

分类号：
学号：20222010028

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



地下水埋深对长期膜下滴灌棉田土壤水盐运移 规律影响模拟研究

学位申请人	陈瑜
指导教师	张金珠教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	水利工程
研究方向	水利水电工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222010028

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



地下水埋深对长期膜下滴灌棉田土壤水盐运移 规律影响模拟研究

学位申请人	陈瑜
指导教师	张金珠 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	水利工程
研究方向	水利水电工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Simulation study on the influence of groundwater depth on soil water
and salt transport law in long-term drip irrigation cotton field**

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

By

Chen Yu
(**Hydraulic and Hydropower Engineering**)


Dissertation Supervisor: Prof. **Zhang Jin-zhu**

May, 2025

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： 时间：2025年5月31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：2025年5月31日

导师签名： 时间：2025年5月31日

摘要

目的:我国正面临着水资源短缺和土壤盐渍化问题,同时地下水水位持续变动导致土壤水盐运移剖面出现新的规律,为了揭示地下水水位与长期膜下滴灌棉田土壤盐分积累和水分的动态变化过程及其内在联系,获得地下水作用下土壤盐渍化的防治,为棉花生长提供理论依据和技术参考。

方法:本文选取北疆典型绿洲区新疆玛纳斯河流域下野地灌区 121 团滴灌棉田 6 块棉田土壤(膜下滴灌应用年限分别 10 a、14 a、18 a、20 a、24 a 以及荒地)为研究对象。通过室内土柱模拟试验系统开展不同地下水埋深(100、150、200 cm)毛管水上升试验和入渗试验观测土壤剖面水盐运移过程及其再分布特性,结合 HYDRUS-1D 模型对水盐分布运移进行模拟,旨在探索盐碱化地区地下水埋深对长期膜下滴灌棉田土壤水盐运移的影响,并为干旱区绿洲农业可持续发展制定科学的灌溉方案提供实测数据和理论依据。

结果:(1)毛管水补给量、湿润锋运移速率和湿润锋运移距离随滴灌年限先增大,后减小,最大值出现在滴灌应用年限为 18 a 时。相同膜下滴灌应用年限的毛管水上升高度随着地下水埋深的升高而上升,但其差异性不显著($P>0.05$)。

(2)根据 Green-Apmt 假定模型,毛管水上升高度与补给量呈显著正相关。K 值表征的水分补给能力随地下水埋深而增强,200 cm 水位下 K 值较 100 cm 提高 5.95-23.00%。此外,滴灌应用年限为 10a 的棉田土壤 K 值达到峰值。

(3)积水入渗过程水分迁移要快于毛管水上升过程。入渗量与毛管水吸水量值随地下水埋深的增加呈现一定的波动性,但整体趋势表明,随着地下水埋深的增大,其值逐渐变小,表明随着地下水埋深的增加,入渗量相对于毛管水吸水量的优势逐渐增强。

(4)入渗后不同处理各土层深度含水量大小顺序都是:100 cm>150 cm>200 cm。同时随灌后天数的增加,表层含水率减小幅度较深层的大。灌水对膜下滴灌应用年限为 20a 时的脱盐效果最佳,其脱盐区深度、达标脱盐深度可达 29 cm 和 30 cm。灌水后 0-40 cm 土层的变异系数较毛管水上升后增加,盐分进入深层土壤,改变了毛管水稳定后的盐分均匀。

(5)根据 6 种长期膜下滴灌棉田年限与 Van Genuchten 模型拟合获得土壤水分特征曲线,表明 18、20a 水分迁移能力较强,能有效的减小地表径流,增加土壤的入渗能力;HYDRUS-1D 在模拟毛管水上升以及入渗对土壤剖面水盐运移时,与实测值吻合度高。

总结:根据毛管水上升运动特性和土壤水分特征曲线,表明 0~20a 有利于提高土壤的入渗能力,更为长期的开垦可能则造成土壤的入渗和持水能力下降。建议通过加强农田管理、休耕等措施实现长期滴灌棉田的可持续发展。

关键词:膜下滴灌;水盐运移;上升毛管水;毛管水补给量;数值模拟

Abstract

Object: China is facing the problem of water shortage and soil salinization. At the same time, the continuous decline of groundwater level leads to the emergence of new laws of soil water and salt transport profile. In order to reveal the dynamic change process and internal relationship between groundwater level and soil salt accumulation and water under long-term mulched drip irrigation (MDI), the prevention and control of soil salinization under groundwater is obtained, which provides theoretical basis and technical reference for cotton growth.

