

# 花铃期水氮互作对膜下滴灌杂交棉花产量 与水分利用效率的影响

孙绘健, 马富裕\*, 刘浩, 崔静, 吴艳琴

(石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 以早熟杂交棉石杂 2 号为材料, 在花铃期进行了 7 个水分处理和 4 个氮素处理的水氮互作对杂交棉花产量和水分利用效率影响的大田试验。研究表明, 在不施氮(N<sub>0</sub>)情况下, 花铃期轻旱和中旱显著降低了棉花产量。在低频小灌量(5 d-18 mm)条件下, 施氮籽棉产量差异不显著; 在高频大灌量(3 d-30 mm)水分处理中, 随着施氮量的增加, 籽棉产量显著下降; 在对照(75% FC), 高频小灌量(3 d-18 mm)和低频大灌量(5 d-30 mm)三个水分处理中, 水氮互作显著提高了棉花的产量和水分利用效率。综合考虑产量和水分利用效率, 在杂交棉花花铃期以低频高灌量和高频低灌量(日耗水量 6 mm)两个水分处理在施 N 300 kg/hm<sup>2</sup> 时为北疆杂交棉花较适宜的灌溉策略和施氮量。

**关键词:** 杂交棉花; 水氮互作; 产量; 水分利用效率; 北疆

**中图分类号:** S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0019-08

肥和水是旱地农业生产的两大限制因子, 根据土壤水分条件进行合理施肥, 以肥调水, 以水促肥, 促进作物生长发育和提高作物产量成为农业综合发展的关键技术<sup>[1]</sup>。研究表明施肥能提高植物渗透调节能力, 尤其是增施氮肥可显著抑制蒸腾失水, 提高水分利用率<sup>[2]</sup>。水氮之间存在明显的协同效应, 通过合理地施用氮肥, 可促进作物根系发育, 增加根系活力, 活化深层水分, 增强根系的提水作用, 使水分和养分传输能力增强, 提高作物对土壤水分和养分的利用能力<sup>[2,3]</sup>。当氮肥施用增加到一定程度时, 虽然作物根系对土壤水分依然有很好的调节作用, 但由于施氮量过高可能会影响作物自身的生长, 造成作物产量、品质及水分利用效率降低<sup>[4,5]</sup>, 而且氮肥超量施用对生态环境安全会造成潜在威胁<sup>[6]</sup>。但干旱胁迫会严重影响氮肥作用的发挥, 因此, 只有在适宜水分配合条件下, 氮肥的作用才会得到充分的发挥。

滴灌是一种与栽培技术相结合, 节水、增产效果显著的局部灌溉技术, 具有灌量小、地表蒸发量小、不向深层渗漏、能维持根区最佳含水量等优点<sup>[7]</sup>。通过滴灌施肥, 可有效地调节施用肥料的种类、比例、数量及时期, 可将肥料施用于根系分布集中的区域, 保证根区养分适度的供应, 减少养分的淋失, 显著地提高养分的利用率<sup>[8,9]</sup>。关于滴灌条件下灌溉

频率、氮肥施用量以及水肥互作效应等对水肥利用率的影响方面国内外学者在棉花、马铃薯、番茄、甘蔗等<sup>[10-14]</sup>作物上作了研究。但在干旱区高产条件下膜下滴灌杂交棉花水氮利用效率的报道却不多。随着新疆棉花生产的不断发展, 杂交品种的使用占有越来越重要的地位, 但对杂交棉花不同水氮条件的适应能力、生产潜力以及水氮利用效率等方面缺少系统的研究。花铃期是棉花对水氮需求最敏感的时期, 亦是产量与品质形成的关键时期<sup>[15]</sup>。本研究采用膜下滴灌种植方式, 研究了花铃期不同的水氮处理对杂交棉花产量与水分利用效率的影响, 旨在明确水氮互作对棉花产量与水分利用效率的关系, 优化水肥管理方案, 为杂交棉花水肥管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

本试验于 2008 年 4 月至 10 月在石河子国家农业高新示范园区(86°01'E, 44°26.5'N)进行, 试验区土壤为中壤土, 0~30 cm 土层含有机质 30 g/kg, 碱解氮 70 mg/kg, 速效磷 20 mg/kg, 速效钾 518 mg/kg, pH 值为 8.3。容重和田间持水量见表 1。供试棉花品种石杂 2 号由石河子农业科学技术研究中心培育, 试验用种也由该机构提供。膜下滴灌地采用“干

收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD44B07); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA100218-6); 兵团科技型中小企业创新计划(2006YD43); 新疆维吾尔自治区农业科技成果转化项目(2008GB2C410378)

作者简介: 孙绘健(1982-), 男, 江苏丰县人, 硕士研究生, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: shj6281@163.com。

