

分类号：
学 号：20232112046

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



不同灌溉模式对塔里木河流域滴灌棉田土壤微环境及棉花生长的影响

学 位 申 请 人
指 导 教 师

张明圣

马富裕 教授

刘扬 副教授

窦宏举 研究员

申 请 学 位 类 别

农业硕士

专 业 名 称

农业

研 究 领 域

农艺与种业

所 在 学 院

农学院

中国·新疆·石河子

2026年6月

分类号：
学号：20232112046

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



不同灌溉模式对塔里木河流域滴灌棉田土壤微环境及棉花生长的影响

学位申请人

张明圣

指导教师

马富裕 教授

刘扬 副教授

窦宏举 研究员

申请学位类别

农业硕士

专业名称

农业

研究领域

农艺与种业

所在学院

农学院

中国·新疆·石河子

2026年6月

Effects of Different Irrigation Regimes on the Soil Microenvironment
and Cotton Growth in Drip-Irrigated Cotton Fields in the Tarim River
Basin

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Agriculture

By

Zhang Mingsheng
(Agronomy and Seed Industry)


Dissertation Supervisor: Prof. Ma Fuyu

June,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


本人所提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：

时间：2026年5月14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：

时间：2026年5月14日

导师签名：

时间：2026年5月14日

摘要

【目的】

塔里木河流域是我国最重要的优质棉花生产基地，水资源极度短缺与土壤盐碱化严重制约着棉花的可持续生产。传统方式的冬前漫灌，耗水量大、灌溉效率低，调整灌溉策略，提高水分利用效率，是未来本流域棉花可持续发展的必然选择。多年的实践证实，“干播湿出”（Dry Sowing Wet Emergence, DSWE）技术作为一种创新节水播种方式，可大幅削减播前灌水量，降低灌溉定额，提高棉花生产水分利用效率，对促进流域棉花可持续发展具有重要意义。然而，“干播湿出”灌溉模式下棉田土壤水热盐的时空演变规律及其对棉花出苗、全生育期生长发育和产量形成的综合影响机制尚不明确，影响了对该技术综合潜力的挖掘。本研究旨在系统阐明不同灌溉模式对棉田土壤水热盐微环境及棉花生长的调控效应，为塔里木流域盐渍化棉田节水高产灌溉模式的优化筛选提供理论依据与技术支撑。

【方法】

试验在新疆生产建设兵团第二师 30 团典型干旱气候区进行。试验共设置 3 个处理：传统冬前漫灌（WI，灌水量 $3300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）、干播湿出（DSWE，播后灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）以及冬前漫灌结合播后滴水出苗（WI-DE，冬灌 $3300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ + 播后滴水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）。通过定点连续监测播后 0-40 天内 0-40 cm 土层的土壤水分、盐分（电导率）及温度的时空动态，并结合全生育期的棉花出苗率、株高、茎粗、叶面积指数（LAI）、叶绿素相对含量（SPAD）、干物质积累与分配规律以及最终产量和经济效益进行系统分析。并采用基于熵权法（EWM）-层次分析法（AHP）组合赋权的 TOPSIS 模型及 RSR、FCE、CEI 等方法对各灌溉模式的综合效益开展多目标综合评价。

【结果】

（1）不同灌溉模式对棉田土壤水热盐微环境的调控效应

DSWE 模式通过精准滴灌在滴头正下方形成了明显的高含水率湿润中心（25%-27.70%），且在整个监测期内 0-20 cm 土层含水率始终显著高于 WI 和 WI-DE 处理，有效保障了种子萌发所需水分。DSWE 模式在水平方向上形成了“中间低、外缘高”的盐分分布格局，滴头正下方盐分被有效淋洗（电导率降至 $512.5\text{-}625.0 \mu\text{S/cm}$ ），并将盐分推向深层（30-40 cm 处电导率 $1188 \mu\text{S/cm}$ ），在种子萌发关键区域成功构建了“低盐区”。由于免去了冬灌，DSWE 模式土壤初始含水率低、热容量小，升温迅速。在播后 20-40 天的关键生长期，其日平均地温较 WI 模式显著提高 $1.5\text{-}2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ，0-10cm 土层温度 $25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，处于棉花出苗的最适宜温度范围。

