

水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根系生长的影响

李文昊^{1,2}, 王振华^{1,2}, 朱延凯^{1,2}, 马东青^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要:为探讨轻度盐渍化地区不同水氮配比对滴灌棉花根系生长的影响,本文基于轻度盐胁迫下水氮耦合试验,确定轻度盐渍化农田棉花种植的合理水氮组合。采用当地主栽棉花品种“农丰 133”,开展轻度盐胁迫(4~5 g·kg⁻¹)及滴灌条件下水氮二因素三水平桶栽试验,研究 3 个施氮水平:300、600 kg·hm⁻²和 900 kg·hm⁻²尿素(分别标记为 N1、N2 和 N3),3 个灌水水平:2 750、3 750 m³·hm⁻²和 4 750 m³·hm⁻²(分别标记为 W1、W2 和 W3)对滴灌棉花根系生长的影响。结果表明:轻度盐胁迫下,灌水和施氮产生的交互作用对棉花根表面积和根平均直径有显著影响,根表面积和根平均直径均随灌溉定额或施氮量的增加而减小。灌水量和施氮量对棉花 0~20 cm 土层根体积调控作用不明显。轻度盐化土滴灌棉花根表面积、根平均直径及根体积垂直方向主要分布在 0~30 cm 土层,且随土层深度的增加逐渐降低;水平方向主要分布在滴头下方。灌溉定额 3 750 m³·hm⁻²,尿素施用量 600 kg·hm⁻²有利于轻度盐化土滴灌棉花根系生长,在各处理间棉花产量最高,为 5 854.5 kg·hm⁻²。

关键词:水氮调控;棉花;根系形态参数;根系空间分布;轻度盐化土;滴灌

中图分类号:S562 **文献标志码:**A

Effects of water and nitrogen fertilization on root growth of cotton under drip irrigation in mildly salinized soil

LI Wenhao^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHU Yankai^{1,2}, MA Dongqing^{1,2}

(1. Shihezi University, School of Hydraulic Engineering, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Crops, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In order to explore the effects of different water and nitrogen combinations on root growth of cotton under drip irrigation in mildly salinized areas, this experiment coupled water and nitrogen under mild salt stress to determine the reasonable combination of water and nitrogen for cotton cultivation in mildly salinized cropland. We used ‘Nongfeng 133’, a local main cotton variety, to carry out a two-factor and three-level barrel cultivation experiment under mild salt stress (4~5 g·kg⁻¹) and drip irrigation conditions. The effects of three nitrogen levels and three water levels on root growth of cotton under drip irrigation were studied. Three urea rates with nitrogen levels of 300, 600 kg·hm⁻² and 900 kg·hm⁻² were labeled as N1, N2, and N3, respectively, and three irrigation levels of 2 750, 3 750 kg·hm⁻² and 4 750 m³·hm⁻² were labeled as W1, W2, and W3, respectively. The results showed that under mild salt stress, the interaction between irrigation and nitrogen had significant effects on root surface area and average root diameter. Both root surface area and average root diameter decreased with increasing irrigation quota or nitrogen application. The effects of irrigation and nitrogen application rate on root volume of cotton in 0~20 cm soil layer were not significant. Under the condition of drip irrigation in mild salinized soil, the root surface area, average root diameter, and root volume of cotton were mainly distributed in the soil layer of 0~30 cm, and decreased gradually with the increase in soil depth in the vertical direction. In the horizontal distribution, roots were mainly distributed under the emitters. It was beneficial to the growth of cotton root system under drip irrigation of mild salinized soil when the irrigation quota was 3 750 m³·hm⁻² and the urea application amount was at 600 kg·

hm^{-2} , and the cotton yield achieved the highest, $5\,854.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, under this condition.

Keywords: water nitrogen regulation; cotton; root morphological parameters; root spatial distribution; mild salinized soil; drip irrigation

棉花属耐盐先锋作物,是我国最重要的三大经济作物之一。根据国家统计局 1994—2016 年“棉花统计公告”中新疆和全国棉花播种面积及总产量数据,2015 年新疆棉花播种总面积 190.43 万 hm^2 ,占全国总播种面积的 50%;而早在 2012 年,新疆棉花总产量已达全国总产量的 54%。新疆棉花的种植面积及总产量不仅占据全国“半壁江山”,同时显示出强大的规模优势和产业化发展态势^[1]。新疆地处西北,属内陆干旱区,土壤盐渍化问题严重,依据第二次土壤普查结果,新疆盐渍化耕地面积 127 万 hm^2 ,占耕地总面积的 31.10%,其中轻度盐渍化农田占总耕地面积的 22.32%^[2]。土壤盐渍化降低了区域棉花的生产水平;大面积利用滴灌技术后,出现的节水灌溉型次生盐渍化问题对新疆的棉花产业及农业生产安全形成了新的威胁^[3-4]。

