



干旱绿洲连作滴灌棉田 土壤水盐运移规律试验研究

主 编 虎胆·吐马尔白 阿力甫江·阿不里米提
副主编 马合木江·艾合买提 木拉提·玉赛音



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



干旱绿洲连作滴灌棉田 土壤水盐运移规律试验研究

主 编 虎胆·吐马尔白 阿力甫江·阿不里米提
副主编 马合木江·艾合买提 木拉提·玉赛音



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

全书共分为十二章。本书围绕新疆滴灌棉田土壤水盐运动及分布规律，研究了不同灌水处理、不同温度、不同滴灌年限对土壤水盐运移的影响；研究了滴灌棉田秸秆覆盖对水盐的调控以及对长期滴灌棉田土壤水盐运移过程进行了数值模拟，揭示土壤水分、盐分运移机理及其分布情况。

本书可作为农业水利工程、土壤物理等专业的高年级本科生和研究生的参考资料，也可供相关的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

干旱绿洲连作滴灌棉田土壤水盐运移规律试验研究 / 虎胆·吐马尔白, 阿力甫江·阿不里米提主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 7
ISBN 978-7-5170-5710-9

I. ①干… II. ①虎… ②阿… III. ①干旱区—绿洲—棉田—连作—滴灌—水盐体系—试验—研究 IV. ①S562.071-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第187237号

书 名	干旱绿洲连作滴灌棉田土壤水盐运移规律试验研究 GANHAN LÜZHOU LIANZUO DIGUAN MIANTIAN TURANG SHUIYAN YUNYI GUILÜ SHIYAN YANJIU
作 者	主 编 虎胆·吐马尔白 阿力甫江·阿不里米提 副主编 马合木江·艾合买提 木拉提·玉赛音
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.25印张 362千字
版 次	2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	78.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

新疆地处我国内陆干旱区，气候干燥、降雨稀少、蒸发强烈，水资源紧缺，生态环境脆弱。由于水资源紧缺、农业需水量较大，大力发展农业节水技术，建设绿色、节水、高效农业是新疆农业可持续发展永恒的主题。在新疆灌溉农业发展的历程中，一直致力于探究和推广更加高效且适合新疆地区的农业节水技术。新疆自 20 世纪 50 年代开始加强渠道建设，防渗标准逐渐提高，以塑膜或苯板与刚性护面结合的复式防渗形式已成为主流。1980 年开始进行半固定式管道加压喷灌试验并成功，带动了新疆节水灌溉的发展，截至 2002 年，全疆喷灌面积发展到 17.6 万 hm^2 。但新疆属于蒸发强烈、作物生育期多风的干旱区，水分蒸发、漂移损失较大，而且喷灌能耗高，运行费用大，不利于喷灌技术的推广应用。1987 年新疆科技人员在地膜栽培基础上首次提出的膜上灌，是对传统地面灌技术的一次突破，一度成为新疆推行节水灌溉技术的主要形式，在新疆膜上灌面积曾达 70 万 hm^2 ，但由于膜上灌技术对土地平整有较高的要求，新疆很多耕地土层薄，坡度大，膜上灌溉节水效果并不理想。经过了多年对节水技术的探索和研究，新疆石河子 1996—1998 年进行了为期 3 年的滴灌试验，终于找到了更加适合新疆节水灌溉的膜下滴灌新模式。