Methods: In this thesis, the soil of typical cotton field with long-term MDI (0,10,14,18,20,24a) was selected as the research object. Through the indoor soil column simulation test system, the capillary water rising test and infiltration test at different groundwater depths (100,150,200 cm) were carried out to observe the water and salt transport process and its redistribution characteristics of soil profile, and the water and salt distribution and migration were simulated by HYDRUS-1D model. The purpose of this study is to explore the influence of groundwater depth on soil water and salt transport in long-term drip irrigation cotton field under mulch in saline-alkali areas, and to provide measured data and theoretical basis for the sustainable development of oasis agriculture in arid areas.

Results: (1) The capillary water recharge, the wetting front migration rate and the wetting front migration distance increased first and then decreased with the drip irrigation years, and the maximum value appeared when the MDI application years were 18 years. The rising height of capillary water under the same drip irrigation application years changed with the increase of groundwater depth, but the difference was not significant ($P>0.05$). The trend of cumulative capillary water recharge with time in each treatment was similar to that of wetting front migration.

(2) According to the Green-Apmt model, there is a significant linear relationship between the rising height of capillary water and the amount of recharge. The water supply capacity characterized by K value increases with the buried depth of groundwater level, and the K value at 200 cm water level is 5.95-23.00 % higher than that at 100 cm. In addition, the K value of the soil in the cotton field with a drip irrigation application period of 10 years reached a peak (0.2654-0.3138), indicating that the soil may have experienced significant water accumulation and structural adjustment after the application of drip irrigation under the film for 10 years. Therefore, it shows higher water demand in the process of rising capillary water.

(3) Compared with the rising process of capillary water, the water migration of ponding infiltration process is faster than that of capillary water rising process, and the wetting front distance, infiltration amount and water migration rate of ponding infiltration are always greater than those of capillary water absorption process. The value of infiltration and capillary water absorption showed a certain fluctuation with the increase of groundwater depth, but the overall trend showed that with the increase of groundwater depth, the value gradually decreased, indicating that with the increase of groundwater depth, the advantage of infiltration

relative to capillary water absorption gradually increased.

(4) The order of water content at different soil depths after infiltration for each treatment was: 100 cm > 150 cm > 200 cm. Meanwhile, with the increase of days after irrigation, the water content of each layer decreased, but the decrease in the surface layer was greater than that in the deep layer. The irrigation effect on salt leaching was the best when the application years of MDI was 20 years, and the depth of the salt leaching zone and the depth of reaching the salt leaching standard could reach 29 cm and 30 cm respectively. The coefficient of variation of the 0-40 cm soil layer increased after irrigation compared with that after the rise of capillary water, and the salt entered the deep soil, changing the uniformity of salt after the capillary water stabilized.

(5) Based on the soil moisture characteristic curves obtained by fitting the Van Genuchten model with the data from six MDI cotton fields, it was indicated that the water migration capacity was relatively strong in the 18th and 20th years, which could effectively reduce surface runoff and enhance soil infiltration capacity. The HYDRUS-1D model had a high degree of consistency with the measured values when simulating the upward movement of capillary water and the infiltration effect on the water and salt transport in the soil profile.

Conclusion: Based on the characteristics of capillary water rise and soil moisture characteristic curves, it is indicated that the cultivation period of 0 to 20 years is conducive to enhancing the soil's infiltration capacity, while longer-term cultivation may lead to a decline in the soil's infiltration and water-holding capacity. It is suggested that sustainable development of long-term drip-irrigated cotton fields be achieved through measures such as strengthening farmland management and implementing fallow periods.

Key words: mulched drip irrigation; water and salt transport; upward capillary water; capillary water recharge; numerical simulation.

