

分类号：  
学 号：20212312302

密 级：  
单位代码：10759

# 石河子大学 博 士 学 位 论 文



## 滴施缩节胺调控棉花根系发育和产量形成的 生理机制

学 位 申 请 人	石 峰
指 导 教 师	罗宏海 教 授
	田立文 研究员
申请学位门类级别	农学博士
学 科 、 专 业 名 称	作物学
研 究 方 向	作物高产高效栽培理论与技术
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子  
2026年6月

分类号:  
学号: 20212312302

密级:  
单位代码: 10759

# 石河子大学 博士学位论文



## 滴施缩节胺调控棉花根系发育和产量形成的 生理机制

学位申请人	石峰
指导教师	罗宏海 教授
	田立文 研究员
申请学位门类级别	农学博士
学科、专业名称	作物学
研究方向	作物高产高效栽培理论与技术
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子  
2026年6月

**Physiological mechanism of DPC application through drip irrigation  
in regulating cotton root development and yield formation**

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

By

**Shi Feng**

**(Crop Science)**

Dissertation Supervisor: Prof. Luo Hong-hai  
Prof. Tian Li-wen

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：石峰

时间：2026年6月2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：石峰

时间：2026年6月2日

导师签名：罗文海

时间：2026年6月2日

## 摘要

**【目的】**新疆是我国最大的棉花生产基地。在注重节本增效的新疆现代棉花栽培背景下，根部滴灌施用缩节胺（N, N-dimethyl piperidinium chloride, DPC）具有能够减少传统叶面喷施 DPC 所需的人工与农机作业成本，规避机械作业对棉株的损伤等潜在优势。然而，滴施 DPC 通过根系吸收诱导棉株响应的生理机制仍缺乏系统研究，尤其是不同 DPC 敏感性棉花品种的适配滴施 DPC 剂量及其驱动产量形成的路径尚不明确。相关基础理论研究的薄弱，限制了滴施 DPC 技术在新疆棉花推广应用。为此，本研究通过设置不同滴施 DPC 剂量与 DPC 敏感型品种组合，系统开展根区土壤微环境与根系生长、侧根激素信号与转录组、光合生理与物质积累、产量品质与残留分析对滴施 DPC 响应规律的研究，阐明滴施 DPC 对根系生长和生理特性的调控及其对地上部生长发育及产量品质形成的作用途径，综合评价滴施 DPC 在不同 DPC 敏感型棉花品种上的应用潜力。研究结果对丰富和发展水肥药一体化绿色轻简栽培技术体系具有重要意义。

**【方法】**试验于 2023 年–2024 年在新疆农垦科学院棉花所试验田进行。采用两因素裂区试验设计，主区为棉花品种，分别为 DPC 敏感型品种惠远 720（H<sub>720</sub>）和 DPC 钝感型品种新陆早 74 号（L<sub>74</sub>）。副区为 DPC 处理，分别为不施 DPC（D<sub>0</sub>，两年均为 0 g·ha<sup>-1</sup>）、叶面喷施 DPC（S<sub>1</sub>，330 g·ha<sup>-1</sup>（2023）和 375 g·ha<sup>-1</sup>（2024））、滴施与喷施 DPC 相同的剂量（D<sub>1</sub>，330 g·ha<sup>-1</sup>（2023）和 375 g·ha<sup>-1</sup>（2024））、滴施 4 倍喷施 DPC 的剂量（D<sub>4</sub>，1320 g·ha<sup>-1</sup>（2023）和 1500 g·ha<sup>-1</sup>（2024））和滴施 6 倍喷施 DPC 的剂量（D<sub>6</sub>，1980 g·ha<sup>-1</sup>（2023）和 2250 g·ha<sup>-1</sup>（2024））。系统测定了棉花关键生育期的根区土壤微环境因子、根系形态及分布、根系生理及转录组测序、叶片光合生理、物质积累与分配、<sup>13</sup>C 同位素示踪、机采适宜性指标、产量品质及 DPC 残留等指标。

