

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.020 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.020

李博,王春霞,汪思佳,等.基于RZWQM2模型的减氮滴灌棉田水氮制度优化[J].水土保持学报,2025,39(6):406-418,430.

LI Bo, WANG Chunxia, WANG Sijia, et al. Optimization of water and nitrogen management for nitrogen-reduced drip-irrigated cotton fields based on RZWQM2 model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):406-418, 430.

基于RZWQM2模型的减氮滴灌棉田水氮制度优化

李博^{1,2}, 王春霞^{1,2}, 汪思佳^{1,2}, 杨跃发^{1,2}, 张景瑞^{1,2}

(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] 基于北疆滴灌棉田田间试验数据得到适宜性较好的RZWQM2模型参数,探究棉花减氮稳产的最优减氮及灌水制度。 [方法] 利用田间试验的3个灌溉定额(400、444、488 mm)和4个施氮水平(294、336、378、420 kg/hm²)处理的实测数据对RZWQM2模型进行率定,利用率定好的RZWQM2模型模拟10种不同的灌溉定额(320、340、360、380、400、420、440、460、480、500 mm)与8种不同减氮水平(常规施氮、减氮4%、减氮8%、减氮12%、减氮16%、减氮20%、减氮24%、减氮28%)组合下的产量、水分利用效率、氮素偏生产力及氮素去向,利用综合评价方法优选出适宜的水氮制度。 [结果] 土壤体积含水率(RMSE 0.012~0.038 cm³/cm³)、硝态氮含量(RMSE 2.486~7.908 mg/kg)及产量(RMSE 167~406 kg/hm²)的模拟精度良好。模拟结果显示,灌水量≤360 mm时土壤氮矿化趋于稳定,超过360 mm灌溉量后显著增加氮损失(氨挥发+反硝化+淋失)。减氮措施可降低氮损失但导致产量下降。 [结论] 由主成分分析推荐优化方案为灌溉定额360 mm、减氮8%~12%(施氮量369.6~386.4 kg/hm²),该方案在稳产(4 310~4 439 kg/hm²)的同时,兼顾水分利用效率[8.74~9.00 kg/(hm²·mm)]与氮肥偏生产力(11.50~11.65 kg/kg),并显著减少氮素淋失。研究结果为干旱区滴灌棉田可持续性水氮管理提供理论依据和技术参考。

关键词: 减氮滴灌; RZWQM2模型; 水氮运移规律; 水氮管理优化; 棉花

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0406-13

Optimization of Water and Nitrogen Management for Nitrogen-Reduced Drip-Irrigated Cotton Fields Based on RZWQM2 Model

LI Bo^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2}, WANG Sijia^{1,2}, YANG Yuefa^{1,2}, ZHANG Jingrui^{1,2}

(1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2.Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: [Objective] Based on the field experiment data from drip-irrigated cotton fields in northern Xinjiang, parameters for the RZWQM2 model with high suitability were obtained to explore the optimal nitrogen reduction and irrigation regimes for stable cotton production with reduced nitrogen. [Methods] The RZWQM2 model was calibrated using the measured data from the field experiment with three irrigation quotas (400, 444, 488 mm) and four nitrogen application levels (294, 336, 378, 420 kg/hm²). The calibrated RZWQM2 model was then used to simulate the yield, water use efficiency, partial factor productivity of nitrogen, and nitrogen fate under the combinations of ten different irrigation quotas (320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500 mm) and eight different nitrogen reduction levels (conventional nitrogen application and reductions of 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24%, 28%). The optimal water-nitrogen management regime was selected by a comprehensive evaluation method. [Results] The simulation accuracy was satisfactory for soil volumetric water content (RMSE 0.012–0.038 cm³/cm³), nitrate nitrogen content (RMSE 2.486–7.908 mg/kg), and yield (RMSE 167–406 kg/hm²). The simulation results showed that soil nitrogen mineralization tended to stabilize when the irrigation amount

收稿日期:2025-04-29

修回日期:2025-06-12

录用日期:2025-06-20

网络首发日期(www.cnki.net):2025-09-12

资助项目:国家自然科学基金项目(52369012)

第一作者:李博(2002—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论及技术研究。E-mail:18648337363@163.com

通信作者:王春霞(1979—),女,教授,硕士生导师,主要从事节水灌溉理论及技术研究。E-mail:410443356@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

was ≤ 360 mm, while nitrogen losses (ammonia volatilization + denitrification + leaching) increased significantly when the irrigation amount exceeded 360 mm. Nitrogen reduction measures effectively decreased nitrogen losses but led to a decrease in yield. [Conclusion] Principal component analysis recommends an optimized scheme of 360 mm irrigation quota with 8%–12% nitrogen reduction (nitrogen application rate of 369.6–386.4 kg/hm²). This scheme can maintain stable yield (4 310–4 439 kg/hm²), while balancing water use efficiency [8.74–9.00 kg/(hm²·mm)] and partial factor productivity of nitrogen (11.50–11.65 kg/kg), significantly reducing nitrogen leaching. These findings provide a theoretical basis and technical reference for sustainable water-nitrogen management in drip-irrigated cotton fields in arid areas.

Keywords: nitrogen-reduced drip irrigation; RZWQM2 model; water and nitrogen transport patterns; water and nitrogen management optimization; cotton

Received: 2025-04-29

Revised: 2025-06-12

Accepted: 2025-06-20

Online(www.cnki.net): 2025-09-12

新疆作为我国优质棉花主产区,其棉花产业对区域经济发展具有重要战略意义^[1]。2024年国家统计局数据显示,新疆农牧民收入的1/3来源于棉花生产,全区棉花产量达568.6万t,占全国总产量的92.2%,较上年增长11.2%。然而,随着种植规模扩大和产量提升,农户为追求高产盲目增加氮肥投入,已有研究^[2]表明,新疆棉农户过量施肥现象普遍,氮肥实际过量施用率达59.6%,不仅导致耕层土壤板结和退化,土壤中氮素的累积还通过挥发、径流、淋洗的方式对农田环境造成污染^[3]。不合理的氮肥输入不仅破坏农田环境,还直接导致棉花贪青晚熟及僵铃脱落^[4],水分利用效率和氮肥农学效率下降^[5],间接导致棉花减产。因此,亟须探究适宜的水氮制度,在维系产量的同时减少氮素的污染。

减氮方面已有诸多研究,罗雪梅等^[6]通过设置减量施氮及配施等量有机肥处理研究发现,新疆绿洲棉花“连作+棉秆全量还田+高氮肥投入”农作制度下,无机氮减施9.9%~14.1%能够达到减氮稳产效果;邱月等^[7]采用缓释氮肥与尿素配施研究发现,减少20%施氮量可增强表层土壤团聚体稳定性,维持较高无机氮含量并减少淋失。这些研究均证实棉田氮肥施用存在较大减氮潜力,但仅通过大田的研究,很难在大区间里得到较为详细的减氮梯度。

为解决传统田间试验的局限性,国内外学者基于土壤水肥运移机制与环境特征,构建多种作物模型以突破传统观测的时空限制。其中,根区水质模型(RZWQM2)因其在描述土壤水氮运移及作物生长过程中的独特优势,成为农业系统模拟的重要工具。该模型起源于美国农业部开发的NTRM模型^[8],经NLEAP^[9]发展,最终形成RZWQM^[10]。最新版本RZWQM2通过整合DSSAT作物生长模块^[11]和PEST参数优化程序^[12],具备更强大的系统模拟能

力。该模型可输入气象、土壤及作物参数,通过设置不同水氮配比,实现对作物生长、水肥利用效率及产量响应的动态预测。近年研究显示,RZWQM2在滴灌棉花^[13]、冬小麦^[14]、夏玉米^[15]等作物系统中均表现出良好适用性。

然而,现有研究中将氮素去向与作物减氮制度优化相结合的研究较为缺乏,本研究通过RZWQM2模型设计减氮条件下的水氮耦合情景,系统分析不同水氮情景对棉田氮素去向的影响。在确保产量稳定及水氮利用效率的前提下,综合考虑氮素的损失,优化滴灌棉田减氮水氮制度,为干旱区棉花生产提供理论支撑与技术方案。