滴灌技术引进于以色列，它可以将作物所需的水分和盐分直接传输到作物根部，是现今灌溉方式中水利用效率最高的方式之一。滴灌的出水点直接位于作物根部位置，对作物根部范围进行湿润，在合理确定灌溉制度和灌水技术参数的前提下，可以直接减少土壤蒸发所造成的损失，避免过量灌溉造成的水分下渗。与其他灌溉方式相比，滴灌对地面的适宜性强，特别是丘陵和坡地，并且可以节水、节肥、防旱、增产、增效。新疆引进滴灌技术之后，与当地的覆膜技术相结合，大幅度提高了土壤水分和养分的利用效率，降低了土壤蒸发量。滴灌在新疆的应用取得了很好的成果，尤其是在新疆特色的棉花种植领域得到了很好的推广，并且带来了巨大的经济效益。但是随着膜下滴灌棉花的应用与推广，一些问题也逐渐成为学者们讨论的话题，尤其是滴灌造成盐分在土壤耕作层中积累的问题以及由于没有大量的水对土壤耕作层的冲洗，导致盐分在土壤 60~80cm 处的积累等问题，加之覆膜造成的土壤白色污染，长期应用会造成作物减产和对土地严重的破坏。

新疆灌溉土壤盐渍化控制问题的研究已经经历了半个多世纪，20 世纪 50—80 年代的灌排工程技术措施、90 年代至今的节水措施两个大的阶段，分别解决了盐分的出处问题和节水问题。第三个阶段则是解决水、盐运移共同引发的问题。自 20 世纪 90 年代以来，滴灌技术开始飞速发展，目前滴灌技术应用面积超过 3000 万亩，并以每年 200 多万亩的速度增长，使新疆成为世界大田微灌技术应用最成功的区域之一。众所周知，在地面灌溉条件下，耕地土壤中的盐分可随同灌水淋洗进入排水系统，但是采用滴灌节水技术后，由灌水携带的盐分、土壤中固有的盐分和地下水中的盐分在蒸发过程中积聚在地表和耕层中，形成节水灌溉后的土壤次生盐渍化问题。由于滴灌特有的界面特征，使其在水盐运行环境、变化特点、脱盐程度等方面与传统灌溉方式有着明显的不同。因此进行连作滴灌棉田土壤盐分积累过程与机理的研究显得尤为重要。

我十分高兴地看到由新疆农业大学虎胆·吐马尔白教授及其团队撰写的《干旱绿洲连作滴灌棉田土壤水盐运移规律试验研究》这部专著，其主要特点是针对新疆滴灌技术大面积推广应用后滴灌棉田土壤盐分逐年积聚等问题，基于前期盐碱地改良与治理方面的工作基础，将新疆具有棉花种植年限较长的典型地段作为研究对象，以地下水与土壤水动力学为基础，以滴灌高效节水和可持续利用为中心，以提高滴灌棉田土壤质量为标准，对生育期滴灌棉田土壤盐分运移规律、非生育期滴灌棉田控盐技术、冻融条件下滴灌棉田盐分运移过程、滴灌棉田秸秆覆盖土壤水盐热的运动进行综合探讨和研究，建立滴灌棉田土壤水、盐、热运移数值模型。同时，通过田间试验研究非生育期滴灌棉田不同春灌、冬灌淋洗制度对土壤盐分的影响，为干旱区水土资源的可持续利用、建立环境友好型灌区以及滴灌技术的大面积推广提供技术支撑。它是对所承担和完成的多项国家自然科学基金项目等课题研究成果的提炼、充实、总结和升华。

本书较为系统地介绍了干旱绿洲新疆连作滴灌棉田土壤水分及盐分运移规律，内容系统全面，研究方法先进，理论联系实际，成果具有明显创新性，可读性和参考性强。本书的出版必将对新疆膜下滴灌节水农业的可持续发展产生重要的作用。

中国工程院院士
中国农业大学教授



2017 年 5 月 1 日

前 言

土壤水盐运动是指在各种自然因素及人为因素的作用下,土壤中水盐运移随时间和空间的变化。在土壤水盐的动态变化过程中,水是盐分运移的载体,盐分是运移的被载体。其中水分的数量、质量、状态和运动决定了土壤盐分运动的状况,所以称水分是盐分的溶剂,盐分是土壤溶液的组成成分,它的运动过程影响水分的分布。土壤的水分盐分与作物生长息息相关,而过量盐碱化的土壤对作物的生长影响十分大。研究滴灌土壤水盐运移规律,是为了更好地了解土壤中水分盐分的分布,防治土壤中盐分累积所造成土壤次生盐渍化,为推广滴灌农田可持续种植模式提供基础理论和技术支撑。