**【结果】**(1)滴施 DPC 可促进根系构型稳定建成，并间接改善根区微域内的水盐运移环境。滴施 DPC 可影响生育期间土壤含水量（SMC）、pH 和电导率（EC）的动态变化，尤其是 H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 处理 0-60 cm 土层 SMC 和 0-20 cm 土层 EC 从盛蕾至盛花期、20-60 cm 土层 pH 从盛蕾至盛铃期的上升幅度增加 0.2%–15.7%；L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 处理 0-40 cm 土层 SMC、pH 和 EC 的上升幅度降低 0.1%–3.2%。同时，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 处理盛花期土壤呼吸速率峰值分别增加 8.1%和 23.1%。此外，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较其它处理盛铃期总根干物质量密度（RDMD）、根长度密度（RLD）、根表面积密度（RSD）和根体积密度（RVD）增加 3.3%–29.9%，其中 0-40 cm 土层 RDMD、RLD、RSD 和 RVD 增加 0.5%–50.3%；比根长增加 0.6%–11.1%，比根表面积和比根体积减少 0.1%–6.2%；盛蕾期、盛花期和盛铃期侧根活力（LRA）、侧根已糖和淀粉含量增加 0.1%–108.8%，蔗糖含量减少 0.2%–56.5%。相关性和通径分析表明，根系形态参数与土壤微环境因子呈显著负相关，与侧根活力和非结构性碳水化合物含量呈显著正相关，其中 SMC 是制约根系生长的主要外部限制因子，LRA 是促进根系生长的核心内部驱动因子。

(2)滴施 DPC 可诱导侧根激素相关基因表达调控激素稳态，促进侧根发生并提升抗逆性。H<sub>720</sub>

品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较其它处理盛蕾期、盛花期和盛铃期 0-60 cm 土层侧根生长素 (IAA) 和脱落酸 (ABA) 含量增加 1.0%–199.7%，赤霉素 (GA<sub>3</sub>) 含量降低 0.7%–52.1%；IAA/GA<sub>3</sub> 增加 11.9%–526.6%，GA<sub>3</sub>/ABA 减少 2.0%–717.7%，且盛花期 40-60 cm 土层的 IAA/ABA 增加 5.9%–114.2%。此外，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理盛铃期侧根差异表达基因 (DEGs) 共同富集于激素相关生物学过程的分子功能条目，其中 H<sub>720</sub> 品种 6526 个 DEGs 富集到 131 条代谢通路，更聚焦于激素核心通路。同时，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较其它处理 IAA、GA 和 ABA 信号通路中关键基因 *GhIAA20*、*GhAUX*、*GhGA3ox1* 和 *GhABF4* 的表达量增加 2.1%–888.0%，GA 和 ABA 信号通路中 *GhGA2ox1* 和 *GhPYL4* 的表达量减少 2.4%–56.3%，进而协同调控侧根的激素信号。

(3) 滴施 DPC 可优化叶片生理功能，改善光合生产性能，并驱动同化产物向根和铃分配。H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 和其它滴施 DPC 处理盛花期、盛铃期和盛铃后期比叶面积减少 0.7%–4.8%；叶绿素含量增加 1.2%–24.1%；蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度、PSII 最大光化学量子转换效率和非光化学淬灭系数减少 0.4%–41.6%，净光合速率、PSII 的实际光合效率、PSII 的相对电子传递速率和光化学淬灭系数增加 1.7%–41.6%；叶片 IAA 和 GA<sub>3</sub> 含量减少 4.6%–60.6%，ABA 含量增加 6.1%–45.6%；己糖、蔗糖和淀粉含量减少 2.8%–35.7%，且上述指标与 S<sub>1</sub> 处理相比均无显著差异。此外，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 和其它滴施 DPC 处理生殖器官干物质积累量 (RDMA)、生殖器官占总干物质的比例 (PRTDMA)、生殖器官最大积累速率和理论积累最大值增加 3.5%–76.9%；根和铃 <sup>13</sup>C 吸收量和分配率增加 0.02%–117.2%。相关性分析表明，两品种 RDMA 和 PRTDMA 与光合性能呈显著正相关，其中 L<sub>74</sub> 品种同化物转运存在一定非协同性。

