

分类号：
学号：2023210008

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



水盐胁迫对滴灌土壤环境及棉花生长的影响研究

学位申请人	权震
指导教师	叶含春 教授 王恒 高级工程师
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：20232110008

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



水盐胁迫对滴灌土壤环境及棉花生长的影响研究

学位申请人	权震
指导教师	叶含春 教授 王恒 高级工程师
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

**Research on the effects of water and salt stress on the soil environment
and cotton growth under drip irrigation**

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

By
Quan Zhen

(Civil and Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. **Ye Han-chun**

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： 权震

时间： 2016年5月20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： 权震

时间： 2016年5月20日

导师签名： 叶合春

时间： 2016年5月20日

摘要

目的: 针对新疆地区土壤盐渍化加剧、水资源短缺以及棉花生产受限等问题, 因此, 围绕盐渍化土壤改良与高效利用开展研究, 对于推动农业可持续发展具有重要意义。本文以新疆典型作物棉花为研究对象, 基于滴灌条件, 系统分析不同土壤初始盐度和水分亏缺水平对棉花生长发育、光合生理特性、产量形成及纤维品质的影响, 明确水盐胁迫下滴灌棉花的响应特征及其调控机制。在此基础上, 探讨适宜的水盐调控范围与优化模式, 以期新疆盐渍化土壤棉花滴灌栽培管理、水盐资源高效利用及棉花稳产优质生产提供理论依据和技术参考。

方法: 本研究采用盆栽试验的方法, 模拟新疆地区典型的盐碱化土壤条件, 并在人工气候室内开展试验。试验设计包括不同土壤初始盐度 (2 g/kg、4 g/kg、6 g/kg、8 g/kg、12 g/kg、16 g/kg、20 g/kg) 和不同水分亏缺 (80%、60%、40%田间持水量) 条件。试验共设置 21 个处理, 3 次重复。系统测定不同处理下土壤水盐、全氮、有机碳、棉花生理生长指标、光合荧光特性、产量构成及纤维品质指标, 并通过比较分析土壤环境变化与棉花响应特征之间的关系, 阐明水盐胁迫对滴灌棉花生长发育、产量形成及品质演变的影响规律。

结果: 土壤水盐分布特征。研究发现, 随着水分亏缺程度的增加, 土壤含水量逐渐降低, 且土壤盐分在表层土壤 (0~10 cm) 出现明显积累。土壤盐度与水分亏缺的交互作用对土壤的水盐分布产生显著影响。在苗期, 土壤含水量在低盐 (S1) 条件下较高, 但随着盐度的增加, 土壤水分含量显著下降, 尤其是在水分亏缺较大的条件下 (W3 处理)。在生育期后期 (吐絮期), 盐分积累进一步加剧, 尤其是在较高盐分处理下, 导致土壤中盐分在 10~20 cm 的土层中呈现较高的积累趋势。

棉花生理生长的影响。棉花的株高、茎粗、叶面积指数等生长指标均受到水盐胁迫的显著影响。随着土壤盐度的升高和水分亏缺的加剧, 棉花的生长表现出显著的抑制作用。特别是在 W3 (严重水分亏缺) 条件下, 棉花的生长指标普遍降低, 株高、茎粗、叶面积指数较对照组 (W1) 降低约 20% 至 40%。此外, 盐分胁迫还显著影响棉花的光合作用和生理代谢活动, 净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr) 和气孔导度 (Gs) 均随水分亏缺和盐度升高而显著降低, 并在花铃期达到最大值, 而胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 整体呈上升趋势。最大光量子产量 (Fv/Fm) 和 PSII潜在活性 (Fv/F0) 随生育期推进逐渐降低, 而非光化学淬灭 (NPQt) 逐渐升高光合效率和气孔导度的下降与生长抑制之间有显著相关性。

棉花产量与品质。在水盐胁迫条件下, 棉花的产量明显下降。不同盐分处理下的棉花产量存在较大差异, 较高盐分条件下棉花的单株产量和纤维质量显著下降。尤其是土壤盐度超过 12 g/kg 时, 棉花的成铃数和单铃重显著减少, 且纤维长度和强度等品质指标也受到影响。水分亏缺对棉花产量的影响同样显著, 尤其是水分亏缺程度较大 (W3 处理) 时, 产量下降最为明显。通径分析表明, 收获生物量对产量的直接影响最大 (直接通径系数为 0.53), 而叶面积指数对产量的间接影响最大 (0.99);