\* 通讯作者: 马富裕(1967-), 男, 甘肃环县人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物生理生态与农业信息技术研究。E-mail: mafuyu403@msn.com。

播湿出”方式播种出苗,一膜 6 行种植模式,即一条膜带上播种 6 行棉花,宽窄行距为 18-55-18-55-18-76 cm,每条膜下铺设 3 条滴灌带,位于窄行中央位置,株距为 9 cm,保苗  $24 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup>。播前施三料磷肥 225 kg/hm<sup>2</sup>(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>(含 N46%)。2008 年 4 月 24 日播种,7 月 6 日打顶,花铃肥于 6 月 26 日开始随水追施,到 8 月底结束滴肥,9 月 6 日结束灌溉。始花(6 月 26 日)前所有处理统一管理,管理方法同高产田。

试验共设 7 个水分处理,其中 3 个临界值处理,分别是灌前 0~60 cm 土层滴灌带正下方水分临界值为中旱(55% FC, FC 为田间持水量,下同);轻旱(65% FC);对照(75% FC, CK),4 个灌溉频率水量处理,即高频小灌量(3 d-18 mm,每 3 天灌溉 18

mm,下同),高频大灌量(3 d-30 mm),低频小灌量(5 d-18 mm)及低频大灌量(5 d-30 mm),4 个施氮水平,分别是 0(生长发育阶段随水追施纯氮 0, 150, 300, 450 kg/hm<sup>2</sup>, 共计 22 个试验处理,每个处理面积为 20 m × 2.4 m = 48 m<sup>2</sup>,采用完全随机设计,3 次重复。具体处理方案如表 2。

表 1 试验田土壤的田间持水量和容重

Table 1 Soil bulk density and field capacity of experimental field

土壤层次(cm) Soil layer	田间持水量(%) Field capacity	容重(g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density
0~20	40.1	1.13
20~40	40.2	1.14
40~60	37.3	1.18

表 2 灌水和施氮处理一览表

Table 2 Irrigation and nitrogen treatments of experimental field

序号 Number	代号 Code	处理方法 Treatment	田间持水量 Field capacity (%)	灌溉频率 Irrigation frequency (d)	灌水量 Irrigation (mm)	氮素水平 N rate (kg/hm <sup>2</sup> )
1	W1N0	N0-55% FC	55	变化 Variable	30	
2	W2N0	N0-65% FC	65	变化 Variable	30	
3	W3N0	N0-75% FC	75	变化 Variable	30	
4	W3N1	N150-75% FC	75	变化 Variable	30	150
5	W3N2	N300-75% FC	75	变化 Variable	30	300
6	W3N3	N450-75% FC	75	变化 Variable	30	450
7	W4N0	N0-3day-18 mm	—	3	18	
8	W4N1	N150-3day-18 mm	—	3	18	150
9	W4N2	N300-3day-18 mm	—	3	18	300
10	W4N3	N450-3day-18 mm	—	3	18	450
11	W5N0	N0-3day-30 mm	—	3	30	
12	W5N1	N150-3day-30 mm	—	3	30	150
13	W5N2	N300-3day-30 mm	—	3	30	300
14	W5N3	N450-3day-30 mm	—	3	30	450
15	W6N0	N0-5day-18 mm	—	5	18	
16	W6N1	N150-5day-18 mm	—	5	18	150
17	W6N2	N300-5day-18 mm	—	5	18	300
18	W6N3	N450-5day-18 mm	—	5	18	450
19	W7N0	N0-5day-30 mm	—	5	30	
20	W7N1	N150-5day-30 mm	—	5	30	150
21	W7N2	N300-5day-30 mm	—	5	30	300
22	W7N3	N450-5day-30 mm	—	5	30	450

## 1.2 测定项目和计算方法

1.2.1 土壤水分含量测定 棉田土壤含水量数据采集设备为频域反射仪(FDR, 中国农业大学生产)每小时采集一次,每个水分处理在滴灌带正下方设一个采集点,使传感器水平埋置在 10 cm, 30 cm, 50 cm 3 个层次,每层埋放 1 个水分传感器,采集数据

分别代表 0~20, 20~40, 40~60 cm 剖面平均含水量。采用烘干法对同步自动监测数据进行回归分析,对传感器进行矫正,矫正方程为  $y = 0.6601x + 0.0687$  ( $R^2 = 0.9602$ ), 式中,  $x$  为传感器测定值,  $y$  为校正后的土壤体积含水量。

表3 试验点(石河子)棉花生育期内降雨量及分布(2008)

Table 3 Rainfall distribution and amount during the cotton growth season in Shihezi(2008)

降雨量和分布 Rainfall amount and distribution	月份 Month						总量 Total
	4	5	6	7	8	9	
降雨量 Rainfall(mm)	15.3	21.2	18.7	23.4	18.0	4.1	100.7
有效降雨量 Effective rainfall(mm)	2.7	5.6	4.4	6.7	4.0	0	23.4

注:降雨量从播种(4月24日)后开始算起,每月降雨量为每天降雨量之和。

Note: The rainfall is recorded from the planting day (April 24th), and the monthly rainfall is the sum of daily rainfall.

