

沙漠绿洲地区膜下滴灌棉花水分利用的水氮耦合效应

李培岭, 张富仓, 贾运岗

(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: 研究施肥量和灌水量对不同滴灌模式棉花产量、水分利用效率(WUE)的水氮耦合效应影响。试验设置1带4行、2带4行、2带6行三种滴灌模式,灌水量和施氮量采用二次通用旋转组合设计,进行大田小区棉花膜下滴灌实验。结果表明,棉花产量的水氮耦合效应:灌水量和施氮量对棉花产量的影响,三种模式均表现为灌水量>施氮量,在灌水量65.1~284.9 mm的范围内,三种模式棉花产量与灌水量呈显著正相关。棉花产量与施肥量的关系,1带4行在施氮量27.6~94.2 kg/hm²呈显著的正相关。2带4行在施氮量27.6~69.0 kg/hm²呈负相关,施氮量69~94.2 kg/hm²呈正相关。2带6行施氮量27.6~55.2 kg/hm²呈正相关,施氮量55.2~94.2 kg/hm²呈负相关;棉花WUE的水氮耦合效应:灌水量和施肥量对棉花WUE的影响,三种滴灌模式表现为施氮量>灌水量。棉花WUE与施氮量的关系,1带4行呈显著的正相关,2带4行施氮量27.2~44.4 kg/hm²呈显著负相关,施氮量44.2~94.2 kg/hm²呈正相关。2带6行在施氮量27.6~55.2 kg/hm²呈正相关,施氮量55.2~94.2 kg/hm²呈负相关。在灌水量65.1~284.9 mm的范围内,三种滴灌模式棉花水分利用效率与灌水量均呈显著的负相关。根据不同滴灌模式的水氮耦合效应,提出以棉花产量、WUE为目标的不同滴灌模式水氮高效利用策略。

关键词: 棉花;滴灌;灌水量;施肥量;水氮耦合效应;产量;水分利用效率;沙漠绿洲区

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)03-0053-07

现代农业强调水肥之间的交互作用,灌水和施肥等因素对膜下滴灌技术的经济效益起着决定性作用^[1],因此研究不同滴灌模式条件下的水氮耦合效应,对膜下滴灌技术水氮综合管理和技术推广具有很重要的实践意义^[2]。目前在水分、养分管理等方面,前人根据膜下滴灌的作物根系分布特点,对膜下滴灌水、肥、盐的运移规律进行了研究^[3]。提出了膜下滴灌土壤水分运移和肥料运移规律等^[4],以及滴灌条件下作物的水分利用和肥料利用规律^[5]。

前人针对滴灌技术的灌水和施肥策略的研究表明,不同滴灌施肥策略显著影响棉花的干物质重和氮素吸收量^[6~12]。滴灌条件下,氮肥在一次灌溉过程的前期施用有利于提高氮肥利用率,减少氮素的淋洗损失。氮肥施用量和施肥频率对土壤氮素利用及土壤运移和累积的影响较大^[3],不同施肥水平和滴灌施肥方式下,作物的根系分布、产量、品质等都有明显差异^[9],可见灌水和施肥对滴灌技术节水效果和经济效益具有显著的影响。但是膜下滴灌技术,实际应用通常会采用不同滴灌模式,作物受滴灌带间距和布置方式等影响下,灌水和施肥水平对作物的产量、肥料利用会产生不同的效果。而目前针

对不同滴灌模式水肥耦合效应的研究尚不多见。本文将在不同滴灌模式条件下,对灌水量和施肥量二次通用旋转组合设计,研究不同滴灌模式棉花产量、氮素利用效率的水氮耦合效应,建立以产量、氮肥利用效率为目标的不同滴灌模式水氮优化方案,提出不同滴灌模式的水肥耦合条件下的高效利用策略,以期对棉花水氮管理提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 自然概况

试验于2007年4月~10月在甘肃民勤农业技术推广中心实验站进行。该试验站位于甘肃石羊河流域的民勤县内,是温带大陆性干旱气候,多年平均降雨量110 mm左右,年蒸发量为2 644 mm,且多为5 mm以下的无效降水,7~9月的降水占全年降水的60%,年均皿蒸发量2 644 mm,干燥度为5.15,无霜期188 d,绝对无霜期仅118 d,日照时数>3 010 h,≥10℃积温3 149.4℃,地下水埋深在30 m以下。1 m土层内土质均为砂壤土,0~60 cm土层含少量腐殖质和黏粒,粒径在0.5~2.0 mm内,60~100 cm土层内黏粒增多,有少量夹层黄砂,胶泥质夹杂少量

收稿日期:2008-10-15

基金项目:国家自然科学基金(50579066,50879073)

作者简介:李培岭(1981-),男,内蒙古宁城县人,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail:lipailing1981@tom.com。

* 通讯作者:张富仓(1962-),男,陕西省武功县人,教授,博士生导师,现从事节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail:zhangfc@nwsuaf.edu.cn。