土壤初始含盐量对棉花品质指数 FQI 的直接影响最大 (-0.66)，表明盐分是影响棉花品质的重要限制因子。主成分分析显示，S1W1 处理表现最优。基于熵权-TOPSIS 综合评价结果，产量在综合评价中的重要性最大。综合评价结果同样表明 S1W1 处理最接近理想解，为本研究条件下最优水盐组合。回归分析结果表明，土壤初始含盐量与水分亏缺程度对棉花产量和品质指数均具有极显著影响 ($P < 0.01$)，当土壤初始盐度为 $2.00 \sim 6.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 且土壤含水量为 $60.29\% \sim 80\% \text{FC}$ 时，棉花综合效益可达到较优水平。

结论：以“控盐保水、稳源促铃、优产提质”为核心，通过合理调节土壤盐分水平和灌溉强度，改善棉花根际水盐环境，增强叶面积形成能力和干物质积累水平，促进光合同化产物向生殖器官分配，实现产量与品质的协同提升。研究表明，水盐胁迫会显著抑制棉花单株铃数、单铃重、籽棉产量及纤维品质形成，而低盐和适宜供水条件有利于维持较高的产量和品质水平。在本研究条件下，S1W1 处理综合表现最优，为最佳水盐组合；适宜调控范围为土壤初始盐度 $2.00 \sim 6.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土壤含水量 $60.29\% \sim 80\% \text{FC}$ 。该技术模式可为盐渍化地区棉花滴灌栽培中的精准灌溉、稳产增效和可持续发展提供理论依据和技术参考。

关键词：水盐胁迫；棉花生长；产量品质；盐碱地；农业可持续发展

Abstract

Objective: In view of the increasing soil salinization, water scarcity, and constraints on cotton production in Xinjiang, research on the amelioration and efficient utilization of saline soils is of great significance for promoting sustainable agricultural development. Taking cotton, a representative crop in Xinjiang, as the research object, this study systematically investigated the effects of different initial soil salinity levels and water-deficit regimes on cotton growth and development, photosynthetic physiological characteristics, yield formation, and fiber quality under drip irrigation conditions. The aim was to clarify the response characteristics and regulatory mechanisms of drip-irrigated cotton under combined water and salt stress, and to determine the suitable range and optimal mode of water–salt regulation, so as to provide a theoretical basis and technical support for drip-irrigated cotton cultivation, efficient water–salt resource utilization, and stable, high-quality cotton production in saline soils of Xinjiang.

Methods: A pot experiment was conducted in an artificial climate chamber to simulate typical saline soil conditions in Xinjiang. Seven initial soil salinity levels (2, 4, 6, 8, 12, 16, and 20 g·kg⁻¹) and three soil moisture levels (80%, 60%, and 40% of field capacity) were established, resulting in 21 treatments with three replicates each. Soil water and salt contents, total nitrogen, organic carbon, cotton physiological and growth traits, photosynthetic fluorescence characteristics, yield components, and fiber quality parameters were systematically measured. By analyzing the relationships between soil environmental changes and cotton responses under different treatments, the effects of water and salt stress on cotton growth, yield formation, and quality variation were elucidated.

Results: Water deficit significantly reduced soil moisture content, while salt accumulation was mainly concentrated in the 0–10 cm surface layer. The interaction between salinity and water deficit had significant effects on soil water–salt distribution. Cotton growth traits, including plant height, stem diameter, and leaf area index, were significantly inhibited with increasing soil salinity and water deficit. Net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), and stomatal conductance (Gs) all decreased with intensified water and salt stress, whereas intercellular CO₂ concentration (Ci) showed an increasing trend. Maximum quantum yield of PSII (Fv/Fm) and PSII potential activity (Fv/F₀) gradually declined during the growth period, while non-photochemical quenching (NPQt) increased. Under water and salt stress, cotton yield and fiber quality decreased significantly. When soil salinity exceeded 12 g·kg⁻¹, boll number per plant, boll weight, fiber length, and fiber strength were markedly reduced. Path analysis showed that harvest biomass had the greatest direct effect on yield (direct path coefficient = 0.53), whereas leaf area index had the greatest indirect effect (0.99). Initial soil salinity exerted the greatest direct negative effect on the fiber quality index (FQI) (−0.66), indicating that salinity was a major limiting factor for cotton quality. Principal component analysis and

