

DOI: 10.13870/j.cnki.stbexb.2024.03.018

汪思佳, 王春霞, 张景瑞, 等. 减氮条件下基于 AquaCrop 模型的北疆膜下滴灌棉花水氮制度优化[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

WANG Sijia, WANG Chunxia, ZHANG Jinrui, et al. Optimization of water and nitrogen regimes based on AquaCrop model for drip irrigation cotton under nitrogen reducing conditions in northern Xingjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

## 减氮条件下基于 AquaCrop 模型的北疆膜下滴灌棉花水氮制度优化

汪思佳<sup>1,2</sup>, 王春霞<sup>1,2</sup>, 张景瑞<sup>1,2</sup>, 杨跃发<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** [目的] 为检验减氮条件下 AquaCrop 模型对北疆膜下滴灌棉花生长及生产的模拟适用性, 探究棉花生育期最优减氮与灌水制度。[方法] 通过 2022 年、2023 年大田试验, 明确 4 种施氮水平(常规施氮量、减氮 10%、减氮 20%、减氮 30%)、3 种灌溉定额(488, 444, 400 mm)对棉花产量、水氮利用效率及土壤养分含量的影响; 利用各处理实测数据率定并验证模型参数, 并用校正好的模型模拟 6 种施氮水平(常规施氮量、减氮 6%、减氮 12%、减氮 18%、减氮 24%、减氮 30%)、6 种灌溉水平(300, 360, 420, 480, 540, 600 mm)组合下棉花产量及水氮利用效率, 通过综合评价方法筛选出最优水氮组合。[结果] 减氮与灌溉定额共同作用, 对棉花产量、水氮利用效率及土壤养分具有显著影响。减施氮肥时, 可通过适当增加灌溉定额达到对产量的弥补稳定棉花产量, 相同施氮量下, 适当减少灌溉定额提高水分利用效率; 相同灌溉定额下, 适当减少施氮量提高氮肥偏生产力; 常规施氮时, 增加 10% 的常规灌溉定额(W1N1)可有效提高耕作层土壤中养分含量。模拟与实测结果表明, 2 年试验处理的冠层覆盖度及地上部生物量各评价指标均满足决定系数  $R^2 \geq 0.936$ , 均方根误差  $NRMSE \leq 40.58\%$ , 纳什系数  $E_{NS} \geq 0.72$ ; 产量与水分利用效率各评价指标均满足  $R^2 \geq 0.87$ ,  $NRMSE \leq 4.29\%$ ,  $E_{NS} \geq 0.81$ ; 该模型实现较好的模拟效果。[结论] 基于 36 种减氮与灌水组合下的情景模拟, 综合考虑产量、水氮利用效率及实际生产成本, 推荐在北疆地区采用减氮 12%, 360 mm 灌溉定额的减氮灌溉制度。可为 AquaCrop 模型在今后对不同施肥灌溉制度下的应用提供经验, 为干旱区棉花种植过程中提升水分及氮肥利用效率提供理论依据和科学指导。

**关键词:** 减施氮肥; AquaCrop; 棉花; 水分利用率; 氮肥偏生产力; 水氮制度

中图分类号: S274.1; S562; S275.6

文献标识码: A

## Optimization of Water and Nitrogen Regime Based on AquaCrop Model for Drip Irrigation Cotton under Nitrogen Reduction Conditions in Northern Xinjiang

WANG Sijia<sup>1,2</sup>, WANG Chunxia<sup>1,2</sup>, ZHANG Jingrui<sup>1,2</sup>, YANG Yuefa<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

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

**Abstract:** [Objective] This study was aimed to test the applicability of the AquaCrop model for simulating the growth and production of drip-irrigated cotton under nitrogen-reducing conditions in the northern border, and to investigate the optimal nitrogen-reducing and irrigation regimes during the reproductive period of cotton. [Methods] Through the field trials in 2022 and 2023, we clarified the effects of four nitrogen application levels (conventional nitrogen application, nitrogen reduction of 10%, nitrogen reduction of 20%, and nitrogen reduction of 30%), and three irrigation schedules (488, 444, and 400 mm) on cotton yield, water and nitrogen use efficiency, and soil nutrient content; we used measured data from the treatments to determine and validate the parameters of the model, and then simulated the model with the calibrated model. Cotton yield and water and nitrogen use efficiencies were simulated with the calibrated model under six combinations of nitrogen application levels (conventional nitrogen application, nitrogen reduction of 6%,

收稿日期: 2023-10-27 修回日期: 2023-12-16 录用日期: 2024-01-22

资助项目: 新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2022DB020, 2021DB012); 国家自然科学基金项目(52369012)

第一作者: 汪思佳(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1321273617@qq.com

通信作者: 王春霞(1979—), 女, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 410443356@qq.com

nitrogen reduction of 12%, nitrogen reduction of 18%, nitrogen reduction of 24%, and nitrogen reduction of 30%), and six combinations of irrigation levels (300, 360, 420, 480, 540, and 600 mm), and the optimal water and nitrogen combinations were screened out by the comprehensive evaluation method. [Results] Nitrogen reduction and irrigation quota together had a significant effect on cotton yield, water and nitrogen use efficiency and soil nutrients. Nitrogen fertilizer reduction can be achieved by appropriately increasing the irrigation quota to stabilize cotton yield; Under the same nitrogen application, appropriately reducing the irrigation quota improved water use efficiency; Under the same irrigation quota, appropriately reducing the nitrogen application improved nitrogen fertilizer bias productivity; A 10% increase in the conventional irrigation quota (W1N1) when applying conventional nitrogen effectively improved the nutrient content of the tillage layer of the soil. The simulation and measurement results showed that each evaluation index of canopy cover and above-ground biomass of the 2-year experimental treatments satisfied the coefficient of determination  $R^2 \geq 0.936$ , the root mean square error  $\text{NRMSE} \leq 40.58\%$ , and the Nash coefficient  $E_{\text{NS}} \geq 0.72$ ; And each evaluation index of yield and water-use efficiency satisfied the coefficient of determination  $R^2 \geq 0.87$ ,  $\text{NRMSE} \leq 4.29\%$ , and  $E_{\text{NS}} \geq 0.81$ ; The model achieved a better simulation effect. [Conclusion] Based on the scenario simulation under 36 combinations of nitrogen reduction and irrigation, and considering the yield, water and nitrogen utilization efficiency and the actual production cost, the nitrogen reduction irrigation system with 12% nitrogen reduction and 360 mm irrigation quota is recommended to be adopted in the northern border region. The study can provide experience for the application of the AquaCrop model under different fertilizer and irrigation regimes in the future and provide a theoretical basis and scientific guidance for the improvement of water and nitrogen fertilizer use efficiency during cotton cultivation in arid regions.