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 膜下滴灌技术发展研究进展	2
1.2.2 地下水埋深对土壤水盐运移影响研究进展	3
1.2.3 上升毛管水特性影响因素研究现状	5
1.2.4 土壤水盐运移模拟研究	6
1.3 研究目标与内容	8
1.4 技术路线	8
第 2 章 材料与方法	10
2.1 供试材料	10
2.2 试验方法	11
2.2.1 入渗试验	11
2.2.2 毛管水上升试验	11
2.2.3 毛管水稳定后的入渗试验	12
2.3 测定项目及方法	13
2.3.1 土壤水分	13
2.3.2 土壤盐分	13
2.3.3 土壤颗粒组成的测定	14
2.3.4 土壤水分特征曲线	14
2.3.5 土壤水分入渗速率	15
2.4 HYDRUS 模型模拟	15
2.4.1 HYDRUS 参数反演	15
2.4.2 土壤水分运移模拟	16
2.4.3 土壤溶质运移模拟	17
2.5 数据处理	17
第 3 章 地下水埋深对长期膜下滴灌棉田土壤毛管水上升特性及对水盐分布的影响	19
3.1 不同膜下滴灌应用年限对毛管水湿润锋迁移及地下水补给量影响	19
3.1.1 不同应用年限对湿润锋迁移过程及速率的影响	19
3.1.2 不同应用年限对毛管水补给量的影响	22

3.2 地下水埋深对长期膜下滴灌棉田土壤毛管水运动特性规律研究	22
3.2.1 地下水埋深对土壤湿润锋迁移过程及速率的影响	22
3.2.2 地下水埋深对土壤毛管水补给量的影响	25
3.2.3 毛管水湿润锋与补给量的关系	26
3.3 毛管水上升土壤剖面的土壤水盐分布特征	27
3.3.1 毛管水上升土壤剖面的土壤水分分布特征	27
3.3.2 毛管水上升土壤剖面的土壤盐分分布特征	29
3.4 讨论	30
3.5 小结	31
第4章 入渗对棉田土壤水盐再分布及地下水补给消耗响应研究	32
4.1 入渗对不同滴灌应用年限土壤水分入渗特性的影响研究	32
4.2 水分入渗和毛管水上升运动特性对比分析	33
4.3 入渗条件下不同地下水埋深对棉田土壤水分、盐分再分布的影响	37
4.3.1 入渗条件下不同地下水埋深对棉田土壤水分再分布的影响	37
4.3.2 入渗条件下不同地下水埋深对棉田土壤含盐量再分布的影响	40
4.4 入渗条件下不同地下水埋深对地下水补给消耗的影响	44
4.5 讨论	47
4.6 小结	48
第5章 不同地下水埋深下棉田土壤的水盐动态模拟研究	49
5.1 棉田土壤水分迁移过程模拟	49
5.2 棉田土壤水分特征曲线参数拟合	50
5.3 HYDRUS-1D 适用性验证	52
5.4 讨论	56
5.5 本章小结	58
第6章 结论与展望	59
6.1 结论	59
6.2 展望	60
参考文献	61
致谢	69
作者简介	70

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

新疆是中国最大的棉花生产基地，棉花种植面积和产量均居全国首位，新疆作为我国棉花主产区，其生产规模和产量均居全国首位。最新统计数据显示，2024年该地区棉花播种面积达3671.9万亩，较上年增长2.3%，实现总产568.6万吨，折合单产154.9公斤/亩。这一产出规模约占全国总产量的九成以上，充分彰显了新疆在现代农业技术应用和规模化种植方面的突出优势。棉花作为新疆地区的主要经济作物，不仅对当地农民的收入有着重要影响，还对国家的纺织工业和出口贸易具有重要意义。新疆地区独特的气候条件（干旱少雨、光照充足）和丰富的土地资源为棉花种植提供了良好的自然条件。然而，新疆地处干旱和半干旱地区，年均降水量仅为150毫米左右，而蒸发量高达1800-2000毫米以上^[1]，水资源短缺成为制约新疆农业生产的主要因素之一。现存水资源存量难以匹配日益增长的耕地需求，水资源承载力达到极限，同时，新疆盐碱化土地面积约为1.1亿亩，占全国盐碱化土地面积的1/3左右^[2,3]。干旱缺水和土壤盐碱化等环境问题对农田土壤生态造成严重威胁，制约着农田土壤地力提升。