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试验基地(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8.3℃,年平均蒸发量1 660 mm,年平均降水量207 mm,无霜期170 d,地下水埋深8 m左右。试验区土壤基本性状见表1。

1.2 试验设计

2022—2023年在实验站进行大田试验,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,收获日期分别为2022年10月3日和2023年9月20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15 cm—20 cm—40 cm—20 cm—15 cm,覆膜宽度1.1 m,株距10 cm。

表 1 土壤基本参数
Table 1 Basic soil parameters

土层深度/ cm	颗粒分布/%			土壤体积质 量/(g·cm ⁻³)	田间持 水率/%	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	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	32.4	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

注:表中田间持水量为土壤体积含水率。

试验设定 3 个不同灌溉定额,分别为 488 mm (W1,常规灌溉量+10%)、444 mm(W2,常规灌溉量)和 400 mm(W3,常规灌溉量-10%);4 个施氮肥水平分别为 420 kg/hm²(N1,常规施氮量)、378 kg/hm²(N2,减氮 10%)、336 kg/hm²(N3,减氮 20%)、294 kg/hm²(N4,减氮 30%),进行完全组合设计,共 12 组处理,每个处理重复 3 次。试验所用肥料为氮肥(尿素),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。

试验各生育期的施肥方式为随灌溉水施肥,具体的灌溉施肥方案见表 2。

表 2 棉花灌溉施肥方案
Table 2 Cotton irrigation and fertilization scheme

生育阶段		灌水量占 比/%	施氮量占 比/%
播种至出苗		10	
蕾期	始蕾期	8	7
	盛蕾至初花	8	11
花铃期	初花至盛花	10	18
	花铃期	10	14
	盛花结铃期	10	18
	结铃期	10	18
	铃期	10	7
	铃期	10	7
吐絮期		7	
		7	

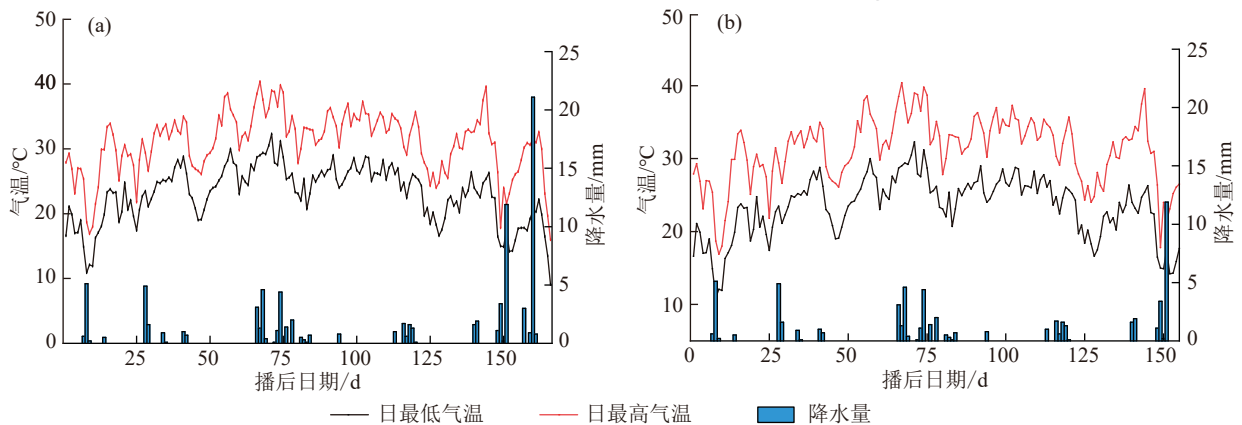


图 1 2022—2023 年气温和降水量
Fig.1 Temperature and rainfall data from 2022 to 2023

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

1.3 测定指标及方法

1.3.1 气象数据 1)基础气象数据的获取模型输入的初始参数大气温度、降水量、风速、相对湿度及日照时间均为数据由试验基地气象站提供。2022—2023 年棉花生育期内气温及降水量见图 1。

2)日照时间与太阳辐射值的换算 太阳辐射值的计算,需要通过 Angstrom 公式与已知的日照时间计算得出。

1.3.2 土壤数据测定 土壤体积含水量采用烘干法测定;土壤硝态氮含量利用紫外分光光度计法^[38]测定。

1.3.3 棉花生长指标测定 1)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^[35]进行计算:

$$Y=0.01n_p \times w \times \rho \quad (1)$$

式中:Y 为籽棉产量,kg/hm²;n_p 为单株棉铃数,个/株;w 为单铃质量,g。

2)棉花耗水量

通过农田水量平衡法^[16]计算耗水量,公式为:

$$ET = W_T + P_0 + K + M + W_0 - W_t \quad (2)$$

$$P_0 = P - P_{径} - P_{渗} \quad (3)$$

式中:ET为某时段内的作物耗水量,mm;W_T为由于计划湿润层增加而增加的水量,mm;P₀为土壤计算湿润层内保存的有效降雨量,mm;P为实际降雨量,mm;P_径为农田由于径流损失的水量,mm;P_渗为农田中由于深层渗漏损失的水量,mm;K为某时段内平均每昼夜地下水补给量,mm;M为某时段内的灌溉水量,mm;W₀、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,mm。

3)水分利用效率计算公式^[17]为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中:ET为作物耗水量,mm。

4)氮肥偏生产力计算公式为:

$$PFP = \frac{Y}{T} \quad (5)$$

式中:T为棉花生育期肥料氮的总施加量,kg/hm²。

1.4 RZWQM2 模型

根区水质模型(root zone water quality model)是制定科学水肥管理措施,预测土壤水氮动态运移的重要工具,在农业水肥管理、环境影响评价等方面有着广泛的应用。该模型采用Brooks-Corey方程描述土壤水分特征曲线和导水率特征曲线^[18];通过Green-Ampt方法模拟降雨、灌溉或融雪的人渗过程^[19];利用Richards方程模拟土壤水分再分布^[20];氮淋溶量由根区底部排水流量及孔隙水氮浓度决定。RZWQM2采用扩展的Shuttleworth-Wallace模型计

算潜在蒸发蒸腾^[21],并结合DSSAT-CROPGRO-cotton模块模拟棉花生长发育及水氮吸收利用。

在模型建立时需输入基本的气象数据(包括日最高气温、日最低气温、风速、平均相对湿度、短波辐射值)、土壤参数(包括土壤体积质量、颗粒分布、田间持水量、硝态氮及铵态氮含量、初始地温、初始土壤体积含水率、残茬等)、作物参数(包括作物品种、耕作方式、灌水时间及灌水量、施氮时间及施氮量等)作为模型的基础参数。

1.5 模型的率定

本研究利用2023年实测的膜下滴灌棉花的土壤体积含水率、硝态氮及铵态氮含量和产量、地上部生物量等结合手动试错法来率定RZWQM2模型的水分模块、养分模块及作物模块参数。分别利用统计学中的均方根误差(RMSE),平均相对误差(MRE)及正规化方均根差(NRMSE)来评估RZWQM2模型的可靠性。为定量评估模拟结果的准确性,将NRMSE模拟结果分为4类^[22]:极好(NRMSE<10%)、良好(10%<NRMSE<20%)、中等(20%<NRMSE<30%)、差(NRMSE>30%)。RMSE、MRE及NRMSE的计算公式^[23]为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2} \quad (6)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Q_{avg}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:N为模拟值或实测值个数;P_i和Q_i分别为第i个模拟值和实测值;Q_{avg}为实测值的平均值。率定后的作物参数见表3。

表 3 率定后作物参数

Table 3 Crop parameters after calibration

参数	名称	取值	
		率定前	率定后
EM-FL	作物萌发到开花的时间/d	30~50	30
FL-SH	初花到初荚的时间/d	8~12	8
FL-SD	初花到初铃的时间/d	12~20	12
SD-PM	初铃到棉花成熟的时间/d	40~60	48
FL-LF	初花到叶片完全展开的时间/d	52~75	75
LFMAX	在 30 °C、350 mg/kg CO ₂ 和最高光强下最大叶片光合速率/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)	0.95~1.15	1.15
SLAVR	正常生长条件下的作物比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)	170~250	170
SIZLF	全叶的最大尺寸/cm ²	250~300	250
XFRT	每日的种子和壳的最大分数比	0.5~1.0	0.96
WTPSD	每颗种子的最大质量/g	0.18	0.18
SFDUR	正常生长条件下荚群的灌浆持续时间/d	20~40	35
SDPDV	正常生长条件下每个荚的平均种子数	20~30	23
PODUR	最佳条件下培育品种达到最终荚果所需的时间/d	8~15	8