entropy weight–TOPSIS evaluation consistently identified the S1W1 treatment as the optimal water–salt combination. Regression analysis showed that both initial soil salinity and water-deficit level had extremely significant effects on cotton yield and quality index ($P < 0.01$). The optimal comprehensive benefit was achieved when the initial soil salinity ranged from 2.00 to 6.82 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and soil moisture was maintained at 60.29%–80% of field capacity.

Conclusion: A water–salt coordinated regulation mode for drip-irrigated cotton was established with the core strategy of “salt control, water conservation, source stabilization, boll promotion, yield improvement, and quality enhancement.” By rationally regulating soil salinity and irrigation intensity, the root-zone water–salt environment of cotton can be improved, leaf area formation and dry matter accumulation can be enhanced, and the allocation of photosynthates to reproductive organs can be promoted, thereby achieving the coordinated improvement of yield and fiber quality. Under the conditions of this study, the S1W1 treatment showed the best comprehensive performance and was identified as the optimal water–salt combination. The suitable regulation range was an initial soil salinity of 2.00–6.82 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and a soil moisture content of 60.29%–80% of field capacity. This technical mode can provide theoretical support and practical guidance for precision irrigation, stable yield improvement, and sustainable development of drip-irrigated cotton cultivation in saline regions.

Key words: water and salt stress; cotton growth; yield and quality; saline soil; sustainable agriculture

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 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 膜下滴灌土壤水盐运移的研究进展.....	3
1.2.2 水盐胁迫对作物生长发育影响的研究进展.....	4
1.2.3 棉花抗逆性的研究进展.....	7
1.3 研究目标.....	8
1.3.1 水盐胁迫对滴灌土壤环境的影响.....	8
1.3.2 水盐胁迫对滴灌棉花生理生长的影响.....	9
1.3.3 水盐胁迫对滴灌棉花产量和品质的影响.....	9
1.4 拟解决的关键问题.....	9
1.5 技术路线.....	9
第二章 试验材料与方法.....	10
2.1 试验区概况.....	10
2.2 试验设计.....	10
2.3 测定项目与方法.....	12
2.3.1 土壤水分.....	12
2.3.2 土壤盐分.....	12
2.3.3 土壤全氮、有机碳和碳氮比.....	12
2.3.4 生长指标测定.....	13
2.3.5 干物质积累与根系形态测定.....	13
2.3.6 光合指标测定.....	13
2.3.7 荧光参数测定.....	13
2.3.8 棉花产量及纤维品质测定.....	14
2.3.9 水分利用效率.....	14
2.4 气象控制方法.....	14
2.5 数据处理与分析方法.....	14
第三章 水盐胁迫对滴灌棉花土壤环境的影响.....	16
3.1 水盐胁迫对滴灌土壤含水量的影响.....	16

3.2	水盐胁迫对滴灌土壤含盐量的影响	17
3.3	水盐胁迫对滴灌土壤碳氮运移的影响	19
3.3.1	土壤全氮	19
3.3.2	土壤有机碳	19
3.3.3	土壤碳氮比	20
3.4	讨论	21
3.5	小结	23
第四章	水盐胁迫对滴灌棉花生理生长的影响	25
4.1	水盐胁迫对滴灌棉花生长形态指标的影响	25
4.1.1	棉花株高	25
4.1.2	棉花茎粗	26
4.1.3	棉花叶面积	27
4.1.4	棉花根系生长	28
4.1.5	棉花干物质积累	30
4.2	水盐胁迫对滴灌棉花光合指标的影响	32
4.3	水盐胁迫对滴灌棉花荧光指标的影响	36
4.4	讨论	39
4.5	小结	41
第五章	水盐胁迫对滴灌棉花产量及品质的影响	43
5.1	水盐胁迫对滴灌棉花产量指标的影响	43
5.2	水盐胁迫对滴灌棉花品质指标的影响	46
5.3	基于水盐胁迫下滴灌棉花水盐调控综合评价	47
5.3.1	水盐胁迫对滴灌棉花产量和品质的通径分析	47
5.3.2	水盐胁迫对滴灌棉花产量和品质的主成分分析	51
5.3.3	水盐胁迫对滴灌棉花产量和品质的熵权-TOPSIS 分析	53
5.3.4	水盐胁迫对滴灌棉花产量和品质的回归分析	58
5.4	讨论	60
5.5	小结	60
第六章	结论与展望	62
6.1	结论	62
6.2	展望	63
	参考文献	65
	致谢	73
	作者简介	74