为了应对水资源短缺的问题，新疆地区广泛采用了滴灌技术。滴灌系统通过根系靶向供水模式，精准调控灌溉水量，可有效抑制传统漫灌中普遍存在的表土蒸发与深层渗漏现象，优化了灌溉水利用率，单位产量耗水量降低^[4]。膜下滴灌技术在新疆的推广始于20世纪90年代末，最初主要应用于棉花种植。2000年以前，膜下滴灌技术的应用面积较小，主要集中在新疆生产建设兵团的试验田和示范田。2010年以后，膜下滴灌技术在新疆得到全面普及，应用范围从棉花扩展到玉米、番茄、甜菜等多种作物。截至2022年，新疆膜下滴灌技术的应用面积已超过4000万亩，占全国膜下滴灌总面积的80%以上。其中，棉花种植中膜下滴灌技术的应用率超过90%^[5]，成为棉花种植的主要灌溉方式。滴灌技术的应用不仅提高了棉花的产量和品质，还有效缓解了水资源紧张的局面。在未来数十年技术迭代周期内，膜下滴灌技术凭借其水肥协同调控优势与地膜覆盖的协同效应，仍将在新疆绿洲农业现代化进程中维持主导型灌溉模式。该技术体系通过精准水肥输送和土壤微环境调控，已深度融入规模化农业生产系统，其环境适应性和经济可持续性决定了其在干旱区节水农业中的核心地位。

然而，长期膜下滴灌在提高水资源利用效率的同时，也会对土壤水盐运移规律产生深远影响^[6,7]，尤其是在地下水埋深较浅的地区，可能加剧土壤盐渍化问题。一方面，

滴灌条件下，水分主要分布在作物根区，形成一个湿润球，在长期膜下滴灌条件下，湿润球内的水分会逐渐向下渗透，如果地下水埋深较浅，水分可能会与地下水发生相互作用，导致盐分在根区积累；另一方面滴灌水量较少，灌溉水中的盐分无法被充分淋洗到深层土壤，而是集中在根区附近，在蒸发强烈的地区，土壤表层水分蒸发后，盐分会在表层或根区积累，形成盐分“表聚”现象。研究表明，滴灌棉田根区土壤的盐分含量比传统灌溉棉田高 20%-40%^[8]，在地下水埋深较浅的地区，盐分积累更为显著。

棉田土壤水盐运移规律受到多种因素的影响，包括灌溉水矿化度^[9]、灌溉频率^[10]、土壤质地^[11]、地下水埋深^[12]等。其中，地下水埋深是一个关键因素，它直接影响土壤水分的补给和盐分的积累。地下水埋深的变化直接影响土壤水盐运移规律。在新疆地区，由于长期灌溉和气候变化，地下水埋深发生了显著变化。一方面，过度灌溉和不合理的水资源管理导致地下水位上升，地下水埋深变浅；另一方面，气候变化和人类活动也可能导致地下水位下降，地下水埋深增加。地下水埋深的变化使得土壤水盐运移可能呈现新的特征^[13, 14]。因此，研究地下水埋深对长期滴灌棉田土壤水盐运移规律的影响，对于合理的水资源管理措施、防止土壤盐渍化、提高棉花产量和品质具有重要意义。本研究通过一维垂直土柱试验模拟试验研究，探讨地下水埋深对土壤水盐运移规律的影响，为新疆地区棉花种植提供科学依据，促进农业可持续发展。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 膜下滴灌技术发展研究进展

农业节水技术的历史演进可追溯至 19 世纪中叶，德国人创新性地采用地下渗灌系统实现精准给水，奠定了现代滴灌技术的基础。程技术发展的关键转折出现在 20 世纪初叶，1913 年北美科罗拉多农业试验站构建了首个具备完整输配水功能的滴灌装置，然而受制于铸铁管材的高昂造价^[15]。该技术直至 1950 年代塑料工业突破后才在可控环境农业中实现产业化应用。我国于 1974 年通过技术引进渠道获取墨西哥滴灌设备原型，经与东亚地膜覆盖体系进行技术耦合，最终形成具有复合功能的膜下滴灌模式^[16]。

在干旱半干旱地区农业用水矛盾突出的背景下，传统漫灌方式导致的资源浪费问题亟待解决。膜下滴灌系统通过双重技术屏障（水分精准调控与土壤蒸发抑制）显著提升农田水分利用效率，其示范效应在 1996 年新疆生产建设兵团试验基地得到验证后^[17]，迅速成为西北旱作农业区标准化种植的核心技术支撑。这种技术应用不仅体现了农业工程创新的适应性特征，更反映了水资源约束条件下生产技术变革的内在需求。作为精准农业水肥调控体系的核心组成，覆膜滴灌技术通过集成滴灌系统与地表覆盖