腐殖质。1 m 土层内含盐量 $< 0.14\%$ ，平均容重 1.51 g/cm^3 ，土壤养分含量差异较小，有机质含量 8 g/kg ，全氮含量 0.8 g/kg ，速效磷平均含量 17.5 mg/kg ，速效钾为 $150 \sim 200 \text{ mg/kg}$ 。

1.2 试验设计

供试棉花品种为新陆早 7 号 (*Gossypium hirsu-*

tuncu·Xinluzao 7)。参照该区地膜覆盖、足墒播种和矮秆密植的棉花种植模式，每穴保苗 2~3 株。播种时初始含水量为 22.2% 。各小区随机布设，小区长 11 m 、宽 4 m ，各小区间宽 1 m 作为保护带，各处理锄草、化控、催熟等田间管理措施均保持一致。

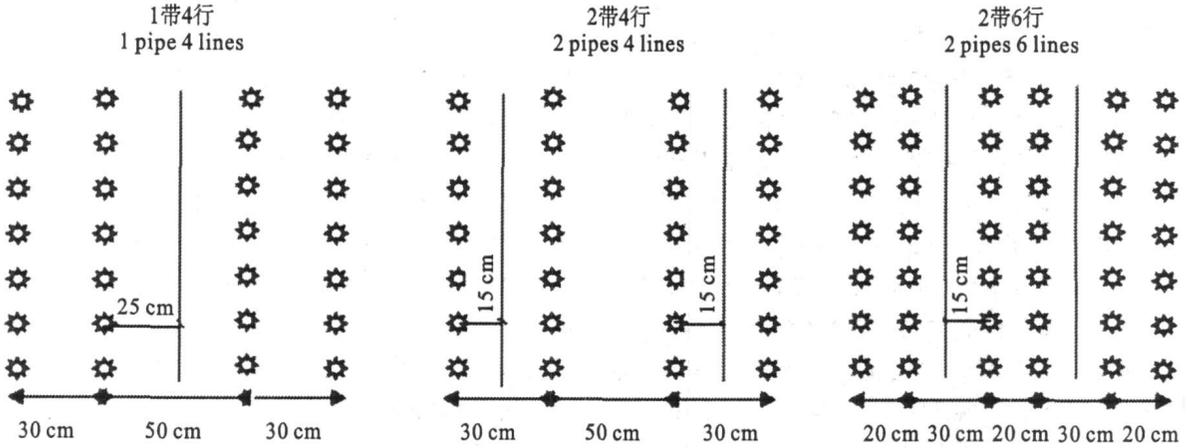


图 1 不同滴灌模式棉花行距及滴灌带布置示意图

Fig. 1 Layout figure of different drip irrigation patterns

本试验设三种滴灌模式，分别为 1 带 4 行、2 带 4 行和 2 带 6 行，试验布置见示意图 1。在不同滴灌模式下，以施氮量和灌水量作为试验因子，采用二次通用旋转组合设计，试验因子的零水平及变化间距见表 1，两个试验因子的编码值及田间实施量见表 2，另外在每种滴灌模式设置不施氮处理。各小区随机布设。滴灌试验采用内镶式薄壁滴灌带，滴头流量为 1.8 L/h ，滴头间距为 25 cm ，灌水量由水表控

制，所有处理灌水日期相同，分别为 6.25、7.2、7.9、7.16、7.19、7.24、7.28、7.31、8.4、8.9、8.18，灌水次数均为 11 次，灌水定额 = 灌溉定额 / 灌水次数。灌水量和施氮量的上下限，根据当地棉花种植灌水和施肥水平而定，上限充分满足棉花水肥需求，下限保证棉花生长和获得经济产量。所用的肥料为尿素 (含 $\text{N}46\%$)，另外施 420 kg/hm^2 的过磷酸钙 (不设处理)，均作为基肥，人工均匀施撒。

表 1 试验因子的零水平及变化间距

Table 1 Zero level and change space of experiment factors

| 项目 Item | 1 带 4 行 1 pipe 4 lines | | 2 带 4 行 2 pipes 4 lines | | 2 带 6 行 2 pipes 6 lines | |
|-------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ |
| 零水平 Zero level | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |
| 变化间距 Change space | 27.6 | 60 | 27.6 | 60 | 27.6 | 60 |

1.3 测定项目及方法

在棉花生育期结束，对不同滴灌模式棉花进行分小区采摘，测定棉花的最终产量。

不同滴灌模式棉花 WUE 的计算：在棉花的播种前和生育期结束时分别测定土壤含水量，计算土壤含水量变化，再加上灌水量和有效降雨量 (本实验中 65.2 mm)，利用水量平衡法，计算不同滴灌模式的耗水量： $ET_a = I - \Delta W$ 水分利用效率 WUE 按下式计算：

$$WUE = Y / ET_a$$

式中： I 为时段 Δt 内的灌水量 (mm)； ΔW 为时段 Δt 内 $0 \sim 90 \text{ cm}$ 土层蓄水量的变化 (mm)；WUE 为作物水分利用效率 (kg/mm)； Y 为产量 (kg/hm^2)； ET_a 为作物腾发量 (mm)，根据试验小区内的土壤含水率实测资料，采用水量平衡方法计算。本试验采用滴灌，灌水定额小于 20 mm ，故不考虑水分的深层渗漏。 ET_a 为时段 Δt 内的平均腾发量 (mm)。