1.6 模型情景设置

基于田间试验的处理设置的空缺,选择10个不同的灌溉定额,分别为320、340、360、380、400、420、440、460、480、500 mm,灌水方式、灌水日期等灌水措施沿用大田试验。依据试验设置减氮量为正常施加量的4%~28%,设置基于初始施氮量420 kg/hm²的8个不同的以4%为梯度的减氮水平,分别为420、403、386、370、353、336、319、302 kg/hm²,共计80个灌水与减氮组合模拟情景。棉花的产量、各土层土壤水氮含量及全土层全生育期各项氮素去向总量、棉花蒸散量ET均通过模型直接得出;水分利用效率(WUE)及氮素偏生产力(PFP)由计算公式(4)和公式(5)得出。

2 结果与分析

2.1 RZWQM2模型适用性分析

2.1.1 土壤体积含水率时空分布规律及与验证 以N4W1、N4W2、N4W3处理为例验证土壤体积含水率模拟效果。由图2可知,0~20 cm土层中,模拟值在灌水和降雨后均出现峰值,实测值在苗期、蕾期、花铃期和吐絮期灌前灌后趋势一致,均表现为灌后高于灌前。20~40 cm土层模拟值响应灌水波动,降雨影响较弱,实测值与模拟趋势吻合。40~60 cm土层模拟值显示,峰值变化随灌水量降低而减弱,仅大定额灌水出现显著波动,实测值与模拟趋势基本一致,仅N2W2处理在蕾期出现灌前略高于灌后的异常。

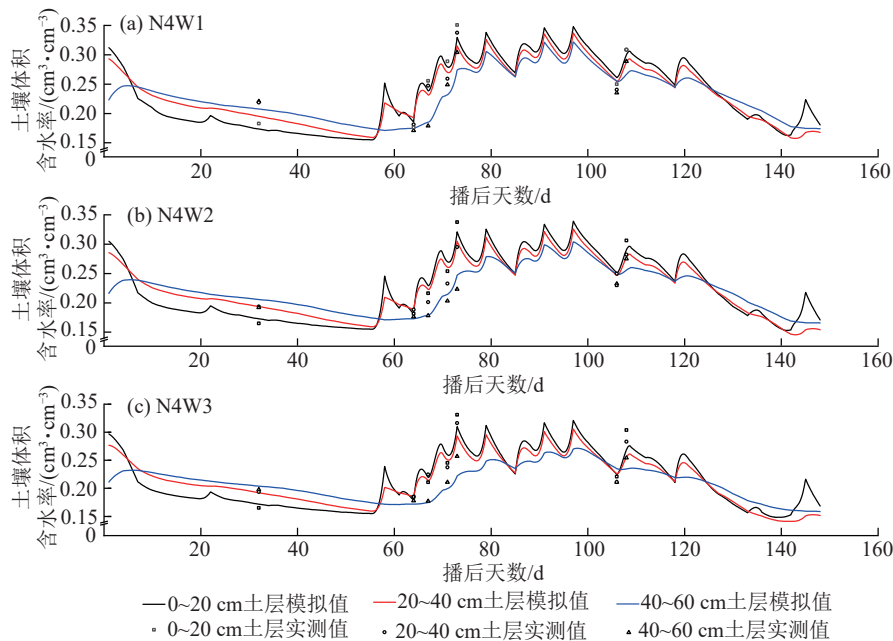


图2 2023年不同处理土壤平均体积含水率模拟值与实测值随棉花生育期进程的变化趋势

Fig. 2 Variation trends of simulated and measured average soil volumetric water content during cotton growth period under different treatments in 2023

全生育期各处理0~60 cm土层验证结果见表4。0~20 cm土层MRE为3.89%~12.42%, RMSE为0.012~0.035 cm³/cm³, NRMSE为4.72%~13.74% (最大误差N1W1); 20~40 cm土层MRE为3.86%~13.05%, RMSE为0.012~0.038 cm³/cm³, NRMSE为5.28%~14.98% (最大误差N1W1); 40~60 cm土层MRE为4.94%~11.34%, RMSE为0.012~0.033 cm³/cm³, NRMSE为5.46%~15.25% (最大误差N2W2)。所有误差均在合理范围内,表明RZWQM2模型对本试验土壤体积含水率具有良好模拟能力。

2.1.2 棉花生育期内土壤硝态氮质量分数时空分布规律及与验证 以N1W3、N2W3、N3W3、N4W3处理为例验证硝态氮模拟效果见图3。0~20 cm土层中,模拟值在苗期略降,蕾期后随灌水施肥呈现“下降-缓慢回升”趋势,花铃期因高频施肥显著高于其他时期,吐絮期因淋失与实测值同步下降。20~40 cm

土层模拟值苗期上升(浅层氮素下渗),蕾期和花铃期随水肥增加持续上升,吐絮期因吸收和淋失下降,实测值趋势一致但存在个别处理误差。40~60 cm土层模拟值苗期下降,氮素主要聚集在主根区,蕾期和花铃期呈“施肥响应峰”,吐絮期无新增氮素补充导致缓慢下降,实测值与模拟趋势吻合。

全生育期各处理0~60 cm土层验证结果见表5。0~20 cm土层MRE为15.24%~22.5%, RMSE为2.507~4.689 mg/kg, NRMSE为16.29%~26.56% (最大误差N4W2); 20~40 cm土层MRE为10.85%~28.11%, RMSE为2.783~7.405 mg/kg, NRMSE为14.90%~27.37% (最大误差N2W3); 40~60 cm土层MRE为10.18%~27.35%, RMSE为2.486~7.908 mg/kg, NRMSE为11.12%~28.96% (最大误差N2W3)。尽管存在一定误差,但RZWQM2模型对本试验土壤硝态氮含量仍具有适用性。

表 4 RZWQM2模型对各处理不同土层的土壤体积含水率的精度

Table 4 Accuracy of RZWQM2 model in simulating soil volumetric water content across different soil layers under different treatments

土层深度/cm	误差指标评价	N1W1	N2W1	N3W1	N4W1	N1W2	N2W2	N3W2	N4W2	N1W3	N2W3	N3W3	N4W3
0~20	MRE/%	10.90	4.31	8.01	5.30	12.42	8.55	7.11	4.09	8.98	9.73	10.00	3.89
	RMSE/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.035	0.014	0.023	0.014	0.032	0.027	0.017	0.012	0.023	0.028	0.027	0.014
	NRMSE/%	13.74	5.38	9.14	5.23	12.88	10.83	7.05	4.96	9.66	12.07	11.33	4.72
20~40	MRE/%	13.05	3.86	12.53	5.93	9.60	9.05	6.88	3.95	11.91	6.26	10.09	4.12
	RMSE/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.038	0.013	0.035	0.016	0.031	0.027	0.019	0.013	0.030	0.020	0.034	0.012
	NRMSE/%	14.98	5.28	13.82	6.22	12.52	11.11	7.96	5.51	13.07	8.70	14.47	5.42
40~60	MRE/%	11.04	4.94	5.83	6.39	10.21	11.34	10.65	5.25	6.36	5.89	5.23	6.86
	RMSE/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.029	0.012	0.016	0.018	0.027	0.033	0.029	0.014	0.018	0.015	0.014	0.019
	NRMSE/%	12.88	5.46	7.02	7.68	12.36	15.25	13.32	6.59	8.75	7.14	6.89	9.03