（2）影响棉花出苗与苗期生长的主控因子

DSWE 模式创造的“高水分、低盐分、高土温”微环境在保证出苗率的同时，显著提高了苗期生长质量。出苗率达到 83.3%，高于 WI（82.7%）和 WI-DE（79.2%）处理。相关性分析表明，0-10

cm 地温 ($r=0.88$) 和 0-20 cm 土壤含水率 ($r=0.89$) 是促进出苗和幼苗生长的主导因子, 而表层电导率 ($r=-0.95$) 是主要的限制因子。

(3) 不同灌溉模式对棉花全生育期生长的影响

DSWE 处理的营养生长优势从苗期延续至中后期。在盛蕾期至盛铃前期, DSWE 处理株高和茎粗均显著高于 WI 和 WI-DE 处理, 株高日增长量较二者分别高出 7.7%和 15.4%。在光合性能方面, DSWE 处理在盛蕾期和盛花期的 LAI 显著高于 WI 处理, 两年平均值在盛蕾期和盛花期分别高出 WI 处理 4.8%和 10.5%; 叶片 SPAD 值在盛花期至吐絮期始终维持较高水平, 有效延缓了叶片功能衰退, 保障了花铃期的光合产物供应。在干物质积累方面, DSWE 处理自播后 90 d 起干物质积累量即显著高于 WI 处理, 并在全生育期内保持相对优势, 全生育期累积干物质质量最高。以上指标数据分布区间均符合棉花高产群体的质量要求。

(4) 不同灌溉模式对棉花产量及经济效益的影响

DSWE 处理通过促进棉花前期营养生长和提升光合生产能力, 显著增加了单株成铃数, 两年籽棉产量均为最高, 较 WI 和 WI-DE 处理分别增产 2.6%和 7.6%, 其中与 WI 处理差异未达显著水平, 但显著高于 WI-DE 处理 ($P<0.05$)。在经济效益方面, DSWE 处理灌溉用水量仅 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 WI 处理节水高达 86.4%, 用水成本仅为 $135 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远低于 WI 和 WI-DE 处理。在产量优势与成本优势的协同驱动下, DSWE 处理净收益两年均居首位, 较 WI 和 WI-DE 处理净收益分别增加 $1952 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4136 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(5) 多模型综合评价

基于 AHP-EWM 组合赋权构建的 TOPSIS 评价结果表明, DSWE 处理相对贴近度最高 ($C_i=0.8258$), 正理想距离最小 ($D^+=0.0717$), 负理想距离最大 ($D^-=0.3396$), 综合排名第一。RSR、FCE 和 CEI 三种方法的交叉验证结果与 TOPSIS 排序完全吻合, 综合优劣顺序一致为 $\text{DSWE} > \text{WI} > \text{WI-DE}$, 进一步验证了评价结论的稳健性与科学性。

【结论】

干播湿出 (DSWE) 模式通过播后精量滴灌, 在显著节约水资源的前提下, 有效改善了棉花根区土壤水热盐微环境, 成功缓解了塔里木河流域盐碱胁迫与早春低温对棉花出苗的双重制约, 实现了与冬灌处理相当或更好的出苗率, 并显著提升了苗期株高和茎粗等生长质量指标, 促进了全生育期群体生长质量与光合产物积累, 实现增产增效。综合多目标评价结果表明, 干播湿出模式是塔里木河流域滴灌棉田实现节水、控盐、增温、促生与增效协同的最优灌溉策略, 具有重要的推广应用价值。此外, 考虑到长期采用干播湿出技术可能导致表土盐分积累, 建议每 2-3 年进行一次适量冬灌, 以维持土壤盐分平衡, 确保技术的可持续应用。

