

分类号：
学号：20232110022

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



不同种植模式棉花水氮耦合效应研究 及灌溉制度优化

学位申请人	边梦寒
指导教师	吕廷波 教授 张栋海 副研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

分类号：
学号：20232110022

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



不同种植模式棉花水氮耦合效应研究 及灌溉制度优化

学位申请人	边梦寒
指导教师	吕廷波 教授 张栋海 副研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年05月

**Study on the Water–Nitrogen Coupling Effects in Cotton under
Different Planting Patterns and Optimization of Irrigation
Scheduling**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Bian Meng-han

(Hydraulic engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Lv Ting-bo

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：边慧真

时间：2026年5月17日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：边慧真

时间：2026年5月17日

导师签名：吴玉峰

时间：2026年5月17日

摘要

目的: 新疆是我国棉花重要产区, 现面临水资源短缺、传统一膜三管六行 (M1T3R6) 棉花种植模式水氮利用效率低及灌溉制度与种植模式不匹配等挑战。本研究以南疆图木舒克市干播湿出棉田为对象, 首次揭示一膜三管四行 (M1T3R4) 种植模式下的水氮耦合效应, 阐明棉花生长与土壤水氮运移规律, 结合 AquaCrop 模型筛选节水减氮高产的灌溉制度, 为新疆棉花可持续生产提供科学依据。

方法: 2024-2025 年在新疆图木舒克市开展两年大田小区定位试验, 以当地 M1T3R6 常规水氮管理 (600 mm、825 kg/hm²) 为对照 CK 处理, 设置 M1T3R4 种植模式下 3 种灌溉水平 (360、450、540 mm) 与 3 种施氮水平 (495、619、743 kg/hm²) 的两因素三水平随机区组试验; 系统测定棉花生长指标、产量、土壤水氮、植株全氮含量、经济效益及水氮生产力等, 解析水氮耦合效应; 校准并验证 AquaCrop 模型, 根据历史气象划分湿润年、平水年、干旱年、极端干旱年的水文年型, 进行 104 种水氮组合的模型情景模拟, 采用 NSGA-II 与 TOPSIS 法完成各年型下灌溉制度多目标优化。

结果: (1) M1T3R4 种植模式可显著优化棉田土壤水氮时空分布, 提升根区水氮供应与生殖器官氮素含量。该模式各处理 60~100 cm 深层土壤含水率 SWC 平均为 14.94%, 较 CK 处理降低 10.33%, 显著减少深层渗漏, 同时保障 20~60 cm 根系核心层的水分供应, SWC 为 19.78%; 0~60 cm 土层铵态氮、硝态氮含量分别为 22.24、32.26 mg/kg, 较 CK 降低氮素淋溶风险, 棉铃氮素含量提高 2.9%。

(2) M1T3R4 种植模式可显著实现棉花产量与水氮资源利用效率的协同提升。该模式可使棉花单株结铃数提升 21.25%、单铃重提升 10.2%, 有效弥补低种植密度的劣势, 最优处理籽棉产量达到 7985.83 kg/hm², 较 CK 提升 28.12%; 同时棉花耗水量较 CK 降低 8.8%, 水分生产力 WP、氮肥偏生产力 PFPN 分别提升 31.1%、64.7%; 该模式水氮耦合效应显著影响棉花产量、WP、PFPN ($P < 0.05$)。

(3) 校准后的 AquaCrop 模型在南疆滴灌棉田不同种植模式不同水氮处理下均表现出良好适用性。结果显示, 冠层覆盖度 CC、土壤含水量 SWC、蒸散发 ET、干物质质量 B 和产量 Y 的模拟值与试验实测值高度吻合, 其中 R² 均大于 0.81, d 均大于 0.85, 表明模型能够较好模拟不同灌溉、施氮处理的棉花生长发育和产量形成过程, 可为历史年型情景分析与多目标优化提供可靠工具基础。

(4) 不同年型下棉花 Y、WP、PFPN 差异显著 ($P < 0.05$), 且均随干旱胁迫增强而呈阶梯式下降。M1T3R4 模式在各年型下情景模拟整体表现均优于 M1T3R6, Y、WP 和 PFPN 平均提升 6.5%、6.14% 和 36.34%。多目标优化后, 各年型最优的灌溉量为 529.9~599.1 mm、施氮量为 551.8~584.9 kg/hm², 较 M1T3R6 模式可增产 8.85%~21.82%, 同时节水 0.15%~11.68%、减氮 29.1%~33.12%。

结论: 综上所述, 相比传统一膜三管六行, 一膜三管四行种植模式搭配最优水氮管理, 可显著促进新疆干播湿出棉花的生长发育, 优化土壤水氮时空分布, 提升水氮生产力、籽棉产量与经济效益, 且年型差异化灌溉制度更进一步实现了新疆棉花节水、减氮、增产的协同目标。