表2 试验因素的码值方案与田间实施方案

Table 2 Field experimental design scheme and coding project of experiment factors

| 试验处理号 Code of treatment | 码值方案 Coding project | | 田间实施方案 Field experimental design scheme | | | | | |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | 施氮量 N rate X_1 | 灌水量 Water X_2 | 1带4行 1pipe 4 lines | | 2带4行 2 pipes 4 lines | | 2带6行 2 pipes 6 lines | |
| | | | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ | 施氮量 N rate $X_1(\text{kg}/\text{hm}^2)$ | 灌水量 Water $X_2(\text{mm})$ |
| 1 | 1 | 1 | 82.8 | 210 | 82.8 | 260 | 82.8 | 260 |
| 2 | 1 | -1 | 82.8 | 90 | 82.8 | 140 | 82.8 | 140 |
| 3 | -1 | 1 | 27.6 | 210 | 27.6 | 260 | 27.6 | 260 |
| 4 | -1 | -1 | 27.6 | 90 | 27.6 | 140 | 27.6 | 140 |
| 5 | -1.41421 | 0 | 16.2 | 150 | 16.2 | 200 | 16.2 | 200 |
| 6 | 1.41421 | 0 | 94.2 | 150 | 94.2 | 200 | 94.2 | 200 |
| 7 | 0 | -1.41421 | 55.2 | 65.1 | 55.2 | 115.1 | 55.2 | 115.1 |
| 8 | 0 | 1.41421 | 55.2 | 234.9 | 55.2 | 284.9 | 55.2 | 284.9 |
| 9 | 0 | 0 | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |
| 10 | 0 | 0 | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |
| 11 | 0 | 0 | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |
| 12 | 0 | 0 | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |
| 13 | 0 | 0 | 55.2 | 150 | 55.2 | 200 | 55.2 | 200 |

2 结果与分析

2.1 不同滴灌模式棉花产量的水氮耦合效应

由表3可知,棉花产量的回归方程,相关系数在0.9以上。表明所建立的回归模型精度较高,与实际状况模拟较好,具有实际应用价值。在回归模拟计算过程中应用的是无量纲线性编码代换,所求得的偏回归系数已标准化,故其绝对值大小可直接反映各变量对因变量的影响程度。由回归方程的一次项偏回归系数和棉花产量的水氮互作效应(图2)可知,灌水量和施氮量对棉花产量的影响,三种滴灌模式均为灌水量>施氮量。由于滴灌带布置在种植行中间,膜内土壤含水量分布不均匀,影响各行棉花的水分吸收,灌水量对棉花产量的影响大于施氮量,不同滴灌模式棉花的水分胁迫影响程度表现为:1带4行>2带6行>2带4行。由棉花产量单因子效应表明(表4):由施氮量不同取值水平棉花产量可见,施氮量与棉花产量的关系,1带4行在施氮量27.6~94.2 kg/hm²呈显著的正相关;2带4行在施氮量27.6~69 kg/hm²时(X_1 : -1.41421~-0.5)呈显著的负相关,在施氮量69~94.2 kg/hm²时(X_1 : -0.5~-1.41421)呈显著的正相关;2带6行在施氮量27.6~55.2 kg/hm²呈正相关,施氮量55.2~94.2 kg/hm²(X_1 : 0~1.41421)呈负相关。由灌水量不同取值水平的棉花产量可见,在灌水量65.1~284.9 mm的范围内,三种滴灌模式棉花产量与灌水量均

呈显著正相关。不同滴灌模式棉花产量的水氮耦合效应表明,1带4行棉花产量相对于2带4行受水分胁迫的影响较大,增加施氮量可提高棉花产量,但提升幅度较小。2带4行在低施氮量情况下,棉花营养生长和生殖生长的氮素吸收不平衡,生育后期棉铃脱落明显,影响棉花产量。在满足棉花一定所需氮素情况下,施氮量与棉花产量呈显著的正相关。2带6行相对于2带4行种植密度增大,棉花生长速率降低,影响霜前棉花产量和质量。

2.2 不同滴灌模式水分利用效率的水氮耦合效应

不同滴灌模式水分利用效率(WUE)与灌水量和施氮量两因素的回归方程(表3)的回归模型精度较高,由回归方程的一次项偏回归系数和WUE的水氮互作效应(图4)分析可知,灌水量和施氮量对不同滴灌模式WUE的影响,三种模式均表现为灌水量>施氮量。不同滴灌模式WUE的水氮单因子效应表明(表5):由施氮量不同取值水平的WUE可见,棉花NUE与施氮量的关系,1带4行在施氮量27.6~94.2 kg/hm²呈负相关。2带4行施氮量27.2~44.4 kg/hm²(X_1 : -1.41421~-0.5)呈显著负相关,施氮量为44.2~94.2 kg/hm²(X_1 : -0.5~1.41421)呈显著正相关。2带6行在施氮量为27.6~55.2 kg/hm²(X_1 : -1.41421~0)呈显著正相关,当施氮量55.2~94.2 kg/hm²(X_1 : 0~1.41421)呈显著负相关。由灌水量不同取值水平的WUE可见,在灌水量65.1~284.9 mm的范围内,三种滴灌模式WUE与灌水