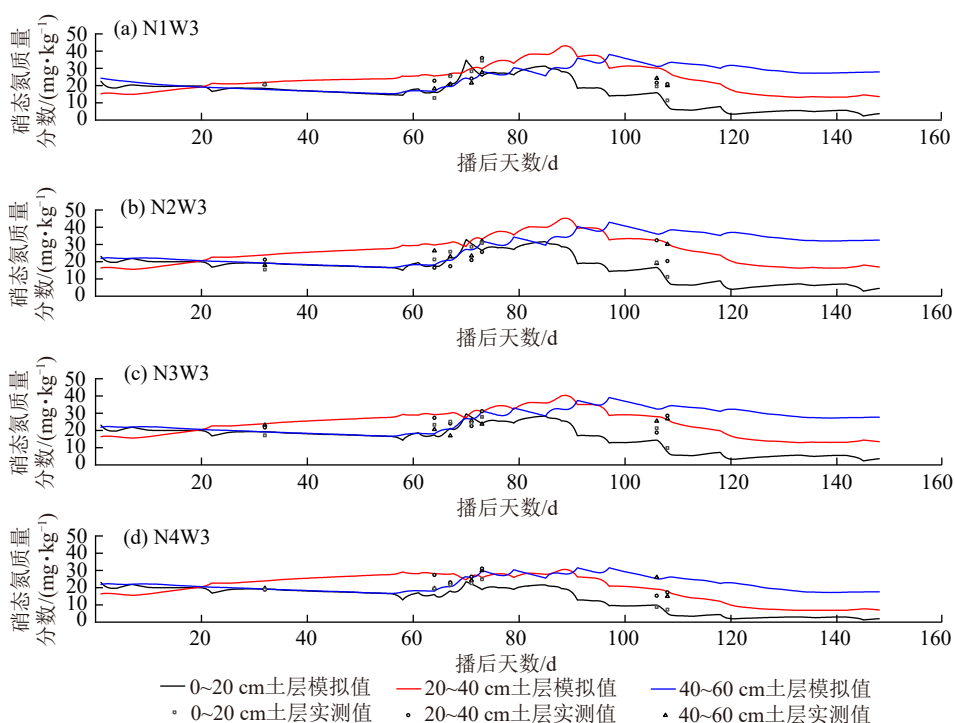


图 3 2023年不同处理土壤平均硝态氮质量分数模拟值与实测值随棉花生育期进程变化趋势

Fig.3 Variation trends of simulated and measured average soil nitrate nitrogen content during cotton growth period under different treatments in 2023

表 5 RZWQM2模型对各处理不同土层的硝态氮质量分数的精度

Table 5 Accuracy of RZWQM2 model in simulating nitrate nitrogen content across different soil layers under different treatments

土层深度/cm	误差指标评价	N1W1	N2W1	N3W1	N4W1	N1W2	N2W2	N3W2	N4W2	N1W3	N2W3	N3W3	N4W3
0~20	MRE/%	22.09	20.49	22.38	20.49	19.15	17.59	15.24	20.51	20.88	18.63	22.50	17.52
	RMSE/(mg·kg ⁻¹)	4.427	4.280	3.881	2.507	3.301	2.990	3.035	4.089	4.689	3.563	4.581	3.261
	NRMSE/%	24.89	25.98	25.59	18.05	17.63	16.29	18.01	26.56	24.52	17.88	24.90	21.20
20~40	MRE/%	13.47	17.57	10.85	16.59	15.18	23.05	13.25	17.74	20.97	28.11	19.61	13.99
	RMSE(mg·kg ⁻¹)	3.778	4.586	2.783	3.464	3.802	5.440	3.368	5.148	5.540	7.405	5.399	3.635
	NRMSE/%	18.59	24.47	16.22	22.27	16.34	22.06	14.90	25.05	22.84	27.37	21.64	17.49
40~60	MRE/%	16.99	16.13	10.18	12.66	20.48	20.79	15.50	12.23	19.35	27.35	20.79	15.13
	RMSE/(mg·kg ⁻¹)	5.156	4.075	2.486	2.830	5.469	6.426	4.284	2.884	6.009	7.908	5.434	4.490
	NRMSE/%	20.73	17.31	11.21	13.60	21.00	25.23	17.70	12.58	24.67	28.96	20.84	19.08

2.1.3 棉花地上部生物量及产量的率定 借助 RZWQM2 模型率定的水分板块和养分板块,结合大田试验的实测数据,对棉花的地上部生物量和产量进行率定。棉花的地上部生物量和产量的模拟值与实测值的对比见图 4、图 5,拟合精度见表 6。由表 6 可知,棉花生物量率定结果的 MRE 为 8.27%~18.94%,RMSE 为 599.00~2 360.00 kg/hm²;棉花产量率定结果的 MRE 为 3.32%~8.93%,RMSE 为 167~406 kg/hm²。模型对于棉花生物量及产量的模拟结果均偏小,且误差稳定,认为 RZWQM2 模型可以用于本试验,RZWQM2 模型可以较好地模拟不同处理对棉花生长的影响。

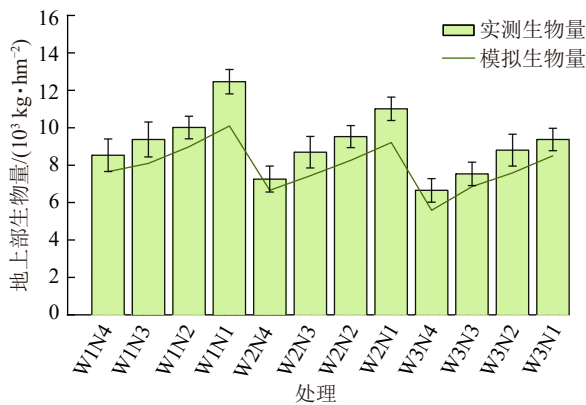


图 4 2023 年不同处理下棉花地上部生物量实测值与模拟值
Fig. 4 Measured and simulated values of aboveground biomass of cotton under different treatments in 2023

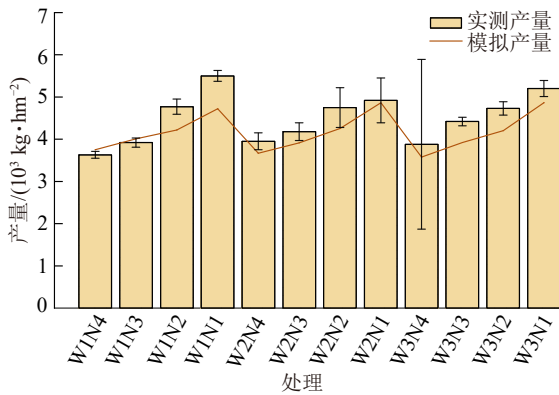


图 5 2023 年不同处理下棉花产量实测值与模拟值
Fig. 5 Measured and simulated values of cotton yield under different treatments in 2023

2.2 不同模拟情景下土壤氮素去向

土层中的氮素的去向,除作物对氮素的吸收利用外,可以分为氮的矿化、固定、氨挥发、反硝化(脱氮)和氮的渗漏,各项全生育期总量可利用 RZWQM2 模型直接导出。本节利用常规施氮 420 kg/hm²下不同的灌水定额,灌溉定额 380 mm 下不同减氮水平 2 个维度来探讨分析氮素的去向及损失。

表 6 棉花生物量及产量模拟值与实测值的拟合精度

Table 6 Fitting accuracy of simulated and measured values of cotton biomass and yield

处理	产量		地上部生物量	
	MRE/%	RMSE/(kg·hm ⁻²)	MRE/%	RMSE/(kg·hm ⁻²)
W1N4	7.18	290	10.33	881
W1N3	4.07	170	13.59	1 274
W1N2	7.46	340	10.25	1 026
W1N1	7.91	406	18.94	2 360
W2N4	7.09	280	8.27	599
W2N3	4.59	188	14.53	1 263
W2N2	6.87	314	13.27	1 264
W2N1	3.32	167	16.38	1 804
W3N4	8.93	351	16.04	1 067
W3N3	4.62	190	9.08	684
W3N2	8.01	366	13.84	1 218
W3N1	4.79	245	9.24	866