本书以新疆维吾尔自治区石河子121团、石河子大学节水灌溉实验站以及库尔勒包头湖实验基地等为研究平台,通过土壤物理学、土壤水动力学、土壤溶质运移、传统统计学、地统计学等方法,将新疆具有棉花种植年限较长的典型地段作为研究对象,系统研究新疆连作滴灌棉田土壤水分及盐分运移规律,为干旱区水土资源的可持续利用、建立环境友好型灌区以及滴灌技术的大面积推广提供技术支撑。

全书共分为十二章。第一章介绍了滴灌棉田土壤水盐运移规律研究意义、国内外研究基本状况以及研究的主要内容。第二章介绍了本书研究中选用的试验区域位置以及试验布置方案等。第三章通过试验研究确定了基本的土壤水分运动参数。第四章研究了滴灌棉田不同灌溉处理对土壤中的水分和盐分分布造成的影响。第五章研究了点源入渗中湿润锋的迁移以及双点源入渗交汇过程中土壤水盐的运移过程。第六章用经典统计学和地统计学的方法对研究区域的土壤水盐空间变异性进行模拟分析。第七章主要在冻融条件下,通过对比试验研究冻融对土壤水盐分布的影响。第八章重点针对不同种植年限的滴灌棉田为研究对象,对全生育期棉花滴灌土壤水盐运移规律进行了试验研究。第九章是选用3种不同盐度的棉田,监测分析其土壤水盐运移规律。第十章研究了不同生育阶段,温度对土壤水分盐分分布的影响。第十一章是滴灌棉田不同位置秸秆覆盖对土壤水分蒸发和土壤盐分运移的影响。第十二章以国内外常用的Hydrus模型模拟为基础,列出了研究中常见的几个模拟实例,为滴灌条件下土壤水盐运移数值模拟提供参考。

在本书编写过程中，参阅、借鉴和引用了许多相关土壤水盐运移规律研究的论文、专著、教材和其他相关资料，在此向各位作者表示衷心的感谢。在本书编写过程中，新疆农业大学杨鹏年教授、岳春芳副教授，石河子大学王振华教授、张金珠副教授，新疆农业大学硕士研究生吴永涛、李卓然、胡钜鑫、穆丽德尔·托伙加、米力夏提·米那多拉以及博士研究生由国栋和古莱姆拜尔·艾尔肯等协助主编完成了此书文字及插图的誊写、描绘与校对等工作，在此谨致以诚挚的感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目“内陆干旱区人工绿洲水盐动态研究与预测”（50449009，50669007）、“干旱区膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律与次生盐渍化预警”（51069015）、“大规模高效节水对滴灌棉田土壤盐渍化的影响研究”（51469033）和自治区自然科学基金项目“内陆干旱区秸秆覆盖对调控灌区土壤水盐分布影响研究”（200821172）的资助。由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足，恳请读者批评指正。

作者

2017年5月10日

目 录

序	
前言	
第一章 绪论	1
第一节 研究背景及意义	1
第二节 国内外研究现状	2
第三节 主要研究内容	7
参考文献	8
第二章 室内外试验	12
第一节 试验区概况	12
第二节 室内试验	13
第三节 田间试验	19
第三章 滴灌棉田土壤水分运动参数确定	26
第一节 土壤水分特征曲线	26
第二节 土壤水分扩散率	35
第三节 土壤非饱和导水率	36
第四节 本章小结	38
参考文献	39
第四章 不同灌水处理下滴灌棉田水盐运移规律	41
第一节 滴灌棉田土壤水盐分布特征	41
第二节 不同灌溉定额对土壤水盐运移和分布的影响	46
第三节 不同灌水次数对土壤水盐运移和分布的影响	49
第四节 棉花滴灌生育期末土壤盐分变化特点	51
第五节 本章小结	54
参考文献	55
第五章 滴灌点源入渗试验研究	57
第一节 点源交汇湿润锋变化规律室内试验研究	57
第二节 双点源交汇湿润锋变化规律田间试验研究	62
第三节 双点源交汇锋土壤水盐分布变化规律	65
第四节 本章小结	72
参考文献	72