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

新疆位于我国西北内陆干旱地带，气候条件以降水稀少、蒸发强烈为主要特征，区域内盐碱化土壤分布范围较大^[1]，新疆现有盐碱化耕地面积约 $1.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，约占耕地总面积的 32%；其中，轻度和中度盐碱地占比达 82%^[2-4]，土壤盐碱化已成为制约新疆农业生产的重要因素，并对粮食产量造成显著影响^[5]。此外，部分灌区在灌溉管理方面仍存在不合理现象，易引起地下水位上升和土壤水分蒸发增强，进而诱发并加重土壤次生盐碱化问题^[6]。因此，如何提高盐碱地资源利用效率、推动土地资源持续利用，已成为新疆农业发展中亟需解决的重要问题。

新疆是典型的灌溉农业分布区，该区降水稀少、蒸发强烈，而农业生产对灌溉的依赖程度较高。相关研究表明，新疆部分地区年均降水量仅为 6.3~25.3 mm，区域水热条件具有显著的干旱特征^[7,8]。与此同时，新疆水资源配置矛盾较为突出，农业用水在总用水中占比超过 95%^[9]。由于农业耗水量大、用水结构偏重以及水资源供需不协调，农业用水比重高和利用效率有待提升已成为区域农业发展中的突出问题^[10]。目前，新疆农业生产仍以灌溉农业为主，近年来以大田滴灌为代表的高效节水灌溉技术得到广泛推广，并在节水增效方面取得了明显成效。尽管如此，现阶段节水灌溉实践中仍存在一些亟待解决的问题，如不同区域条件下灌溉模式适配性不足、用水效率提升空间仍然较大^[11]，因此，结合区域资源条件，探索因地制宜、科学高效的节水灌溉发展路径^[12]，对于促进新疆农业高质量发展具有重要意义！

棉花作为耐盐性相对较强的作物之一^[13]，也是我国农业生产体系中的重要经济作物，在农业经济和棉纺产业链中发挥着重要作用。近年来随着棉花产业持续发展，生产能力不断提升，我国已成为全球重要的棉花生产国。新疆作为我国棉花主产区之一，棉花生产不仅是当地农民增收的重要途径，也是我国商品棉供给的重要保障^[14]。然而，受土壤盐渍化、土壤肥力偏低及栽培管理条件等多种因素影响，新疆部分棉区棉花单产提升仍受到一定限制。面对新疆绿洲棉区土壤盐渍化程度较高、土壤肥力普遍不足等现实问题，围绕绿洲棉区作物根区水盐环境特征开展研究，明确水盐关系对棉花生理生长和产量形成的影响，对于进一步挖掘新疆棉区增产潜力具有重要意义^[15,16]。

盐分胁迫是限制作物正常生长和产量稳定提升的主要逆境因素之一，也是制约盐渍化地区农业生产的重要原因。围绕土壤盐渍化治理，国内外学者已从工程、化学、农艺和生物等多个方面开展了大量研究，并针对不同类型的盐渍化土壤提出了相应的改良措