关键词: 膜下滴灌; 干播湿出; 塔里木河流域; 棉花; 水热盐动态; 综合评价

Abstract

【Objective】

The Tarim River Basin is China's most important production base for high-quality cotton, but severe water scarcity and soil salinization are major constraints on sustainable cotton production. Traditional pre-winter flood irrigation is water-intensive and inefficient; therefore, adjusting irrigation strategies and improving water use efficiency are essential for the sustainable development of cotton in this basin. Years of practical application have confirmed that the "Dry Sowing Wet Emergence" (DSWE) technique, as an innovative water-saving seeding method, can significantly reduce pre-sowing irrigation volumes, lower irrigation quotas, and improve water use efficiency in cotton production, making it of great significance for promoting the sustainable development of cotton in the basin. However, the spatiotemporal patterns of soil water, heat, and salt dynamics in cotton fields under the DSWE irrigation regime, as well as the comprehensive mechanisms by which these factors influence cotton seedling emergence, growth and development throughout the entire growth period, and yield formation, remain unclear. This lack of understanding has hindered the full realization of this technology's potential. This study aims to systematically elucidate the regulatory effects of different irrigation regimes on the soil water, heat, and salt microenvironment in cotton fields and on cotton growth, thereby providing a theoretical basis and technical support for the optimization and selection of water-saving, high-yield irrigation models for saline-alkali cotton fields in southern Xinjiang.

【Methods】

The experiment was conducted in a typical arid climate zone at Regiment 30, Second Division of the Xinjiang Production and Construction Corps. Three treatments were established: conventional pre-winter flood irrigation (WI, irrigation volume $3,300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), dry seeding with post-sowing irrigation (DSWE, post-sowing irrigation $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), and pre-winter flood irrigation combined with post-sowing drip irrigation for seedling emergence (WI-DE, winter irrigation $3,300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ + post-sowing drip irrigation $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$). Through continuous on-site monitoring of the spatiotemporal dynamics of soil moisture, salinity (electrical conductivity), and temperature in the 0–40 cm soil layer from 0 to 40 days after sowing, a systematic analysis was conducted in conjunction with cotton emergence rate, plant height, stem diameter, leaf area index (LAI), relative chlorophyll content (SPAD), patterns of dry matter accumulation and distribution, as well as final yield and economic benefits throughout the entire growth period. Furthermore, a multi-objective comprehensive evaluation of the overall benefits of each irrigation regimen was conducted using a TOPSIS model with combined weighting based on the Entropy Weight Method (EWM) and Analytic Hierarchy Process (AHP), as well as methods such as RSR, FCE, and CEI.

【Results】

(1) Regulatory Effects of Different Irrigation Regimes on the Soil Water-Heat-Salinity Microenvironment in

Cotton Fields

The DSWE regime, through precision drip irrigation, created a distinct center of high soil moisture (25%–27.70%) directly beneath the emitters. Throughout the monitoring period, soil moisture in the 0–20 cm layer remained significantly higher than in the WI and WI-DE treatments, effectively ensuring the water required for seed germination. Horizontally, the DSWE system established a salt distribution pattern characterized by “lower concentrations in the center and higher concentrations at the periphery.” Salinity was effectively leached directly beneath the emitters (conductivity reduced to 512.5–625.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and pushed toward deeper layers (conductivity of 1,188 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at 30–40 cm), successfully creating a “low-salinity zone” in the critical seed germination area. Since winter irrigation was eliminated, the DSWE model featured low initial soil moisture and low thermal capacity, resulting in rapid soil warming. During the critical growth period 20–40 days after sowing, the daily average soil temperature was significantly higher by 1.5–2.8 °C compared to the WI model, with temperatures in the 0–10 cm soil layer ranging from 25–30 °C—within the optimal temperature range for cotton seedling emergence.

(2) Major Factors Influencing Cotton Germination and Seedling Growth

The “high moisture, low salinity, high soil temperature” microenvironment created by the DSWE model not only ensured germination rates but also significantly improved seedling growth quality. The germination rate reached 83.3%, higher than that of the WI (82.7%) and WI-DE (79.2%) treatments. Correlation analysis indicates that soil temperature at 0–10 cm ($r = 0.88$) and soil moisture content at 0–20 cm ($r = 0.89$) are the dominant factors promoting germination and seedling growth, while surface soil electrical conductivity ($r = -0.95$) is the primary limiting factor.