的协同效应,实现了水热资源的高效利用,该技术体系自20世纪90年代中期在新疆棉区推广以来,广泛用于棉花的生产,在1996-2002年间,新疆的棉花使用膜下滴灌面积从 1.67 hm^2 扩大到了 $12 \times 10^4 \text{ hm}^2$,目前已经突破 $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$,成为大田应用膜下滴灌技术面积最大的地区^[17]。

尽管膜下滴灌可以显著提高水生产力^[18],但它不能从根区完全浸出盐分,导致盐分积累并破坏作物生长和土壤环境。与传统灌溉方式相比,膜下滴灌的灌溉频率较高,但每次灌溉的水量很少,这改变了土壤水和盐的输送特性^[19, 20],覆膜的存在减少了土壤表层水分蒸发和土壤表面热量波动,膜下滴灌会改变棉田土壤的特征存在差异,导致土壤水分和盐分的分配^[21]。谭利军等^[22]进行了4 a的膜下滴灌,发现土壤剖面下层(40-150 cm)盐度降低幅度随种植年限增加而增加。Li等^[19]指出经过13 a的长期膜下滴灌后,农田土壤的含盐量将稳定在一定水平。长期膜下滴灌棉田中的残留塑料薄膜积累也需要特别注意。通过土柱实验,温越等人确定了塑料薄膜残留物对土壤特性的显著影响。他们观察到,当主要位于表土层(0-15 cm)的残留塑料薄膜数量超过 396 kg/hm^2 时,会严重损害土壤的渗透能力。这反过来又会影响土壤质地和结构。随着膜下滴灌应用时间增长,无法管理塑料薄膜残留物可能会导致由于耕作实践,塑料薄膜在更深的土壤层中积累,进一步加剧土壤质地和结构的变化^[23]。同时土壤颗粒组成是土壤质地^[24]和水力特性^[25]的关键指标,对土壤水盐迁移有显著影响。黄天宝等^[23]随着膜下滴灌应用年限的增加,砂粒的含量逐渐降低,而粘土颗粒的含量增加。

鉴于干旱地区的水资源匮乏现状,土壤理化特性(包括质地特征与盐分分布格局)对水分运移过程的调控机制研究具有重要科学意义。特别是在长期覆膜滴灌模式下,土壤水盐运移与基质势的耦合效应显著改变了土壤水力特性参数的空间异质性。然而,当前研究多聚焦于单一因素对入渗过程的影响,关于膜下长期膜下滴灌引发的土壤结构演变及其对水分入渗动态响应机制的系统研究仍显不足。

1.2.2 地下水埋深对土壤水盐运移影响研究进展

包气带中水盐耦合运移过程的动力学机制主要受土壤水势梯度调控,其能量转化特征具有明显的方向性差异。在水分入渗阶段,重力势在驱动动力中占据主导地位,促使溶质随水分向深层迁移;而在潜水蒸发上升流过程中,基质势与溶质势)的协同作用成为主要驱动力。这种双向能量转换机制形成了典型的水盐运移“下渗-蒸发”动态平衡系统,其界面转换深度通常出现在40-60 cm土层,该临界层的水势梯度转折特征可作为判断水盐运移方向转变的重要指标。