(4) 滴施 DPC 可塑造适宜机采的株型，优化棉铃分布，促进产量增加，并减少 DPC 残留量。H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 和其它滴施 DPC 处理盛蕾期至吐絮期的生育天数缩短 3–9 d，株高、果枝长度、株宽和果枝始节高降低 1.3%–47.8%，茎粗增加 1.7%–11.1%；单位面积剩余叶片数量和悬挂叶减少 1.7%–59.1%，脱叶率和吐絮率增加 0.05%–8.8%。同时，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理下部、中部、内部和外部铃数和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理中部、内部和外部铃数较 D<sub>0</sub> 和其它滴施 DPC 处理增加 1.5%–75.0%。此外，H<sub>720</sub> 品种 D<sub>4</sub> 处理和 L<sub>74</sub> 品种 D<sub>6</sub> 处理较 D<sub>0</sub> 和其它滴施 DPC 处理铃数、铃重、籽棉产量和皮棉产量增加 0.2%–8.5%，且产量和纤维品质与 S<sub>1</sub> 处理相比均无显著差异，但棉株内的 DPC 残留降低 46.5%–71.0%，并与土壤中的 DPC 残留量均低于国内外制定的最大残留水平。结构方程模型表明，H<sub>720</sub> 品种产量形成依赖于茎粗驱动的铃数增加及光合速率对生殖器官生物量的持续驱动，但其根系易受水盐抑制而负向影响产量；L<sub>74</sub> 品种产量形成则通过茎粗驱动的铃数及叶绿素驱动的光合速率，以及 IAA 与 GA<sub>3</sub> 的拮抗调控优化源库关系，且其根系受盐分抑制但不直接影响产量。

**【结论】** 针对 DPC 敏感型与钝感型品种，分别滴施 4 倍和 6 倍叶面喷施剂量的 DPC，可通过调控侧根内源激素信号及相关基因表达，促进根系构型建成，间接改善根区水盐运移环境；增强叶片光合性能和重塑激素稳态，驱动同化产物向生殖器官分配；塑造适宜机采的紧凑株型并优化棉铃空间分布，最终达到与喷施 DPC 相当的产量与品质水平，具备替代叶面喷施潜力。

**关键词：** 根部滴施；缩节胺响应；根系发育；源库关系；棉花产量

论文类型：B（应用研究）

## Abstract

**【Object】** Xinjiang is the largest cotton production base in China. In the context of modern cotton cultivation in Xinjiang that emphasizes cost saving and efficiency improvement, the application of 1,1-dimethyl piperidinium chloride (DPC) through root drip irrigation has potential advantages of reducing the cost of manual and agricultural machinery operation required for traditional DPC foliar spraying and avoiding damage to cotton plants caused by mechanical operations. However, there is still a lack of systematic research on the physiological mechanism by which drip DPC induces cotton plant response through root absorption, especially the appropriate drip application dose of DPC and the pathway driving yield formation for different DPC sensitive cotton varieties are still unclear. The weak research on relevant basic theories has limited the promotion and application of drip DPC technology in cotton in Xinjiang. Therefore, this study systematically investigated the response patterns of root zone soil microenvironment and root growth, lateral root hormone signals and transcriptome, photosynthetic physiology and matter accumulation, yield and quality, as well as residue analysis to drip DPC application by setting different combinations of DPC dosage and DPC sensitive cultivars. It clarified the regulatory mechanisms of drip DPC on root growth and physiological characteristics, and its action pathways affecting aboveground growth, development, yield and quality formation, and comprehensively evaluated the application potential of drip DPC on cotton cultivars with different DPC sensitivity. The research results are of great significance to enrich and develop the green and simple cultivation technology system of water, fertilizer and pesticide integration.

**【Methods】** The experiment was conducted in the experimental field of the Cotton Research Institute of Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences from 2023 to 2024. A two-factor split plot design was adopted in this study. The main plots consisted of two cotton cultivars, which were DPC sensitive cultivar Huiyuan 720 (H<sub>720</sub>) and DPC insensitive cultivar Xinluzao 74 (L<sub>74</sub>). The sub plot was DPC treatment, which includes no DPC (D<sub>0</sub>, 0 g ha<sup>-1</sup> in both years), foliar spraying DPC (S<sub>1</sub>, 330 g ha<sup>-1</sup> in 2023 and 375 g ha<sup>-1</sup> in 2024), drip application of the same dose as spraying DPC (D<sub>1</sub>, 330 g ha<sup>-1</sup> in 2023 and 375 g ha<sup>-1</sup> in 2024), drip application of 4 times the dose of spraying DPC (D<sub>4</sub>, 1320 g ha<sup>-1</sup> in 2023 and 1500 g ha<sup>-1</sup> in 2024), and drip application of 6 times the dose of spraying DPC (D<sub>6</sub>, 1980 g ha<sup>-1</sup> in 2023 and 2250 g ha<sup>-1</sup> in 2024). The root zone soil microenvironment factors, root morphology and distribution, root physiology and transcriptome sequencing, leaf photosynthetic physiology, matter accumulation and distribution, <sup>13</sup>C isotope tracing, machine harvesting suitability index, yield and quality and DPC residue were systematically measured during the key growth stages of cotton.