### 1.2.2 棉田水量平衡计算

(1) 棉田蒸散量的计算。采用土壤水分平衡模型计算作物蒸散量,计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P_0 + K - C$$

式中, $ET_{1-2}$ 为阶段耗水量(mm); $i$ 为土壤层次号数; $n$ 为土壤层次数目; $\gamma_i$ 为第*i*层土壤干容重( $g/cm^3$ ); $H_i$ 为第*i*层土壤厚度(cm); $W_{i1}$ 为第*i*层土壤时段初的含水率(干土重的百分率); $W_{i2}$ 为第*i*层土壤时段末的含水率(干土重的百分率); $M$ 为时段内的灌水量(mm); $K$ 为时段内的地下水补给量(mm); $C$ 为时段内的排水量(地表排水与地下排水之和)(mm),此处 $C = 0$ 。

(2) 有效降水量计算。采用联合国粮农组织(FAO)推荐经验公式计算<sup>[17]</sup>,公式如下:

$$P_0 = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 & (TP < 50 \text{ mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 & (TP > 50 \text{ mm}) \end{cases}$$

式中, $P_0$ 为有效降水量(mm); $TP$ 为总的降雨量(mm)。

(3) 地下水补给量计算。试验所在地地下水埋深2 m,因此,本研究地下水蒸发采用阿维里扬诺夫<sup>[18]</sup>的抛物线型公式,即

$$E = E_0(1 - H/H_{\max})^n$$

式中, $E$ 为地下水蒸发强度(mm/d); $E_0$ 为埋深为0时的地下水蒸发强度(mm/d),可用大气蒸发代替<sup>[19]</sup>;  $H$ 为潜水平埋深(m); $H_{\max}$ 为潜水蒸发强度为0时的埋深(m); $n$ 为经验常数。这里 $H$ 为2 m, $H_{\max}$ 为4 m, $n$ 为2。

(4) 棉花生育期灌水量和蒸散量。见表4。

表4 棉花全生育期灌水量和蒸散量

Table 4 Irrigation and evapotranspiration during cotton growth season

土壤水分 Soil moisture	水分处理 Water treatment						
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
灌水量 Irrigation(mm)	195.0	270.0	411.0	483.0	735.0	357.0	525.0
有效降雨量 Effective rainfall(mm)	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
地下水补给 Groundwater recharge(mm)	101.2	101.2	101.2	101.2	101.2	101.2	101.2
总蒸散量 Evapotranspiration(mm)	369.4	442.6	507.9	590.3	830.9	477.6	624.0

1.2.3 棉花测产 在盛絮期(9月25日)每小区选择长势一致面积为6.67 m<sup>2</sup>的3个点进行产量测定,最终产量取3次重复的平均值。测产方法:数出小区的棉花株数、吐絮个数、青铃个数。并在各小区内收取10株上部、中部和下部棉花共计30株,带回称其单铃重。棉花的产量计算:

$$Y = (n_{吐} W_{吐} + 0.8 W_{吐} n_{青}) \times 1500$$

式中, $Y$ 为产量( $kg/hm^2$ ); $n_{吐}$ 为吐絮的个数; $n_{青}$ 为青铃的个数; $W_{吐}$ 为平均单个铃吐絮的重量(g)。

1.2.4 水分利用效率计算 本研究水分利用效率计算分别采用籽棉产量与灌溉用水比值法和耗水量比值法分别计算灌溉水分利用效率和总水分利用效率。公式如下:

$$IWUE = Y/I$$

$$TWUE = Y/ET$$

式中, $IWUE$ 为灌溉水分利用效率( $kg/(hm^2 \cdot mm)$ ); $TWUE$ 为总水分利用效率( $kg/(hm^2 \cdot mm)$ ); $Y$ 为杂交棉花籽棉产量( $kg/hm^2$ ); $I$ 为灌水量(mm); $ET$ 为棉田蒸散量(mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 花铃期不同水氮处理对杂交棉花生育进程的影响