土壤水电导率、地下水埋深及其矿化度是影响土壤盐渍化最主要的因素,土壤全盐量与土壤水电导率、地下水埋深及其矿化度均呈正相关^[26]。马贵仁等^[27]研究发现随

浅层地下水埋深的增大, 土壤盐分逐渐减少, 建议采取有效措施降低地下水埋深。明广辉等^[28]研究发现在长期膜下滴灌土壤盐分呈"酒杯"状表聚型分布, 土壤累积含盐量与地下水埋深呈负指数关系。利用暗管排水技术降低河套灌区土壤盐分, 控制地下水埋深, 可以有效调控地下水对土壤盐分积累的影响^[29]。李娜等^[30]研究发现浅层土壤水、盐含量受灌溉和蒸发影响较大, 随土层深度的增大, 土壤水盐含量受控于地下水埋深, 土壤含盐量与地下水埋深、土壤含水率成反比, 与各离子含量成正比。窦旭等^[31]发现土壤盐分受地下水埋深的影响较大, 随着地下水埋深减小而增大, 荒地地下水埋深与土壤盐分满足线性关系, 耕地地下水埋深与土壤盐分满足指数关系。王丽娟等^[32]针对奎屯河流域土壤水盐运移特征, 发现在地下水位埋藏较浅的平原及冲积平原区, 包气带含盐量呈现出随深度增加而逐渐降低的趋势; 然而, 在人工耕地所在的洪泛冲积平原以及细土平原区域, 情况却有所不同, 包气带含盐量会随着深度的增加而呈现上升趋势, 包气带岩性结构较为单一且潜水位埋藏较深的地区, 包气带含盐量随深度增加时, 仅会出现微小幅度的波动变化。经研究分析认为, 地形、地貌特征以及潜水位埋深, 是对包气带盐分分布起到主要控制作用的关键因素。此外, 人为开展的大面积灌溉活动, 在一定程度上加快了土壤积盐的进程, 对包气带盐分分布格局产生了不可忽视的影响。冯壮壮^[33]研究发现 0-20 cm 表层土壤中含盐量随地下水埋深增大, 盐分集聚减少, 而土层深度在 0-120 cm 范围内的土壤含盐量受地下水埋深影响减小。徐英等^[34]指出地下水位埋深对土壤返盐所产生的影响存在着特定的滞后特性。并非地下水位埋深一旦小于临界深度, 土壤便会即刻出现盐渍化现象。唯有当地下水位处于小于临界深度的状态持续一段时长后, 才会致使土壤演变为中度或者轻度盐渍化状态。胡琪^[35]研究指出降低地下水位具有减蒸抑盐的效果, 有利于减轻土壤盐渍化。

当地下水埋深由 1.5 m 下降至 2 m, 淡水灌后, 浅层土壤的含水量相较于灌溉之前有所上升, 高于灌溉前 1%-3%, 而盐分含量却降低了 3.5%-7.5%; 咸水灌后土壤含水量与含盐量仍高于灌前, 但其增幅要低于水位埋深较浅时的情况。反观咸水灌溉的情形, 灌溉后的土壤含水量与含盐量依旧高于灌溉前的水平, 不过, 其增长幅度相较于水位埋深较浅阶段要更低。安乐生等^[36]研究发现土壤 Cl⁻含量与潜水 Cl⁻质量浓度的空间分布表现出高度的相似性和相关性, 并且认为水文地质条件是对区域"饱和带-包气带"盐分迁移富集起决定作用的内部因素, 而地形地貌条件是起控制作用的外部因素。张琴琴等^[37]研究发现和田地区绿洲植被覆盖、地下水埋深及土壤盐分的空间分异趋势比较一致, 三者存在较高的耦合关系。王国帅等^[38]研究河套灌区耕地-荒地-海子土壤盐分变化, 发现地下水和海子盐分时空分布呈条带状, 存在较强的空间相似性, 并建议降低下水埋深。

Qiao 等^[39]研究通过水盐动态监测研究发现, 地下水位变化对土壤-地下水系统产生

显著影响。当地下水位埋深小于 1.9 m 时，膜下滴灌的水分调控效应不明显；当地下水埋深大于 4.2 m，适当延长灌水周期能够增加根层土壤含水率；随着地下水位的降低，土壤含水率、土壤离子浓度、土壤盐分和地下水总溶解固形物显著降低，土壤和地下水的盐渍化程度降低。李文昊等^[40]指出地下水位埋深是造成土壤次生盐渍化的重要因素，水分是土壤次生盐碱化的重要媒介。

地下水水位改变是影响土壤盐渍化的重要因素。根据地下水水位及其合理深度，并根据地下水埋深与土壤盐渍化与荒漠化的关系要改善土壤盐渍化的发生，或者是要治理已发生的土壤盐渍化，就必须合理控制该区域地下水位。