量呈负相关。WUE 水氮耦合效应表明,1 带 4 行滴灌模式膜内土壤含水量分布不均匀,影响棉花水分吸收和利用,抑制了棉花的耗水量,增加施氮量可提高棉花的 WUE,但提升空间较低,因此灌水量对 1 带 4 行棉花 WUE 的影响大于施氮量。2 带 4 行土壤含水量分布相对均匀,各行棉花水分吸收明显提

高,棉花的耗水量增大,棉花 WUE 低于 1 带 4 行。2 带 6 行土壤含水量分布同 2 带 4 行相近,但种植密度高于 2 带 4 行,透光和通气性能下降,光合蒸腾速率降低,耗水量下降,但棉花霜前棉花产量降低,影响了棉花的 WUE。

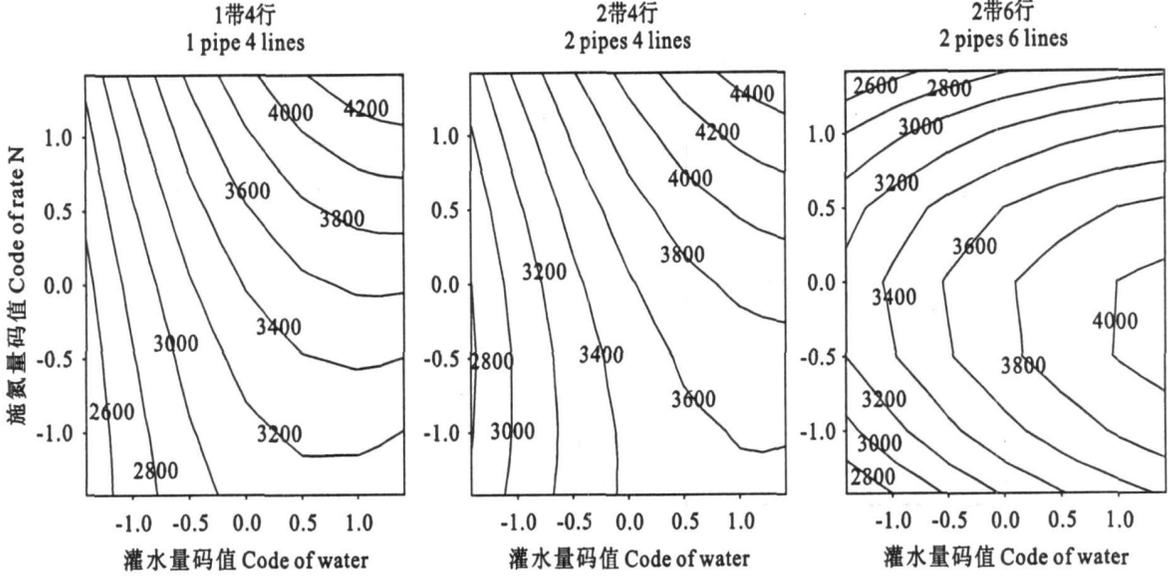


图 2 不同滴灌模式棉花产量的水氮互作效应分析

Fig. 2 Interaction effects of water and nitrogen on cotton yield

表 3 棉花产量、水分利用效率与试验因素的回归方程

Table 3 Regression equations between experiment factors with cotton yields and WUE

| 项目 Item | 滴灌模式 Drip irrigation pattern | 回归方程 (Y, X ₁ -施氮量, X ₂ -灌水量) Regression equation | F 值 F value |
|--------------------|---------------------------------|--|----------------|
| 产量 Cotton yield | 1 带 4 行 1 pipe 4 lines | $Y=3408.871+309.404X_1+380.393X_2+50.402X_1^2-161.348X_2^2+120.672X_1X_2$ | 59.656** |
| | 2 带 4 行 2 pipes 4 lines | $Y=3578.444+225.109X_1+383.382X_2+87.334X_1^2-119.083X_2^2+91.547X_1X_2$ | 9.694** |
| | 2 带 6 行 2 pipes 6 lines | $Y=3774.296-152.0234X_1+284.041X_2-384.213188X_1^2-56.602X_2^2-57.072X_1X_2$ | 11.636** |
| 水分利用效率 WUE | 1 带 4 行 1 pipe 4 lines | $Y=22.726+2.111X_1-7.142X_2+0.456X_1^2+1.411X_2^2-0.248X_1X_2$ | 272.325** |
| | 2 带 4 行 2 pipes 4 lines | $Y=17.896+1.127X_1-3.749X_2+0.457X_1^2+0.505X_2^2-0.018X_1X_2$ | 24.337** |
| | 2 带 6 行 2 pipes 6 lines | $Y=18.872-0.745X_1-4.488X_2-2.101X_1^2+1.244X_2^2-0.105X_1X_2$ | 14.002** |