(3) Effects of Different Irrigation Regimens on Cotton Growth Throughout the Entire Growth Period

The vegetative growth advantage of the DSWE treatment persisted from the seedling stage through the middle and late growth stages. From the peak budding stage to the early peak boll stage, plant height and stem diameter in the DSWE treatment were significantly higher than those in the WI and WI-DE treatments, with daily plant height increments 7.7% and 15.4% higher than the latter two, respectively. Regarding photosynthetic performance, the DSWE treatment exhibited significantly higher LAI than the WI treatment during the peak budding and peak flowering stages, with two-year averages exceeding those of the WI treatment by 4.8% and 10.5%, respectively; leaf SPAD values remained at a consistently high level from the peak flowering stage to the boll opening stage, effectively delaying the decline in leaf function and ensuring the supply of photosynthetic products during the flowering and boll-filling stages. Regarding dry matter accumulation, the DSWE treatment showed significantly higher dry matter accumulation than the WI treatment starting from 90 days after sowing, maintaining a relative advantage throughout the entire growth period and achieving the highest cumulative dry matter yield. The distribution ranges of all these indicators met the quality requirements for high-yielding cotton populations.

(4) Effects of Different Irrigation Regimens on Cotton Yield and Economic Benefits

By promoting early vegetative growth and enhancing photosynthetic capacity, the DSWE treatment significantly increased the number of bolls per plant. Seed cotton yield was the highest in both years, with increases of 2.6% and 7.6% compared to the WI and WI-DE treatments, respectively. While the difference from the WI treatment was not statistically significant, it was significantly higher than that of the WI-DE treatment ($P < 0.05$). In terms of economic benefits, the DSWE treatment required only $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ of irrigation water, representing a water savings of up to 86.4% compared to the WI treatment. Water costs were only $135 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, far lower than those of the WI and WI-DE treatments. Driven by the synergistic effects of yield and cost advantages, the DSWE treatment ranked first in net profit for both years, with net profits increasing by $1,952 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $4,136 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ compared to the WI and WI-DE treatments, respectively.

(5) Multi-model Comprehensive Evaluation

The TOPSIS evaluation results, constructed based on AHP-EWM combined weighting, indicate that the DSWE treatment has the highest relative proximity ($C_i = 0.8258$), the smallest positive ideal distance ($D^+ = 0.0717$), and the largest negative ideal distance ($D^- = 0.3396$), ranking first overall. The cross-validation results of the RSR, FCE, and CEI methods fully align with the TOPSIS ranking, with a consistent order of preference: DSWE > WI > WI-DE. This further validates the robustness and scientific validity of the evaluation conclusions.

【Conclusion】

The Dry-Sow-Wet-Emerge (DSWE) method, through post-sowing precision drip irrigation, effectively improves the water, heat, and salt microenvironment in the cotton root zone while significantly conserving water resources. successfully alleviating the dual constraints of salinity-alkalinity stress and early spring low temperatures on cotton seedling emergence in the Tarim River Basin. It achieved seedling emergence rates comparable to or better than those of the winter irrigation treatment, significantly improved growth quality indicators such as seedling height and stem diameter, and promoted population growth quality and photosynthetic product accumulation throughout the entire growth period, thereby increasing both yield and efficiency. Comprehensive multi-objective evaluation results indicate that the “dry seeding, wet emergence” model is the optimal irrigation strategy for achieving synergistic water conservation, salt control, temperature increase, growth promotion, and efficiency enhancement in drip-irrigated cotton fields in the Tarim River Basin, and holds significant value for widespread application.