第六章 滴灌棉田土壤水盐空间变异特征研究	74
第一节 研究方法	74
第二节 滴灌棉田水盐空间变异规律	77
第三节 本章小结	99
参考文献	101
第七章 滴灌棉田冻融期土壤水盐运移规律研究	103
第一节 冻融期土壤温度与气温关系	103
第二节 土壤水分的变化规律	107
第三节 土壤盐分的变化规律	112
第四节 积雪覆盖与积雪入渗土壤水盐运移规律	118
第五节 无积雪覆盖土壤水盐运移规律	122
第六节 本章小结	123
参考文献	124
第八章 不同年限滴灌棉田土壤水盐分布规律研究	126
第一节 水分运动特征	126
第二节 溶质运移特征	127
第三节 生育期不同年限滴灌棉田水分变化规律	128
第四节 生育期不同年限滴灌棉田盐分累积规律	129
第五节 非生育期不同年限滴灌棉田水分变化规律	136
第六节 非生育期不同年限滴灌棉田盐分累积规律	138
第七节 不同年限滴灌棉田土壤盐渍化评价	144
第八节 本章小结	149
参考文献	150
第九章 滴灌棉田不同盐度土壤盐分变化规律研究	152
第一节 试验区水质及土壤物理性质	152
第二节 不同盐度棉田地下水位变化情况	153
第三节 生育期不同盐度土壤水盐变化规律	154
第四节 非生育期不同盐度土壤水盐变化规律	161
第五节 灌溉模式与调控措施	168
第六节 本章小结	169
参考文献	170
第十章 滴灌棉田温度对土壤水盐运移影响研究	172
第一节 不同生育阶段气温和土壤温度变化	172
第二节 土壤温度与含水率及含盐率的关系	173
第三节 本章小结	176
参考文献	177

第十一章	滴灌棉田秸秆覆盖水盐调控试验研究	178
第一节	滴灌棉田秸秆覆盖水盐运移规律研究现状分析	178
第二节	滴灌棉田秸秆覆盖条件下土壤水盐运动规律研究	180
第三节	不同深度秸秆覆盖对作物根系分布的影响研究	189
第四节	本章小结	194
	参考文献	195
第十二章	滴灌棉田土壤水盐运移规律数值模拟计算实例	197
第一节	土壤水盐运动基本方程	197
第二节	不同秋浇定额条件下的土壤水盐运移数值模拟（实例一）	199
第三节	滴灌棉田根系吸水数值模拟（实例二）	207
第四节	滴灌棉田不同盐度土壤盐分数值模拟（实例三）	213
第五节	滴灌棉田水盐运移数值模拟（实例四）	222
第六节	滴灌棉田秸秆覆盖土壤水热数值模拟（实例五）	227
	参考文献	233

第一章 绪 论

第一节 研究背景及意义

我国水资源极度匮乏，是世界 13 个贫水国之一，用占世界 8% 的淡水资源养育了世界 1/5 的人口，人均占有量仅为世界人均水量的 1/4。随着我国经济社会的发展，特别是人口的不断增长，水资源供需矛盾日益加剧。解决好水资源的供需矛盾，实现水资源的合理配置及节水高效利用是实现我国经济、社会及生态可持续发展的重要保证。