施^[13,17]，其中，生物改良因能够兼顾土壤性质改善、植被恢复和土地利用提升，被认为是盐碱地治理的重要途径之一^[18]。在盐胁迫条件下，植物的水分吸收、离子平衡及生理代谢过程均会发生不同程度的变化^[19]，还会改变土壤中水、热、盐的时空分布特征，进而影响根区环境稳定性。土壤水热盐过程相互耦合，其动态变化直接关系到作物生长发育及盐渍化土壤的调控效果^[20]，影响农业的可持续发展。而水势是表征植物水分状况及其对逆境响应的重要指标，能够较敏感地反映土壤水分条件与植物生长之间的关系。适宜的水分调控有助于维持细胞吸水能力，并在一定程度上提高植物对盐胁迫的适应能力。近年来，关于耐盐植物的研究多集中于分子调控和基因表达等层面^[21]，而针对不同盐分条件下植株生长响应及其关键水分生理指标的研究仍需进一步深化。棉花作为一种耐盐性相对较强的经济作物^[22,23]，了在盐渍化地区农业生产中具有重要应用价值。因此，以棉花为研究对象，系统分析水盐胁迫条件下其生长及生理生化特征的变化，对于阐明棉花对盐胁迫的响应机制、提高盐碱地利用效率以及优化区域土壤水盐调控具有重要意义。本研究通过盆栽试验探讨不同水盐条件下棉花生长和生理生化指标的响应特征，以期对盐碱地改良利用和棉花高效生产提供理论依据。

因此，针对新疆盐渍化土壤滴灌棉花生产中的水盐协同调控需求，本研究在已有研究基础上，采用温室盆栽试验，以滴灌方式开展棉花栽培试验，并设置土壤初始含盐量和水分亏缺两个处理因素。系统分析不同水盐条件下棉花生理生长及产量的响应规律。研究可为干旱区盐渍化土壤上棉花节水灌溉调控提供理论依据和技术参考，对提升水分利用效率、缓解新疆农业用水压力具有一定现实意义。

1.2 国内外研究现状

目前，全球约有 45×10^6 hm²耕地受到土壤盐渍化影响，土壤盐渍化已成为限制作物产量提升的重要因素之一。对于我国西北干旱半干旱盐碱化地区而言，受自然干旱缺水条件和人类农业活动共同作用，盐碱地土壤水盐运移过程复杂，作物生长过程中水肥利用效率和产量形成均受到明显制约^[24,25]。滴灌通过改变土壤表层水热交换条件和灌溉水分输入方式，对土壤水盐分布、根区生态环境及作物生长发育产生重要调控作用。与传统灌溉方式相比，膜下滴灌能够将灌溉水较为精准地输送至作物根区，减少地表无效蒸发，促进土壤水分在膜下湿润区内的集聚与保持，从而改善根区供水条件。覆膜措施削弱了地表蒸发作用，改变了盐分随水分迁移和再分布过程，使土壤盐分在空间上呈现膜内相对淡化、膜间或湿润边缘易积盐的分布特征^[26]。除此之外，膜下滴灌还会影响根区温度、通气状况及微生物活动，进而改变作物根系生长环境和水肥吸收过程^[27]。因此，深入揭示膜下滴灌土壤水盐变化特征及其对作物生长的影响，对于提升水肥利用效率和保障作物稳产具有重要价值。围绕上述问题，国内外学者已开展了大量研究，并取得了

较为丰富的成果，现有研究主要集中在以下几个方面：

1.2.1 膜下滴灌土壤水盐运移的研究进展

膜下滴灌技术在我国，尤其是在新疆等干旱和半干旱地区已得到广泛应用，围绕其对农田水分、养分及盐分分布的影响也开展了大量研究^[26]，现有研究普遍认为，膜下滴灌在节水增产方面具有明显优势^[28-30]，同时能够在一定程度上降低土壤表层盐分含量^[31]，并抑制地下水返盐过程^[32,33]。然而，与传统地面灌溉方式相比，膜下滴灌改变了土壤表层边界条件，使土壤水分、盐分及养分的迁移过程表现出更强的时空异质性，其迁移规律也更加复杂。