由图1可知,不同的水分处理在不追施氮素(N<sub>0</sub>)水平下,始花-吐絮天数差异明显。中度干旱(W1)和轻度干旱(W2)始花-吐絮天数分别比对照

(W3)缩短了 11 d 和 6 d, W4 和 W7 水分处理分别比对照(W3)延长 4 d 和 3 d, 而 W5 水分处理比对照(W3)延长了 11 d。随着施氮量的提高,除了 W6 水分处理始花 - 吐絮天数变化不大以外,对照 W3, W4, W5 和 W7 水分处理始花 - 吐絮天数变均会延

长 1~2 d。干旱胁迫导致棉花始花 - 吐絮天数的缩短,限制了干物质的积累,而水肥过多导致棉花始花 - 吐絮天数的延长,从而导致棉花长势旺盛,霜后花比例增加,降低了棉花的品质,均对棉花产生不利的影响。

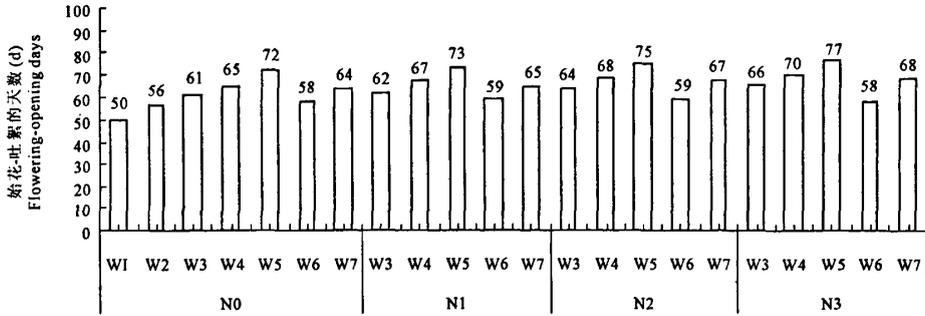


图 1 不同水分和氮素处理棉花开花 - 吐絮天数比较

Fig.1 Comparison of days from flowering to open bolls stage of different irrigation and N treatments

2.2 花铃期不同水氮处理对杂交棉花产量的影响

2.1.1 不同水分处理对杂交棉花产量的影响 研究表明(图 2),在不施氮素(N0)条件下,不同水分处理间的籽棉产量存在显著差异( $P = 0.0001$ )。W7 水分处理籽棉产量最高,达到了 5 618 kg/hm<sup>2</sup>,籽棉产量比对照 W3 高出 12%;W4, W5 和 W6 与对照 W3 差异不显著。中度干旱(W1)和轻度干旱(W2)籽棉产量分别比对照(W3)降低了 24%和 10%,均达到了显著差异水平。

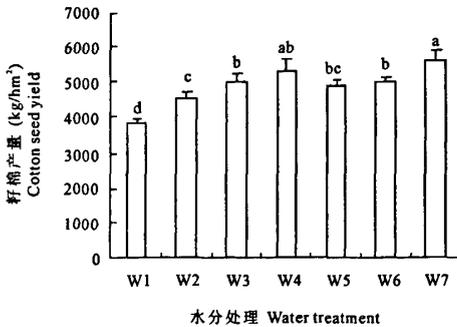


图 2 不同水分处理(N0)下棉花产量比较

Fig.2 Comparison of cotton yield in different irrigation treatments

2.1.2 施氮水平对杂交棉花产量的影响 研究发现在对照 W3 水分处理条件下随着施氮水平的提高棉花的产量也在增加(图 3),但施氮量超过 150 kg/hm<sup>2</sup>后,籽棉产量增加不再显著( $P > 0.05$ )。对 W3 水分条件下的产量与施氮量进行数学模拟,得到产量(y)和施 N 量(x)之间的效应方程(图 3): $y = -0.0042x^2 + 3.738x + 5031.5$ ,在 N445 水平下,

求得最高产量为 5 863 kg/hm<sup>2</sup>,仅比 N300 高出 77 kg/hm<sup>2</sup>,而在 N450 水平下产量为 5 862 kg/hm<sup>2</sup>,比 N445 产量略低。由此可见,最高产量时的施氮量并不是最佳氮肥量,因为此时施肥利润已下降。只有当边际产值等于边际成本时,其单位面积的施肥利润才是最大,此时的施肥量为最佳施肥量<sup>[20]</sup>。

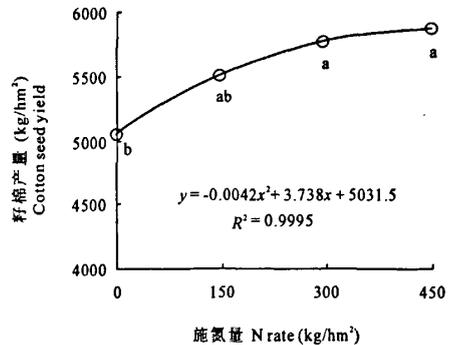


图 3 不同 N 素处理(W3)下棉花产量的比较

Fig.3 Comparison of cotton yield in different N treatments

注:图中不同小写字母表示差异 0.05 显著水平,下同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level, and they are the same in the following.