据统计，我国水资源可利用率（实际利用水资源量与可利用水资源量之比）小于 70%，约有全国总用水量的七成被用于农业生产，而用于灌溉的水量占农业用水量的九成多。我国目前的灌溉水利用率仅为 0.45 左右，与发达国家的 0.8 左右的水平还有很大的差距，尤其在我国西部地区，由于农业基础设施不完善，其灌溉水利用率更低。新疆地处我国西北干旱地区，全年高温少雨，是典型的水资源匮乏地区之一。水资源作为支撑新疆生态环境的基础，其可持续发展利用对保护新疆生态环境、促进新疆跨越式发展具有重要作用。因此需重视水资源开发利用，从全局多角度关注新疆水资源问题。滴灌是当今世界上节水效果较好的一种灌溉方式。滴灌技术作为一种高效的节水灌溉技术已在新疆大规模推广与应用，研究滴灌条件下土壤水分时空运移与分布特征，有利于发展干旱区精准农业，同时对当地水土资源的可持续利用有着重要的作用。

新疆从 1996 年引进滴灌技术以来，其节水灌溉事业就以惊人的速度在发展，到目前，其发展规模还在不断扩大。膜下滴灌技术具有提高地温、减少棵间蒸发、抑制盐分积累的特点。但是，由于推广应用而随之产生的残膜污染问题、土壤次生盐渍化问题日益得到人们的关注。采用膜下滴灌技术以后，土壤中的盐分只能被淋洗到作物根系层以下离地表很近的区域，虽然能为作物生长提供一个较好的水盐环境，但被淋洗的盐分会随着灌水、外界蒸发及作物蒸腾作用在作物根区范围内上下运移，这就对作物生长产生潜在的威胁。

新疆地处我国西北部，属干旱气候区，土地资源丰富，光热资源充足，但水资源缺乏，分布不均，生态环境极为脆弱。在气候干燥、蒸发量大、地下水位较高的灌区，形成了大面积的盐碱地。据不完全统计，新疆有 105 万 hm^2 的盐渍土面积，占耕地面积的 33.4%，且有盐渍化面积增加的趋势，盐渍化成为危害农业发展的一个突出问题^[1-3]。新疆盐碱化的耕地中有八成以上为土壤次生盐碱化耕地。水资源短缺与土壤盐渍化成为困扰新疆农业可持续发展的两大难点^[4-10]。随着国家对农业的投资力度不断加大，全国各地都在探索开发利用盐渍土的新方法、新思路。尤其在干旱、半干旱地区开发利用盐碱地对于增加粮食产量、解决农民收入、改善生态环境等有着重要作用。在与盐碱土壤做斗争的过程中，产生了一些比较行之有效的改良利用盐碱地的方法，如非生育期大水漫灌压盐、化学改良、生物改良、工程改良等技术。

如今，新疆已经有了一套趋向成熟的基于膜下滴灌开垦利用盐碱地的技术^[11]。但在采用膜下滴灌技术后，土壤盐分被淋洗至根系层以下但仍距地表不深的区域，虽能在生育期为作物生长提供一个良好的水盐环境，但在长期过程中存在潜在威胁。目前对于采用膜下滴灌的土壤盐分的运移机理，及如何改良滴灌方式能有效地淡化根区土壤盐分等诸多问题仍未十分清楚。近些年来，众多学者针对滴灌土壤盐分累积规律进行了长期的监测研究，但结论众说纷纭。因此，关于滴灌土壤盐分运移趋势的研究还需进一步深入，这对于当地滴灌耕地的有效利用有着重要的现实意义。使用滴灌并不能把土壤盐分从土壤中去除，长期灌溉下土壤盐分造成耕地质量下降，甚至导致土壤生产能力丧失。因此，进一步揭示滴灌棉田土壤水盐运移的内在机理，制定一套科学合理的灌溉技术及盐碱地防治体系，合理开发利用水资源及防治耕地次生盐渍化，对于干旱半干旱地区农业的可持续发展具有重要意义。