**【Results】**(1) Dripping DPC can promote the stable establishment of root architecture and indirectly improve the water and salt transport environment in the root zone. Dripping DPC could affect the dynamic changes of soil moisture content (SMC), pH and electrical conductivity (EC) during the growth period. In particular, the increase of SMC in 0-60 cm soil layer and EC in 0-20 cm soil layer from peak squaring to peak flowering stage, and pH in 20-60 cm soil layer from peak squaring to peak bolling stage of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment

increased by 0.2%–15.7% compared with D<sub>0</sub> treatment. Compared with D<sub>0</sub> treatment, the increase of SMC, pH and EC in 0–40 cm soil layer of L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment cultivar decreased by 0.1%–3.2%. At the same time, the peak soil respiration rate at the flowering period of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 8.1% and 23.1%, respectively, compared with D<sub>0</sub> treatment. In addition, the total root dry matter density (RDMD), root length density (RLD), root surface area density (RSD) and root volume density (RVD) of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 3.3%–29.9% compared with other treatments. Among them, the RDMD, RLD, RSD and RVD of 0–40 cm soil layer increased by 0.5%–50.3%. The specific root length increased by 0.6%–11.1%, and the specific root surface area and specific root volume decreased by 0.1%–6.2%. Lateral root activity (LRA), lateral root hexose and starch content at the peak squaring stage, peak flowering stage, and peak bolling stage increased by 0.1%–108.8%, while sucrose content decreased by 0.2%–56.5%. Correlation and path analysis indicate that root morphological parameters were significantly negatively correlated with soil microenvironment factors, and significantly positively correlated with lateral root activity and non-structural carbohydrate content. Among them, SMC was the main external limiting factor restricting root growth, and LRA was the core internal driving factor promoting root growth.

(2) Dripping DPC can induce the expression of hormone related genes in lateral root, regulate hormone homeostasis, promote lateral root formation and enhance stress resistance. The contents of auxin (IAA) and abscisic acid (ABA) in the lateral roots of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 1.0%–199.7% and the content of gibberellin (GA<sub>3</sub>) decreased by 0.7%–52.1% compared with other treatments in the 0–60 cm soil layer at the peak squaring stage, peak flowering stage, and peak bolling stage; IAA/GA<sub>3</sub> increased by 11.9%–526.6%, GA<sub>3</sub>/ABA decreased by 2.0%–717.7%, and the IAA/ABA in the 40–60 cm soil layer at the peak flowering stage increased by 5.9%–114.2%. In addition, the differentially expressed genes (DEGs) in the lateral roots of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment at the peak bolling stage were enriched in molecular functional terms related to hormone related biological processes. Among them, 6526 DEGs in H<sub>720</sub> cultivar were enriched in 131 metabolic pathways, focusing more on the hormone core pathway. At the same time, the expression levels of key genes *GhIAA20*, *GhAUX*, *GhGA3ox1* and *GhABF4* in IAA, GA and ABA signaling pathways of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment compared to other treatments were increased by 2.1%–888.0%, while the expression levels of *GhGA2ox1* and *GhPYL4* in the GA and ABA signaling pathways decreased by 2.4%–56.3%, thereby synergistically regulating hormone signals in lateral roots.

(3) Dripping DPC can optimize leaf physiological functions, improve photosynthetic production performance, and drive the distribution of assimilation products to roots and bolls. The specific leaf area of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment decreased by 0.7%–4.8% compared with D<sub>0</sub> and other drip DPC treatments at peak flowering stage, peak bolling stage and late peak bolling stage; Chlorophyll content increased by 1.2%–24.1%; transpiration rate, intercellular carbon dioxide concentration, stomatal conductance, maximum photochemical quantum conversion efficiency of PSII and non-photochemical quenching coefficient decreased by 0.4%–41.6%, net photosynthetic rate, actual photosynthetic efficiency of PSII, relative electron transport rate of PSII and photochemical quenching coefficient increased by 1.7%–41.6%; leaf IAA and GA<sub>3</sub> contents decreased by 4.6%–60.6%, while ABA content increased by 6.1%–45.6%; leaf hexose, sucrose and starch contents decreased by 2.8%–35.7%, and there was no significant difference