**Keywords:** nitrogen fertilizer reduction; AquaCrop; cotton; water use efficiency; nitrogen bias productivity; water nitrogen regime

Received: 2023-10-27

Revised: 2023-12-16

Accepted: 2024-01-22

棉花作为一种高价值经济作物,是世界最主要的农产品作物之一,更在新疆国民经济和民族政策中占据重要地位<sup>[1]</sup>。2022年,新疆棉花种植面积及总产量占全国的83.22%和90.20%<sup>[2]</sup>。现阶段农户以追逐高产为目的,盲目施加氮肥现象愈加严重,新疆农用氮肥折吨量由1987年 $14.2 \times 10^4$  t升高至2020年 $105.18 \times 10^4$  t<sup>[3-4]</sup>,与此同时,水资源短缺,农业用水供需矛盾现象普遍存在。过量施氮和不合理灌溉成为现阶段亟待解决的问题<sup>[5]</sup>。因此,解决棉花种植过程中的资源浪费,在确保稳产基础上,制定合理的减氮灌溉制度,有助于北疆地区棉花的高效生产。

作物对氮肥的吸收、转运和利用依赖于土壤水分,二者存在明显的交互效应<sup>[6]</sup>。水分过量施入,不仅造成氮素淋失,还降低土壤氧气含量,硝化作用被抑制,肥效降低,棉花减产;水分亏缺导致作物生长受到限制,降低作物根系养分的供应;氮肥的过量投入使干旱效应胁迫程度增大,养分得不到充分利用,产量减少。前人<sup>[7]</sup>研究表明,在常规水肥管理模式基础

上适量减氮有利于提高棉花氮肥表观利用率,并达到稳产甚至增产增效,与常规施氮量相比,减氮20%可达到增产增效结果。宋喜山等<sup>[8]</sup>、张沅等<sup>[9]</sup>研究表明,灌溉定额直接影响棉花产量及水分利用效率,其关系符合二次抛物线形式,遵循“报酬递减规律”。孟妍君等<sup>[10]</sup>、CUI等<sup>[11]</sup>研究发现,水氮之间存在明显交互效应,并且对提高作物产量方面,灌溉定额贡献大于施氮量;GOULDING等<sup>[12]</sup>研究发现,可在产量稳定的同时,降低水肥施入量,有效提高资源利用情况,减少农田环境污染。上述大量学者主要研究灌溉定额或氮肥减施单因素改变下对棉花产量及水氮利用效率的影响,但是以减氮为基础的水氮耦合研究尚不全面。

由于田间试验受季节因素限制,且极易受外界不可控因素影响,因此,近几年,国内外学者通过对作物生长阶段主要表现特征间的复杂关系,利用模型预测不同处理下作物的响应情况。AquaCrop作为水分驱动模型,能够通过输入不同水分,肥料等变量,模拟

作物生长、水分利用情况及产量的预测<sup>[13]</sup>,目前,该模型已被广泛运用于小麦、大豆、玉米、棉花、香梨、藏红花等作物,并对其生长及生产力有较好的模拟。拟采用 AquaCrop 模型模拟多情景下棉花生长生产及水氮利用效率,突破大田试验中实施多梯度减氮与灌水方案的局限性。因此,明确 AquaCrop 模型对棉田生育期内减氮条件下棉花生长与生产模拟适用性,为 AquaCrop 模型在不同施肥条件下的应用提供经验。在 AquaCrop 模型有较好适用性的基础上,探究棉花在不同减氮与灌水组合下的生长反映,研究水氮耦合对棉花水肥利用效率的影响,在稳产前提下,缩小减氮与灌水试验梯度,对棉田生育期内水氮制度进行优

化,为干旱区棉花种植过程中提升水分及氮肥利用效率提供理论依据和科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2022 年 4 月至 2023 年 10 月在新疆生产建设兵团第八师石河子市现代节水灌溉兵团重点实验室(44°19′28″N,85°59′47″E)进行。试验地属温带大陆性气候,昼夜温差大,地表蒸发强烈,土质为粉砂壤土,试验区海拔 451 m,平均地面坡度 6‰,多年平均气温为 8.3 ℃,年均蒸发量 1 660 mm,年均降水量 207 mm,无霜期 170 天,地下水埋深 8 m 左右。试验区土壤基本性状见表 1。

表 1 土壤基本参数

Table 1 Basic soil parameters

土层深度/cm	颗粒分布/%			土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%	硝态氮含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤类型
	黏粒(<0.002 μm)	粉粒(0.05~0.002 μm)	砂粒(5~0.05 μm)					
0—20	5.84	61.76	32.40	1.53	26.78	37.69	11.11	粉砂壤土
20—40	9.51	68.27	22.22	1.59	31.23	23.42	7.26	粉砂壤土
40—60	7.36	70.39	22.25	1.67	41.87	7.99	1.91	粉砂壤土
60—80	6.82	78.85	14.32	1.72	29.86	2.48	0.78	粉砂壤土
80—100	4.99	58.15	36.86	1.75	28.56	1.64	0.24	粉砂壤土

注:表中田间持水量为土壤体积含水率。

### 1.2 试验设计

2022—2023 年在试验站进行大田试验,供试棉花品种为新陆系列“新陆 42 号”,采用“1 膜 2 管 4 行”种植模式,播种时间分别为 2022 年 4 月 19 日和 2023 年 4 月 23 日,单个试验小区面积为 1.1 m×5.0 m。采用滴灌系统灌溉,毛管为单翼迷宫式滴灌带,滴头间距 30 cm,滴头流量 2.6 L/h。播种间距为 15 cm—20 cm—40 cm—20 cm—15 cm,覆膜宽度 1.1 m,株距 10 cm,棉花布置形式见图 1。

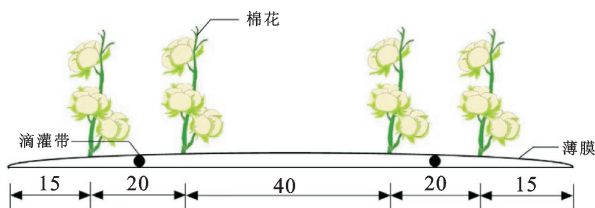


图 1 棉花布置

Fig. 1 Diagram of cotton layout form

试验设定 W1、W2、W3 的 3 个不同灌溉定额,分别为 488(常规灌溉量+10%),444(常规灌溉量)和 400 mm(常规灌溉量-10%);设置 N1、N2、N3、N4 的 4 个施氮肥水平,分别为 440(常规施氮量)、387(-10%氮肥)、336(-20%氮肥)、294 kg/hm<sup>2</sup>(-30%氮肥),进行完全组合设计,共 12 组处理,每个处理重复 3 次(表 2)。试验所用肥料为氮肥(尿素)。

为满足棉田需要,另施磷酸二氢钾,但对该肥用量不做处理。

表 2 大田试验设计

Table 2 Field trial design

处理	施氮水平	施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌溉水平	灌溉定额/(mm)
N1W1	N1	420.00	W1	488
N1W2	N1	420.00	W2	444
N2W3	N1	420.00	W3	400
N2W1	N2	378.00	W1	488
N2W2	N2	378.00	W2	444
N2W3	N2	378.00	W3	400
N3W1	N3	336.00	W1	488
N3W2	N3	336.00	W2	444
N3W3	N3	336.00	W3	400
N4W1	N4	294.00	W1	488
N4W2	N4	294.00	W2	444
N4W3	N4	294.00	W3	400

### 1.3 田间观测项目及方法

1.3.1 气象数据获取 农田大气温度、降雨量由该试验站农田微气象站提供,监测降雨量、气温、相对湿度、风速、气温等气象指标,将其输入至 AquaCrop 模型。2022 年及 2023 年棉花生育期内气温,降雨量及参考作物腾发量见图 2。