围绕膜下滴灌条件下土壤水盐运移规律，已有研究从室内试验、田间观测和区域对比等多个层面进行了探讨。王全九等^[34]通过室内试验分析了滴灌历时、滴头流量和土壤初始含盐量等因素对盐碱土水分运移过程的影响，结果表明，不同灌水条件下湿润体形成及水分再分布特征存在明显差异。针对不同年限棉田的研究发现^[35]，膜下滴灌条件下土壤水盐动态在作物生育期内均呈波动变化，其中盐分主要积聚于30~60 cm土层。张伟等^[36]在新疆北部地区的研究表明，膜下滴灌条件下表层0~20 cm土壤含水量相对较低，而较深土层含水量相对较高，同时土体存在一定程度的盐分积累现象，且30~50 cm土层积盐较为明显。朱昌欣等^[37]通过土柱入渗试验指出，灌水量、土壤初始含水量、初始含盐量及滴头流量均会影响盐碱土中水分迁移特征，其中滴头流量和土壤初始含水量对湿润体范围及淡化区形成具有重要作用。不同灌区和不同作物条件下的研究还表明，膜下滴灌改变了土壤水分补给和盐分迁移路径，其盐分积累速率与分布形态与灌溉方式密切相关^[38]。综合已有研究可以看出，膜下滴灌条件下土壤盐分分布具有较为明显的空间差异。在水平方向上，盐分多向膜间裸地聚集；在垂向上，膜内表层土壤受灌水淋洗作用影响，盐分含量相对较低，而膜外区域受蒸发作用影响更易发生积盐。随着灌水量增加，湿润区和盐分淋洗范围通常会相应扩大；在相同灌水总量条件下，提高灌水频率有利于增强淋盐效果。岳跃民等^[39]研究表明，根区盐分主要集中于湿润峰边缘，且40~60 cm土层盐分累积较为明显，而60~100 cm土层受膜下滴灌影响相对较弱。于晓瑞等^[40]进一步指出，长期膜下滴灌条件下棉田土壤盐分变化呈现先升高、后降低、再升高的趋势，并且当土壤盐分含量超过0.51%时，棉花产量会受到明显抑制。

土壤盐分迁移通常伴随水分运动而发生，其在根区内的积聚与地表蒸发条件下的返盐现象，是盐渍化土壤中较为常见的过程。然而，在降水、蒸发、灌溉及作物耗水等多因素共同作用下，土壤水盐运移过程往往表现出较强的复杂性和动态性。近年来，国内外学者围绕土壤中水盐迁移及其分布特征开展了较多研究，并在不同区域尺度和作物类型上取得了丰富成果^[41-45]。在国内研究方面，余世鹏^[46]对黄淮海平原水盐运动规律进行了分析，揭示了区域尺度上的水盐变化特征，并提出了相应的调控思路。田间尺度上，

刘祯媛等^[47,48]研究了冬小麦节水灌溉条件下土壤水盐动态变化,表明灌溉制度对农田水盐分布具有显著影响。膜下滴灌技术在干旱及半干旱地区的应用明显改善了水分利用效率,并有效抑制表层盐分积累。然而,土壤盐分在膜下灌溉条件下呈现复杂的空间分布特征,需进一步研究以减少盐分对作物根区的负面影响。

1.2.2 水盐胁迫对作物生长发育影响的研究进展

1) 盐分胁迫对作物生长发育影响的研究进展

盐分胁迫会通过渗透效应和离子毒害共同影响植物正常生长,其最直接的表现是植株生长受抑和生物量积累下降。随着土壤含盐量升高,土壤溶质势下降,植物根系吸水难度增加,进而影响细胞分裂与伸长过程,导致叶片扩展速率减缓和营养生长受限^[49]。同时,盐胁迫还会引起叶片气孔关闭,降低植株对CO₂的吸收能力,使光合作用减弱,最终对产量形成产生不利影响^[50]。已有研究表明,在盐胁迫条件下,植物光合能力通常显著下降,且抑制程度会随盐浓度升高和胁迫持续时间延长而加重^[51]。此外,盐逆境还会破坏叶绿体结构,降低叶绿素含量,进而削弱光能利用能力^[52]。李金刚等^[53]指出,盐胁迫对植物最显著的影响表现为生长迟缓和发育受限,并会进一步抑制器官分化与建成。一般认为,当土壤含盐量达到一定水平后,植物生长将受到明显抑制,盐分继续升高则会造成更为严重的伤害^[54]。相关研究还发现^[55],高盐条件会显著抑制种子萌发、降低发芽势^[56],并使幼苗株高、鲜重、干物质积累等指标下降^[57]。由于幼苗期通常是植物对盐分较为敏感的阶段,因此苗期生长表现常被用作评价植物耐盐性的重要依据。总体来看,盐胁迫会导致植物叶片卷曲、叶面积减小和叶色失绿等表型变化,并通过抑制生长、生理代谢和干物质积累对作物生产形成不利影响。