between the above indicators compared with S<sub>1</sub> treatment. In addition, the dry matter accumulation of reproductive organs (RDMA), the proportion of reproductive organs to total dry matter (PRTDMA), the maximum accumulation rate of reproductive organs and the maximum theoretical accumulation of reproductive organs of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 3.5%–76.9% compared with D<sub>0</sub> and other drip DPC treatments; <sup>13</sup>C uptake and distribution rate of roots and bolls increased by 0.02%–117.2%. Correlation analysis showed that RDMA and PRTDMA of the two cultivars were significantly positively correlated with photosynthetic performance, with L<sub>74</sub> cultivar exhibiting a certain degree of non-synergistic transport of assimilates.

(4) Dripping DPC can shape the plant type suitable for mechanical harvesting, optimize boll distribution, promote the increase of yield, and reduce DPC residues. Compared with D<sub>0</sub> and other drip DPC treatments, the growth days from peak squaring stage to bolling opening stage of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment were shortened by 3–9 d, plant height, fruit branch length, plant width and fruit branch initial section height were reduced by 1.3%–47.8%, and stem diameter was increased by 1.7%–11.1%; the number of remaining leaves and hanging leaves per unit area decreased by 1.7%–59.1%, and the defoliation rate and boll opening rate increased by 0.05%–8.8%. At the same time, the number of lower, middle, inner and peripheral bolls of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and the number of middle, inner and peripheral bolls of L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 1.5%–75.0% compared with D<sub>0</sub> and other drip DPC treatments. In addition, the boll number, boll weight, seed cotton yield and lint yield of H<sub>720</sub> in D<sub>4</sub> treatment and L<sub>74</sub> in D<sub>6</sub> treatment increased by 0.2%–8.5% compared with D<sub>0</sub> and other drip DPC treatments, and there was no significant difference in yield and fiber quality compared with S<sub>1</sub> treatment, but the DPC residues in cotton plant decreased by 46.5%–71.0%, and the DPC residues in soil were lower than the maximum residue level established at home and abroad. The structural equation model indicated that the yield formation of H<sub>720</sub> cultivar depended on the increase of boll number driven by stem diameter and the sustained drive of photosynthetic rate on reproductive organ biomass, but its roots were susceptible to water and salt inhibition, which negatively affected the yield. The yield formation of L<sub>74</sub> cultivar was determined by the boll number driven by stem diameter, the photosynthetic rate driven by chlorophyll, and the antagonistic regulation of IAA and GA<sub>3</sub> to optimize the source-sink relationship, its root system was inhibited by salt but does not directly affect yield.

**【Conclusion】** For DPC sensitive cultivar and DPC insensitive cultivar, drip application of 4 and 6 times the dose of spraying DPC, respectively, promoted root architecture establishment by regulating endogenous hormone signaling and related gene expression in the lateral root, which indirectly improved the water and salt transport environment in the root zone; enhanced the photosynthetic performance of leaves and reshaped hormone homeostasis, driving the distribution of assimilates to reproductive organs; shaped the compact plant type suitable for mechanical harvesting and optimized the spatial distribution of cotton bolls, ultimately achieving yield and quality levels equivalent to spraying DPC, thereby demonstrating the potential to replace foliar spraying.

**Key words:** Root drip application; DPC response; Root development; Source-sink relationship; Yield formation

**Type: B** (Applied Research)

# 目录

摘要 .....	I
Abstract .....	III
目录 .....	VI
缩略词表 .....	IX
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 棉花缩节胺化控技术的发展与应用 .....	2
1.2.2 缩节胺对棉花根系生长发育的调控效应 .....	6
1.2.3 缩节胺对棉花叶片生理特性和物质积累的调控效应 .....	8
1.2.4 缩节胺对棉花形态建成和产量品质的调控效应 .....	10
1.2.5 缩节胺在棉花和土壤中的残留分析 .....	11
1.3 问题的提出 .....	11
1.4 研究思路 .....	12
1.4.1 研究目的 .....	12
1.4.2 研究内容 .....	12
1.4.3 技术路线 .....	13
第 2 章 材料与方法 .....	15
2.1 试验区概况 .....	15
2.2 试验设计和田间管理 .....	15
2.2.1 试验材料 .....	15
2.2.2 试验设计 .....	16
2.2.3 田间管理 .....	17
2.3 测定项目和方法 .....	17
2.3.1 根区土壤微环境 .....	17
2.3.2 根系形态 .....	18
2.3.3 根系生理 .....	19
2.3.4 根系内源激素含量和转录组测序 .....	21
2.3.5 光合生理 .....	23
2.3.6 干物质积累与分配 .....	25
2.3.7 <sup>13</sup> C 同化物分配 .....	25