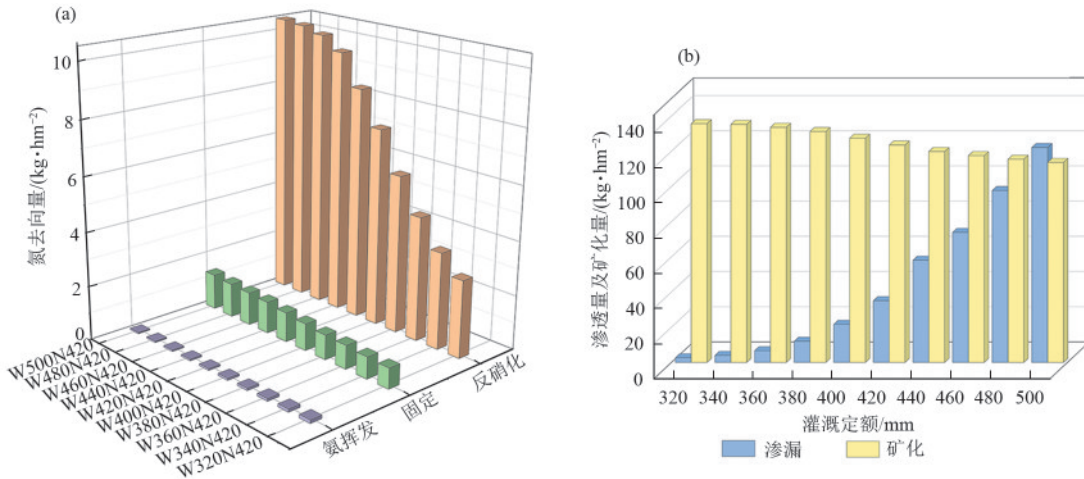
2.2.1 不同灌水定额棉田土壤中的氮素去向 由图 6 可知,不同灌水定额下的氨挥发的量很小,总体保持在 0.048~0.125 kg/hm²。随着灌水定额增加呈减小趋势,从低水到高水情景,氨挥发减少 61.44%。不同灌水定额下氮的固定量总体保持在 0.762~1.326 kg/hm²,随着灌水定额的上升,氮的固定量有所提升。不同灌溉定额下土壤氮素的反硝化量总体保持在 2.877~10.468 kg/hm²,随着灌溉定额的增加,其反硝化的量逐渐增高,在灌水定额高于 440 mm 时其增长幅度变缓,基本保持在 9.726~10.468 kg/hm²。

由图 6 可知,不同灌水定额下的氮的矿化总量保持在 113.65~135.67 kg/hm²,随着灌水量的增加,氮的矿化量逐渐减少,当灌水定额<360 mm 时,氮矿化量的减小幅度较小,其矿化量维持在 133.59~135.67 kg/hm²;当灌水定额>360 mm 时,氮矿化量的减小幅度变大,灌溉量从 360~500 mm 土壤矿化量降低 14.93%。不同灌溉定额下的氮素渗漏变化较为明显,当灌水定额高于 360 mm 时渗漏量增大明显,从 6.65 kg/hm²激增到 12.02 kg/hm²,随着灌水定额的继续增加,氮素渗漏量增加幅度愈加明显,在 400~500 mm 灌水定额下可达 21.64~122.12 kg/hm²。说明灌水量的增加直接影响氮素的渗漏,进而影响氮素的利用效率甚至造成氮素的污染。

2.2.2 不同减氮水平下土壤氮素去向 不同减氮水平下的氮素的矿化、固定、氨挥发、反硝化及深层渗漏量见图 7。由图 7 可知,随着施氮水平的下降,土壤中

氨挥发的量从0.084 2 kg/hm²下降到0.043 1 kg/hm²,氮素的减施,直接从根源上减少表层土中的氮素含量,从而间接减少土壤氨挥发的损失量;氮的固定量也随施氮水平的下降而下降,高施氮量直接导致土

壤氮素在土层中的累积,使氮素难以释放;氮素的反硝化作用,也随着减氮的进行而减少。土壤的矿化量和深层渗漏量变化幅度趋于稳定,随着施氮水平的降低,矿化量呈增加趋势,而渗漏量呈减少趋势。



注:W320、W340、W360、W380、W400、W420、W440、W460、W480、W500分别表示灌溉定额为320、340、360、380、400、420、440、460、480、500 mm;N420、N403、N386、N370、N353、N336、N319、N302分别表示减氮水平为420、403、386、370、353、336、319、302 kg/hm²。下同。

图 6 不同灌溉定额下土层氮素氨挥发、固定、反硝化量及矿化量、渗漏量

Fig.6 Nitrogen ammonia volatilization, fixation, denitrification, mineralization, and leaching amounts in soil layers under different irrigation quotas

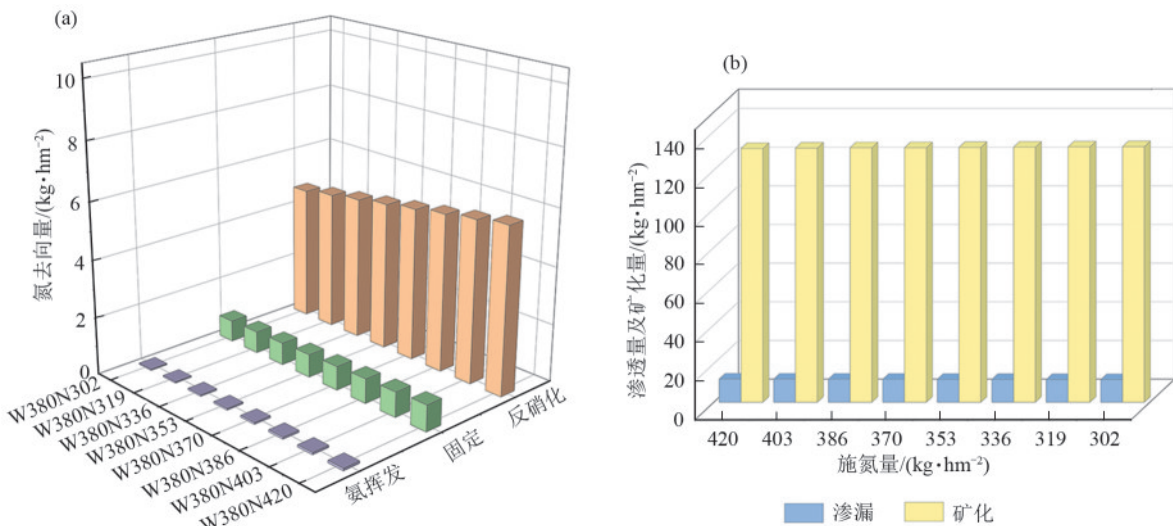


图 7 不同减氮水平下土层氮素氨挥发、固定和反硝化量及矿化量、渗漏量

Fig.7 Nitrogen ammonia volatilization, fixation, denitrification, mineralization, and leaching amounts in soil layers under different nitrogen reduction levels

综上,在该土壤状况背景下的土层的氨挥发量较小,考虑氮损失时氨挥发的参与度较小,而随着灌水量的增大反硝化和渗漏的量增大明显,故总体土壤氮素的损失量(氨挥发+反硝化+渗漏)随着灌水的增大而逐渐变大,从5.62 kg/hm²增加到132.63 kg/hm²。减施氮肥,土壤氮素的损失量也逐步减小,从17.96 kg/hm²减少到16.48 kg/hm²。

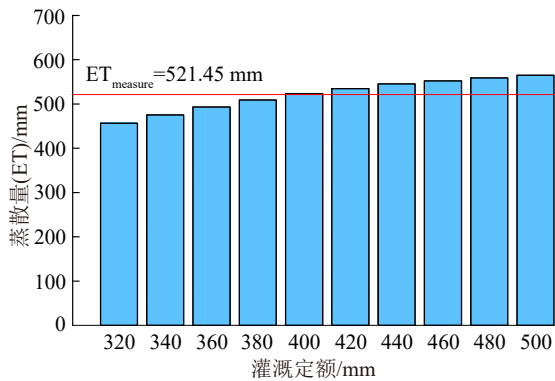
2.3 不同模拟情景下棉田水氮制度优化

2.3.1 棉花耗水量ET的模拟及分析

基于RZWQM2模型对不同情景的棉田全生育期的棉田的蒸散量

ET进行模拟发现,不同施氮水平相同灌水定额下的棉田的蒸散量ET基本相同,所以以施氮水平在420 kg/hm²下不同灌水定额下的情景下的ET变化情况为例分析(图2~图8)。最低棉田的蒸散量出现在最低灌溉定额的情景W320N420下,ET为456.23 mm;最高棉田的蒸散量出现在最高灌溉定额的情景W500N420情况下,ET为565.06 mm;在设定的10个灌溉定额情景下,ET平均值为521.45 mm。随着灌水定额的增加蒸散量呈上升趋势,且随着灌溉定额的增加,其ET的增加幅度明显下降,即灌水量