表 4 棉花产量的水氮单因子效应分析

Table 4 Effect of single-factor of water and nitrogen on cotton yield

| 影响因素 Factor | 滴灌模式 Drip irrigation pattern | 码值 Code | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | -1.4142 | -1.2071 | -1 | -0.5 | 0 | 0.5 | 1 | 1.2071 | 1.4142 |
| 施氮量 Rate N X ₁ | 1 带 4 行 1 pipe 4 lines | 3072.11 | 3108.83 | 3149.87 | 3266.77 | 3408.87 | 3576.17 | 3768.68 | 3855.80 | 3947.24 |
| | 2 带 4 行 2 pipes 4 lines | 3434.76 | 3433.97 | 3440.67 | 3487.72 | 3578.44 | 3712.83 | 3890.89 | 3977.43 | 4071.47 |
| | 2 带 6 行 2 pipes 6 lines | 3220.86 | 3397.97 | 3542.11 | 3754.25 | 3774.30 | 3602.23 | 3238.06 | 3030.95 | 2790.88 |
| 灌水量 Water X ₂ | 1 带 4 行 1 pipe 4 lines | 2548.22 | 2714.60 | 2867.13 | 3178.34 | 3408.87 | 3558.73 | 3627.92 | 3632.95 | 3624.13 |
| | 2 带 4 行 2 pipes 4 lines | 2798.10 | 2942.15 | 3075.98 | 3356.98 | 3578.44 | 3740.37 | 3842.74 | 3867.71 | 3882.46 |
| | 2 带 6 行 2 pipes 6 lines | 3259.40 | 3348.95 | 3433.65 | 3618.12 | 3774.3 | 3902.17 | 4001.74 | 4034.69 | 4062.79 |

2.3 棉花产量和水分利用效率的水氮优化方案

进行模拟和筛选优化组合方案。棉花产量以 $\geq 3600.00 \text{ kg/hm}^2$ 为目标,水分利用效率(WUE)以 \geq

依据试验结果所建立的数学模型,利用计算机

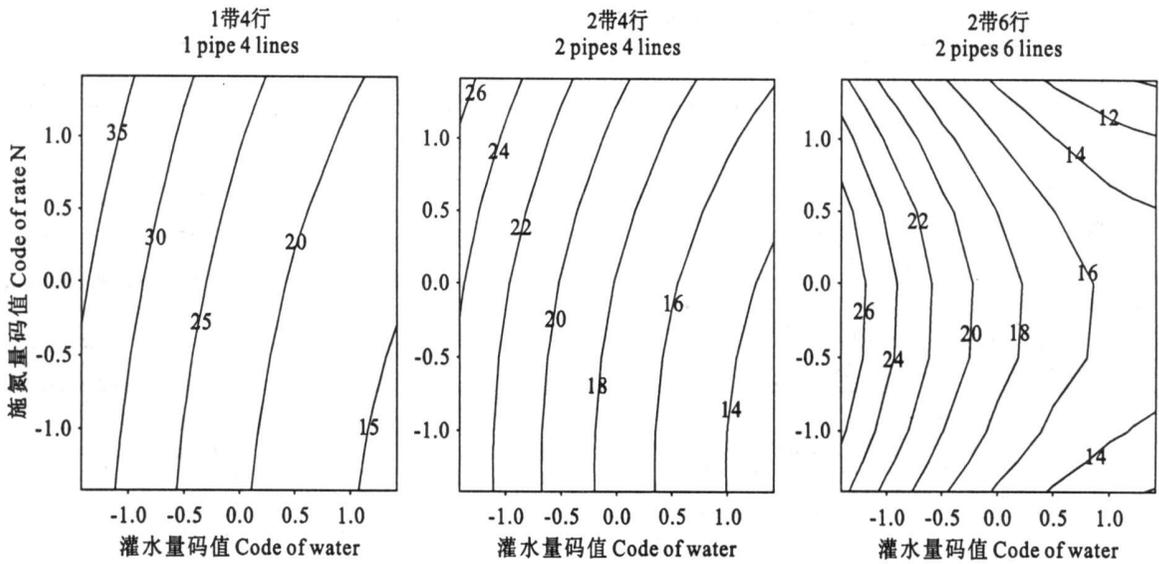


图3 不同滴灌模式水分利用效率的水氮互作效应分析

Fig.3 Interaction effects of water and nitrogen on cotton water use efficiency

表5 棉花水分利用效率(WUE)的水氮单因子效应分析

Table 5 Effect of single-factor of water and nitrogen on cotton nitrogen use efficiency