关键词: 棉花; 干播湿出; 种植模式; 水氮耦合; AquaCrop

Abstract

Object: Southern Xinjiang is a major cotton-producing region in China. It currently faces challenges such as water scarcity, low water and nitrogen use efficiency in the traditional “one-film-three-pipes-six-rows” (M1T3R6) cotton cultivation model, and mismatches between irrigation regimes and cultivation practices. This study focuses on dry-seeded, wet-emerged cotton fields in Southern Xinjiang. It is the first to reveal the water-nitrogen coupling effects of the “one-film, three-tubes, four-rows” (M1T3R4) planting system, elucidates the patterns of cotton growth and soil water and nitrogen movement under this system, and uses the AquaCrop model to screen for water and nitrogen management schemes that conserve water, reduce nitrogen use, and increase yields, thereby providing a scientific basis for sustainable cotton production in Southern Xinjiang.

Methods: A two-year field plot experiment was conducted in Tumushuk City, Southern Xinjiang, from 2024 to 2025. The local conventional water and nitrogen management practice (M1T3R6; 600 mm, 825 kg/ha) served as the control (CK) treatment. A two-factor, three-level randomized block design was established under the M1T3R4 planting pattern, with three irrigation levels (W1: 360, W2: 450, W3: 540 mm) and three nitrogen application rates (N1: 495, N2: 619, N3: 743 kg/ha) under the M1T3R4 cropping system; systematically measured cotton growth indices, yield, spatiotemporal distribution of soil water and nitrogen, total nitrogen content in cotton, economic benefits, and water-nitrogen productivity, and analyzed the water-nitrogen coupling effects; The AquaCrop model was calibrated and validated. Based on historical meteorological data, four hydrological year types were classified: wet, normal, dry, and extremely dry. The NSGA-II and TOPSIS methods were employed to perform multi-objective optimization of irrigation regimes under each year type.

Results: (1) The M1T3R4 cropping pattern significantly optimizes the spatiotemporal distribution of soil water and nitrogen in cotton fields, enhancing water and nitrogen supply to the root zone and increasing nitrogen content in reproductive organs. For this pattern, the average soil water content (SWC) in the 60–100 cm deep soil layer across all treatments was 14.94%, a 10.33% reduction compared to the control (CK) treatment, significantly reducing deep-layer leaching while ensuring water supply in the 20–60 cm root zone core layer, where SWC was 19.78%; The concentrations of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the 0–60 cm soil layer were 22.24 and 32.26 mg/kg, respectively, reducing the risk of nitrogen leaching compared to the CK treatment and increasing nitrogen content in cotton bolls by 2.9%.

(2) The M1T3R4 cropping system significantly enhances both cotton yield and the efficiency of water and nitrogen resource utilization. This system increases the number of bolls per plant by 21.25% and boll weight by 10.2%, effectively compensating for the disadvantages of low planting density. The optimal treatment achieved a lint yield of 7,985.83 kg/ha, a 28.12% increase compared to CK; simultaneously reducing cotton water consumption by 8.8% compared to CK, while increasing water productivity (WP) and nitrogen fertilizer partial productivity (PFPN) by 31.1% and 64.7%, respectively; the water-nitrogen coupling effect of this pattern significantly influenced cotton yield, WP, and PFPN ($P < 0.05$).

(3) The calibrated AquaCrop model demonstrated good applicability across different planting patterns and water-nitrogen treatments in drip-irrigated cotton fields in southern Xinjiang. Results showed that the simulated values of canopy cover (CC), soil water content (SWC), evapotranspiration (ET), dry matter (B),

and yield (Y) were in high agreement with the experimental measurements, with R^2 values all greater than 0.81 and d values all greater than 0.85. This indicates that the model can effectively simulate the growth and development as well as the yield formation processes of cotton under different irrigation and nitrogen application treatments, providing a reliable tool for historical scenario analysis and multi-objective optimization.

(4) Significant differences ($P < 0.05$) were observed in cotton yield (Y), water potential (WP), and plant water potential (PFPN) across different climatic scenarios, with all three parameters exhibiting a stepwise decline as drought stress intensified. The M1T3R4 model outperformed the M1T3R6 model in overall scenario simulation across all climatic scenarios, with average increases of 6.5%, 6.14%, and 36.34% in Y, WP, and PFPN, respectively. After multi-objective optimization, the optimal irrigation volume for each climate scenario ranged from 529.9 to 599.1 mm, and the optimal nitrogen application rate ranged from 551.8 to 584.9 kg/ha. Compared to the M1T3R6 model, this resulted in yield increases of 8.85% to 21.82%, while simultaneously saving 0.15%–11.68% of water and reducing nitrogen application by 29.1%–33.12%.