1.2.3 上升毛管水特性影响因素研究现状

向上的土壤水流是作物的重要水源^[41]，也是干旱和半干旱地区可持续土地管理设计中需要考虑的重要因素^[42]。浅层地下水的毛细上升可以提供作物生长所需的水，并减少对灌溉水的需求^[43]。毛细管水可以溶解各种营养物质，这些营养物质可以输送到作物的根际，供其生长和吸收^[44]。Wu 等^[45]发现，毛细水上升在整个季节为作物提供水分方面起着重要作用，因此作物对地下水有很强的依赖性。在大豆的每个生长季节，地下水位占作物总耗水量的 12%至 30%，约 1.5 至 2 m 的地下水位可以稳定粮食产量的年际变化。Soppe 和 Ayars^[46]发现，地下水占红花日耗水量的 40%，当地下水位保持在 1.5 米深时，作物总耗水量的 25%来自季节性地下水。与没有地下水供应相比，有地下水供应的灌溉减少了 46%。Han 等人^[47]使用结合 Hydras-1D 和 SWAT 简化作物生长模型的数值模型研究了地下水对棉花生长的影响。当地下水平均深度为 1.84 m 时，毛细水上升对作物蒸腾的贡献接近 23%，导致棉花产量增加 20%。同样，当地下水位对棉花生长有积极影响时，棉花生长将通过增加叶面积指数和潜在蒸腾作用来增加地下水毛细上升。因此，作物生长和水分输送都需要考虑地下水的毛细上升。

毛细水可分为向上毛细水和悬着毛细水^[48]。悬着毛细水是指由于毛细作用而保持在地表附近的水，而向上毛细水则是指通过毛细作用上升到土壤孔隙中的地下水。关于毛细水的运动特征，研究主要集中在均质土壤中向上毛细水补给量^[49-51]、上升高度^[52-54]和上升速率^[55, 56]。研究发现，均质土壤中向上毛细水补给量、上升高度和上升速率均随时间呈幂函数关系，毛细水上升高度与地下水补给之间存在明显的线性关系。毛细水受到各种因素的影响，Zhang 等^[56]研究了粒径分布对毛细水上升高度的影响。同一类型土壤中毛细水上升的特征表现为相对上升速率随着细粒含量的增加而从慢到快增加。此外，土壤粒径对毛细水上升高度也有显著影响。在保持低含水量的条件下，毛细水上升的速度和高度与土壤中相颗粒的含量成正比，即粗颗粒含量越高，毛细水的上升速度越快，上升幅度越大。Wang 等^[57]进行了室内土柱实验，以探索砂壤土中不

同密度和盐度下毛细水的上升。砂层对土壤水分运动具有显著的抑制作用，并对毛细水上升的高度、速率和地下水补给产生显著影响。Li 等^[58]研究了不同矿化程度对毛细水上升高度的影响。通过他们的研究，他们发现矿化程度越高，毛细水上升的高度越低。在砂粒粒径较小的情况下，高矿化度的水会影响土壤的孔隙结构，影响毛细水上升的高度。Xing 等^[59]通过对不同浓度地下水的研究证明，KCl 或 NaCl 溶解地下水的总溶解固体（TDS）对毛细水比重的影响比对土壤孔隙结构的影响更大。上述土柱试验采用单因素和双因素控制实验来研究土壤中的毛细水运动，未考虑长期膜下滴灌可能会改变土壤的多重影响因素，因此，有必要探究长期膜下滴灌和地下水埋深对于土壤水盐运移规律的改变,为干旱地区的节水规划及盐渍化防治提供科学依据。

1.2.4 土壤水盐运移模拟研究

土壤水盐运移，作为土壤内部水分与盐分的动态传递进程，在农田生产、水利设施规划以及生态环境维护等诸多方面，均展现出至关重要的意义。精准洞悉土壤水盐运移的规律，能够为完善农田管理策略、提升土壤水分与肥料利用效率，提供坚实的理论支撑。在早期阶段，针对土壤水盐运移的研究，主要依赖于田间实地观测的手段来获取数据。然而，这种方法存在诸多弊端，例如对动态变化的监测难度极大，需要投入大量的时间与人力，成本颇高，并且很难有效排除复杂环境因素以及其他偶然状况对观测结果所产生的干扰。鉴于此，众多学者逐渐转向采用模型模拟法来深入开展土壤水盐运移的研究工作。为了能够精准地描述土壤水分入渗过程，并对其科学预测与深入分析，不少学者整合了大量的实地测量数据，致力于构建土壤水盐运移的相关理论与模型。土壤水盐运移理论的源头可追溯至 Darcy 定律，历经长达一百多年的持续发展，在此基础上，陆续衍生出一系列用于描述土壤水分入渗的模型，其中较为常见的有 Green - Ampt 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型、Smith 模型以及 Ghosh 模型等^[60]。