2.3.8 生育特性 .....	27
2.3.9 脱叶吐絮 .....	27
2.3.10 棉铃分布 .....	28
2.3.11 产量构成和纤维品质 .....	28
2.3.12 棉株和土壤缩节胺残留 .....	28
2.4 数据处理与分析 .....	29
第 3 章 滴施 DPC 对根区土壤微环境和根系生长发育协同调控效应.....	30
3.1 结果与分析 .....	30
3.1.1 根区土壤理化性质及呼吸速率.....	30
3.1.2 根系形态参数特征及分布特征.....	40
3.1.3 侧根活力及其碳水化合物含量.....	44
3.1.4 相关性分析.....	54
3.2 讨论.....	60
3.2.1 DPC 处理对根区土壤环境的影响 .....	60
3.2.2 DPC 处理对棉花根系构型的影响 .....	61
3.2.3 DPC 处理对棉花根系生理的影响 .....	61
3.3 小结.....	62
第 4 章 滴施 DPC 介导棉花侧根发育的激素信号与转录组分子解析.....	63
4.1 结果与分析 .....	63
4.1.1 侧根内源激素含量 .....	63
4.1.2 侧根内源激素含量比值 .....	66
4.1.3 侧根转录组分析.....	69
4.2 讨论.....	80
4.2.1 DPC 处理对侧根内源激素含量及比值的影响 .....	80
4.2.2 DPC 调控侧根激素稳态的转录网络解析.....	81
4.3 小结.....	83
第 5 章 滴施 DPC 对叶片光合生理特征和物质积累与分配作用途径.....	84
5.1 结果与分析 .....	84
5.1.1 光合特性 .....	84
5.1.2 生理特性 .....	96
5.1.3 干物质积累与分配.....	101
5.1.4 <sup>13</sup> C 吸收与分配 .....	116
5.1.5 相关性分析.....	119
5.2 讨论.....	121

5.2.1 DPC 处理对棉花叶片光合特性的影响 .....	121
5.2.2 DPC 处理对棉花叶片生理特性的影响 .....	122
5.2.3 DPC 处理对棉花干物质积累和分配的影响.....	124
5.3 小结.....	125
第 6 章 滴施 DPC 对机采棉农艺性状与产量品质的调控及残留分析.....	126
6.1 结果与分析 .....	126
6.1.1 农艺性状与棉铃分布 .....	126
6.1.2 机采性状与纤维品质 .....	139
6.1.3 棉花产量与缩节胺残留 .....	146
6.1.4 相关性分析.....	150
6.1.5 结构方程模型.....	152
6.2 讨论.....	154
6.2.1 DPC 处理对棉花农艺性状和机采适宜性的影响 .....	154
6.2.2 DPC 处理对棉铃分布和产量品质的影响.....	155
6.2.3 DPC 处理对棉株和土壤 DPC 残留的影响.....	156
6.3 小结.....	156
第 7 章 研究结论、创新点与展望 .....	158
7.1 研究结论 .....	158
7.1.1 滴施 DPC 对根区土壤微环境和根系生长发育协同调控效应 .....	158
7.1.2 滴施 DPC 介导棉花侧根发育的激素信号与转录组分子解析 .....	158
7.1.3 滴施 DPC 对叶片光合生理特征和物质积累与分配作用途径 .....	158
7.1.4 滴施 DPC 对机采棉农艺性状与产量品质的调控及残留分析 .....	159
7.2 创新点.....	159
7.3 展望.....	160
参考文献 .....	161
致谢 .....	179
作者简介 .....	180
导师评阅表.....	182