很多研究者对作物水氮调控进行了细致研究,丁红等^[5]研究表明,水氮调控可以促进花生根系和地上部生长,从而提高荚果产量。张凤翔等^[6]研究表明,低水分条件下增加氮素含量能够显著增加水稻根干重、根体积和促进水稻根系的扎深,土壤水分较低时施氮对株高无显著的促进效应。Zonta 等^[7]通过研究水氮的灌溉速率对棉花生长和产量的影响,得出了在缺水条件下棉花适宜的灌水和施氮时机及用量。谢志良等^[8]研究表明,水分短缺将抑制棉花冠层生长,导致光合作用下降,但通过施加氮肥可促进根系向纵深方向生长,提高水分利用效率。Ehdaie 等^[9]研究表明,干旱条件下较多的毛细根数量和较大的根表面积有利于吸收土壤中的水分和养分,从而获得较高的作物产量。已有研究成果极大推动了农业生产的科学发展,但针对盐碱地水氮调控下滴灌棉花生长的研究较少。

课题组已经分析了水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性作用^[10],结合棉花的生理生长指标等数据,确定出该试验条件下轻度盐化土棉花最佳灌水及施氮量分别为 $3\,740\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $754\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但成果尚未分析水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花地下部根系生长的影响。本研究利用已有试验条件,获取并深入分析根系数据,探寻轻度盐化土壤环境下水氮耦合对滴灌棉花根系生长的影响。结合已有研究结果,为区域轻度盐化土条件下滴灌棉花水肥生产提供更全面的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站($85^{\circ}59'47''\text{E}$, $44^{\circ}19'28''\text{N}$,海拔 412 m)完成。试验站地处石河子市西郊石河子大学农业试验场二连,该地区属于典型的温带大陆性气候,平均地面坡度为 6‰。全年平均日照时间达 $2\,865\text{ h}$,多年平均降雨量为 198 mm ,平均蒸发量为 $1\,340\text{ mm}$,无霜期 170 d 。

1.2 试验设计

2017 年 4—10 月采用桶栽试验种植棉花(桶高 0.50 m ,内径 0.45 m ,在桶底部打孔)。试验选取当地棉花主栽品种“农丰 133”,按机采棉“一膜两管六行”模式设计株距,即桶内呈等边三角形布置棉花 3 株,株距 11 cm 。供试土壤预先进行盐处理,采用取自兵团第八师 121 团的重盐碱土与中壤土按比例掺合,自然晾干碾碎去石块混合均匀后,根据《新疆垦区盐碱地改良》^[11]“耕地土壤盐化程度的分级标准”,配比含盐量为 $4\sim 5\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的轻度盐化土,按容重 $1.40\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 分层装土深 45 cm 。为贴合自然环境,将桶口面与地面平齐埋入土中。

设计水氮 2 因素 3 水平完全组合试验,根据生产实践和前人的研究^[12],氮肥设 3 个水平:300、600、900 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素(分别标记为 N1、N2、N3);灌水设 3 个水平:2 750、3 750、4 750 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (分别标记为 W1、W2、W3);共设置 9 个处理,3 次重复,随机排列,共 27 个桶。2017 年 4 月 12 日人工点种,棉花播种深度在 $3\sim 4\text{ cm}$ 之间,采用“干播湿出”播种方式。用医用输液管模拟滴灌的滴头,滴头位于棉花播种位置处,控制滴头流量为 $1.8\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。参照郑旭荣^[13]研究成果,全生育期灌溉次数为 12 次,肥随水入,各生育期灌水及氮肥比例如表 1 所示。磷肥、钾肥以磷酸二氢钾作基肥一次施入,各处理施用量均为 $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 测试项目及方法

2017 年 10 月 1 日收获棉花后,采用破坏试验分层取样法,以滴头(桶中心)为中心,经桶中心的两条互相垂直的直径分别定义为 X 轴和 Y 轴,将土样在水平面上分为四个象限。沿 X 轴正方向间距为 5 cm ,Y 轴正方向间距为 5 cm ,深度为 10 cm 分层切

表 1 棉花各生育期灌水及施肥比例

Table 1 Proportion of irrigation and fertilization in cotton at different growth stages