| 影响因素 Factor | 滴灌模式 Drip irrigation pattern | 码值 Code | | | | | | | | |
|------------------------|---------------------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | -1.4142 | -1.2071 | -1 | -0.5 | 0 | 0.5 | 1 | 1.2071 | 1.4142 |
| 施氮量 N rate X_1 | 1带4行 1 pipe 4 lines | 20.65 | 20.84 | 21.07 | 21.79 | 22.73 | 23.90 | 25.29 | 25.94 | 26.62 |
| | 2带4行 2pipes 4 lines | 17.22 | 17.20 | 17.23 | 17.45 | 17.90 | 18.57 | 19.48 | 19.92 | 20.40 |
| | 2带6行 2pipes 6 lines | 15.72 | 16.71 | 17.52 | 18.72 | 18.87 | 17.97 | 16.03 | 14.91 | 13.62 |
| 灌水量 Water X_2 | 1带4行 1 pipe 4 lines | 35.65 | 33.40 | 31.28 | 26.65 | 22.73 | 19.51 | 17.00 | 16.16 | 15.45 |
| | 2带4行 2pipes 4 lines | 24.21 | 23.16 | 22.15 | 19.90 | 17.90 | 16.15 | 14.65 | 14.11 | 13.60 |
| | 2带6行 2pipes 6 lines | 27.71 | 26.10 | 24.60 | 21.43 | 18.87 | 16.94 | 15.63 | 15.27 | 15.01 |

20 kg/mm 为目标,分别建立不同滴灌模式棉花水氮耦合优化技术方案。各优化方案及对应的技术参见表6,试验因素的优化组合频数分析见表7。棉花产量、水分利用效率优化技术参数和试验方案中优化指标,棉花产量达到 ≥ 3600 kg/hm²和水分利用效率达到 ≥ 20 kg/mm 时,不同滴灌模式所需施肥量,1带4行 69.6~72.7 kg/hm²,2带4行 46.1~77.0 kg/hm²、2带6行 32.1~51.4 kg/hm²,不同滴灌模式所需灌水量,则需根据不同滴灌模式棉花产量或WUE 所需灌水量分别进行水分管理。

3 结论与讨论

大田膜下滴灌节水技术中,灌水和施肥等因素对棉花产量以及经济效益起着决定性作用^[2],滴灌棉花产量、水分和养分利用水氮耦合效应,也成为滴灌水氮管理的研究热点。棉花产量的水氮耦合效应有研究表明,棉花受到水分严重胁迫时,施肥对产量无显著影响,即水分严重胁迫完全抑制了肥效的发

挥^[1,2,11]。本文对三种滴灌模式棉花产量的水氮耦合效应研究表明,1带4行在灌水量65.1~234.9 mm,棉花产量与灌水量呈显著的正相关,随着灌水量的增加,产量有显著的提高。在此滴灌模式下施用氮肥对棉花增产有一定效应,但施用氮肥增产的空间比较小。说明1带4行由于水分胁迫明显抑制氮素发挥,增加灌水量后,能够有效促进棉花生长和提高棉花产量,水氮互作效应明显。2带4行在灌水量115.1~284.9 mm 的范围内,棉花产量与灌水量呈显著的正相关。在施氮量为16.2~94.2 kg/hm²,随着施氮量的增加,产量随施氮量增加先下降后上升。在低施氮量情况下,随施氮量增加,棉花营养生长和生殖生长的氮素吸收不平衡,产生棉花生育后期生殖生长养分供应不足,表现为蕾铃脱落明显,产量与施氮量呈负相关,在满足棉花营养生长一定的氮素需求情况下,棉花产量随施氮量增加而显著提高。2带6行相对于2带4行种植密度增大,棉花群体的透光性和通气性下降,棉花生长速率显

表 6 不同滴灌模式棉花水氮耦合效应回归分析
Table 6 Regression analysis of cotton yields and water-nitrogen

| 项目 Items | 棉花产量 Cotton yield $Y \geq 3\ 600.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$ | | | | | |
|------------------------------------|---|-------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|
| | 1带4行 1pipe 4 lines | | 2带4行 2 pipes 4 lines | | 2带6行 2 pipes 6 lines | |
| | X_1 | X_2 | X_1 | X_2 | X_1 | X_2 |
| X_i 平均值 X_i mean | 0.905 | 0.905 | 0.255 | 0.644 | -0.383 | 0.966 |
| S_x 标准误 Standard error | 0.195 | 0.195 | 0.298 | 0.229 | 0.274 | 0.164 |
| 95%置信域 95% confidence interval | 0.522~1.288 | 0.522~1.288 | -0.329~0.840 | 0.645~1.092 | -0.921~-0.101 | 0.645~1.286 |
| 水氮用量 Applied water and nitrogen | 69.6~90.7 kg/hm^2 | 181.3~227.3 mm | 46.1~78.4 kg/hm^2 | 188.74~215.5 mm | 29.8~52.4 kg/hm^2 | 188.7~227.2 mm |

| 项目 Items | 水分利用效率 WUE $Y \geq 20.00\ \text{kg}/\text{mm}$ | | | | | |
|------------------------------------|--|------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
| | 1带4行 1pipe 4 lines | | 2带4行 2 pipes 4 lines | | 2带6行 2 pipes 6 lines | |
| | X_1 | X_2 | X_1 | X_2 | X_1 | X_2 |
| X_i 平均值 X_i mean | 0.186 | -0.929 | 0.201 | -1.006 | -0.157 | -1.23 |
| S_x 标准误 Standard error | 0.293 | 0.15 | 0.317 | 0.141 | 0.347 | 0.069 |
| 95%置信域 95% confidence interval | -0.389~0.635 | -1.046~-0.635 | -0.421~0.791 | -1.282~-0.861 | -0.838~0.524 | -1.365~-1.096 |
| 水氮用量 Applied water and nitrogen | 44.5~72.7 kg/hm^2 | 87.2~111.9 mm | 43.6~77.0 kg/hm^2 | 73.1~98.3 mm | 32.1~69.7 kg/hm^2 | 68.1~84.2 mm |