2.1.3 水氮互作对杂交棉花产量的影响 根据水氮双因子互作效应分析得知(表 5),不同水氮处理在水因素,氮因素和水氮互作因素方面,籽棉产量均存在极显著差异。图 4 表明,在不施氮(N0)水平下,不同水分处理之间产量差异不显著,在 N1 施氮水平下,对照 W3, W4 和 W7 三个水分处理中增产显著,分别增产了 9%,16%和 20%,W6 处理产量增加

不明显,而 W5 处理显著下降,减产达 7%。与 N1 相比,当施氮水平达到 N2 时,W4 和 W7 处理产量仍在显著增长,分别增产达 10% 和 14%,对照 W3 和 W5 处理的产量也在增长,但不显著;与 N2 相比,当施氮水平达到 N3 时,对照 W3 和 W5 处理产量仍小幅

度增长,W4 和 W7 处理产量均显著下降,减产分别为 23% 和 20%,在 W6 水分处理中,随着施氮量的增加,产量却在显著下降,说明灌溉有个阈值,当灌溉超过这个阈值时,无论施氮与否,均会对产量造成不利的影响。

表 5 杂交棉花籽棉产量水平上水氮互作双因素方差分析  
Table 5 Two-way analysis of variance for the interaction between water and nitrogen for seed cotton yield under different water and N-treatments

变异来源 Variation source	自由度 Freedom	平方和 Square sum	均方 Mean square	F 值 F value	F <sub>0.01</sub>
水因素间 Water factor	4	32951678	8237919	59.26**	3.83
氮因素间 N factor	3	4897307	1632436	11.74**	4.31
水 × 氮 Water × nitrogen	12	10249400	854117	6.15**	2.66
误差 Error	40	5560193	139005		
总变异 Total variation	59	53658578			

注: \*\* 表示差异 0.01 的显著水平。

Note: \*\* means significant difference at the 0.05 level.

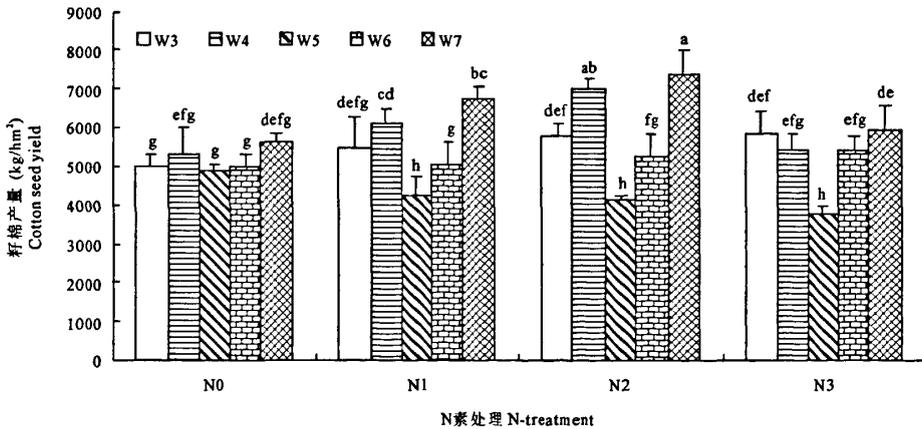


图 4 水氮互作下棉花产量的比较

Fig.4 Comparison of cotton yield in interactive irrigation and N treatments

研究还发现,对照 W3, W4 和 W7 三个水分处理几乎都是在 N2 条件下籽棉产量最高(图 4)。在 W6 处理条件下,施氮籽棉产量差异不显著,而 W5 水分处理中,随着施氮量的增加,籽棉产量显著下降。说明只有水肥适中情况下,互作效应才明显。另外, W4 和 W7 两个水分处理在同一施氮水平下籽棉产量的增长速率明显高于对照处理 W3,在 N1 施氮水平下,W4、W7 分别比对照 W3 增产 12% 和 23%;在 N2 施氮水平下,W4、W7 比对照 W3 增产 21% 和 28%,说明 W4 和 W7 两个水分处理均比对照 W3(灌溉间隔 8 d 左右,每次 30 mm 灌水量)增产明显,优于对照 W3 灌溉处理。因此,从产量试验结果看 W7N2 籽棉产量最高,达到了 7 426 kg/hm<sup>2</sup>,其次是

W4N2,籽棉产量为 7 018 kg/hm<sup>2</sup>,二者无显著差异。因此,W7N2 和 W4N2 两个水氮组合为北疆杂交棉花较适宜的灌溉和施氮组合。