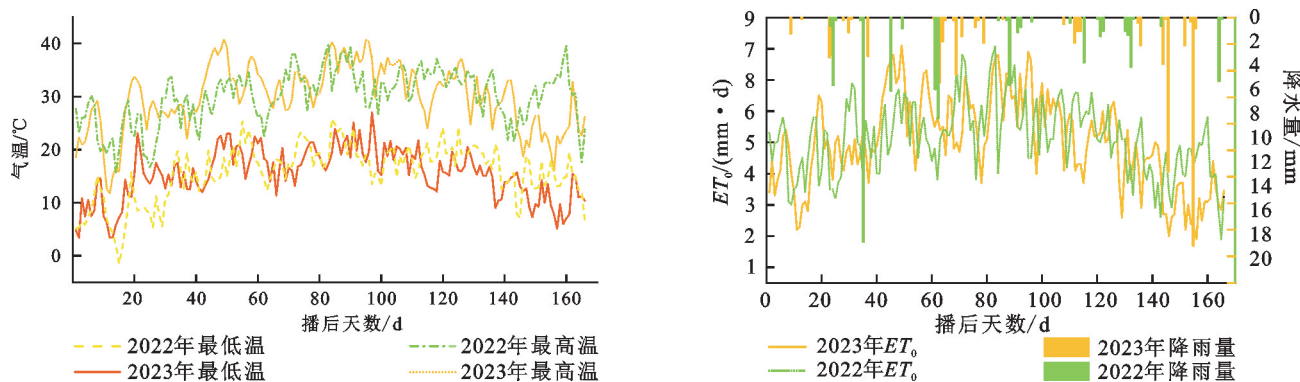


图 2 2022—2023 年棉花生育期内气象数据

Fig. 2 Meteorological data during the reproductive period of cotton, 2022—2023

## 1.3.2 土壤数据测定 (1) 土壤体积含水量的测定

土壤含水量采用烘干法测定。土壤体积含水量 ( $W_i$ ) 计算公式为:

$$W_i = \theta_i \times \rho_i \quad (1)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  层土壤体积含水量 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\theta_i$  为第  $i$  层土壤质量含水量 ( $\text{g}/\text{g}$ );  $\rho_i$  为第  $i$  层土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

## (2) 土壤养分含量的测定

将风干土样与 2 mol/L 的 KCl 浸提液以 1 : 5 比例进行混合, 振荡离心。

土壤硝态氮含量的测定在紫外分光光度计 220, 275 nm 波长处进行比色, 利用吸光度在标准曲线上查出土壤浸出液中硝态氮含量, 并通过公式计算土壤硝态氮含量:

$$NN = (\rho_N - \rho_0) \times (R_1 + R_2) \quad (2)$$

式中:  $NN$  为土壤硝态氮含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $\rho_N$  为在标准曲线上查出的土壤浸出液中硝态氮含量 ( $\text{mg}/\text{L}$ );  $\rho_0$  为在标准曲线上查出空白试验中硝态氮含量 ( $\text{mg}/\text{L}$ );  $R_1$  为浸提液体积与烘干土的比例系数 ( $\text{mL}/\text{g}$ );  $R_2$  为土壤水分体积与烘干土的比例系数 ( $\text{mL}/\text{g}$ )。

土壤铵态氮含量的测定为浸出液中加入苯酚溶液、次氯酸钾溶液及掩蔽剂后加蒸馏水定容。在紫外分光光度计 625 nm 波长处进行比色, 利用吸光度在标准曲线上查出土壤浸出液中铵态氮含量, 并通过公式计算土壤铵态氮含量:

$$AN = \frac{\rho \times V \times D}{m} \times (1 + \frac{\omega_w}{100}) \quad (3)$$

式中:  $AN$  为土壤铵态氮含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $\rho$  为在标准曲线上查出显色液中铵态氮含量 ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ );  $V$  为显色液定容体积 ( $\text{mL}$ );  $D$  为分取倍数;  $m$  为新鲜土样质量 ( $\text{g}$ );  $\omega_w$  为以风干土计的土壤水分质量分数 (%)。

## 1.3.3 棉花生长指标测定 (1) 冠层覆盖度 (CC)

利用叶面积指数 (LAI) 计算获得。自棉花出苗期后, 以 10 天为周期在每个小区定株测量叶片的长度和宽度, 计算得出冠层覆盖度 (CC)。LAI 计算公

式为:

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} \times B_{ij})}{m} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为作物种植密度 ( $\text{株}/\text{hm}^2$ );  $m$  为测定株数;  $L_{ij}$  为所测叶片最大长度 ( $\text{m}$ );  $B_{ij}$  为所测叶片最大宽度 ( $\text{m}$ );  $i$  为叶片数;  $j$  为棉花株数; 0.75 为叶面积回归系数。

冠层覆盖度的计算公式为:

$$CC = 1.005(1 - e^{-0.6LAI})^{1.2} \quad (5)$$

## (2) 地上生物量及产量

在棉花各个生育期测定地上部生物量 (茎, 叶, 蕾, 铃), 每个小区采 3 株具有代表性的棉花株样, 截断地下部后于 105 °C 杀青 30 min, 放置 75 °C 下干燥至恒重, 对其质量进行称量。根据种植密度和面积对各处理总生物量进行计算。

在棉花生育期末, 对各处理棉花进行采收, 测定各处理下棉花株数、单铃质量、总铃数, 利用公式对其理论产量进行计算:

$$Y = 0.01 n_p \times \omega \times \rho \quad (6)$$

式中:  $Y$  为籽棉产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $n_p$  为单株棉铃数 (个/株);  $\omega$  为单铃质量 ( $\text{g}$ )。

## (3) 棉花耗水量

通过农田水量平衡法计算耗水量, 计算公式为:

$$ET = W_T + P_0 + K + M + W_0 - W_t \quad (7)$$

式中:  $ET$  为某时段内的作物耗水量 ( $\text{mm}$ );  $W_T$  为由于计划湿润层增加而增加的水量 ( $\text{mm}$ );  $P_0$  为土壤计算湿润层内保存的有效降雨量 ( $\text{mm}$ );  $K$  某时段内平均每昼夜地下水补给量 ( $\text{mm}$ );  $M$  为某时段内的灌溉水量 ( $\text{mm}$ );  $W_0$ 、 $W_t$  分别为某时段末与时段初的土壤计划湿润层内的储水量 ( $\text{mm}$ )。(本试验地的地下水埋深较深, 地下水补给量为 0)。

## (4) 水分利用效率

水分利用效率是指大田中作物蒸散消耗单位水

分所制造出的干物质量或产量。计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (8)$$

式中:ET 为作物耗水量(mm)。

(5) 氮肥偏生产力

氮肥偏生产力是指大田中肥料氮的单位施入所制造出的棉花籽棉产量。计算公式为:

$$PFP = \frac{Y}{T} \quad (9)$$

式中:T 为棉花生育期肥料氮的总施加量(kg/hm<sup>2</sup>)。

1.4 数据统计处理

采用 Excel 2007 和 spss 26 软件进行数据处理、统计分析及综合评价,综合分析采用主成分排序法,将多个灌溉施氮量下的水氮利用效率、产量、成本投入为数值变量,降维进行因子分析,最后将主成分得分进行排序,筛选出最优灌溉施氮制度;使用 Origin 2018 软件进行绘图处理。

1.5 模型率定

在 AquaCrop 模型中输入气候数据、作物生长数据、灌溉系统、田间管理、土壤剖面及地下水基本数据搭建基本数据网,通过输入 2022 年不同灌水、施肥梯度下大田试验的实测数据对模型可调试参数进行校准,利用 2023 年同条件下各实测数据对率定后模型参数进行验证(表 3)。E<sub>NS</sub>、NRMSE、RMSE、R<sup>2</sup> 等统计指标评估实测值与模拟值之间误差及准确度(表 4)。

表 3 AquaCrop 模型部分模块参数

Table 3 Parameters of some modules of the AquaCrop model

符号	定义	取值	单位
Tbase	基底温度	15	°C
Tupper	上限温度	35	°C
CC0	初始覆盖度	1.01	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
CGC	冠层增长系数	10.0	°C/d
CCx	最大冠层覆盖度	90	%
CDC	冠层衰减系数	9.8	°C/d
Zx	最大有效生根深度	0.80	m
Rexshp	根区平均膨胀速率	0.6	cm/d
Kcb	作物系数	1.1	—
WP	标准水分生产力	18	g/m <sup>2</sup>
HI	参考收获参数	34	%
Ksexp, w.upper	限制冠层伸展的土壤水分消耗上限阈值	0.25	—
Ksexp, w.lower	限制冠层伸展的土壤水分消耗下限阈值	0.65	—
Kssto.upper	气孔控制:土壤水分耗竭阈值上限阈值	0.35	—
Kssen.upper	冠层衰老的土壤水分耗竭因子上限阈值	0.60	—