Key words: sub-mulch drip irrigation; dry seeding, wet emergence; Tarim River Basin; cotton; water-heat-salt dynamics; comprehensive evaluation

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 干播湿出技术研究进展.....	2
1.2.2 灌溉模式对土壤环境的影响研究.....	3
1.2.3 灌溉模式对棉花生长发育的影响研究.....	4
1.2.4 灌溉模式对棉花产量形成的影响研究.....	5
1.2.5 不同灌溉模式综合效应评价.....	6
1.3 研究内容及目标.....	7
1.3.1 研究目标.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.3.3 拟解决的关键问题.....	7
1.4 技术路线图.....	8
第 2 章 不同灌溉模式对土壤水热盐的影响.....	10
2.1 材料与方法.....	11
2.1.1 试验地概况.....	11
2.1.2 试验设计和田间管理.....	12
2.1.3 测定指标及方法.....	13
2.1.4 统计分析.....	14
2.2 结果与分析.....	14
2.2.1 不同灌溉模式对土壤水分时空分布的影响.....	14
2.2.2 不同灌溉模式对土壤盐分时空分布的影响.....	15
2.2.3 不同灌溉模式对土壤温度的影响.....	16
2.2.4 不同灌溉模式对棉花出苗率及苗期生长的影响.....	17
2.2.5 土壤水热盐与棉花出苗及苗期生长的相关性分析.....	18
2.3 讨论.....	19
2.3.1 干播湿出模式通过优化土壤水盐分布促进棉花出苗.....	19
2.3.2 干播湿出模式通过提高土壤温度加速幼苗生长.....	20
2.3.3 水热盐环境对棉花出苗及产量的综合响应.....	20
2.4 本章小结.....	21

第 3 章 不同灌溉模式对棉花生长的影响	22
3.1 材料与方法	22
3.1.1 试验地概况	22
3.1.2 试验设计和田间管理	23
3.1.3 测定指标及方法	24
3.1.4 统计分析	25
3.2 结果与分析	25
3.2.1 不同灌溉模式对棉花株高的影响	25
3.2.2 不同灌溉模式对棉花茎粗的影响	26
3.2.3 不同灌溉模式对棉花叶龄的影响	27
3.2.4 不同灌溉模式对棉花叶面积指数和叶绿素含量的影响	28
3.2.5 不同灌溉模式对棉花干物质积累的影响	29
3.2.6 不同灌溉模式对棉花产量、产量构成及效益的影响	30
3.3 讨论	31
3.3.1 不同灌溉模式对棉花营养生长的影响	31
3.3.2 不同灌溉模式对棉花光合性能的影响	32
3.3.3 不同灌溉模式对棉花产量及经济效益的影响	33
3.4 本章小结	33
第 4 章 多模型综合效应评价	35
4.1 综合评价指标体系	35
4.1.1 层次分析法 (AHP)	35
4.1.2 熵权法 (EWM)	36
4.1.3 组合赋权与 TOPSIS 评价	37
4.1.4 秩和比法 (RSR)	37
4.1.5 模糊综合评价法 (FCE)	37
4.1.6 综合评价指数法 (CEI)	38
4.2 综合评价	38
4.2.1 AHP 主观权重确定及一致性检验	38
4.2.2 熵权法客观权重与组合权重确定	40
4.2.3 TOPSIS 综合评价结果与分析	41
4.2.4 RSR、FCE 和 CEI 多方法交叉验证	42
4.3 本章小结	43
第 5 章 主要结论与展望	45
5.1 主要结论	45

5.2 研究创新点.....	46
5.3 研究展望.....	46
参考文献.....	48

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 是世界上最重要的纤维作物, 全球约有 24% 的棉花种植面积采用滴灌技术^[1]。中国是世界最大的棉花生产国和消费国之一, 棉花产业对国家经济发展具有重要战略意义^[2]。新疆作为我国最大的优质棉生产基地, 其棉花产量占全国总产量的 89.5% 以上, 南疆地区是新疆棉花生产的核心区域^[3]。该区域具有光热资源丰富、昼夜温差大等独特气候优势, 年平均日照时数达 2900 小时以上, 非常适宜优质棉花生产^[4]。然而, 南疆地区同时面临着水资源极度短缺、土壤盐碱化严重、春季气温变幅大等诸多挑战, 严重制约着棉花的稳产高产^[5, 6]。