2.3 不同水氮处理对杂交棉花产量水分利用效率的影响

2.3.1 不同水分处理对杂交棉花水分利用效率的影响 研究表明,在不追施氮素(N0)条件下,不同水分处理之间无论是灌溉水分利用效率(IWUE)还是总水分利用效率(TWUE)均随着灌水量的增加而下降(表 6)。各处理 IWUE 大小依次是 W1 > W2 > W6 > W3 > W4 > W7 > W5,表明随着灌水量的增加,IWUE 是逐渐减小的,除了 W4 和 W7 之间差异不显著外,其余各个处理均有显著差异(P = 0.0001)。

比较各处理 TWUE, W1, W2, W6, 与对照 W3 之间, W5 的 TWUE 最低, 与其他所有处理差异均显著。TWUE 差异不显著, 但显著高于 W4、W7 和 W4 处 著。

表 6 不同水分处理(N0)下杂交棉花水分利用效率影响的比较

Table 6 Comparison of effect of different water treatments on water use efficiency

处理 Treatment	灌水量 Irrigation (mm)	蒸散量 Evapotranspiration (mm)	籽棉产量 Cotton yield (kg/hm <sup>2</sup> )	灌溉水分利用效率 IWUE (kg/(hm <sup>2</sup> ·mm))	总水分利用效率 TWUE (kg/(hm <sup>2</sup> ·mm))
W1	195.0	369.4	3859.5	19.8 a	10.5 a
W2	270.0	442.6	4549.1	16.6 b	10.3 a
W3	411.0	507.9	5034.8	12.3 d	9.9 a
W4	483.0	590.3	5318.2	11.0 e	9.0 b
W5	735.0	830.9	4911.7	6.7 f	5.9 c
W6	357.0	477.6	4997.2	14.0 c	10.5 a
W7	525.0	624.0	5617.6	10.7 e	9.0 b

2.3.2 水氮互作对杂交棉花水分利用效率的影响  
研究表明水氮互作对各处理杂交棉花籽棉产量水

平上的灌溉水分利用效率(IWUE)和总水分利用效率(TWUE)均存在显著差异(图 5,图 6)。

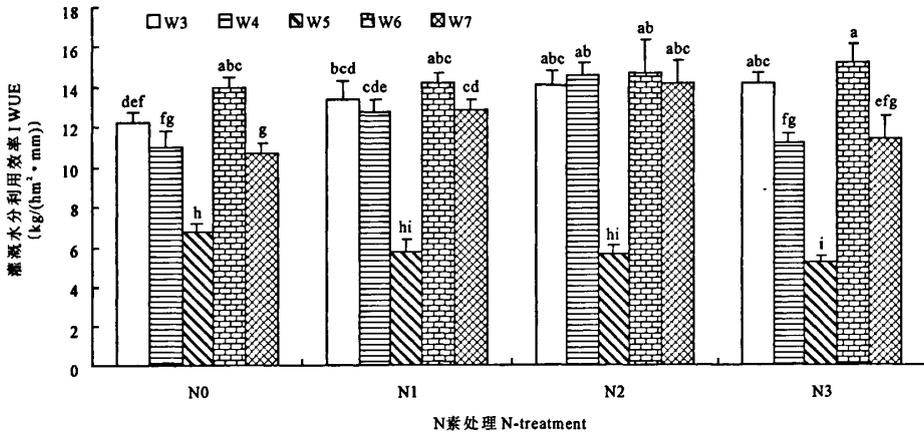


图 5 水氮互作对杂交棉花灌溉水分利用效率影响的比较

Fig.5 Comparison of effect of interactive irrigation and nitrogen applications on irrigation water use efficiency

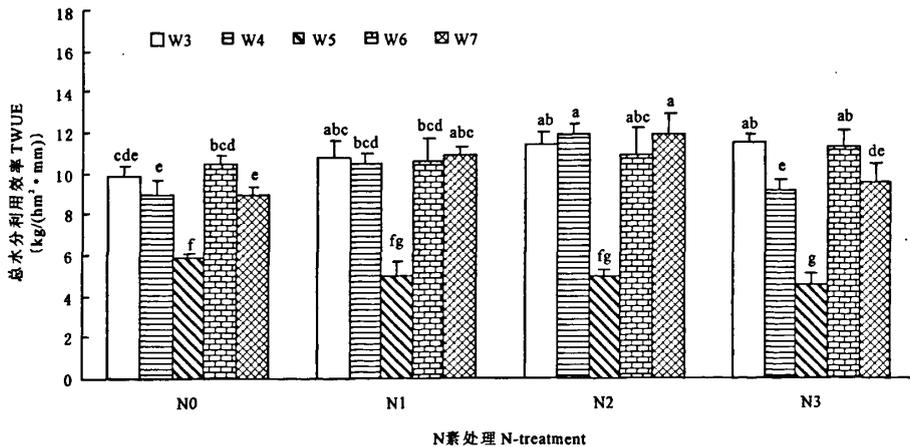


图 6 水氮互作对杂交棉花总水分利用效率影响的比较

Fig.6 Comparison of effect of interactive irrigation and nitrogen applications on total water use efficiency