生育期 Growth period	灌水、施肥周期/d Irrigation and fertilization cycle	灌水次数/次 Number of irrigations	施肥次数/次 Fertilization frequency	灌水比例/% Irrigation ratio	施肥比例/% Fertilization ratio
苗期 Seedling stage	15	3	3	10	10
蕾期 Bud stage	8	2	2	15	15
花铃期 Flowering bell	7	5	5	60	60
吐絮期 Bubbling stage	15	2	2	15	15
全生育期 Total growth period	140	12	12	100	100

块,获得长×宽×高为 5 cm×5 cm×10 cm 大小的单位土块,27 个桶共计 9 072 个样品。

2018 年 3 月至 5 月,用镊子人工手拣土块中体积较大的根系;残留在土中细小根系利用 0.5 mm 土筛缓慢筛分;土壤漏于筛下,根系存于筛上。每个土块中获得的根系用细孔尼龙网包裹,置于自来水下慢慢冲洗,将洗净的待测根系放入大小为 10 cm×20 cm 的透明托盘内,向托盘内注入 1~2 cm 深清水,并用镊子将托盘内根系分开,减少重叠面积。使用 EPSON V600 高分辨率扫描仪将棉花根系扫描成灰阶模式的 TIF 图像文件,之后用根系扫描分析系统 WinRhizo 分析图像,获取根表面积、根平均直径和根体积参数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 对数据进行整理及图表制作;使用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,采用 Duncan 法比较处理间的差异($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根表面积垂直分布的影响

由图 1 可知,不同水氮处理都表现出滴灌棉花根表面积随土层深度的增加呈现先增加后降低的变化趋势。即 0~10 cm 土层根表面积小于 10~20 cm;根表面积在 10~30 cm 土层最大;30~40 cm 土层根表面积小于 20~30 cm 土层。试验中发现,棉花生育期结束后部分毛细根系在桶底聚集,从而导致各处理 40~50 cm 土层的总根表面积比 30~40 cm 土层增加 15.17%。在等施氮处理下,0~10 cm 土层 W3 水平比 W2 水平减小13.15%;20~30 cm 土层 N1 和 N2 处理灌水抑制根表面积增加效果不显著,N3 水平下随灌溉定额的增加,W2N3 与 W3N3 较 W1N3 处理根表面积平均依次减小 15.91%和 10.84%;30~40 cm 土层,N1 处理 3 个灌溉定额水平较 N2 处理根表面积平均减小 13.70%,N2 处理 3 个灌溉定额水平较 N3 处理根表面积平均减小 9.92%。

因此,土壤中过量的水分对根表面积增加具有一定的抑制作用。等灌水处理下,除 0~10 cm 土层,根表面积随施氮量的增加先增后减;其余各土层均随施氮量增加逐渐减小,说明高氮将抑制根表面积生长。

2.2 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根表面积水平分布的影响

由图 2 可知,各处理水平方向根表面积在滴头下方最大,随距离滴头位置的增加滴灌棉花根表面积逐渐减小。在等施氮处理下,相同土层根表面积随灌溉定额的增加而减小,距离滴头位置越远,表现越明显;距滴头 15~20 cm 位置处,W2 水平根表面积较 W1 水平平均减小 6.90%,W3 根表面积较 W1 水平平均减小 11.31%。等灌水处理下,相同土层根表面积随施肥量的增加呈抛物线状分布,即相同灌水条件下,N2 水平根表面积最大;距离滴头位置越远,表现越明显。距滴头 10~15 cm 位置处,N2 水平根表面积较 N1 水平平均增加 7.43%,较 N3 水平平均增加 6.54%。综合考虑轻度盐化土滴灌棉花根表面积垂直及水平分布,试验条件下中水、中肥处理根表面积最大。

2.3 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根平均直径垂直分布的影响

由图 3 可知,除各处理 30~40 cm 土层根平均直径比 20~30 cm 土层增加 4.01%外,轻度盐化土滴灌棉花根平均直径随土层深度的增加而逐渐降低。等施氮处理下,N1 处理根平均直径整体随灌溉定额的增加先增后减;N2 处理 0~30 cm 土层根平均直径随灌溉定额的增加而逐渐减少,30~50 cm 土层随灌溉定额的增加先增后减;N3 处理 0~30 cm 土层根平均直径随灌溉定额的增加先增后减,30~50 cm 土层随灌溉定额的逐渐减少,说明灌水量能够显著影响根平均直径在土壤中垂直分布。等灌水处理下,各土层根平均直径随施氮量的增加呈现先增后减现象。中水和中氮促进垂直方向根直径生长。