增加对 ET 的增加能力变小。



注:图中ET_{measure}为全情景的蒸散量的平均值。

图 8 标准施氮水平下不同灌溉定额棉田全生育期 ET 变化
Fig.8 Variations in ET of cotton fields throughout growth period under different irrigation quotas at standard nitrogen application levels

2.3.2 棉花产量及水分利用效率(WUE)、氮素偏生产力(PFP)分析 基于RZWQM2模型设置的80个不同水氮处理下的情景,对产量进行模拟分析,后计算出各情景WUE及PFP。由图9可知,在灌溉定额增加时,产量呈增-降-平稳趋势,当灌溉定额从320 mm增长到400 mm时,常规施氮条件下其产量从4 562 kg/hm²增加到4 800 kg/hm²,产量增加幅度

最大为5.21%,随着减氮程度的降低,其产量增加对于灌水量的响应强度降低,减氮8%~28%,产量的增长幅度在1.63%~2.00%;当灌水定额>400 mm时,产量的变化情况逐渐趋向于下降后平稳的趋势,可见,过量灌溉对增产的效益较小。

水肥的利用效率受田间管理措施、气象因素、土壤性质等诸多因素影响,本节只考虑在水氮胁迫下的水分利用效率及氮素偏生产力的变化情况。随着施氮量的减少,水分利用效率呈下降趋势,随着灌水定额的增加,水分利用效率呈缓降趋势,WUE从9.99~8.35 kg/(hm²·mm)下降至8.48~6.42 kg/(hm²·mm),下降15.1%~19.7%;随着灌溉定额的增加,氮素偏生产力呈增-降-平稳趋势,当灌水定额<400 mm时,减氮量越低的情景,其PFP对水分的响应强度越高,常规施氮的情景下,灌水定额从320 mm增长到400 mm时,PFP从10.86 kg/kg增长至11.43 kg/kg,增长幅度为5.21%,而减氮28%处理仅从12.61 kg/kg增长至12.85 kg/kg,增长幅度为1.86%。各情景均在400 mm处呈现出最大的PFP,在灌水定额>400 mm的灌水定额下时下降程度明显,后呈现平稳趋势。

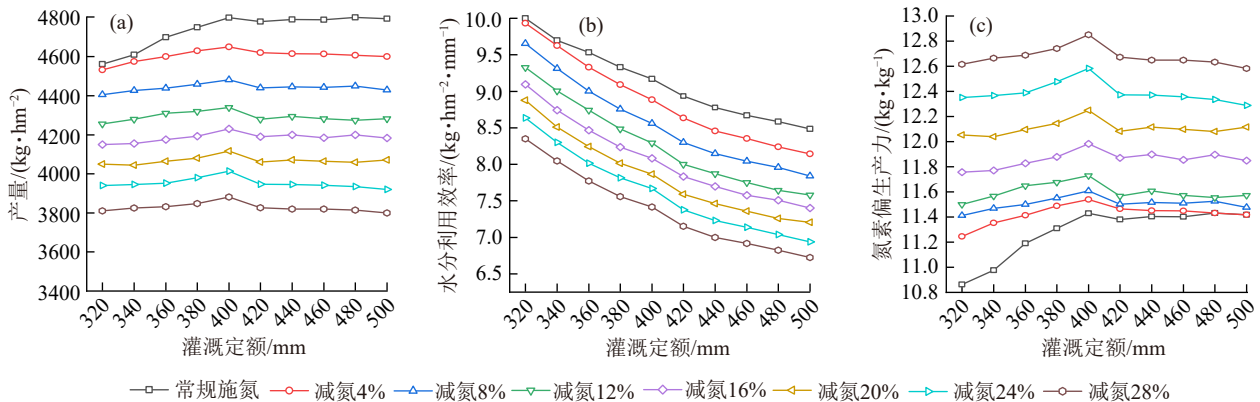


图 9 不同水氮处理下棉花产量和水氮利用效率变化

Fig.9 Variations in cotton yield and water and nitrogen use efficiency under different water and nitrogen treatments

2.3.3 棉田综合效益评价 基于氮淋失量、棉花产量及水氮利用效率的模拟数据,利用SPSS 27.0软件中的主成分分析棉花产量、WUE及PFP 3个指标的综合效益。除生产效益外,氮素深层渗漏量也是关键指标,因为氮素渗漏过多时,对环境的污染是不可逆转的。将3个指标进行主成分分析可得,KMO取样适切性量数为0.693>0.6,说明这一系列数据适合开展主成分分析。进一步分析主成分特征值及累计贡献率可得,PC1特征值2.557远>1;PC2和PC3分别为0.360和0.083迅速下降,符合主成分“前少后多、快速衰减”的规律,说明PC1为核心成分。由旋转先后的成分矩阵可知,未旋转时,PC1与产量、水分

利用效率强正相关,与氮素偏生产力强负相关,几乎主导所有变量的差异解释;通过“凯撒正态化最大方差法”旋转,让各主成分对变量的解释更清晰。PC1仍主导产量,PC2主导水分利用效率,PC3参与氮素偏生产力解释,避免未旋转时PC1“一主到底”的模糊性(表7~表9)。

表 7 KMO 检验及巴特利特检验
Table 7 KMO test and Bartlett's test

KMO 取样适切性量数		0.693
巴特利特球形度检验	近似卡方	198.286
	自由度	3
	显著性	0

表 8 主成分特征值及累计贡献率

Table 8 Principal component eigenvalues and cumulative contribution rates

组件号(PC)	初始特征值	方差百分比/%	累积/%
产量	2.557	85.232	85.232
水分利用效率	0.360	11.994	97.226
氮素偏生产力	0.083	2.774	100.000

表 9 因子荷载矩阵分析

Table 9 Factor loading matrix analysis

指标	未旋转			旋转后		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
产量	0.944	-0.267	0.194	0.892	0.357	-0.278
水分利用效率	0.864	-0.502	0.023	0.332	0.915	-0.229
氮素偏生产力	-0.959	0.190	0.212	-0.672	-0.395	0.626

灌水量增大时,氮素渗漏量呈现出激增的变化趋势,故据此确定 360 mm 为较优灌溉定额。在 360 mm 灌溉水量条件下,利用产量、WUE 及 PFP 3 个指标优化得出较好的减氮稳产制度,综合效益评价分析(表 10)。

表 10 灌溉定额为 360 mm 时各项指标综合分析结果排序

Table 10 Ranking of comprehensive analysis results for different indicators under irrigation quota of 360 mm

排序	减氮程度/%	产量/(kg·hm ⁻²)	水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	氮素偏生产力/(kg·kg ⁻¹)	主成分值
1	4	4 600	9.33	11.41	1.021 45
2	8	4 439	9.00	11.50	0.615 40
3	12	4 310	8.74	11.65	0.238 05
4	16	4 175	8.47	11.83	-0.171 80
5	20	4 064	8.24	12.10	-0.587 55
6	24	3 952	8.02	12.39	-1.022 01
7	28	3 832	7.77	12.69	-1.478 14

减氮 4%~12% 的情景下主成分值为正值,综合得分较高,减氮 4% 较减氮 8% 增加氮肥量为 17 kg/hm²,产量降低 3.50%,水分利用效率降低 3.54%,氮肥偏生产力增加 0.08%;减氮 8% 较减氮 12% 情景下增加氮肥施加量为 17 kg/hm²,产量降低 2.91%,水分利用效率降低 2.89%,氮肥偏生产力增加 1.30%;综合考虑到稳产效益,在减氮 8%~12% 的条件下也能达到稳产效益,且更适宜于北疆干旱地区的环境可持续发展,故推荐使用减氮 8%~12%,灌溉定额 360 mm 的灌水施氮制度,具体制度方案见表 11。

表 11 最优灌水施氮方案

Table 11 Optimal irrigation and nitrogen application scheme

生育阶段	灌水量/mm	减氮 8% 下施氮量/(kg·hm ⁻²)	减氮 12% 下施氮量/(kg·hm ⁻²)
播种期至出苗期	44		
蕾期	始蕾期	28	27.6
	盛蕾至初花	28	41.4
花铃期	初花至盛花	35	69.0
	花铃期	35	55.2
	盛花结铃期	35	69.0
	结铃期	35	69.0
	铃期	35	27.6
吐絮期	铃期	35	27.6
		25	
	25		
合计	360	386.4	369.6