Conclusion: In summary, compared to the traditional “one film, three pipes, six rows” system, the “one film, three pipes, four rows” planting system, combined with optimal water and nitrogen management, can significantly promote the growth and development of dry-seeded, wet-emerged cotton in Southern Xinjiang, optimize the spatiotemporal distribution of soil water and nitrogen, and enhance water and nitrogen productivity, lint yield, and economic benefits. Furthermore, the differentiated annual irrigation regime has further achieved the synergistic goals of water conservation, nitrogen reduction, and yield increase for cotton in Southern Xinjiang.

Key words: Cotton; Dry sowing and wet emergence; Planting patterns; Water–nitrogen coupling; AquaCrop

目录

摘要.....	I
Abstract	1
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 种植模式对棉花生长的影响研究.....	2
1.2.2 棉花水氮管理及其耦合效应的研究.....	4
1.2.3 AquaCrop 模型在作物灌溉制度优化中的应用	5
1.3 研究目标与研究内容.....	7
1.3.1 研究目标.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.4 技术路线.....	8
第2章 试验材料与方法.....	9
2.1 试验地概况.....	9
2.2 试验布置与设计.....	10
2.3 测定项目及方法.....	11
2.3.1 土壤水氮含量.....	11
2.3.2 棉花生理生长指标.....	12
2.3.3 籽棉产量及其构成.....	12
2.3.4 棉花水氮生产力.....	13
2.4 AquaCrop 模型介绍.....	13
2.4.1 模型原理.....	13
2.4.2 模型数据库建立.....	13
2.4.3 模型评估.....	15
2.4.4 模型情景设置.....	15
2.5 灌溉制度多目标优化流程.....	16
2.6 数据处理与分析.....	17
第3章 不同种植模式对棉花土壤水氮分布的影响.....	18
3.1 不同处理对灌后土壤水分时空变化的影响.....	18

3.2 不同处理对土壤含氮量分布的影响.....	22
3.2.1 不同处理对土壤硝态氮分布的影响.....	22
3.2.2 不同处理对土壤铵态氮分布的影响.....	24
3.3 不同处理对植株全氮含量分布的影响.....	26
3.4 本章小结.....	28
第4章 不同种植模式对棉花生长及水氮耦合效应的影响.....	29
4.1 不同处理对棉花生长的影响.....	29
4.1.1 不同处理对棉花株高、茎粗、LAI的影响.....	29
4.1.2 不同处理对棉花干物质质量的影响.....	33
4.2 不同处理对棉花产量及经济效益的影响.....	34
4.2.1 不同处理对棉花产量及其构成的影响.....	34
4.2.2 不同处理对棉花经济效益的影响.....	36
4.3 不同处理下水氮耦合效应分析.....	38
4.4 本章小结.....	40
第5章 基于 AquaCrop 模型的棉花灌溉制度多目标优化.....	42
5.1 AquaCrop 模型适用性评估.....	42
5.1.1 冠层覆盖度校准与验证.....	42
5.1.2 土壤含水量校准与验证.....	45
5.1.3 产量、干物质质量和蒸散发校准与验证.....	47
5.2 基于 AquaCrop 模型的不同水文年型情景模拟与分析.....	48
5.2.1 历史水文年型划分与选取.....	48
5.2.2 不同水文年型情景模拟结果分析.....	49
5.3 不同水文年型下棉花灌溉制度的多目标优化.....	52
5.4 本章小结.....	54
第6章 结论与展望.....	56
6.1 结论.....	56
6.2 展望.....	57
参考文献.....	58
致谢.....	66
作者简介.....	67

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

棉花是我国重要的经济作物，新疆棉花产业在国家棉花供给安全与战略性农产品供给格局中占据核心地位。2025年，新疆棉花产量达616.5万吨，占全国总产量的92.8%，播种面积3887.5万亩，单产158.6kg/亩，且连续7年稳定在500万吨以上^[1]。南疆作为新疆棉花主产区，光热资源充沛，其产量占全疆80%以上，是保障国家棉花供给安全的核心区域^[2]。然而，新疆地处西北内陆干旱区，水资源严重匮乏，蒸发强烈，农业用水占全区经济社会用水总量的90%以上^[3]。同时，新疆盐碱土分布广泛，盐碱化耕地面积占总耕地面积的37.7%^[4]；化肥投入强度已达451.5 kg/hm²，其中氮肥占比超过60%，传统栽培模式下棉花氮肥利用率仅为30%~35%，不仅造成氮素大量流失，还会加重土壤盐碱化^[5]。此外，“十五五”期间，新疆棉区面临种植面积调减至3600万亩与水资源刚性约束的双重压力，产业正经历从“规模扩张”向“质量效益”的深刻转型。2026年中央一号文件《中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见》明确部署“加强耕地保护和质量提升”，强调通过农艺措施保护土壤健康、减少水氮流失的紧迫性。因此，亟需通过技术创新实现高产与节水节肥的协同。