第二节 国内外研究现状

一、土壤水盐运移研究进展

土壤水盐运移是指土壤中水分、盐分随时间和空间的变化，它的运动是土壤中水分和盐分共同作用的结果。其中土壤水分作为溶剂和运转剂，是盐分运动的基础，它的数量、状态、分布和运动直接影响着土壤盐分运动。水是盐分运移的载体，盐分是运移的被载体。盐分溶解于水中，能在土壤水中产生溶质势，影响着水分的运动。因此土壤水分和盐分运动是互相联系、互相影响的，将水盐运动过程放在一起研究，就能比较容易找到其中的规律。国外有关水盐运移的试验和理论研究比较早。土壤水分运移理论源于 Darcy 定律，Richard 首先将其用于非饱和土壤水的研究，并推导出相应的土壤水分运动基本方程。修正后的 Richards 对流-弥散方程^[12]见式 (1-1) ~ 式 (1-3)，开创了包气带水分运移数学模型研究的开端，使土壤水的研究发生了深刻的变化。

$$\frac{\partial \theta(h,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \tag{1-1}$$

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \tag{1-2}$$

$$K(\theta) = K_s \theta_e^l [1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \tag{1-3}$$

式中： θ 为土壤含水率，%； θ_e 为有效土壤含水率，%； θ_r 为残余土壤含水率，%； θ_s 为饱和土壤含水率，%； h 为负压水头，cm； K 为水力传导系数，cm/d； K_s 为渗透系数，cm/d； t 为时间，min； z 为空间坐标，原点在地面，向上为正； l 为地下水埋深，cm； n 、 m 、 α 均为经验参数。

土壤中溶质的运动是十分复杂的，溶质随着土壤水分的运动而迁移，且也会在自身浓度梯度的作用下运动，部分溶质可以被土壤吸附，或为植物吸收，或浓度超过了水的溶解能力后会离析沉淀。溶质在土壤中还有化合分解、离子交换等化学变化。因此，土壤中的溶质处在一个物理、化学、生物的相互联系和连续变化的系统中。土壤中溶质迁移的物理

过程包括对流、溶质分子扩散、机械弥散过程、土粒与土壤溶液界面处的离子交换吸附作用以及溶质随薄膜水的运动。

土壤溶质运移方程是在热传导方程的基础上发展起来的,通过溶质对流和水动力弥散作用进行研究^[13]。由于土壤水分和盐分运移是同时发生的,因此在研究实际问题时,两类方程应同时考虑。Lapidus 和 Amundson^[14]、Nielsen 和 Biggar^[15]根据一系列实验提出了易混合置换理论,认为溶质的通量是由对流、扩散和弥散的综合作用引起的。溶质运移基本方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \lambda_1 \theta c - \lambda_2 \rho_0 s = \frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho_b s}{\partial t} \quad (1-4)$$

式中: D 为水动力弥散系数, cm^2/d ; s 为被吸附的固相质量分数, %; q 为土体中水的流速, cm^3/s ; c 为溶质质量浓度, g/cm^3 ; ρ_0 为水密度, g/cm^3 ; ρ_b 为盐分溶液密度, g/cm^3 ; λ_1 、 λ_2 为经验常数, 与土壤质地和结构有关。

自 20 世纪 70 年代开始, 研究工作由实验和理论分析开始朝向了田间应用, 从而发展了可动与不可动水体的两区模型和优势流、大孔隙等模型。目前研究最多的模型是从土壤水分运动理论和多孔介质中的溶质运移理论出发, 建立以对流、弥散为主, 综合考虑吸附、解吸、源汇项及动水、不动水等因素影响的溶质运模型。这类模型能较好说明土壤溶质传输基本特征, 具有坚实的理论基础。目前, 国内外普遍通用的模型是由美国国家盐改中心 (U. S. Salinity Laboratory) 研制发的 SWMS-1D、SWMS-2D、SWMS-3D、Hydrus-1D、Hydrus-2D/3D 多种模型, 它们成功地构建了一维饱和多孔介质中水分、能量、溶质运移的数值模型。其应用领域涉及到节水灌溉、灌溉管理、作物生长、盐碱地改良、农药污染、放射性物质泄漏、核物运动、环境污染物扩散等, 为农业种植、工业生产和环境保护等提供了必要的理论依据。