表 7 试验因素的优化组合频数分析

Table 7 Frequency analysis of optional combination of experiment factors

| 项目 Items | 变量 Variable | 1带4行 1pipe 4 lines | | | | 2带4行 2 pipes 4 lines | | | | 2带6行 2 pipes 6 lines | | | |
|-----------------------|----------------|--------------------|-----------------|------------|-----------------|----------------------|-----------------|------------|-----------------|----------------------|-----------------|------------|-----------------|
| | | X_1 | | X_2 | | X_1 | | X_2 | | X_1 | | X_2 | |
| | | 次数 Time | 频率 Frequency | 次数 Time | 频率 Frequency | 次数 Time | 频率 Frequency | 次数 Time | 频率 Frequency | 次数 Time | 频率 Frequency | 次数 Time | 频率 Frequency |
| 产量 Cotton yield | -1.41421 | 0 | 0.000 | 0 | 0.000 | 3 | 0.200 | 1 | 0.067 | 2 | 0.200 | 0 | 0.000 |
| | -1.00000 | 0 | 0.000 | 0 | 0.000 | 2 | 0.133 | 1 | 0.067 | 3 | 0.300 | 0 | 0.000 |
| | 0.00000 | 2 | 0.250 | 2 | 0.250 | 2 | 0.133 | 3 | 0.200 | 3 | 0.300 | 2 | 0.200 |
| | 1.00000 | 3 | 0.375 | 3 | 0.375 | 3 | 0.200 | 5 | 0.333 | 2 | 0.200 | 4 | 0.400 |
| | 1.41421 | 3 | 0.375 | 3 | 0.375 | 5 | 0.333 | 5 | 0.333 | 0 | 0.000 | 4 | 0.400 |
| 水分利 用效率 WUE | -1.41421 | 2 | 0.153 | 5 | 0.385 | 2 | 0.167 | 5 | 0.417 | 2 | 0.222 | 5 | 0.556 |
| | -1.00000 | 2 | 0.154 | 5 | 0.385 | 2 | 0.167 | 5 | 0.417 | 2 | 0.222 | 4 | 0.444 |
| | 0.00000 | 3 | 0.231 | 3 | 0.231 | 2 | 0.167 | 2 | 0.167 | 2 | 0.222 | 0 | 0.000 |
| | 1.00000 | 3 | 0.231 | 0 | 0.000 | 3 | 0.250 | 0 | 0.000 | 2 | 0.222 | 0 | 0.000 |
| | 1.41421 | 3 | 0.231 | 0 | 0.000 | 3 | 0.250 | 0 | 0.000 | 1 | 0.111 | 0 | 0.000 |

著降低。随着施氮量的增加,促进棉花生长和产量增加,但施氮量过多就会使棉花营养生长的时期延长,棉铃霜前吐絮数量减少,霜前棉花产量显著降低,影响棉花整体产量。

滴灌棉花的 WUE 的水氮耦合效应表明,灌水量对 WUE 影响大于施肥量,不同滴灌模式下 WUE 随着施氮量的增加而显著提升,随灌水量增加而显著下降。施氮量和灌水量对 WUE 的水氮耦合效应影响,在 1 带 4 行的模式下,灌水量为 210 mm 时,施氮量为 16.2 kg/hm^2 和 82.2 kg/hm^2 的水分利用率仅相差 9.4%,而在 82.2 kg/hm^2 施氮量下,灌水量为 90 mm 和 210 mm 差值达到 41.6%,水氮之间互作效应

明显。可以看出,氮肥对水分利用率有明显的促进作用,即增施氮肥提高了灌水利用效率,但灌水量对水分利用效率的影响要高于氮肥的影响,所以水分是膜下滴灌棉花的主效应因子^[4~7]。本文对 WUE 水氮耦合分析表明,1 带 4 行棉花受到土壤含水量分布的影响,受到一定程度的水分胁迫,控制了棉花的耗水量,另外增加施氮量促进了棉花的产量增长,从而提高了棉花的 WUE。2 带 4 行土壤含水量分布相对均匀,各行棉花根系的水分吸收也明显增加,棉花的蒸腾速率明显上升,棉花的耗水量显著增大,使棉花 WUE 低于 1 带 4 行。2 带 6 行土壤含水量分布同 2 带 4 行相近,但 2 带 6 行种植密度高于 2 带 4