水资源短缺是制约南疆棉花生产可持续发展的首要因素。南疆地区年均降水量仅为 50-80 mm, 而年均蒸发量高达 2400 mm 以上, 棉花全生育期需水量高达 600-800 mm, 农业用水几乎完全依赖灌溉^[7]。随着区域经济社会发展和生态用水需求的增加, 农业用水配额持续压缩, 发展节水灌溉技术成为必然选择^[8]。膜下滴灌技术自 20 世纪 90 年代末引入新疆以来, 因其节水、省工、增产等显著优势, 已成为南疆棉田的主导灌溉方式, 目前覆盖面积已超过 186 万 hm^2 ^[9, 10]。

传统的膜下滴灌棉花播种采用“先灌后播”模式, 即在播种前进行大水漫灌造墒, 待土壤含水量适宜后再进行播种。这种模式虽然能够压盐保墒, 保证出苗所需水分, 但存在诸多弊端: 播前灌水量大 ($2250\text{-}3000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), 水资源浪费严重; 灌水后需等待土壤适墒, 延误播期; 灌水导致地温下降, 不利于种子萌发; 灌溉后表层土壤板结, 影响出苗质量^[11-14]。

“干播湿出”技术 (Dry Sowing and Wet Emergence, DSWE) 是近年来在南疆推广应用的一项创新播种技术^[15]。该技术的核心是在土壤相对干燥条件下完成播种和覆膜, 播后通过滴灌系统精准供水促进种子萌发和出苗^[16]。与传统“先灌后播”模式相比, 干播湿出技术具有显著优势, 大幅减少播前灌水量, 节约水资源 30%-60%; 可适时早播, 充分利用有效积温; 保持较高地温, 促进种子快速萌发; 减轻土壤板结, 提高出苗质量^[17-20]。

然而, 干播湿出技术在南疆实际应用中仍面临一些亟待解决的问题。首先, 南疆地区土壤盐碱化程度普遍重于北疆, 传统“单次滴灌”的干播湿出模式在南疆盐碱地上出苗成苗效果差, 难以有效缓解土壤盐胁迫, 成苗率明显偏低, 严重影响群体密度和后期产量形成^[21, 22]。其次, 干播湿出条件下土壤水热盐动态变化规律及其对棉花出苗、全生育

期生长和产量形成的综合影响机制尚不明确^[23]。第三，不同灌水定额、灌水频率等灌溉参数组合对干播湿出效果的影响存在较大差异，急需系统研究和优化筛选^[24]。

新疆生产建设兵团第二师地处南疆塔里木盆地东缘，是典型的干旱荒漠绿洲灌区，棉花种植面积大、土壤盐碱化问题突出，是干播湿出技术推广应用的重点区域。本研究以第二师典型棉区为研究对象，系统研究不同灌溉模式对干播湿出条件下土壤微环境、棉花出苗成苗、生长发育和产量形成的影响，旨在筛选适宜的灌溉模式，为塔里木河流域干旱盐碱区棉花高效节水生产提供理论依据和技术支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 干播湿出技术研究进展

干播湿出技术是一种适应干旱区特点的棉花播种技术，其核心理念是将传统“先灌后播”模式转变为“先播后灌”模式^[25]。该技术的基本原理是：在土壤含水量较低（田间持水量的 50%-60%）条件下完成播种和覆膜作业，播种后通过膜下滴灌系统进行精准灌溉，使水分从滴头向四周扩散，湿润种子周围土壤，促进种子吸水萌发和幼苗出土^[26]。

干播湿出技术最早起源于新疆北疆地区，20 世纪末随着膜下滴灌技术的推广而逐步发展起来^[27]。研究发现，在新疆石河子地区采用干播湿出技术的棉田较传统灌溉棉田节水 1500-2100 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ，产量基本持平或略有增加^[28]。在南疆阿克苏的研究指出，优化根区环境是提高干播湿出技术稳定性的关键，结合冬灌与干播湿出可获得最优效果，灌溉水生产力可提高 16.29%-38.64%^[14]。