国内的研究是从 20 世纪 70 年代的黄淮海平原旱涝盐碱综合治理开始的, 石元春、李韵珠、贾大林^[16]等结合我国实际进行了大量的理论和实践工作, 在土壤盐化、碱化的防治和治理取得了许多成功的经验。张蔚臻^[17]提出了土壤水盐运移模拟的初步研究结果, 将水盐平衡理论和数值模拟方法应用于区域水盐预测预报, 使我国的农田土壤水盐运动研究进入一个新的阶段。李韵珠^[18]运用动力学模型研究了非稳态蒸发条件下夹黏土层的土壤水盐运动。刘亚平^[19]提出了在稳定蒸发条件下, 潜水蒸发与埋深关系公式和用潜水蒸发量近似估算土壤盐分的方法。杨金忠^[20]等在饱和-非饱和土壤水盐运动的计算方法上取得了进展, 并对土壤盐分扩散-弥散系数等方面作了广泛的研究。目前, 研究植物根区内土壤盐分的运移情况已成为研究的重要热点。

20 世纪 90 年代以后, 农田土壤水盐运移的随机理论和方法成为研究的热点。叶自桐^[21]对传输函数模型 (TFM) 进行了简化, 提出了适于研究入渗条件下土壤盐分对流运输的传输函数修正模型, 并根据田间不同矿化度灌溉入渗试验结果, 得到了盐分通过 0~60cm 土层时的时间概率函数。王福利^[22]用数值模拟方法研究了降雨淋洗条件下, 盐分在农田土壤中运移的问题。张展羽等^[23]将农田水盐运移模型分解组合, 为模拟计算提供了简便可靠的方法, 为盐渍化地区实施节水灌溉提供了决策工具。徐力刚、杨劲松等^[24]建立了土壤水盐运移的数学模型, 并对数学模型进行了数值求解, 他们还应用自主开发的土

壤水盐数值模拟软件 (Soil Water and Salt Transport Model, SWSTM), 结合研究区实际气候条件, 模拟变化天气和变化地下水位条件下农田土壤中冬小麦水盐运移过程。任理等^[25]结合非饱和水流问题和盐分运动的运动平均斜率模型, 提出了 MMS - MCS 模型。此外, 国内还有学者对秸秆、草、硬壳等覆盖下水盐运动规律进行了研究^[25-29]。纪永福等^[30]在夏季高温时节, 采用塑料薄膜、麦草和沙子覆盖盐碱地表面, 结果表明这些材料都具有较好的改良盐碱地的作用, 分别计算了它们的使用量及对各种盐离子的抑制作用。覆盖后对土壤中各离子的抑制作用顺序为: $K^+ > Na^+ > Cl^- > SO_4^{2-} > Mg^{2+} > HCO_3^- > Ca^{2+}$ 。3 种覆盖材料以塑料薄膜效果最佳。这些成果都对今后深入研究提供了有价值的参考。刘国华等^[31]指出新疆绿洲的土壤盐分变化趋势和成盐驱动因子是干旱区关注的焦点, 以于田绿洲为例, 在于田内部, 土壤积盐比较严重, 盐分含量变化在垂直剖面上主要表现为聚盐型和混合型, 还有少数的脱盐性存在。通过灌水洗盐降低土壤表层盐分含量则是改良盐碱土的根本措施。

农田土壤中的水盐动态变化特点和运移机制研究一直是人们关注的重点。在生产实践中应用水盐运移规律, 需要在特定条件下选择并建立完全封闭的平衡区进行基础研究, 即大量试验监测和数据分析, 以便解决目前模型缺乏对生产实践的指导意义, 使之能综合反映水盐在土壤-植物-大气连续系统中的物理过程及揭示水盐运移的实质。