3 讨论

3.1 RZWQM2 模型的适用性评价

本研究构建的 RZWQM2 模型在北疆膜下滴灌棉田的水氮运移模拟中表现出较好适用性,但仍存在一定改进空间。各处理土壤体积含水率的模拟精度指标 RMSE (0.012~0.038 cm³/cm³)、MRE (4.72%~13.74%) 和 NRMSE (4.72%~15.25%) 相比于多数学者的研究也呈现出较优的精度。薛长亮等^[24]、肖雨霄等^[25]研究发现,RZWQM2 模型深层土壤模拟精度显著优于表层的现象,值得注意的是,本研究未观测到该现象,一方面可能与滴灌系统“少量多频”灌水特性有关,导致深层土壤水分变化幅度较小;另一方面,可能是模型初始地下水位值较低,未能充分模拟地下水对土壤水分的补充^[26]。

在硝态氮含量模拟方面,模拟结果稍差,各处理平均 RMSE (2.486~7.908 mg/kg)、MRE (10.18%~28.11%) 和 NRMSE (11.12%~28.96%)。可能与溶质迁移的复杂性^[27]有关,氮素在土壤中的运移不仅涉及吸附、交换等物理过程及生物化学/物理化学过程;另一方面,模型假定土壤均质,但试验地因长期种植导致初始氮素分布不均,存在空间异质性,都可能导致硝态氮实测值的一些偏差和波动。在生育后期的土壤深层氮素实测值偏低,原因可能是花铃期后棉花氮素需求转向棉铃发育,深层根系吸收的氮素需经木质部长途运输至地上部,20~60 cm 土层的氮素的吸收量增多,导致氮素含量的降低;另一方面,可能是吐絮期灌水量减少,导致氮素运输效率下降,进而形成深层土壤氮素“吸收慢、残留少”的假象,实则氮素未迁移到深层土壤。

棉花产量及地上部生物量的模拟结果显示, RMSE 分别为 167~406、599.00~2 360.00 kg/hm², MRE 与 NRMSE 为 3.32%~8.93% 和 8.27%~18.94%, 与夏文等^[28]研究结果一致, 但模型对产量的预测值普遍存在系统性负偏差。主要原因是试验地位于北疆干旱半干旱地区, 降雨量少, 蒸发量大, 棉田长期处于水分胁迫, 直接影响作物的生长发育。肖雨霄等^[25]研究发现, RZWMQ2 模型在水分亏缺时对作物生长过程的模拟性能较差。尽管存在误差, 但幅度稳定, 表明 RZWMQ2 模型仍可用于本试验条件下的产量模拟。

3.2 基于 RZWMQ2 棉田土壤氮素去向分析

土壤氮素矿化受土壤肥力、质地、水热条件及微生物群落调控, 其中温湿度为核心因子^[29]。有研究^[30]表明, 当土壤含水量介于吸湿水与最适含水量之间时, 氮矿化量与含水量呈正相关。本研究发现, 灌溉定额 ≤ 360 mm 时, 氮矿化量趋于稳定; 当灌水量超过 360 mm, 矿化量降幅显著增大, 是因为 320~360 mm 灌溉量使土壤含水量接近最适矿化区间, 而超过 360 mm 导致主根层过湿缺氧, 微生物转向厌氧代谢。厌氧条件下反硝化作用增强, 硝态氮(NO₃⁻)被还原为气态氮(NO 和 N₂), 造成氮损失且矿化速率下降^[31]。施氮量情景分析表明, 过量施氮抑制微生物活性(土壤氮素饱和), 尽管外源氮输入增加, 但总体矿化进程受抑, 导致矿化量变化不显著。

氨挥发损失不是氮素主要的损失途径, 王肖娟等^[32]研究发现, 滴灌氨挥发量高于漫灌, 但 2 种灌溉方式的氨挥发损失比例均较低。本研究中的氨挥发量总体偏小, 可能与土壤质地有关, 土壤胶体对 NH₄⁺ 的吸附作用减少 NH₃ 挥发损失^[33]。本研究中, 随着灌水定额的增加, 氨挥发量减小, 原因可能是当灌水量较大时, 表层土层中氮素的入渗速率加快, “以水带氮” 加快氮素入渗, 减少表层氨挥发。与徐万里等^[34]研究得出的相同土壤含水量、施肥量条件下, 加大灌水量缩短挥发时间、降低氮肥氨挥发平均速率的结论一致。本研究中随着施氮量的减少, 氨挥发量也呈现减小趋势, 与杨淑莉等^[35]研究结论一致。合理地减少施氮, 可以降低表层土壤的 NH₄⁺-N 浓度, 从而减少氨挥发的损失。

本研究中随着灌溉定额的增加, 其反硝化量逐步增高, 增幅先小后趋稳, 与范思思^[36]研究结果一致, 其研究发现, 反硝化功能基因 *nosZ* 丰度随土壤湿度增加而上升, 但高水状态引发底物过度还原, 抑制微生物活性。减氮处理显著降低全生育期反硝化量。本研究中随着减氮程度的加深, 其全生育期反

硝化量逐步减小, 白芳芳等^[37]研究表明, 减氮通过降低 *nirS* 型反硝化细菌(δ -变形菌纲)丰度来减缓反硝化速率。

综合氮素总损失(氨挥发+反硝化+渗漏), 灌水量增加导致渗漏量急剧上升, 成为总损失的主要驱动因子, 凸显水分对淋失的显著影响。是因为灌水量超过 360 mm 时, 土壤水分迁移从基质流转变为优先流, 水力梯度显著增大, 驱动溶质对流作用大幅增强, 氮素随水分渗透速度加快而加速向下迁移。减氮虽能降低渗漏量, 但其效应弱于水分调控。

本研究氮素去向数据主要依赖模型模拟, 缺乏田间试验的直接验证与实测数据支撑, 导致研究结果的精准度和可靠性不足, 难以全面反映农田氮素迁移转化的复杂过程。后续将深化模型与田间试验结合, 优化模型以提升对北疆膜下滴灌棉田氮素循环的预测能力。

3.3 减氮条件下膜下滴灌棉花水氮制度优化

情景模拟表明, 棉花水分利用效率(WUE)随灌水定额增加而降低, 表明产量与耗水量非线性相关。灌溉定额 400 mm 时产量和氮素偏生产力(PFP)达峰值, 超过后者先降后稳。过量灌水导致棉花产量和 PFP 下降的主要机制涉及多个生理生态过程: 加剧养分淋失, 削弱土壤肥力; 抑制根系下扎, 限制水分吸收; 诱导气孔关闭, 降低光合效率, 最终阻碍干物质积累。氮素胁迫可诱导棉花光合系统及酶活性调节, 从而在低减氮梯度下出现一定的补偿生长效益, 但本研究是基于作物模型, 模型对减氮补偿效应的模拟存在局限性, 实际农业生产中影响作物减氮补偿效益的因素复杂多样, 模型可能无法完全准确地模拟所有因素及其相互作用。结合氮素渗漏量分析及区域实践, 确定 360 mm 为最优灌溉定额, 并建议 320~400 mm 为适宜灌水区间。

减氮情景模拟显示, 施氮量下降直接导致棉田产量和水分利用效率的降低, 因氮源不足导致叶绿素合成受阻、光合效率削弱; 但显著提升氮素偏生产力, 其机制在于高氮投入加剧损失且边际效益递减, 而低氮条件下会激发棉花生理适应机制, 增强棉花对氮素吸收效率。基于主成分分析法综合评价产量、WUE 和 PFP, 推荐 360 mm 灌溉定额下减氮 8%~12%。本研究结果与汪思佳等^[38]研究结果一致。

4 结论

1) RZWMQ2 模型对本试验的水分板块和作物板块模拟较好, 氮素板块模拟良好, 总体上 RZWMQ2 模型在本研究地区的适应性较好, 可以用于北疆滴灌棉田的模拟研究。