行,透光和通气性能下降,使得光合速率和蒸腾速率降低,减少了棉花的耗水量,同时也影响了棉花干物质累积,促使棉花吐絮期延长,影响霜前期棉花产量,导致棉花的WUE偏低。

不同滴灌模式棉花产量、水分利用效率的水氮耦合效应分析得出,1带4行的水分胁迫极大抑制了肥效发挥,而2带4行和2带6行在水分适宜时氮肥之间的效应差异显著,2带4行氮肥促进了水分发挥,2带6行则限制了水分发挥。棉花产量的水氮耦合效应分析得出,棉花产量达到 $\geq 3600 \text{ kg/hm}^2$ 和水分利用效率达到 $\geq 20 \text{ kg/mm}$ 时,不同滴灌模式所需施肥量,1带4行 $69.6 \sim 72.7 \text{ kg/hm}^2$,2带4行 $46.1 \sim 77.0 \text{ kg/hm}^2$ 、2带6行 $32.1 \sim 51.4 \text{ kg/hm}^2$,不同滴灌模式所需灌水量,则需根据不同滴灌模式棉花产量或WUE所需灌水量分别进行水分管理。由于本文实验为一年试验资料,棉花产量、WUE在不同的年季气候变化情况下,可能会有所影响,尚需进一步研究。

参考文献:

[1] 徐飞鹏,李云开,任树梅.新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展

的思考[J].农业工程学报,2003,19(1):25-27.

- [2] 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.
- [3] 习金根,周建斌,赵满兴,等.滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(3):271-275.
- [4] 侯振安,李品芳,吕新,等.不同滴灌施肥方式下棉花根区的水、盐和氮素分布[J].中国农业科学,2007,40(3):549-557.
- [5] 危常州,马富裕,雷咏雯,等.棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J].棉花学报,2002,14(4):209-214.
- [6] 胡晓棠,李明思,马富裕.膜下滴灌棉花的土壤干旱诊断指标与灌水决策[J].农业工程学报,2002,18(1):49-53.
- [7] 刘建军,陈燕华,李明思.膜下滴灌棉花植株耗水率与土壤水分的关系[J].棉花学报,2002,14(4):200-203.
- [8] 李明思,康绍忠,杨海梅.地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J].农业工程学报,2007,23(6):49-54.
- [9] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J].农业工程学报,2005,21(6):26-29.
- [10] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J].水利学报,2004,(9):31-37.
- [11] 栗岩峰,李久生,李蓓.滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J].水利学报,2007,38(7):857-865.
- [12] 张琼,李光永,柴付军.棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J].水利学报,2004,(9):123-126.

Coupling effect of water and nitrogen on cotton yield and water use efficiency in different patterns of drip irrigation under film mulching

LI Pei-ling, ZHANG Fu-cang, JIA Yun-gang

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

Abstract: The coupling effect of water and nitrogen on cotton yield and water use efficiency (WUE) was studied under different drip irrigation patterns. The field experiments were conducted in three drip irrigation patterns including 1 pipe 4 lines, 2 pipes 4 lines and 2 pipes 6 lines, in which universal design of the second rotation was used. The result showed that the coupling effect of water and nitrogen on cotton yield was more significant than nitrogen under three drip irrigation. In applying water of $65.1 \sim 284.9 \text{ mm}$, three drip irrigation patterns were positive correlation between cotton yield and water. In the applying nitrogen of $27.6 \sim 94.2 \text{ kg/hm}^2$, 1 pipe-4 lines were positive correlation between nitrogen and cotton yield, 2 pipes-4 lines negative correlation in applying nitrogen of $27.6 \sim 69.0 \text{ kg/hm}^2$ and positive correlation in the applying nitrogen of $69 \sim 94.2 \text{ kg/hm}^2$, 2 pipes-6 lines positive correlation in applying nitrogen of $27.6 \sim 55.2 \text{ kg/hm}^2$ and negative correlation in applying nitrogen of $55.2 \sim 94.2 \text{ kg/hm}^2$. For the coupling effect of water and nitrogen on water use efficiency (WUE), water was more significant than nitrogen under three drip irrigation patterns. 1 pipe-4 lines was positive correlation between nitrogen and WUE. 2 pipes-4 lines was negative correlation in applying nitrogen of $27.2 \sim 44.4 \text{ kg/hm}^2$ and positive correlation in applying nitrogen of $44.2 \sim 94.2 \text{ kg/hm}^2$, 2 pipes-6 lines was positive correlation in applying nitrogen of $27.6 \sim 55.2 \text{ kg/hm}^2$ and negative correlation in applying nitrogen of $55.2 \sim 94.2 \text{ kg/hm}^2$. In applying water of $65.1 \sim 284.9 \text{ mm}$, three drip irrigation patterns were negative correlation between water and WUE. According to water and nitrogen coupling effect in different patterns of drip irrigation, a management strategy was set forward with increasing cotton yield and WUE as the objectives.

Keywords: cotton; drip irrigation pattern; irrigation; fertilizer; coupling effect of water and nitrogen; yield; water use efficiency; desert oasis