在盐碱复合胁迫条件下,植物体内多种生理过程会受到影响,常表现为矿质营养吸收受阻、细胞膜系统受损以及活性氧过量积累等现象。为适应逆境环境,植物通常会启动一系列防御机制,包括渗透调节物质积累、抗氧化酶活性变化以及非酶抗氧化系统调节等。正常生长条件下,植物体内活性氧的产生与清除处于动态平衡状态;而在逆境胁迫下,过量活性氧会打破这一平衡,进而诱发膜脂过氧化和细胞代谢紊乱^[58]。为减轻氧化损伤,植物可通过提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性,增强对活性氧的清除能力。相关研究表明,随着NaCl浓度升高,沟叶结缕草体内SOD、POD和CAT活性呈增强趋势^[59]。月季在盐胁迫条件下抗氧化酶活性同样有所提高,这有助于缓解氧化伤害并维持植株正常生长^[60]。

当土壤盐分达到一定水平后,土壤溶液水势下降,植物根系吸水受到抑制,进而引发生理性干旱,并对植株正常生长造成不利影响^[61]。已有研究表明,渗透调节是植物缓解盐胁迫伤害的重要适应机制之一^[62]。一般来说,植物通过渗透调节来抵抗盐胁迫,主要是通过有机调节和无机两种调节方式。一般而言,植物主要通过无机离子调节和有机

渗透调节两种方式维持细胞渗透平衡。其中,无机调节主要表现为植物吸收并积累一定量的无机离子,以降低细胞渗透势;有机调节则依赖植物体内合成和积累多种有机渗透调节物质,包括可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等。可溶性糖如海藻糖、葡萄糖和蔗糖等,不仅有助于维持细胞膜和原生质体稳定,还能够在盐胁迫条件下减轻高浓度离子对胞内酶活性的抑制作用^[63]。相关研究表明,甜菜可通过提高脯氨酸和可溶性蛋白含量来维持体内渗透平衡,从而增强逆境适应能力^[64]。霍宏亮^[65]对杜梨幼苗的研究也发现,随着NaCl浓度升高,植株体内游离脯氨酸和可溶性蛋白含量总体呈先升高后缓慢下降的变化趋势。

盐胁迫会对棉花种子萌发和苗期生长产生明显影响,常表现为吸胀过程受扰、出芽延迟及发芽率下降^[66,67]。种子萌发和苗期生长是决定棉花群体建立质量的重要阶段,出苗整齐度、幼苗健壮程度及成活率均与后期产量形成密切相关。水分、温度和盐分是影响棉花萌发与幼苗生长的关键环境因素,其中苗期也是评价棉花抗旱耐盐能力的重要时期。随着盐分胁迫加重,土壤渗透胁迫增强,棉花地上部和地下部生长通常均会受到抑制,表现为侧根长度和数量减少、叶面积扩展受限、茎秆变细以及生物量积累下降等,其中地上部对盐分的敏感性通常高于地下部^[68],此外,盐胁迫还会影响棉花生殖生长过程,随着盐分水平升高,棉铃脱落率增加,单株结铃数减少,而对单铃重的影响相对较小。已有研究表明,较低水平的盐分条件在特定情况下可能对棉花部分生长指标产生一定促进作用^[69],但总体而言,较高盐分会导致植株吸收过量Na⁺,加速叶片衰老并最终造成产量下降^[70]。另一方面,土壤水分是棉花种子萌发的前提条件,其不仅影响萌发启动时间,还会影响发芽率和出苗稳定性。适宜的土壤含水条件有利于种子萌发,而水分不足会限制种子吸水;水分过多则可能降低土壤通气性,抑制种子呼吸作用,从而不利于幼苗正常生长。盐分胁迫显著抑制作物生长发育,表现为水分吸收受阻、光合作用下降、叶绿体结构破坏及生物量减少,最终对产量和品质造成显著影响。

2) 水分亏缺对作物生长发育影响的研究进展

干旱胁迫会对植物生长发育产生显著影响。水分不仅是维持植物正常生长的重要条件,也是体内多种代谢过程的参与介质。在水分亏缺条件下,植物体内渗透势发生变化,细胞失水加剧,进而引起一系列生理代谢紊乱,并诱导植株通过形态调整来适应逆境环境。因此,在棉花抗旱性研究中,通常通过植株外部形态变化与体内生理状态相结合的方式综合判定,棉花受旱反应的指标主要涉及株高增长、叶片扩展、根系发育、干物质积累、叶片含水状态、光合特性以及抗氧化和渗透调节相关参数等^[71]。