## 缩略词表

英文缩写 Abbreviation	英文全称 Full term	中文全称 Chinese term
ABA	Absciscic acid	脱落酸
C <sub>a</sub>	Chlorophyll a content	叶绿素 a 含量
C <sub>b</sub>	Chlorophyll b content	叶绿素 b 含量
C <sub>a+b</sub>	Chlorophyll a+b content	叶绿素 a+b 含量
C <sub>a/b</sub>	Chlorophyll a content/chlorophyll b content	叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量
C <sub>i</sub>	Intercellular CO <sub>2</sub> concentration	胞间二氧化碳浓度
<sup>13</sup> C <sub>i</sub>	Absorption capacity of <sup>13</sup> C	<sup>13</sup> C 的吸收量
DMA	Dry matter accumulation	干物质积累量
DPC	N, N-dimethyl piperidinium chloride	缩节胺
ETR	Electron transport rate	PSII 的相对电子传递速率
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	Variable fluorescence/maximum fluorescence	PSII 最大光化学量子转换效率
GA <sub>3</sub>	Gibberellin	赤霉素
G <sub>s</sub>	Stomatal conductance	气孔导度
HFFB	Height of first fruit branch	果枝始节高
IAA	Indole-3-acetic acid	生长素
LFBL	Lower fruit branch length	上部果枝长度
LRA	Lateral root activity	侧根活力
L <sub>GA3</sub>	Leaf gibberellin content	叶片赤霉素含量
L <sub>IAA</sub>	Leaf indole-3-acetic acid content	叶片生长素含量
L <sub>Sucrose</sub>	Leaf sucrose content	叶片蔗糖含量
MFBL	Middle fruit branch length	中部果枝长度
NPQ	Non-photochemical quenching	非光化学淬灭系数
NRLPUA	Numbers of remaining leaves per unit area	单位面积剩余叶片数量
P <sub>n</sub>	Net photosynthetic rate	净光合速率
PRTDMA	Proportion of reproductive organs to the total dry matter accumulation	生殖器官占总干物质积累量的比例
qP	Photochemical quenching	光化学淬灭系数
RDMA	Reproductive organ dry matter accumulation	生殖器官干物质积累量

---

RDMD	Root dry matter density	根干物质质量密度
R <sub>Hexose</sub>	Lateral root hexose content	侧根己糖含量
RLD	Root length density	根长密度
RSD	Root surface area density	根表面积密度
RVD	Root volume density	根体积密度
SMC	Soil moisture content	土壤含水量
SLA	Specific leaf area	比叶面积
SRL	Specific root length	比根长
SRS	Specific root surface area	比根表面积
SRV	Specific root volume	比根体积
Tr	Transpiration rate	蒸腾速率
T <sub>RDMD</sub>	Total root dry matter density	总根长密度
UFBL	Upper fruit branch length	上部果枝长度
Y(II)	PSII actual quantum yield	PSII 的实际光合效率

---

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

我国是全球最大的植棉国之一，其中以新疆为主的西北内陆棉区是我国的核心棉花产区。据国家统计局数据显示，2025年新疆棉花种植面积和总产分别占全国的87.0%和92.8%，单产也远远高于全国平均水平（中华人民共和国国家统计局，2025）。新疆棉花产业的快速发展与栽培技术的创新突破密切相关（Feng et al., 2017）。近几年，在植棉成本持续增加和环境资源约束加剧的背景下，建立和应用具有中国特色的棉花轻简高效与绿色栽培技术，已成为保障我国棉花提质增效和产业可持续发展的必然要求（Feng et al., 2022）。其中，以缩节胺（N, N-dimethyl piperidinium chloride, DPC）为主的化学调控技术能够改善棉花群体结构，助力实现机采棉高产优质，是发展轻简高效栽培技术体系中的关键环节之一（Feng et al., 2022; Feng et al., 2024）。长期以来，新疆棉区进行DPC系统化调的施用方式主要以机械（农机或无人机）叶面喷施为主，但这种多频率喷施DPC不仅增加了劳动力和机械作业成本的投入，还加剧了燃料消耗和二氧化碳排放的问题（Aldakhil et al., 2019）。因此，探索一种操作简单、低成本且环境友好的DPC施用方式对完善新疆绿色轻简化栽培体系至关重要。