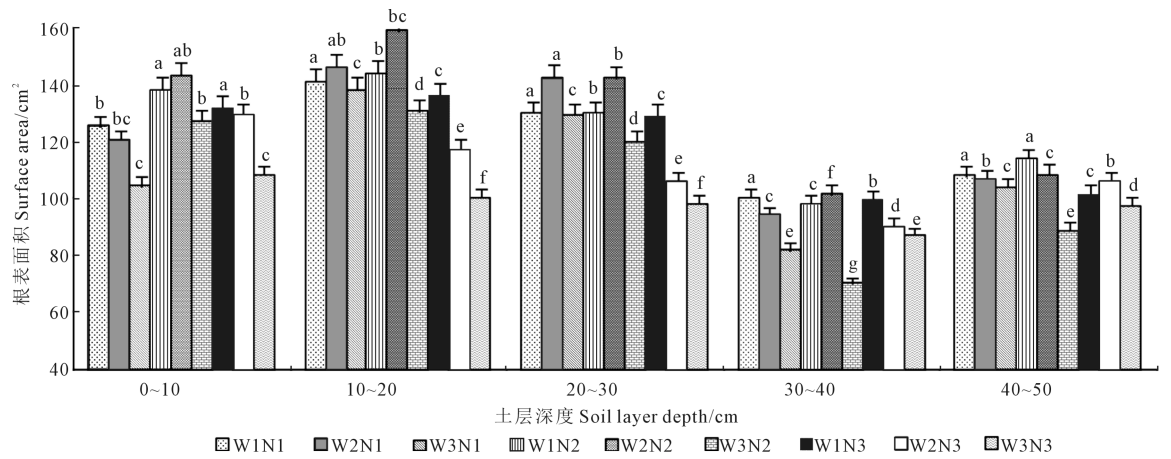


图 1 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根表面积垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of cotton root surface area under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

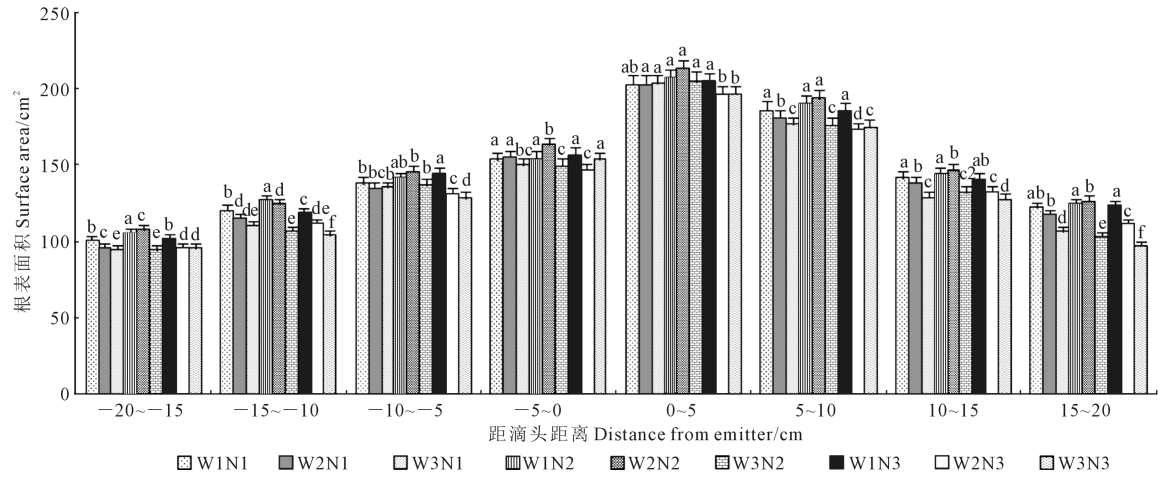


图 2 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根表面积水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of cotton root surface area under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