棉花种子萌发和出苗是棉花生产的关键环节，出苗率和成苗率直接影响棉田保苗株数和最终产量。在北疆低盐碱地区，干播湿出技术通过保持较高地温和适宜土壤水分，可实现棉花出苗率 80%以上、成苗率 75%以上^[29]。然而，南疆土壤盐分较高，单次滴灌的干播湿出模式难以维持出苗后至成苗阶段的低盐环境，导致幼苗死亡率高、成苗率低，这是制约该技术在南疆推广的主要障碍^[30, 31]。

针对上述问题，在南疆图木舒克的两年田间试验发现，采用多次滴灌（3 次，总量 900 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）替代单次滴灌可显著改善出苗后土壤盐分动态，使出苗后 15-30 天内土壤盐分持续保持较低水平，与单次滴灌相比成苗率提高 36.3%，籽棉产量提高 24.2%，同时仅消耗冬春漫灌用水量的 40%^[32]。在阿克苏地区沙雅县的研究也表明，干播湿出条件下以两次滴灌（105+45 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）的供水模式最优，与冬灌对照相比籽棉产量增产 393.51 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，水分利用效率提高 48.9%^[33]。上述研究证实，多次少量滴灌策略可有效克服南疆土壤盐分对棉花出苗成苗的不利影响。

研究表明，干播湿出条件下不同灌溉模式显著影响棉花苗期根系构型，高频灌溉处

理根长密度和根系活力显著高于低频处理，根系形态的改善直接促进了植株地上部的生长建成。这说明灌溉模式对棉花生长的影响在苗期即已产生，并通过根系-地上部的协调发育延伸至整个生育期^[34]。

1.2.2 灌溉模式对土壤环境的影响研究

土壤水分是作物生长的基本保障，灌溉模式通过影响水分入渗、再分配和蒸散过程，决定着土壤水分的时空分布格局^[35]。在膜下滴灌条件下，水分从滴头进入土壤后，在重力和基质势的共同作用下向四周扩散，形成以滴头为中心的湿润体^[36]。灌水频率对土壤水分动态变化有显著影响，高频灌溉可使土壤含水量维持在较稳定的水平，减小水分波动幅度，有利于作物根系对水分的持续吸收^[37]。

在干播湿出棉田的研究发现，0-10 cm 表层土壤含水率在灌水后迅速升高并达到峰值，单频次处理含水率随后急剧下降，而双频次处理呈“S”型变化，在第二次灌水后仍能维持较高含水率，出苗期平均含水率较单频次处理提高 0.62%-0.67%，有效延长了种子萌发和幼苗生长的适宜水分供应窗口期^[33]。单次滴灌在播后 20-30 天土壤水分急剧降低，而多次滴灌处理在此阶段仍维持显著较高的土壤含水量（较单次处理高 17.0%-41.7%）^[32]。

土壤温度是影响种子萌发和作物生长的重要环境因子。大定额灌溉会导致土壤温度明显下降，而小定额高频灌溉对土壤温度的扰动较小^[38]。干播湿出技术的一个重要优势是通过省去冬春漫灌，使播种时土壤温度较传统模式高 2-4°C，这对促进种子快速萌发具有重要意义^[39]。研究表明，免冬春灌可明显提高土壤表层温度，播前 0-10 cm 土壤日均温度比春灌处理高 1.86°C^[40]。

对干播湿出条件下不同供水模式土壤温度的动态监测表明，多次滴灌处理较单次滴灌出苗期平均土壤温度降低 0.16-0.48°C，差异主要体现在第二次灌水后阶段；出苗灌水定额越大，灌水后土壤温度越低，C3（150 m³·hm⁻²）处理较 C1（60 m³·hm⁻²）处理出苗期土壤平均温度降低 0.45°C，且随土层深度增大，各处理间差异性逐渐减弱^[33]。研究发现，多次滴灌处理在播后 5-30 天土壤温度持续高于冬春漫灌和单次滴灌处理，较冬春漫灌处理高 5.7%-19.7%、较单次滴灌处理高 8.8%-20.2%，有利于保障棉花幼苗的正常生长^[32]。