表 4 肥料胁迫参数取值

Table 4 Fertilizer stress parameter values

施肥水平	模型参数				肥料胁迫下 相应的土壤	
	冠层衰减程度	平均冠层减少/%	冠层扩张减少/%	相对生物量/%	最大冠层覆盖度/%	肥力压力/%
减肥 30% (N4)	small	0.02	12	60	72	30
减肥 20% (N3)	small	0.01	7	73	79	20
减肥 10% (N2)	small	0.01	3	85	86	10
常规施肥 (N1)	Not considered					

1.6 模型模拟情景设定

利用校核后参数,进行 AquaCrop 模型多组数据模拟,模拟设定灌溉定额在 300~600 mm 范围内,以 60 mm 为梯度,施氮量在常规施氮量至减氮 30% 范围内以 6% 为梯度,共设置 36 个减氮与灌水组合情景(以实测数据分析为依据)。最终以稳产增效为目的,利用 SPSS 中主成分排序法进行综合评价,确定最优减氮条件下水肥灌溉制度。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对土壤养分、棉花产量及水氮利用效率的影响

施氮灌溉水平对土壤养分均有显著影响。相同灌溉定额下,生育期末 0—60 cm 土层土壤硝态氮、铵态氮含量均随施氮量的增加而增加,W1、W2、W3 灌溉定额下,N1 处理较 N4 处理硝态氮含量分别增加 36.94%, 21.32%, 18.50%, W1 灌溉定额下,0—60 cm 土层内硝态氮含量对产量影响最大;N1、N4 处理下灌溉定额与硝态氮分别呈正相关、负相关,W1N1 处理土壤硝态氮、铵态氮含量分别高于 W3N1 处理 11.55%, 15.70%;W1N4 处理土壤硝态氮、铵态氮含量分别低于 W3N4 处理 9.68%, 22.64%。N2 处理下,硝态氮随灌溉定额的增加呈“降—增”趋势;N3 处理下,硝态氮随灌溉定额的增加呈“增—降”趋势,铵态氮与硝态氮变化一致。N2、N3、N4 处理下,灌溉定额在常规灌溉定额基础上增加时,产量与土壤中养分含量变化趋势保持一致。

灌溉定额与施氮量直接影响棉花产量及水氮利用效率,通过 2 年试验数据分析表明,各处理间存在差异。由表 5 可知,相同灌溉定额下,各施氮处理,产量间具有显著差异,W1、W3 较 W2 处理受施氮影响更加显著,随着氮肥胁迫程度增加,产量显著降低,W1、W2、W3 灌溉定额下,N1 处理较 N4 处理产量分

别增加 34.00%, 19.72%, 25.38%, 2023 年不同处理表现一致。相同施氮量下, 不同灌溉水平, 产量差异不显著, 施氮量减少 10% 和 20% 时, 灌溉定额的增减均可负反馈调节棉花产量, W1N2 处理产量高于 W2N2 处理 1.48%, W3N3 处理产量高于 W2N3 处理 5.43%; 施氮量减少 30% 时, 灌溉定额的增减均负反馈调节产量, W1N4、W3N4 处理分别低于 W2N4 处理 8.10% 和 1.77%。比较 2 年不同处理棉花产量结果均表明, W1N1 处理棉花产量最高, W3N4 或 W1N4 处理棉花产量最低, 因此, 正常施氮时可通过增加 10% 灌溉定额达到增产目的, 而在减少 30% 施氮量时, 常规或增加 10% 的灌溉定额可尽量减少经济损失。

棉花水分利用效率受棉花产量和生育期棉花耗

表 5 水氮耦合对棉花产量、水分利用效率、氮肥偏生产力、土壤养分的影响

Table 5 Effect of water—nitrogen coupling on cotton yield, water use efficiency, nitrogen bias productivity, and soil nutrients

年份	处理	产量×10 <sup>3</sup> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	生育期末 0—60 cm 土层	
					土壤硝态氮平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤铵态氮平均含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
2022 年	W1N4	3.63±0.08fg	6.75±0.34e	12.35±0.25g	17.58±0.73g	4.21±0.23g
	W1N3	3.92±0.11fg	7.54±0.22cde	11.67±0.18g	19.61±0.80ef	5.83±0.40e
	W1N2	4.77±0.18de	8.22±0.53bcd	12.62±0.30g	24.96±0.35b	7.66±0.35bc
	W1N1	5.50±0.13b	9.28±0.36b	13.10±0.10f	27.88±0.98a	9.42±0.25a
	W3N4	3.88±2.01g	7.34±0.30e	13.20±0.13g	19.61±0.24ef	5.03±0.17f
	W3N3	4.42±0.10e	8.19±0.28bcd	13.15±0.13e	20.04±0.40de	5.42±0.11ef
	W3N2	4.73±0.16cd	8.67±0.46b	12.51±0.16c	23.11±0.29bc	7.01±0.10cd
	W3N1	5.20±0.19a	9.40±0.52a	12.38±0.13b	24.06±0.45bc	7.49±0.24bc
	W2N4	3.95±0.17f	7.37±0.20de	13.44±0.05e	18.83±0.50ef	5.42±0.14ef
	W2N3	4.18±0.13ef	7.46±0.21cde	12.44±0.30c	21.96±0.51cd	5.91±0.10e
	W2N2	4.75±0.12cd	8.27±0.47bcd	12.57±0.20b	22.07±0.16cd	6.57±0.14d
	W2N1	4.92±0.04bc	8.48±0.53bc	11.71±0.22a	24.71±0.46b	7.82±0.07b
2023 年	W1N4	4.04±0.05e	7.94±0.51g	13.74±1.28g	18.95±0.50g	4.51±0.17f
	W1N3	4.18±0.28c	7.55±0.70f	12.44±0.70f	20.93±0.45ef	5.81±0.06e
	W1N2	4.56±0.31b	8.03±0.79e	12.07±0.75e	25.71±0.65bc	8.17±0.06e
	W1N1	5.13±0.44a	8.88±0.38c	12.20±0.95c	28.58±0.23a	9.62±0.17a
	W3N4	3.93±0.06de	7.72±0.43e	13.38±0.16e	20.98±0.24ef	5.83±0.34e
	W3N3	4.11±0.69cd	7.97±0.11e	12.23±0.99e	21.57±0.11e	5.96±0.35e
	W3N2	4.57±0.06b	8.82±0.56c	12.09±0.52c	24.38±0.32cd	7.38±0.29c
	W3N1	5.11±0.59a	9.84±0.65a	12.17±0.29b	25.28±0.21bc	8.11±0.25b
	W2N4	3.95±0.14e	7.46±0.80f	13.43±0.06d	20.01±0.10fg	5.72±0.28e
	W2N3	4.10±0.11cd	7.51±0.48f	12.20±0.46c	23.01±0.47d	6.18±0.37de
	W2N2	4.57±0.07b	8.27±0.15d	12.09±0.42b	23.19±0.18d	6.84±0.24cd
	W2N1	5.03±0.08a	9.04±0.72b	11.96±0.26a	26.02±0.18b	8.21±0.08b