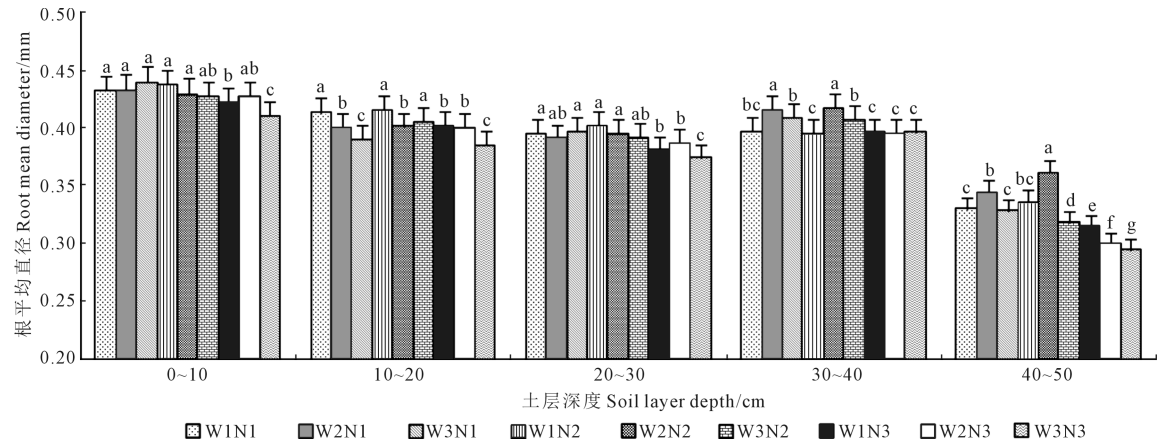


图 3 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根平均直径垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of average diameter of cotton root under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

2.4 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根平均直径水平分布的影响

由图 4 可知,各处理水平方向根平均直径在滴头下方最大,随距离滴头位置的增加滴灌棉花根表面积逐渐减小。等施氮处理下,在滴头两侧根平均

直径随灌溉定额的增加先增后减,距离滴头 10~15 cm 范围 W2 水平内根平均直径较 W1 水平平均提高 10.41%,较 W1 水平平均提高 6.68%。等灌水处理下,在滴头两侧 0~20 cm 范围内随含氮量的增加根平均直径差异较小,说明灌水量是影响根平均直

径水平方向大小分布的主要因素。综合考虑轻度盐化土滴灌棉花根平均直径垂直及水平分布,试验条件下中水、中肥处理根平均直径最大。

2.5 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根体积垂直分布的影响

由图 5 可知,轻度盐化土滴灌棉花根体积分布主要集中在 0~30 cm 土层内,且随土层深度的增加而逐渐降低,40~50 cm 土层根体积大于 30~40 cm,同样因为试验结束后部分毛细根系在桶底聚集。等施氮处理下,0~20 cm 土层棉花根体积在不同灌溉定额处理下变化不明显;20~50 cm 土层棉花根体积随灌溉定额的增加而降低,W2 水平较 W1 水平棉花根体积平均减小 8.91%,W3 水平较 W1 水平棉花根体积平均减小 10.83%。等灌水处理下,施氮量对棉花根体积的影响较小;20~50 cm 土层根体积总体

随灌溉定额的增加呈现先增后减的变化趋势。N2 水平较 N1 水平棉花根体积平均减小 4.75%,N3 水平较 N1 水平棉花根体积平均减小 5.42%。

2.6 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花根体积水平分布的影响

由图 6 可知,各处理水平方向上根体积在滴头下方最大,随距离滴头位置的增加滴灌棉花根体积逐渐减小。等施氮处理下,各土层根体积随灌溉定额的增加而降低,除在 N1 和 N2 水平,-15~15 cm 范围内根体积随含水量的增加先增后减;N3 水平下,W2 和 W3 处理分别比 W1 处理滴灌棉花根体积平均减小 10.72%和 13.45%。等灌水处理下,轻度盐化土滴灌棉花根体积均随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势。综合考虑轻度盐化土滴灌棉花根体积垂直及水平分布,试验条件下中水、中肥处理根体积最大。