(1) 从总体上看,除 W5 处理外,各水分处理随施氮量的提高 IWUE 随之提高(图 5)。研究发现 W6N3 处理 IWUE 最高,达到了  $15.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ,但 W6 水分处理在四个氮素条件下差异不显著,说明适当干旱可以提高 IWUE,施氮对提高 IWUE 无明显影响;W3, W4 和 W7 水分处理适量施氮可以提高灌溉水分利用效率。W5 水分处理施氮量越高, IWUE 越低。

(2) 由图 6 可知:各处理 TWUE 和 IWUE 有所不同,即除 3 d-30 mm 外,各处理几乎在 N2 条件下 TWUE 最高。W7N2 和 W4N2 处理 TWUE 相等并且最高,其余的依次是  $W3N3 > W3N2 > W6N3 > W6N2 > W7N1 > W3N1$ ,它们均与 W7N2 和 W4N2 处理 TWUE 差异不显著, W3 和 W7 水分处理在 N2 施氮水平达到了最高,对照 W3 水分处理在 N3 施氮水平达到了最高,而 W5 在四个施氮水平下 TWUE 均较低,说明水氮互作可以提高 TWUE,水肥过高不利于提高 TWUE。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

1) 调亏灌溉理论认为,在作物生长发育的某一特定阶段,一定程度的水分胁迫对作物的产量形成具有一定的正效应<sup>[21]</sup>。在沟灌条件下 65% FC 可作为灌溉临界值<sup>[22]</sup>,但在本研究表明,若以实现最高产量为目标,在滴灌带正下方 0~60 cm 土层相对田间持水量低于 65% 的水分胁迫,已不属调亏灌溉概念所包含的范围,因为这种过程明显影响了棉花的生理需求,导致产量显著下降,土壤临界含水量愈低,持续时间愈长,棉花受伤愈大。

2) 关于灌溉频率国内外在很多作物上进行了研究,结果表明高频低灌量和低频高灌量在产量上均能达到较好的效果,但它们最终结果均是灌溉频率越高,产量也越高<sup>[13,23,24]</sup>。但在本研究条件下,对杂交棉花产量低频高灌量要优于高频低灌量。

3) 对杂交棉花研究表明水氮互作产量增加明显,水氮不足或过高均会影响棉花产量。这一结果和孙孝贵,刘新永等人研究的非杂种棉花的结论一致<sup>[25,26]</sup>。在对照 W3, W4 和 W7 三个水分处理中,对照处理 W3 在 N3 籽棉产量达到最高, W4, W7 处理灌水量超过对照处理 W3 的灌水量,在 N2 时籽棉产量达到最高水平;在 W6 处理条件下,施氮籽棉产量增加差异不显著,而 W6 水分处理中,随着施氮量的增加,籽棉产量却在显著下降。说明只有水肥适中情况下,互作效应才明显。另外研究发现, W4 和

W7 两个水分处理在同一施氮水平下籽棉产量的增长速率明显高于对照处理 W3,在 N1 施氮水平下, W4, W7 分别比对照 W3 增产 12% 和 23%;在 N2 施氮水平下, W4, W7 比对照 W3 增产 21% 和 28%,说明 W4 和 W7 两个水分处理均比对照 W3(灌溉间隔 8 d 左右,每次 30 mm 灌水量)增产明显,优于对照 W3 灌溉处理。

4) 适量施氮可以提高杂交棉花水分利用效率。本实验研究表明在对照 W3, W4, W7 三个水分处理时,施氮可以提棉花灌水和总水分利用效率,对照处理 W3 在 N3 施氮水平下达到最高, W4, W7 水分处理在 N2 达到最高。但是在 W6 水分处理时,氮素水平从 0~450 kg/hm<sup>2</sup>,对灌水和总水分利用均效率没有显著影响,但它们的水分利用效率都比较高,说明适当干旱可以提灌溉和总水分利用效率,在干旱条件下施氮对水分利用效率没有显著影响,原因是干旱不能使氮素发挥应有的效应。

### 4.2 结论

综合考虑产量和水分利用效率,在杂交棉花花铃期以低频高灌量和高频低灌量(日耗水量 6 mm)两个水分处理在施 N 300 kg/hm<sup>2</sup> 时为北疆杂交棉花较适宜的灌溉策略和施氮量。