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著。

## 2.2 AquaCrop 模型参数率定与验证

### 2.2.1 棉花冠层覆盖度与生物量的率定与验证

AquaCrop 模型参数校准验证见图 3、图 4。棉花在生育初期, 受灌溉施肥影响, 根系不断吸收并输送养分至各器官, 叶片增加并不断舒展, 冠层覆盖度迅速增

加, 在播种 80 天后达到最大值, 随着生育期推进, 各器官营养物质向棉铃运移, 棉花停止营养生长并进入生殖生长, 叶片光合强度降低后, 叶绿素被分解, 叶片开始脱落, 冠层覆盖度逐渐降低, 生物量累积缓慢。

2022 年各处理冠层覆盖度评价指标为 0.936 <

$R^2 < 0.997$ ,  $3.99\% < \text{NRMSE} < 12.41\%$ ,  $0.94 < E_{\text{NS}} < 0.99$ , 各处理生物量评价指标为  $0.963 < R^2 < 0.996$ ,  $1.36\% < \text{NRMSE} < 40.58\%$ ,  $0.72 < E_{\text{NS}} < 0.99$ ; 2023 年冠层覆盖度和生物量模拟值与实测值进行对比, 各处理冠层覆盖度评价指标为  $0.989 < R^2 < 0.996$ ,  $4.13\% < \text{NRMSE} < 14.03\%$ ,  $0.94 < E_{\text{NS}} <$

$0.99$ , 各处理生物量评价指标为  $0.975 < R^2 < 0.997$ ,  $1.96\% < \text{NRMSE} < 19.83\%$ ,  $0.94 < E_{\text{NS}} < 0.99$ 。上述结果表明, 各处理模拟值与实测值误差在允许范围内, 验证拟合度较高, 因此, AquaCrop 模型可较好模拟不同水氮处理下棉花的冠层覆盖度及生物量的变化情况。

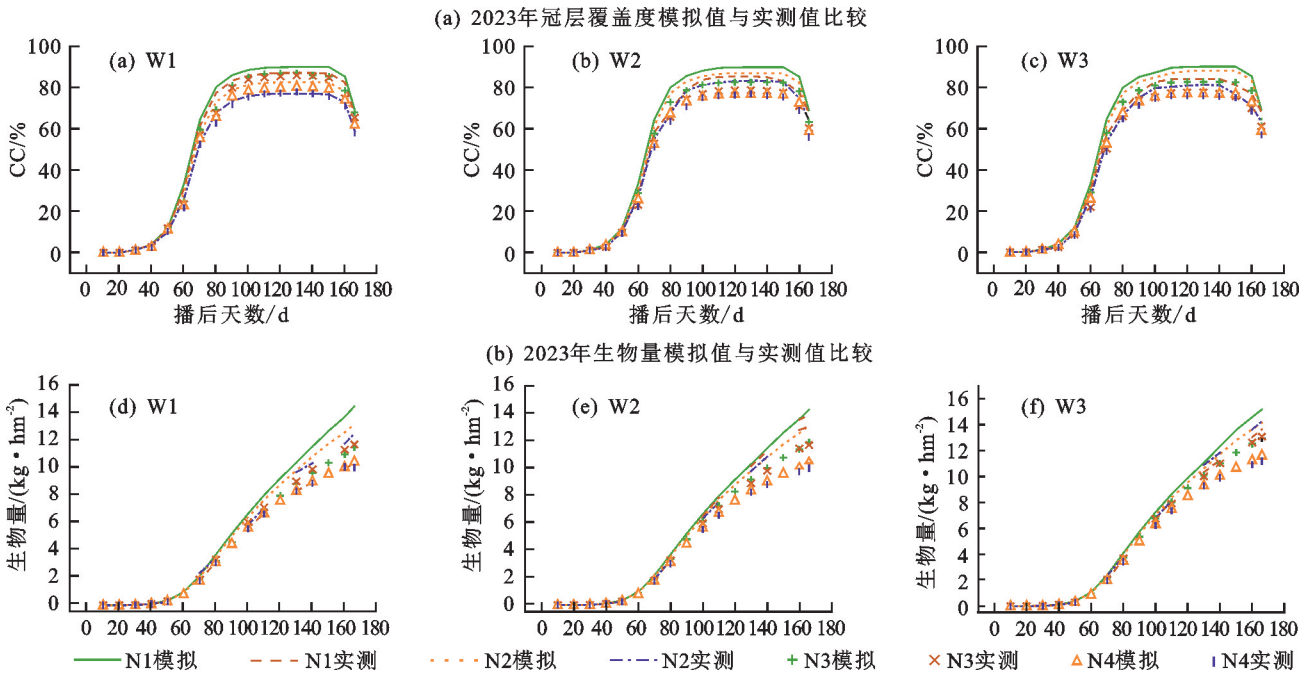


图 3 2022 年棉花冠层覆盖度与地上积累生物量的模拟值与实测值率定

Fig. 3 Simulated versus measured rates of cotton canopy cover and aboveground accumulated biomass in 2022

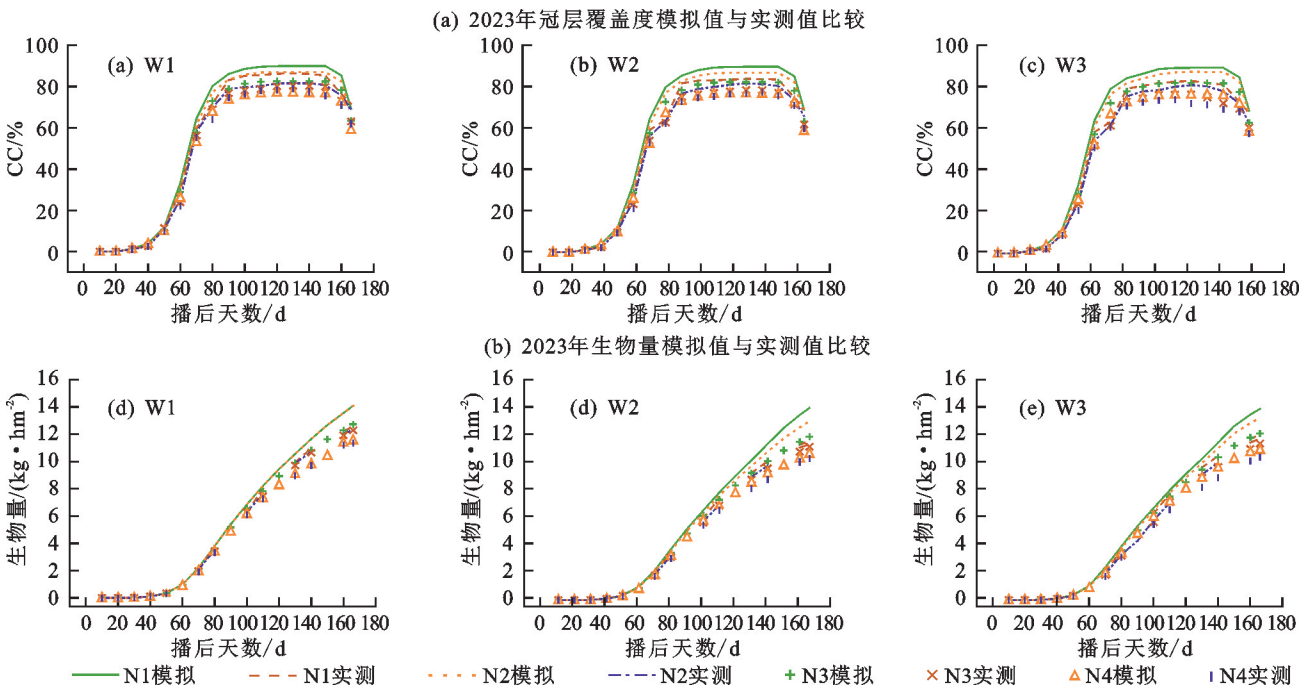


图 4 2023 年棉花冠层覆盖度与地上积累生物量的模拟值与实测值验证

Fig. 4 Verification of simulated and measured values of cotton canopy coverage and aboveground biomass accumulation in 2023