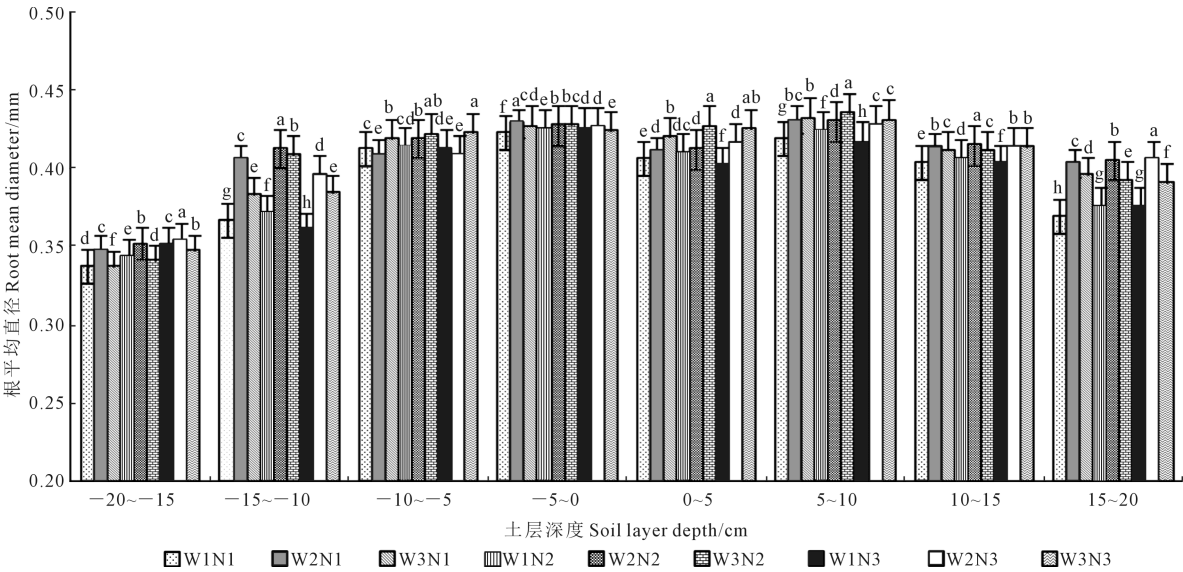


图 4 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根平均直径水平分布

Fig.4 Horizontal distribution of average diameter of cotton root under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

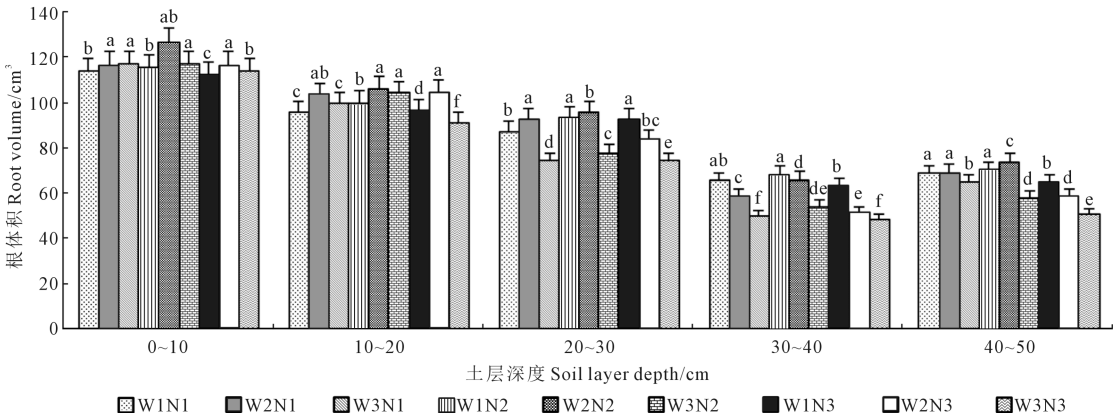


图 5 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根体积垂直分布

Fig.5 Vertical distribution of cotton root volume under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

3 讨 论

水氮可有效调控作物根系生长^[14]。通过调控水氮用量,可以不同程度地缓解盐胁迫引起的作物不良生长,改善盐渍土中作物根系的生长状况。本研究利用桶栽试验确定并非水大、肥大就能促进轻度盐化土滴灌棉花根系的生长,相反过高的水肥用量都将影响棉花根系的生长。研究结果与张金珠等^[15]确定的干旱条件下增施一定量氮肥可有助于缓解水分对根表面积增长的抑制作用,但过量使用氮肥将抑制棉花根表面积生长的成果相近;但该文献未详细研究根平均直径和根体积等形态参数。廖常健等^[16]同样得出,高水和高氮对根表面积生长具有抑制作用,与 Sharme 等^[17]提出的一定干旱条件能促进根系伸长和根径增加,扩大水分和养分吸收面积促进对养分的吸收成果相似。

本研究综合分析了不同水肥处理对根表面积、根平均直径及根体积的综合影响,确定出轻度盐化土滴灌灌溉定额 3 750 m³ · hm⁻², 尿素施用量 600 kg · hm⁻²棉花根系生长最佳。课题组还测算不同处理棉花的实际产量,同样得出轻度盐化土滴灌灌溉定额 3 750 m³ · hm⁻², 尿素施用量 600 kg · hm⁻²棉花产量最高,为 5 854.5 kg · hm⁻²(各处理棉花产量见表 2)。研究成果与课题组利用回归方程确定的