### 参考文献:

- [1] Akinremi O O. Simulation of soil moisture and other components of the hydrological cycle using a water budget approach[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 75: 133-142.
- [2] 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [3] 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3): 221-226.
- [4] 徐萌. 无机营养与作物抗旱性关系[J]. *干旱地区农业研究*, 1989, 7(4): 77-80.
- [5] 李志勇, 陈建军, 陈明灿. 不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率[J]. *麦类作物学报*, 2005, 25(5): 80-83.
- [6] 易镇邪, 王璞. 氮肥类型对夏玉米及后作冬小麦产量与水、氮利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(2): 11-17.
- [7] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(4): 29-32.
- [8] Mohammad M J, Zuraiqi S, Quasme W, et al. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 243-249.
- [9] 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 滴灌施肥对农田土壤氮素利用和流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 27(7): 49-53.
- [10] Singandhupe R B, Rao G N, Patil N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003,

- 19:327—340.
- [11] Silber A, Xu G, Levkovich I, et al. High fertigation frequency: The effects on uptake of nutrients, water and plant growth[J]. *Plant and Soil*, 2003, 253:467—477.
- [12] Thorburn P J, Dart I K, Biggs I M, et al. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2003, 22:201—209.
- [13] Michele Rinaldi, Domenico Ventrella, Caterina Gagliano. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87:91—105.
- [14] 赵玲,侯振安,危常州,等.膜下滴灌棉花氮磷肥料施用效果研究[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3):307—310.
- [15] 黄骏麒. *中国棉作学*[M]. 北京:中国农业科学出版社, 1998.
- [16] 灌溉试验规范 SL13—90. 中华人民共和国水利部行业标准[S]. 1990.
- [17] Derek Clarke, Martin Smith, Khaled El-Askari. *CropWat for Windows: User Guide Version 4.2*[M]. 1998:13—14.
- [18] 阿维里扬诺夫 CФ. 防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M]. 北京:中国工业出版社, 1985:56—70.
- [19] 来剑斌,王永平,蒋庆华,等.土壤质地对潜水蒸发的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(6):153—157.
- [20] 詹其厚. 氮肥不同用量对玉米产量的影响及肥效分析[J]. *安徽农业科学*, 1997, 25(4):352—353.
- [21] 郭相平,康绍忠. 调亏灌溉——节水灌溉的新思路[J]. *西北水资源与水工程*, 1998, 9(4):22—26.
- [22] 胡顺军,宋郁东,周宏飞,等.塔里木盆地棉花水分利用效率试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3):66—70.
- [23] Shuqin Wan, Yaohu Kang. Effect of drip irrigation frequency on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use[J]. *Irrigation Science*, 2006, 24:161—174.
- [24] El-Hendawy S E, Hokam E M, Schmidhalter U. Drip irrigation frequency: The effects and their interaction with nitrogen fertilization on sandy soil water distribution, maize yield and water use efficiency under Egyptian conditions[J]. *Agronomy & Crop Science*, 2008, 194:180—192.
- [25] 孙孝贵,鲍柏洋. 膜下滴灌水氮耦合对棉花生长发育的影响[C]//兵团精准农业技术研讨会论文混编, 2006:314—317.
- [26] 刘新永,田长彦. 棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2):286—291.

## A study on effect of interactions of water management and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency in hybrid cotton during flowering-bolling stage in drip irrigation under mulch

SUN Hui-jian, MA Fu-yu\*, LIU Hao, CUI Jing, WU Yan-qin  
(College of Agronomy, Shihezi University/The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture,  
Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** A field experiment, including seven water treatments and four nitrogen treatments, was conducted to evaluate the effects of interaction of water management and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency during flowering-bolling stage of hybrid cotton Shiza No. 2 in Shihezi in 2008. The results showed that cotton yield decreased significantly under mild water stress and moderate water stress during flowering-bolling stage under the condition of no-nitrogen treatment but insignificantly compared with 5 d - 18 mm irrigation in each level of N-application. With nitrogen increasing, the cotton yield decreased significantly in 3 d - 30 mm water treatment. The cotton yield and water use efficiency increased significantly under 75% FC and 3 d - 18 mm and 5 d - 30 mm irrigation conditions. Therefore, it could be concluded from the comprehensive effect of interactions of water and nitrogen of cotton yield and water use efficiency that 5 d - 30 mm and 3 d - 18 mm water treatments with 300 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen rate were the optimal irrigation strategy and nitrogen application for hybrid cotton in Northern Xinjiang.

**Keywords:** hybrid cotton; water and nitrogen; interaction; yield; water use efficiency; Northern Xinjiang