除了这些传统的入渗公式之外，伴随着计算机技术的飞速进步，诸多学者开始借助模拟软件对土壤水盐运移现象展开模拟与预测，常见的模拟软件包括 HYDRUS、BP 神经网络以及 SWAP 等。土壤水盐运移模型所涉及的领域极为广泛，既涵盖宏观层面，也包含微观领域，并且依据研究尺度的不同，还能够进一步细分为流域尺度、区域尺度、田间尺度以及点位尺度等；从模型类型来看，又可划分为经验模型、半经验模型以及物理模型。当下，众多学者积极结合实测数据，对现有的各类入渗公式在不同情境下的适用性展开评估，深入剖析不同灌溉条件下土壤水盐的分布特征。例如，吴忠东^[61]与史晓楠^[62]的研究成果指出，在微咸水入渗过程中，一维代数模型、Philip 模型以及 Green - Ampt 模型均可对其进行较为精确的描述，其中 Green - Ampt 模型的模拟精度

更为突出。王卫光等^[63]以及杨树青等人，则依据实地测量数据以及 SWAP 模型的模拟结果，制定出了科学合理的微咸水灌溉方式与灌溉制度。早期的田间实地观测法因存在动态监测难、耗时耗力、成本高昂且易受环境及偶然因素干扰等问题，已难以满足土壤水盐运移研究的需求，故而模型模拟法成为了众多学者开展相关研究的重要手段。

HYDRUS 是一个用于求解变饱和地下介质中水流理查兹方程和热量和溶质输运平流-色散方程的软件程序。变饱和带是理解水盐运移的基础，包括渗透、土壤水分储存、蒸发、植物水分吸收、地下水补给、径流和侵蚀。现在越来越多的研究集中在综合水循环上，考虑地下水和地表水之间的水、热和溶质交换必须包括饱和区和非饱和区。HYDRUS 使用有限元 (FE) 方法来模拟水、热和多种溶质在不饱和、部分饱和或完全饱和多孔介质中的一维、二维或三维运动。目前，HYDRUS 软件包广泛用于研究不同场景和条件下，如开放式自然条件灌溉土壤入渗^[64]和土壤渗水^[65]土壤含水量的分布和动态变化，也广泛用于解决水体和盐分在实际灌溉区的监测^[66]以及滴灌实施和方案制定^[67, 68]以及土壤水资源评估^[69]。

为了克服田间实验的局限性，HYDRUS 提供更准确的水和盐规律以及作物生长过程的分析 and 预测。多项研究评估了 Hydrus-1D 模型在不同环境下的仿真精度^[70]。的作者评估了 Hydrus-1D 模型在摩洛哥半干旱地区不同水资源管理条件下模拟灌溉冬小麦土壤水分的性能，平均模拟均方根误差 (RMSE) 约为 3%。使用 Hydrus-1D 模型在意大利南部用于西瓜种植的典型园艺种植系统的土壤湿度模拟 RMSE 低于 9%^[71]。此外，越来越多的研究使用 Hydrus-1D 模拟作为真实值来分析从土壤湿度变化得出的其他关键指标。基于 Hydrus-1D 模型模拟了中国南方成熟柑橘园的 SWC 变化，以分析季节性缺水现象和需求^[72]。将 Hydrus-1D 与地理信息系统相结合，以评估气候变化对土壤盐分和灌溉管理的影响。在美国阿拉巴马州使用 Hydrus-1D 模拟了基于多深度土壤田持水能力的灌溉调度阈值^[73]。使用 APSIM 和 Hydrus-1D 模型预测了 1981 年至 2089 年间气候变化对夏玉米土壤水分动态的影响，得出的结论是气候变化使夏玉米的生长季节缩短了 12 至 27 天^[74]。由于区域土壤水分观测数据有限，许多研究直接使用物理 Hydrus-1D 模型生成大型时空垂直土壤水分数据集，用于深度学习模型的训练和验证，特别是在大规模 SWC 估计研究结合遥感技术的情况下^[75]使用修正根系水分吸收的 HYDRUS-2D 模型，结合作物水分生产力，评价了中国干旱西北地区薄膜覆盖滴灌条件下不同灌溉情景下土壤盐分、植物水分和作物产量的结果，为优化灌溉系统和农业管理提供参考。

上述土均表明 HYDRUS 在土壤水盐运移研究中展现出较好的拟合结果，同时土壤中毛细水运动的特征受到许多其他因素的影响^[76, 77]，如土壤容重、粘土含量、初始含水量、地下水深度和土壤中水溶液的溶质浓度。HYDRUS-1D 模型作为经典的土壤水分