在南疆棉区，水资源短缺问题尤为突出。水资源定额管理下，生育期用水与非生育期压盐用水矛盾尖锐，传统冬春灌模式难以为继，采取有效措施实现水资源对经济社会发展的可持续支撑迫在眉睫^[6]。干播湿出作为南疆图木舒克市近年来推广的重要节水创新，将传统冬春灌蓄水保墒、压盐洗碱模式，转变为播种时地膜保墒和滴灌精准补墒模式，播种后及时滴水出苗，可实现一播全苗、苗齐苗壮，出苗率稳定在90%以上^[7]。该技术节水效果显著，较传统冬春灌亩均节水180 m³，已在南疆地区普遍推广应用，成为节约农业灌溉用水、实现水资源集约高效利用的关键技术途径^[8]。然而，当前南疆种植模式仍以“矮、密、早”为主，该模式的高密度种植易导致田间通风透光不良、水肥耦合不协调等问题^[9]。近年来有研究表明，一膜三管四行（76 cm+10 cm+76 cm）宽窄行种植模式凭借更合理的株行距配置，有效改善了冠层郁闭问题，增加了单株生长空间，塑造了适宜机采的株型，实现了生产效率提升与生产成本降低，表现出良好的应用潜力^[10]。

水氮调控是棉花生长发育与产量形成的关键因子，二者存在显著的耦合效应^[11]。适宜的水氮管理可促进棉花干物质积累，增强抗逆性，提高产量与品质，对控水节肥、保护生态环境及农业可持续发展均具有重要意义^[12]。然而，南疆地区年降水量分布极不均衡且水资源持续减少，干旱已成为限制棉花生产发展的关键因素，合理的灌溉制度应用

显得尤为关键。水氮失衡会导致作物生长受抑、资源利用效率下降，不合理的水肥管理还会引发水资源浪费、地下水污染、土壤次生盐碱化等一系列问题；过量灌溉会造成肥料流失和土壤侵蚀板结，过量施肥则导致作物贪青晚熟、生长发育异常，并造成肥料浪费和成本增加^[13]。目前，图木舒克市当地农户水氮管理仍存在灌溉定额偏高、施肥过量等问题，因此研究制定节水减氮高产的灌溉制度，对提高干旱区作物的生产效率和经济效益具有重要意义。现有研究表明，作物模型作为长时间尺度下的农业生产优化的高效工具，有效弥补田间试验周期短、处理数量设置有限的不足^[14]。联合国粮农组织（FAO）开发的 AquaCrop 模型以“水驱动”机理为核心，对水分胁迫、冠层扩展与蒸散分解过程具有明确的生理学表述，具有参数量相对精简、易于校准的优势，已在棉花灌溉制度优化、干旱区农田水氮调控等研究中得到广泛应用^[15]。尽管如此，干旱胁迫或种植模式差异可能导致模型精度下降，仍需进行校准与验证以评估其适用性。

综上所述，南疆图木舒克市棉花产业面临水资源短缺、种植模式与水肥管理不匹配、长期可持续性评估不足等多重挑战。开展一膜三管四行模式下水氮耦合效应研究，结合 AquaCrop 模型进行多情景模拟，明确适宜的水氮配置方案与灌溉制度，对于提升南疆棉花水肥生产力、保障产业可持续发展具有重要的理论与实践意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 种植模式对棉花生长的影响研究

棉花作为新疆地区的主要经济作物，其生长发育及产量形成在很大程度上受到种植模式的影响。种植模式本质上是通过调控群体空间配置来优化光、温、水、肥等资源的时空分布，进而影响作物的光合生产和干物质分配^[17]。种植模式通过调控株行距配置、群体结构等因素，对棉花的冠层微环境、个体发育进程、群体光能截获效率以及最终的产量产出和经济效益产生重要影响。合理的种植模式应实现个体与群体的协调发展，既要保证单株生长势，又要充分利用群体优势，最终达到高产高效的目标。

国外在棉花种植模式研究方面起步较早，美国、澳大利亚等棉花主产国凭借大规模种植和先进的农业技术，积累了丰富的研究成果。早年研究主要关注行距配置对产量的直接影响，相关研究表明，合理的行距配置能够显著提高棉花的产量和经济效益^[18]。近年来，随着可持续农业发展的进行，研究视角逐渐从单一产量目标转向产量、效益、可持续性的综合评价。在干旱棉区，综合考虑产量、经济效益和可持续指数，四行棉花种植模式被认为是生产力最高且较为理想的可持续种植模式^[19]。Wu 等^[20]采用基于高时空分辨率传感器的网格采样方法监测三种种植模式下的土壤水分动态，发现棉花耗水量是影响生物量、特别是生殖器官生物量的最重要因素，并强调了作物对种植实践和多种环