2.2.2 棉花产量和水分利用效率校验 对比 2022 年棉花产量及水分利用效率模拟值与实测值(图 5), 各评价指标  $R^2$  分别为 0.91, 0.87, NRMSE 分别为

4.29%, 4.22%,  $E_{\text{NS}}$  分别为 0.89, 0.87; 对比 2023 年棉花产量及水分利用效率模拟值与实测值, 各评价指标  $R^2$  分别为 0.93, 0.91, NRMSE 分别为 3.94%, 4.06%,

$E_{NS}$  分别为 0.85, 0.81。上述结果表明, 2 年各处理棉花产量与水分利用效率模拟均符合精度要求, 棉花产量

模拟精度优于水分利用效率。因此, AquaCrop 模型可较好模拟不同水氮处理下棉花产量及水分利用效率。

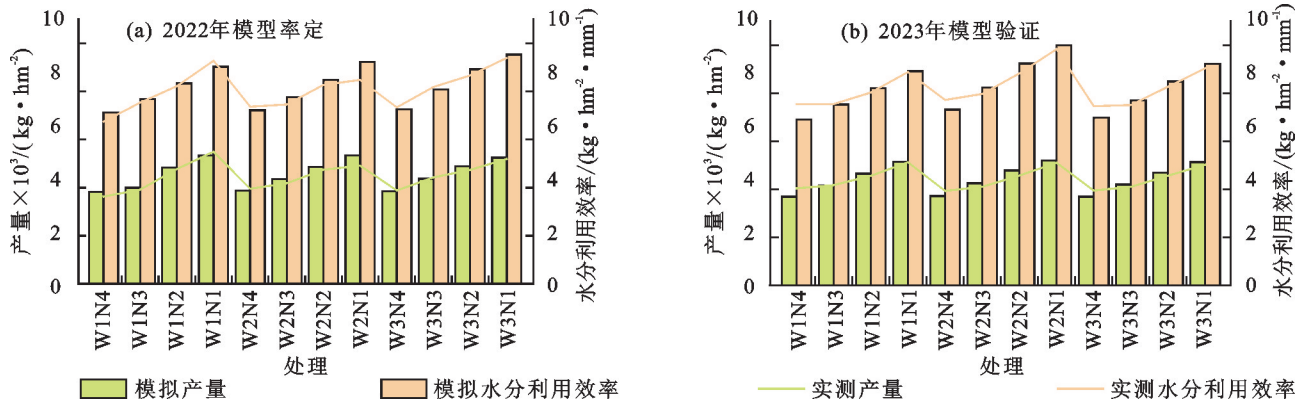


图 5 各处理棉花产量和水分利用效率模拟值与实测值比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of cotton yield and water use efficiency for each treatment

### 2.3 减氮条件下基于 AquaCrop 模型滴灌棉花水肥制度优化

模型模拟可解决大田试验中人力短缺、空间、资源有限等问题。利用 AquaCrop 模型校核后参数, 进行增密梯度下 25 组不同减氮与灌水组合情景模拟, 探究基于棉花产量及水氮利用效率最优的减氮与灌水制度。由图 6a 可知, 随着灌溉定额增加, 产量呈“增—降—缓增—缓降”趋势; 氮肥胁迫程度增加, 实现产量增幅较大时的灌溉定额越小, 在灌溉定额为 420~540 mm 时, 灌溉定额对产量的效应呈小幅增长后降低趋势, 施氮量较低时则无显著变化; >540 mm 灌溉定额后, 各施氮处理产量基本保持不变。由此可见, 过量灌溉对增产并无明显效应。

水肥利用效率受田间管理、气象因素、土壤性质等多因素影响, 由图 6b 可知, 随着施氮量降低, 水分利用效率呈递减趋势, 随着灌溉定额升高, 水分利用效率逐渐降低并趋于稳定。由图 6c 可知, 不同施氮条件下, 灌溉定额对氮肥偏生产力的影响呈先增加后

降低趋势, 随灌溉定额增加, 施氮量减少 30% 对棉花提高氮肥偏生产力变幅最大, 施氮量减少 6% 时棉花提高氮肥偏生产力变幅最小。灌溉定额 < 360 mm, 减氮 < 12% 时, 增加灌溉定额或施氮量均显著影响产量及氮肥偏生产力, 随着施氮量胁迫程度增加, 减少灌溉定额可使产量、水分利用效率和氮肥偏生产力显著增加。综合上述模拟结果, 由于在灌溉定额 > 360 mm 后, 各施氮处理产量达到最大值并基本保持不变, 水分利用效率和氮肥偏生产力持续降低, 在 420 mm 灌溉定额后趋平稳; 因此, 在 360 mm 灌溉定额下对产量、水分利用效率及氮肥偏生产力进行综合效益评价见表 6, 利用 SPSS 主成分排序法计算获得, 减氮 6% 和减氮 12% 处理在 360 mm 灌溉定额下, 所得综合评价分数较高, 减氮 6% 较减氮 12% 增加产量与氮肥施加量分别为 0.12 和 24 kg/hm<sup>2</sup>, 因此, 考虑前期成本投入与环境可持续发展, 在北疆干旱地区, 推荐使用减氮 12%, 灌溉定额为 360 mm 施氮灌溉方案, 具体方案见表 7。

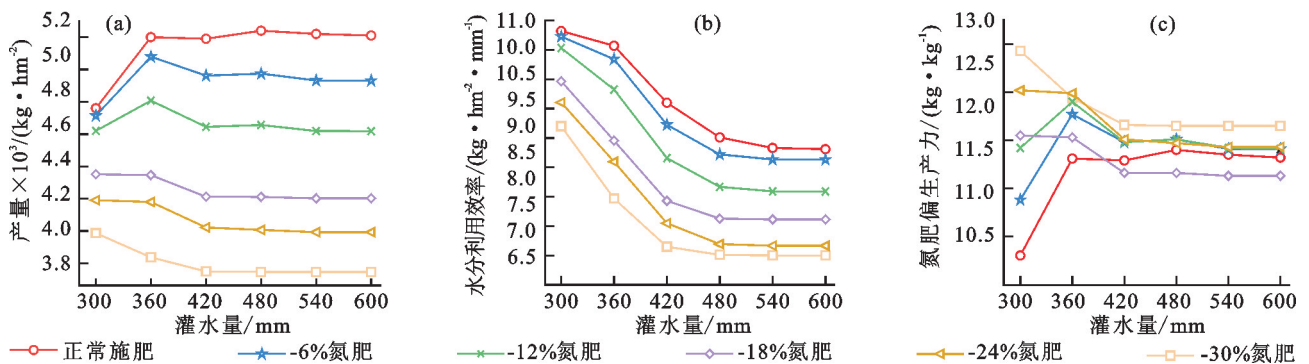


图 6 不同水氮处理下棉花产量和水分利用效率变化情况

Fig. 6 Changes in cotton yield and water and nitrogen use efficiency under different water and nitrogen treatments



### 3 讨论

#### 3.1 不同水氮制度对土壤养分、产量及水氮利用率的影响

土壤速效氮作为作物快速吸收利用的直接来源,其含量作为评价土壤肥力的重要指标。秦宇坤等<sup>[14]</sup>研究表明,土壤硝态氮与铵态氮含量均随施氮量增加而增加,其中,硝态氮增加效果显著;ZHANG 等<sup>[15]</sup>研究表明,土壤硝态氮含量随灌溉定额和施氮量增加而增加。本研究中,施氮量减少 10% 和 20% 时,随灌溉定额增加,土壤养分含量变化趋势不尽相同,表明