在植物对干旱胁迫的响应过程中,叶片生长变化通常是反映胁迫程度最敏感的形态指标之一。已有研究表明,抗旱性较强的植物在叶片解剖结构上往往表现出一定的适应性特征,如叶片厚度、栅栏组织厚度、木质部厚度和维管束厚度相对较小,而主叶脉厚度和气孔密度相对较大,这些结构特征有助于增强植物对干旱环境的适应能力^[72]。此外,

植物还可通过调节叶水势、蒸腾速率和气孔导度等生理过程,减少体内水分散失,并配合根系形态和渗透调节能力的变化来提高抗旱适应性^[73]。已有研究表明,苗期水分不足会抑制小麦叶片扩展,导致植株叶片相对含水量的丧失加重,同时造成细胞膜透性增强,并诱导丙二醛和可溶性蛋白等相关指标发生变化,这说明,植物在干旱条件下会通过限制叶片生长、调节体内渗透平衡等方式减轻逆境对幼苗生长的不利影响^[74]。

在干旱胁迫条件下,株高变化常被用作评价植物受旱程度及抗旱能力的重要生长指标之一。一般而言,随着干旱程度加剧,植物株高增长会受到更明显的抑制;而抗旱性较强的品种受胁迫影响相对较小,因而能够保持较高的相对株高。相关研究表明,与抗旱性品种靖麦12号相比,干旱敏感型品系云0073在干旱条件下株高下降更为显著,说明不同基因型植物对水分亏缺的响应存在明显差异^[75]。

干旱胁迫是影响植物叶片生理状态的重要环境因素之一,可通过改变叶绿素含量、叶片结构及相关代谢过程,进而影响植物生长发育。因而,在干旱条件下,叶水势、冠层温度、膜稳定性、内源激素水平及产量形成等指标是评价植物受旱响应的重要参数,这些参数能够从水分状态调节、生理代谢变化及最终生产表现等不同层面反映植物对干旱环境的适应能力。已有研究表明,干旱处理会降低黑麦草叶片叶绿素含量,同时增强抗氧化系统响应;在逆境条件下,植物体内活性氧积累增加,进而通过提高相关抗氧化酶活性来清除过量活性氧,以减轻细胞损伤并维持蛋白质稳定性^[76]。此外,模拟干旱试验结果显示,水分亏缺会叶片含水状态、气孔调节和光合代谢过程受到抑制,并伴随渗透调节和抗氧化防御响应增强显著降低叶片叶绿素含量,造成叶片卷曲和失绿^[77]。

植物叶片气孔是植物调节水分散失与碳同化过程的重要结构。遭受干旱时,植物往往通过调节气孔开度来重新分配CO₂吸收与蒸腾耗水之间的关系,从而在降低水分流失的同时维持基本的光合活动,以增强对干旱逆境的适应能力^[78,79]。总体来看,植物在干旱条件下表现出的生长和形态变化,可在一定程度上反映其对逆境的响应强弱,尤其在多指标综合分析的条件下,更有助于全面揭示干旱胁迫对植物生长发育的影响。因此,系统研究植物生长及形态指标变化,对于认识植物干旱适应机制具有重要参考价值。

植物体内水分状况的变化会直接影响其生理活动过程。叶片作为植物地上部最重要的功能器官之一,承担着光合产物形成、水分散失调控及气体交换等生理功能。相对含水量(RWC)常被用作反映植物体内水分状况的重要指标。一般而言,随着干旱胁迫程度加重,叶片相对含水量会逐渐降低。与此同时,土壤含水量作为表征环境水分条件的重要指标,会直接影响植物根系吸水过程,并在一定程度上反映植物所处的干旱程度。不同土壤含水条件下,植物在生长表现和抗旱适应能力方面存在显著差异。相关研究表明,在设置不同土壤水分梯度条件下,紫花苜蓿的净光合速率、气孔导度及根系生物量积累等均与土壤含水量变化密切相关^[80]。

在干旱胁迫条件下,内源激素作为植物体内重要的信号调节物质,能够通过协调细