土壤盐分是南疆棉区影响棉花生产的重要限制因子。灌溉通过水分运移携带盐分迁移，对土壤盐分的垂直分布和水平分布产生显著影响^[41]。在垂直方向上，灌溉水入渗过程中会将土壤上层的可溶性盐分向下淋洗，随淋洗量的增加，土壤表层盐分显著降低^[42]。在水平方向上，滴灌条件下盐分呈现以滴头为中心向外增加的分布格局，覆膜区电导率明显低于膜间裸地^[43]。

研究表明，干播湿出棉田灌水前 0-20 cm 表层土壤盐分积聚程度较高，电导率均值

达 456.94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；灌水后随出苗灌水定额的升高，表层土壤电导率显著降低，且随滴水频次增加，0-10 cm 土层电导率进一步降低^[33]。单次滴灌处理在播后 10 天内可有效降低盐分，但 20-30 天盐分急剧回升，显著高于漫灌和多次滴灌处理；而多次滴灌处理通过补充灌溉维持了持续的盐分淋洗效果，播后 15-30 天土壤电导率较单次滴灌处理低 16.0%-27.2%，有效保障了幼苗期低盐环境^[32]。

1.2.3 灌溉模式对棉花生长发育的影响研究

出苗率和成苗率是衡量干播湿出技术成效的核心指标，直接决定最终群体密度和产量潜力。棉花萌发和出苗阶段对水分、温度和盐分均十分敏感，三者综合作用决定出苗质量^[44]。研究发现，冬春漫灌、单次滴灌和多次滴灌三种处理的出苗率相近（85.1%-86.9%），表明初期适宜水分条件下均可保证种子萌发；但进入成苗阶段，单次滴灌处理因土壤盐分急剧回升，造成幼苗大量死亡，成苗率仅为 60.1%，显著低于漫灌的 80.1% 和多次滴灌的 81.8%，多次滴灌保苗密度较单次滴灌提高 36.5%。

研究表明，随出苗灌水定额增加，出苗率呈先升后降的趋势，当出苗灌水定额小于 195 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，C3 处理（150 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）出苗率较 C1 处理（60 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）提升 15.09%；高频次处理出苗率明显高于低频次，2022 年两次滴灌较单次提升 2.42%；综合评价中两次滴灌（105+45 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）的 C5 处理出苗率与成苗状况最优。值得注意的是，出苗水量过高（ $\geq 1125 \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）反而会导致出苗率明显下降，可能因大水量降低地温、减少土壤孔隙氧气而抑制萌发，说明合理控制单次灌水量、提高灌水频率是优化干播湿出出苗效果的关键^[33]。

株高和茎粗是反映棉花营养生长状况的重要形态指标，受出苗期和生育期灌溉模式的共同调控^[45]。干播湿出条件下，苗期灌溉模式通过影响出苗质量和幼苗早期生长，对全生育期株高和茎粗产生持续效应。袁席天等^[33]的研究表明，随出苗灌水定额的增加，棉花株高在苗期受出苗灌水定额影响较大；第一次灌水对棉花株高影响最大，相同出苗灌水定额下 C3 处理株高大于 C5 处理，C2 处理大于 C4 处理；出苗灌水定额过低（C1 处理，60 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）的棉株受长时间干旱胁迫，幼苗矮小，打顶后株高仅稳定在 71 cm 左右，较最优处理（C6）降低 25.58%，且后期大田灌溉也未能产生有效补偿效应。

在茎粗方面，冬灌对照处理（CK）全生育期茎粗最大，干播湿出 C6 处理（150+45 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ）与 CK 相近，差异仅 3.1%；而出苗灌水定额最低的 C1 处理茎粗显著偏低，与 CK 相比降低 24.45%。Dai 等^[32]的研究也证实，多次滴灌处理棉花地上部生物量与漫灌处理相当，显著高于单次滴灌处理。这表明苗期适宜的水盐环境对棉花株型构建具有重要的奠基作用，苗期水分亏缺或盐胁迫造成的生长抑制难以在后期完全弥补。

叶面积指数（LAI）是决定棉花光合生产能力的关键因素，直接影响光能截获量和干物质积累^[46]。干播湿出条件下，灌溉模式对棉花叶面积的影响在苗期即有显著表现，