施氮量在一定范围内减少时,土壤养分含量受灌溉定额影响并不显著;施氮量减少 30% 时,土壤养分含量随灌溉定额增加而减少,是由于灌溉定额的增加使土壤湿度增高,氮挥发占比增大,另外,0—60 cm 土层内,氮循环以淋失的外循环为主,随灌溉定额增加,淋失量增大,同时,作物的吸收使低水平氮肥施入下土壤中养分存蓄减少<sup>[16]</sup>;另外,相同灌溉定额下,土壤中硝态氮、铵态氮含量与棉花产量均呈正相关,表明较高的养分含量为土壤向作物根系输送营养提供良好的条件,从而提高作物产量。

表 6 灌溉定额为 360 mm 时各项指标综合分析结果排序表

Table 6 Ranking of the results of the comprehensive analysis of the indicators when the irrigation water volume is 360 mm

排序	减氮百分数(%)	产量×10 <sup>3</sup> / (kg·hm <sup>2</sup> )	水分利用效率/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	主成分值
1	6	5.20	10.57	11.81	1.412 96
2	12	5.08	10.34	12.27	0.701 55
3	18	4.81	9.82	12.40	0.153 87
5	24	4.35	8.96	12.03	-0.082 99
6	0	4.18	8.60	12.49	-0.877 23
7	30	3.84	7.97	12.44	-1.308 16

表 7 最优灌水施氮方案

Table 7 Optimal irrigation and nitrogen application programme

生育阶段	灌水量/mm	氮素/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
播种至出苗	44	
蕾期	始蕾期	26.4
	盛蕾至初花	39.6
	初花至盛花	66.0
	花铃期	52.8
	盛花结铃期	66.0
花铃期	结铃期	66.0
	铃期	26.4
	铃期	26.4
吐絮期	25	
	25	
合计	360	369.6

棉花产量受水氮作用影响显著,二者交互作用对棉花生育期发育至关重要。WANG 等<sup>[17]</sup>研究结果表明,低水平的灌溉不利于肥料的作用,并确定高产时施氮量与灌溉定额的区间;SI 等<sup>[18]</sup>研究表明,在水氮对产量的共同影响下,氮肥施用对产量的影响作用高于灌溉定额。本研究表明,水氮胁迫共同作用下将一定程度上抑制棉花产量,说明水分的减量在很大程度上导致棉花自营养生长期起的持续性缺水,从而使生殖生长期提前,铃蕾数量减少,同时,水分减少使氮肥从土壤向棉花根系的输送受到阻碍,营养得不到充分补给,棉花干物质积累量减少,生长缓慢,蕾铃质量

降低,最终导致产量的减少。

作物生长过程中,水分胁迫很大程度影响作物对水氮的利用情况。LI 等<sup>[19]</sup>研究表明,随着氮肥减量,氮素偏生产力呈升高趋势。本研究中,一定范围内的减少水分施入或维持正常氮肥施入量,均可提高作物的水分利用效率,但结果并不十分显著。同时,水分利用效率与氮肥偏生产力间存在显著关系,灌溉定额在适宜范围内,有利于增加根系伸长和根表面积分布,促进对土壤中氮素的消耗,减少根系附近土层中的氮残留量,积极影响着植株叶面积及蒸腾速率,从而改进水氮利用效率<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 AquaCrop 模型的适用性分析

基于 2 年棉花田间试验数据基础,AquaCrop 模型较精确的预测棉花生长过程中正常灌水施氮的冠层覆盖度及生物量动态变化过程。对于所有试验处理,AquaCrop 在棉花生长前期高估棉花冠层覆盖度,而在生育后期推迟对减水减氮处理下棉花叶片起始脱落时间,使生育期提前。本研究中,2022 年 W2N1 处理下冠层覆盖度模拟效果最好, $R^2$ 、NRMSE、 $E_{NS}$  分别为 0.984、4.5%、0.99,杨广等<sup>[21]</sup>模拟不同矿化度下棉花冠层覆盖度  $R^2$  和 NRMSE 分别为  $\geq 0.812$  和 3.1%~10.9%。本研究表明,AquaCrop 可精确模拟生育期内冠层覆盖度发展情况。灌水周期内受到水氮胁迫的棉花叶片中叶绿素含量较少,生育后期,叶片中的叶绿素不断分解、运

移,从而加剧对光合作用的抑制作用,导致叶片出现卷缩、枯黄和衰落,棉花早衰。本研究在 2022 年对 W2N3 处理下生物量模拟效果最好, $R^2$ 、NRMSE、 $E_{NS}$  分别为 0.963, 1.36%, 0.98, 在水分胁迫时,模拟精度较低。CHENG 等<sup>[22]</sup>、AZIZ 等<sup>[23]</sup> 等研究结果表明,水分胁迫使 AquaCrop 模型准确能力降低,模型性能略有影响。可能是因为在通过叶面积指数和经验公式计算水分胁迫下大田棉花冠层覆盖度时,往往忽略其种植模式及早期冠层覆盖度的增长差异,因此,在 AquaCrop 模型通过冠层覆盖度计算地上部生物量时,误差累积导致实测值与模拟值相差较大。

由于棉花生长和产量的构成受水氮胁迫影响显著,准确模拟棉花产量及水分利用对水氮胁迫灌溉至关重要。与水分利用效率相比,AquaCrop 对不同处理下产量模拟更加理想,与 EVETT 等<sup>[24]</sup> 的缺水情景下对水分利用效率模拟更加困难的研究结果基本一致。另外,施氮量在很大程度上影响蒸散强度,水分利用效率在不同施氮量下也因此具有可变性,但在模型模拟中,只对全生育期内作物受氮肥胁迫系数进行选择,不能对各生育阶段氮肥受胁迫程度进行量化,导致实测值与模拟值产生偏差。

### 3.3 北疆地区减氮条件下膜下滴灌棉花适宜水肥制度推荐

节水减氮利于棉花成本降低和环境友好发展,本试验表明,最佳灌水施氮处理为 W1N1。考虑到多处理不同灌溉梯度实施的复杂性,季节的限制性及相关成本的局限性。因此,基于当前研究灌水水平提供自 300 mm,梯度为 20 mm 的不同灌溉定额,通过 AquaCrop 模型适用性策略进行试验条件的扩增与模拟,对生育期灌溉定额与施氮量进行重新构建,优化灌溉施肥决策,预见最佳水肥制度。

模拟结果表明,常规施氮,灌溉定额 500 mm 时产量最高;减施 30% 氮肥,灌溉定额 500 mm 产量最低,并且产量不再受灌溉定额增加而产生响应。是因为外界条件和施氮量不变的理想情况下,当作物生育期灌溉补给根系层土壤水分至田间持水量,多余灌溉水从根区下渗,此时持续增加灌溉定额,根区深层渗漏量增大,作物生育期耗水量保持不变,作物对水分的吸收能力为最大值,从而使产量达到能力上限。在同一施氮量下,产量随灌溉定额增多呈先增后降趋势,但水分利用效率呈持续降低趋势,表明产量对作物生育期耗水量可能并不十分敏感,且随着灌溉定额增加,耗水量大于产量的变化幅度。灌溉定额 < 360 mm,以正常施氮量为上限,此范围内增加氮肥施量促进增水对氮肥偏生产力的响应,但依旧低于减氮条