2)氮素渗漏量在灌水量 ≥ 360 mm时增长明显,从6.65 kg/hm²激增到12.02 kg/hm²,随着灌水定额的继续增加,氮素渗漏量增加幅度愈加明显,最高可达122.12 kg/hm²。氮素矿化量在灌水量 ≤ 360 mm时趋稳,其矿化量维持在133.59~135.67 kg/hm²,超过后降幅显著,土壤矿化量降低14.93%;氮总损失量(氨挥发+反硝化+渗漏)随灌水量增加呈显著上升趋势,其中氨挥发占比较少。随着灌溉定额的增加,其反硝化的量逐渐增高,在灌水定额高于440 mm时其增长幅度变缓,基本保持在9.726~10.468 kg/hm²;减氮处理对矿化量及总损失量影响有限,未显著改变其变化趋势。

3)利用RZWQM2模型模拟不同的灌水减氮情景,依据氮素的渗漏量、产量、水分利用效率(WUE)及氮素偏生产力(PFP)综合评价。得出最优的灌溉施肥定额为:减氮8%~12%(386~370 kg/hm²),灌溉定额360 mm,灌水周期7 d。

参考文献:

- [1] 王晓伟,岳丕昌,丁建国,等.新疆棉花生产的比较优势分析[J].中国棉花,2012,39(6):4-6.
WANG X W, YUE P C, DING J G, et al. Study on the comparative advantage of Xinjiang cotton production [J]. China Cotton, 2012, 39(6): 4-6.
- [2] 玛衣拉·吐尔逊,甫祺娜依·尤力瓦斯,阿西亚·托乎提.农户过量施用化肥行为的影响因素分析:以新疆棉花种植户为例[J].棉花学报,2016,28(6):619-627.
MAYILAA T, FUQINAYI Y, ASIYA T. College of economy and management impact factors of excessive household fertilization: A case study of cotton growing in Xinjiang, China [J]. Cotton Science, 2016, 28(6): 619-627.
- [3] 徐云连,吴靛,吴蔚君,等.施氮对小麦产量和氮素径流损失及氮肥投入阈值的研究[J].水土保持学报,2018,32(2):246-251.
XU Y L, WU L, WU W J, et al. Effects of nitrogen application on wheat yield and runoff loss of nitrogen and application threshold of nitrogen fertilizer [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 246-251.
- [4] 宋兴虎, TUFAILI Ahmed Wagan, BIANGKAM Souliyanonh, 等.氮肥用量及其后效对棉花产量和生物质累积动态的影响[J].棉花学报,2018,30(2):145-154.
SONG X H, TUFAILI A W, BIANGKAM S, et al. Nitrogen fertilizer and its residual effect on cotton yield and biomass accumulation [J]. Cotton Science, 2018, 30(2): 145-154.
- [5] 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 effects of nitrogen application on cotton yield and water use efficiency in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 316-326.
- [6] 罗雪梅.减氮配施有机肥对土壤氮素有效性及棉花生长的影响[D].新疆石河子:石河子大学,2023.
LUO X M. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer application on soil nitrogen availability and cotton growth [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2023.
- [7] 邱悦,崔静,杨晓燕,等.减氮配施缓释氮肥对滴灌棉花氮素利用和产量的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):122-131.
QIU Y, CUI J, YANG X Y, et al. Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and yield of cotton under drip irrigation [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 122-131.
- [8] SHAFTER M J, PIERCE F J. An user's guide to NTRM, a soil-crop simulation model for nitrogen, tillage, and crop-residue management [M]. London: Forgotten Books, 2018.
- [9] SHAFFER M J, HALVORSON A D, PIERCE F J. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): Model description and application [M]// Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2015: 285-322.
- [10] HANSON J D, AHUJA L R, SHAFFER M D, et al. RZWQM: Simulating the effects of management on water quality and crop production [J]. Agricultural Systems, 1998, 57(2): 161-195.
- [11] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [12] HOOGENBOOM G, JONES J W, WILKENS P W, et al. Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0 [Z]. Honolulu: University of Hawaii, 2004.
- [13] 郝闯闯.南疆喀什噶尔河灌区膜下滴灌棉花耗水规律与灌溉制度优化研究[D].新疆石河子:石河子大学,2023.
HAO C C. Study on water consumption patterns and irrigation system optimization of drip-irrigated cotton under mulch in the kashgar river irrigation district of southern Xinjiang [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2023.
- [14] 洪圣哲.基于RZWQM2模型研究不同灌溉制度对冬小麦水分利用效率的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
HONG S Z. Study on the impact of different irrigation systems on water use efficiency of winter wheat based on RZWQM2 model [D]. Taian, Shandong: Shandong

- Agricultural University, 2022.
- [15] 武闯. 基于 RZWQM-2 模型的夏玉米水氮分布及生长特性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- WU C. Study on water and nitrogen distribution and growth characteristics of summer maize based on RZWQM2 model[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [16] PLÉNET D, MOLLIÉ A, PELLERIN S. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224(2): 259-272.
- [17] MADDONNI G A, OTEGUI M E, CIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 183-193.
- [18] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Colorado: Colorado State University, 1964.
- [19] GREEN W H, AMPT G. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, 4(1): 1-24.
- [20] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Journal of Applied Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [21] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops: An energy combination theory[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111(469): 839-855.
- [22] JAMIESON P D, PORTER J R, WILSON D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. *Field Crops Research*, 1991, 27(4): 337-350.
- [23] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 111-120.
- LI Y, LIU H J, HUANG G H. Evaluation of water and nitrogen management for winter wheat-summer maize based on RZWQM Model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(6): 111-120.
- [24] 薛长亮, 张克强, 杨德光, 等. RZWQM 模拟小麦-玉米轮作系统氮素运移及损失特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(2): 150-158.
- XUE C L, ZHANG K Q, YANG D G, et al. Simulation of nitrogen transport and loss characteristics in wheat-maize rotation system by RZWQM[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 150-158.
- [25] 肖雨霄, 张红娟, 岑剑涛, 等. RZWQM2 模型对中国北方农牧交错带青饲玉米模拟适用性评价[J]. *节水灌溉*, 2023(7): 20-27.
- XIAO Y X, ZHANG H J, CEN J T, et al. Evaluation of simulation applicability of RZWQM2 model for silage maize in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(7): 20-27.
- [26] 姚举上, 刘文娟, 马琨, 等. 基于根区水质模型的宁夏引黄灌区春玉米土壤水氮运移及淋溶过程模拟[J]. *农业科学研究(中英文)*, 2025, 46(1): 1-10.
- YAO J S, LIU W J, MA K, et al. Simulation of soil water and nitrogen transport and leaching processes of spring maize in ningxia yellow river irrigation district based on RZWQM2 model[J]. *Agricultural Science Research*, 2025, 46(1): 1-10.
- [27] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 113-114.
- LI Y Z, LI B G. Soil solute transport[M]. Beijing: Science Press, 1998: 113-114.
- [28] 夏文, 林涛, 褚晓升, 等. RZWQM2 模型模拟地膜覆盖时间对南疆棉田水分利用效率及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 140-150.
- XIA W, LIN T, CHU X S, et al. Simulation of the effects of plastic film mulching duration on water use efficiency and yield of cotton fields in southern Xinjiang using RZWQM2 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(11): 140-150.
- [29] 张金波, 宋长春. 土壤氮素转化研究进展[J]. *吉林农业科学*, 2004(1): 38-43.
- ZHANG J B, SONG C C. Research progress on soil nitrogen transformation[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2004(1): 38-43.
- [30] 王艳杰, 邹国元, 付桦, 等. 土壤氮素矿化研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(10): 203-208.
- WANG Y J, ZOU G Y, FU H, et al. Research progress on soil nitrogen mineralization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 21(10): 203-208.
- [31] DAVIDSON E A, KELLER M, ERICKSON H E, et al. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides[J]. *BioScience*, 2000, 50(8): 667-680.
- [32] 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 methods and nitrogen application rates on nitrogen use efficiency and loss in cotton fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(10): 2751-2758.
- [33] 徐万里, 刘骅, 张云舒, 等. 新疆灰漠土区不同肥料配比土壤氨挥发原位监测[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4565-4571.
- XU W L, LIU H, ZHANG Y S, et al. In-situ monitoring of soil ammonia volatilization under different fertilizer ratios in grey desert soil area of Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4565-4571.

(下转第 430 页)