轻度盐化土棉花最佳灌水施氮量 3 740 m³ · hm⁻²和 754 kg · hm⁻²有一定差异^[5],但在分析过程中均认为,棉花各生育期净光合速率和蒸腾速率等光合指标、气孔导度和细胞间 CO₂浓度等叶绿素荧光参数、籽棉产量及增产效应最大值都出现在灌溉定额 3 750 m³ · hm⁻², 尿素施用量 600 kg · hm⁻²处理,本文进一步利用根系参数等数据证明了该成果。本成果还与石洪亮^[18]提出的施氮 300 kg · hm⁻²(即施尿素量 642.81 kg · hm⁻²)时,灌溉定额 2 800~3 800 m³ · hm⁻²,籽棉产量差异不明显,水、氮利用率最高的研究结论相近。

4 结 论

- 1)轻度盐胁迫下,灌水和施氮产生的交互作用对棉花根表面积和根平均直径有显著影响;根表面积和根平均直径均随灌溉定额或施氮量的增加而减小。灌水量和施氮量对棉花 0~20 cm 土层根体积调控作用不明显。
- 2)轻度盐化土滴灌棉花根表面积、根平均直径及根体积垂直方向随土层深度的增加逐渐降低,水平方向主要分布在滴头下方。灌溉定额 3 750 m³ · hm⁻², 尿素施用量 600 kg · hm⁻²有利于轻度盐化土滴灌棉花根系生长。

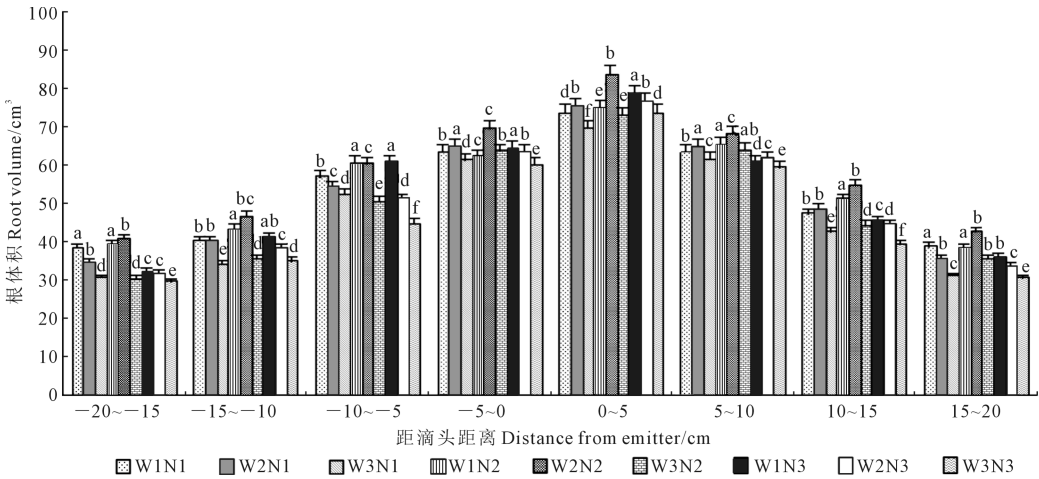


图 6 各处理下轻度盐化土滴灌棉花根体积水平分布

Fig.6 Horizontal distribution of cotton root volume under drip irrigation in mild salinized soil under different treatments

表 2 不同处理棉花产量

Table 2 Cotton yields under different experimental treatments

试验处理 Experimental treatment	产量/(kg · hm ⁻²) Cotton yield	试验处理 Experimental treatment	产量/(kg · hm ⁻²) Cotton yield	试验处理 Experimental treatment	产量/(kg · hm ⁻²) Cotton yield
W 1N 1	3483.75	W 2N 1	4480.5	W 3N 1	4847.63
W 1N 2	4177.88	W 2N 2	5854.5	W 3N 2	5554.13
W 1N 3	4432.88	W 2N 3	5718.75	W 3N 3	5151.38

参 考 文 献:

[1] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等.膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J].农业工程学报,2014,30(4):90-99.

[2] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.冻融对北疆盐碱地长期滴灌棉田土壤盐分的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):40-46.

[3] 张寿雨,吴世新,贺可.基于开垦年龄的新疆盐渍化耕地时空特征分析[J].干旱区研究,2017,34(5):972-979.

[4] 张正文.新疆棉花产业发展研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.

[5] 丁红,张智猛,戴良香,等.水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):872-881.