随着膜下滴灌水肥一体化技术的不断成熟、以及实际生产需求，逐步发展出“水肥药一体化”技术，即利用滴灌系统将水、肥液和药液（杀菌剂、杀虫剂和除草剂等）通过根部输送至棉株体内，不仅表现出良好的防治效果，且具有省工省时的优势（Ghidui et al., 2012; 吕宁等, 2019; 唐茂淞, 2023）。考虑新疆棉花全生育期滴灌频率（8~12次），覆盖DPC系统化调时期，以及DPC不仅可以被叶面吸收，也可通过根系吸收。同时，DPC随水滴施可以降低植棉成本，并避免农机作业对棉花的损伤。因此，在“水肥药一体化”技术中，将DPC随水滴施具有重要的实践可行性（张特等, 2022a; 娄善伟等, 2023a）。

近年研究表明，滴施DPC对棉花生长的控制效果与叶面喷施DPC相似，且根系长度与根表面积有所增加，表明滴施DPC可以通过根系吸收发挥药效，同时对根系具有一定的调控作用，有助于维持水分及养分的正常吸收。然而，由于DPC易被土壤吸附，其调控效果与滴施DPC剂量的增加并不成正比，且DPC对棉花的调控效果还与品种对DPC的敏感性差异程度有关，导致DPC随水滴施的应用仍存在困难（Bogiani and Rosolem, 2009; 张特等, 2022a; 伍林等, 2025）。目前，关于滴施DPC经根系吸收后，如何诱导根系生长发育，及其驱动产量形成的路径尚不明确，尤其是滴施DPC剂量与不同DPC敏感型品种协同调控效应仍缺乏系统解析。

基于此,我们假设:针对不同 DPC 敏感型品种,滴施适宜剂量的 DPC 可通过影响棉花根系信号传导机制,诱导根系生长发育,并调控根区土壤微环境;同时,DPC 经根系吸收后,可优化株型和生理特性,促进光合产物更多地向生殖器官分配,从而协同调控地上部生长与产量品质形成。

因此,本研究旨在揭示滴施 DPC 剂量调控下,不同 DPC 敏感型品种在根系特征及根区土壤微环境方面所表现出的差异化响应规律;阐明滴施 DPC 经根系吸收后对地上部生长发育及产量品质形成的作用途径;并结合棉株和土壤中的 DPC 残留量,综合评价滴施 DPC 在不同 DPC 敏感型棉花品种上的应用潜力。研究结果对挖掘棉花根系的作用潜力,丰富水肥药(控)一体化技术及完善新疆绿色轻简化栽培管理技术体系具有重要的理论价值和实践指导意义。

## 1.2 国内外研究现状

棉花是锦葵科(Malvaceae)棉属(*Gossypium*)的一年生或多年生草本植物,经长期的人工驯化、培育和选择,现在广泛栽培的棉花已成为一年生的草本植物。我国棉花种植历史悠久,传统植棉模式主要依赖于劳动密集型的精耕细作,但进入 21 世纪以来,随着大量劳动力向城市转移和植棉成本的不断攀升,制约了棉花产业的可持续发展,还带来严重的环境问题(Feng et al., 2022)。针对这一系列挑战,广大棉花科技工作人员对传统精耕细作和集约化栽培技术进行改革创新,提出建立了具有中国特色的棉花轻简化生产与发展模式(董合忠, 2016)。

近年来,以新疆为主的西北内陆优势棉花产区,大力发展轻简高效植棉技术(白岩等, 2017)。“矮、密、早”栽培技术是新疆棉花发展的精髓,考虑“轻简高效”是市场经济环境下的必然选择,为推动二者深度融合,亟需调整优化新疆棉花轻简高效策略下“矮、密、早”关键栽培技术(田立文等, 2017)。其中,DPC 化调技术是协调“矮、密、早”的核心手段,即能有效矮化植株、为高密度种植创造合理的群体结构,还有促进棉花早熟的作用,但该技术在轻简化应用上仍存在较大的优化空间(田立文等, 2017; 娄善伟等, 2021; 张特等, 2021)。因此,在新疆棉花生产对轻简高效栽培的需求日趋紧迫的背景下,深入梳理 DPC 的发展应用基础,并进一步推进和创新改造 DPC 系统化控技术,对保障新疆棉区健康可持续发展具有重要的实践意义。

### 1.2.1 棉花缩节胺化控技术的发展与应用

#### 1.2.1.1 缩节胺的发展历程

缩节胺(Mepiquat chloride)是一种外源抑制性季铵盐类植物生长延缓剂,化学名称