件下的增水效果;施氮量较少时,随着灌溉定额增多,产量增多,氮肥偏生产力降低,说明灌溉定额对产量的贡献比重不断增加,直至作物在该施氮量下,最大程度地利用水分产生极限产量;施氮量正常水平时,灌溉定额增多,产量增多,氮肥有足够的水分将其输送至作物,直至达到作物需求量;另一方面,不同灌溉条件,当氮肥偏生产力达到同一施氮水平下最大值时,该水氮比即为当前可输送作物吸收氮肥最优灌溉定额以及可被作物充分吸收的施氮量之比。综合产量、水分利用效率及氮肥偏生产力三者之间关系,推荐减氮 6%, 360 mm 灌溉定额,与 SEPASKHAH 等<sup>[25]</sup> 学者得出 360 mm 灌溉定额为较优灌溉定额之一研究结果相吻合。

## 4 结论

(1) W1N1 处理可有效提高土壤耕作层内硝态氮和铵态氮含量。减施氮肥时可通过适当增加灌溉定额弥补产量损失,相同施氮量下,适当减少灌溉定额提高水分利用效率;相同灌溉定额下,适当减少施氮量提高氮肥偏生产力;

(2) AquaCrop 模型可精准模拟不同减氮下棉花生长生理指标动态变化过程,常规灌溉模拟效果优于亏缺灌溉;常规施氮、减氮 30% 分别对冠层覆盖度、生物量的模拟效果最好;

(3) 利用 AquaCrop 模型模拟不同减氮与灌水组合情景,依据水氮利用效率及产量进行综合考量后,推荐北疆膜下滴灌棉花采用减氮 12%, 360 mm 灌溉定额水肥制度。

### 参考文献:

- [1] 蔡焕杰,李府阳,赵政鑫,等.施氮对中国棉田产量和水分利用效率影响的 Meta 分析[J].农业机械学报,2023,54(12):316-326.  
CAI H J, LI F Y, ZHAO Z X, et al. Meta-analysis of the effect of nitrogen application on yield and water use efficiency in Chinese cotton fields[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 316-326.
- [2] 吴博,王文涛,戴翠荣,等.新疆阿拉尔垦区不同剂量甲哌(车翁)对新陆中 60 号农艺性状、产量和纤维品质的影响[J].中国棉花,2023,50(12):23-27.  
WU B, WANG W T, DAI C R, et al. Effects of different dosages of mepiquat chloride on agronomic traits, yield, and fiber quality of Xinluzhong 60 in aral reclamation area of Xinjiang[J]. China Cotton, 2023, 50(12): 23-27.
- [3] 国家统计局.中国统计年鉴 2020[M].北京:中国统计出版社,2020.  
Nbs. China statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China

- Statistics Press, 2020.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴 1987[M]. 北京: 中国统计出版社, 1987.  
Nbs. China statistical yearbook 1987[M]. Beijing: China Statistics Press, 1987.
- [5] 王全九, 王康, 苏李君, 等. 灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 300-312.  
WANG Q J, WANG K, SU L J, et al. Effect of irrigation amount, nitrogen application rate and planting density on cotton leaf area index and yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 300-312.
- [6] FENG Y Y, SHI H B, JIA Y H, et al. Multi-objective optimization water-nitrogen coupling zones of maize under mulched drip irrigation: A case study of West Liaohai Plain, China[J]. Agronomy, 2023, 13(2): e486.
- [7] LI Z Y, WANG B F, LIU Z H, et al. Ridge-furrow planting with film mulching and biochar addition can enhance the spring maize yield and water and nitrogen use efficiency by promoting root growth[J]. Field Crops Research, 2023, 303: e109139.
- [8] 宋喜山, 曹红霞, 何子建, 等. AquaCrop 模型在北疆棉花生育期灌溉洗盐制度优化中的适用性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 111-122.  
SONG X S, CAO H X, HE Z J, et al. Applicability of the AquaCrop model in optimization of irrigation and salt leaching schedule during the reproductive period of cotton in northern Xinjiang of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(20): 111-122.
- [9] 张滢, 何子建, 石浩磊, 等. 盐碱棉田地表-地下接力式滴灌下水盐分布及棉花生长特征[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 200-208.  
ZHANG Y, HE Z J, SHI H L, et al. Salt distribution and cotton growth characteristics of saline-alkali cotton field under surface-subsurface relay drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 200-208.
- [10] 孟妍君, 马鑫颖, 宋晨, 等. 水氮调控对棉花生理性状及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1379-1391.  
MENG Y J, MA X Y, SONG C, et al. Effects of water and nitrogen regulation on physiological characteristics and yield of cotton[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1379-1391.
- [11] CUI Z J, EFFAH Z, YAN B, et al. Water and nitrogen coupling increased the water-nitrogen use efficiency of oilseed flax[J]. Plants, 2022, 12(1): e51.
- [12] GOULDING K, JARVIS S, WHITMORE A. Optimizing nutrient management for farm systems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2008, 363(1491): 667-680.
- [13] XING H M, XU X G, LI Z H, et al. Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(11): 2444-2458.
- [14] 秦宇坤, 陈俊英, 王玉萍, 等. 不同减氮措施对棉花干物质积累特征参数、养分吸收及产量的影响[C]//中国农学会棉花分会. 中国农学会棉花分会 2021 年年会论文集. 江西省棉花研究所, 2021: 2.  
QIN Y K, CHEN J Y, WANG Y P, et al. Effects of different nitrogen reduction measures on the characteristic parameters of dry matter accumulation, nutrient uptake and yield of cotton. Compilation of papers from the 2021 Annual Meeting of the Chinese Society of Agriculture, Cotton Branch[C]. Cotton Branch of Chinese Society of Agriculture, Editorial Board of Journal of Cotton, 2021: 2.
- [15] ZHANG F, CHEN M R, FU J T, et al. Coupling effects of irrigation amount and fertilization rate on yield, quality, water and fertilizer use efficiency of different potato varieties in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287: e108446.
- [16] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.  
LIUX H, LU J, QI Y, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 1-12.
- [17] WANG H D, WU L F, WANG X K, et al. Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: e106662.
- [18] SI Z Y, GAO Y, SHEN X J, et al. Effects of nitrogen and irrigation water application on yield, water and nitrogen utilization and soil nitrate nitrogen accumulation in summer cotton[J]. The Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3945-3954.
- [19] LI Y, WANG F, SUN J S, et al. Coupling effect of water and nitrogen on mechanically harvested cotton with drip irrigation under plastic film in arid area of western Inner Mongolia, China[J]. The Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 845-854.
- [20] 李培岭, 张富仓. 不同沟灌方式下根区水氮调控对棉花群体生理指标的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 38-45.  
LI P L, ZHANG F C. Effect of root zone water and ni-

- trogen regulation on cotton population physiological indices under different furrow irrigation patterns [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 38-45.
- [21] 杨广, 雷杰, 孔春贤, 等. 膜下滴灌水源矿化度对棉花生长的影响及 AquaCrop 模拟[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 83-92.
- YANGG, LEI J, KONG C X, et al. Effects of water salinity on cotton growth in mulched drip irrigation and its simulation by AquaCrop model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 83-92.
- [22] CHENG M H, WANG H D, FAN J L, et al. Evaluation of AquaCrop model for greenhouse cherry tomato with plastic film mulch under various water and nitrogen supplies[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 274: e107949.
- [23] AZIZ M, AHMAD RIZVI S, SULTAN M, et al. Simulating cotton growth and productivity using AquaCrop model under deficit irrigation in a semi-arid climate[J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): e242.
- [24] EVETT S R, TOLK J A. Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management [J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 423-425.
- [25] SEPASKHAH A R, KANOONI A, GHASEMI M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(1): 67-79.