[6] 张凤翔,周明耀,周春林,等.水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响[J].农业工程学报,2006,22(5):197-200.

[7] Zonta J H, Brand O Z N, Sofiatti V, et al. Irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in semi-arid environment [J]. Australian Journal of Crop Science, 2016,10(1):118-126.

[8] 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):160-165.

[9] Ehdaie B,Merhaut D J,Ahmadian S,et al. Root system size influences water-nutrient uptake and nitrate leaching potential in wheat [J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2010, 196(6):455-466.

[10] 王振华,朱延凯,张金珠等.水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J].农业机械学报,2018,49(6):296-308.

[11] 罗家雄.新疆垦区盐碱地改良[M].北京:中国科学技术出版社,1985:74-75.

[12] 贺怀杰,王振华,郑旭荣,等.水氮耦合对膜下滴灌棉花生长及产量的影响[J].新疆农业科学,2017,54(11):1983-1989.

[13] 郑旭荣,胡晓棠,李明思,等.棉花膜下滴灌田间耗水规律的试验研究[J].节水灌溉,2000,(5):25-27.

[14] 胡家齐,夏桂敏,张柏纶,等.调亏灌溉与施氮对花生产量及水氮利用的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):187-193,199.

[15] 张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白.秸秆覆盖对滴灌棉花土壤水盐运移及根系分布的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(12):1467-1476.

[16] 廖常健,张鹏,张玉龙,等.微灌水氮调控对花生生长发育及产量的影响[J].中国油料作物学报,2017,39(3):372-379.

[17] Sharme B R,Chaudhary T N. Wheat root growth, gain yield and water uptake as influenced by soil water regime and depth of nitrogen placement in a loamy sand soil [J]. Agriculture Water Management, 1983, 6:365-373.

[18] 石洪亮,张巨松,严青青,等.氮肥对非充分灌溉下棉花产量及品质的补偿作用[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):134-145.

(上接第 206 页)

参 考 文 献:

[1] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,12(2):192-197.

[2] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等.冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J].中国农业科学,2011,44(4):745-752.

[3] 王寅,鲁剑巍,李小坤,等.长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果[J].作物学报,2013,39(8):1491-1500.

[4] 姚锋先.不同水氮管理对水稻生长和水氮效率影响的生理机制研究[D].武汉:华中农业大学,2011.

[5] Begg J E, Turner N C. Crop and water deficits [J]. Advance in Agronomy, 1976, 28:161-218.

[6] Prasertsak A, Fuka S. Nitrogen availability and water stress interaction on rice growth and yield [J]. Field Crops Research, 1997, 52(3):249-260.

[7] Aqueel M A, Leather S R. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars [J]. Crop Protection, 2011, 30(2):216-221.

[8] Sandhua S S, Mahalb S S, Vashistb K K, et al. Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India [J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2):32-39.

[9] 徐国伟,王贺正,翟志华,等.不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J].农业工程学报,2015,31(10):132-141.

[10] 邢莹莹,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):713-7.

[11] 左青松,蒯婕,杨士芬,等.不同氮肥和密度对直播油菜冠层结构及

群体特征的影响[J].作物学报,2015,41(5):758-765.

[12] 刘波,魏全全,鲁剑巍,等.苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):144-153.

[13] 石小虎.温室膜下滴灌番茄对水氮耦合的响应研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2013.

[14] 刘世全,曹红霞,张建青,等.不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(7):1362-1371.

[15] 赵国苹,虞娜,刘启,等.水氮配合对油菜生物量影响的研究[J].土壤通报,2006,37(2):298-302.

[16] 吕丽华,曹志强,张经廷,等.水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J].中国农业科学,2014,47(19):3839-3849.

[17] 宋燕燕,赵秀娟,张淑香,等.水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现油菜减氮增效研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):632-640.

[18] 高娜,张玉龙,刘玉,等.水氮调控对小油菜养分吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):821-828.

[19] 卢杨.脲酶/硝化双抑制剂配施对油菜生长及控氮效应的影响[D].保定:河北农业大学,2013.

[20] 刘波.冬油菜氮素营养调控技术及相关机制研究[D].武汉:华中农业大学,2016.

[21] 刘波,鲁剑巍,李小坤,等.不同栽培模式及施氮方式对油菜产量和氮肥利用率的影响[J].中国农业科学,2016,49(18):3551-3560.

[22] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释掺混尿素对土壤无机氮和油菜产量及氮素利用率的影响[J].土壤,2017,49(3):505-511.