二、滴灌土壤水盐运移研究进展

近十几年来, 滴灌条件下土壤中的水盐动态变化特征和运移机制研究一直是研究的重点。滴灌条件下的土壤水盐运移实质上是点源入渗条件下的土壤水盐运移问题。点源水盐运移研究包括点源入渗的水分运移和盐分运移。点源水分运移研究主要包括点源入渗量随入渗历时的变化特性、湿润锋运移特性、湿润体形状、湿润体体内水分分布等。点源盐分运移研究主要包括湿润体体内含盐率的分布、土壤积盐、压盐过程及其影响因素。刘晓英等研究了滴灌条件下土壤水分运动规律, 滴灌条件下单点源土壤水分运动受到滴头流量、灌水量、土壤初始含水率、土壤质地等因素的影响。在相同的灌水量下, 滴头流量增加, 滴头附近土壤含水率增加。滴头流量越小, 形成的饱和进水带越小, 且随时间的延长增长缓慢, 最终湿润锋轮廓越大, 反之, 饱和进水带越大, 且随时间的延续增长迅速, 水平方向运移越快。湿润圈随滴头流量、土壤初始含水率的增大而增大, 且湿润体内相位置的土壤含水率也增大。刘雪芹^[32]等研究揭示了在点源供水的条件下, 湿润体内含水率的分布从中心向外逐渐减少, 含水率剖面具有三角形形状特征。

相同质地土壤, 灌水量相同时, 垂直方向湿润距离随着滴头流量的增加而减小, 而水平方向距离随之增加; 滴头流量和灌水量相同, 偏砂性土壤水平方向湿润距离小于垂直方向湿润距离; 质地较细土壤水平方向和垂直方向湿润距离相近; 相同质地的土壤, 相同滴头流量下, 灌水量越大, 湿润范围越大。

国内已对滴灌条件下的盐分运移规律及影响因素也进行了深入研究。王全九、张勇研究^[33-34]表明: 土壤水分是土壤盐分运移的载体, 在滴灌条件下, 伴随着水分的入渗, 水流可将盐分带入湿润锋边缘, 使土壤盐分在三维空间发生运移。滴灌持续滴水, 脉冲式逐渐推进, 使盐分集中到湿润锋边缘; 在多滴头的情况下, 湿润锋相互重叠, 使盐分的侧向

移动逐渐过渡到向下移动,形成了一个平面整体向下洗盐。盐渍化土壤盐分运移主要包括两个过程:①灌水过程中,在水分的携带下,盐分进行三维运移,也就是表土的淋洗脱盐;②灌溉后,在土壤水势梯度、植物蒸腾、土面蒸发的作用下,随土壤水分的再分布而发生的再运移。侯振安等^[35]研究了不同滴灌处理施肥方式下棉花根区的水、盐、氮素分布。叶含春^[36]对田间滴灌试验的土壤盐分变化规律进行了研究,认为滴灌为浅灌且可控性强,不会产生深层渗漏,土壤含盐率在整个滴灌期较低。盐分在空间的分布主要受蒸发和湿润区范围的影响,灌水量的增加有助于土壤脱盐。

滴灌条件下,土壤盐分运移主要包括水平运移和垂直运移的过程。水平方向上,距离滴头较近区域的土壤含盐率在水分的淋洗后,低于土壤初始含盐率(脱盐区),较远的区域土壤含盐率高于土壤初始含盐率(积盐区),所以滴灌下土壤盐分分布存在着明显的积盐区和脱盐区。在相同的灌水量和土壤初始含水率下,随着滴头流量的增加,脱盐区水平距离变化甚微,不利于作物正常的淡化区形成;在相同的滴头流量下,随着灌水量的增加,脱盐区的水平距离增加。在相同的灌水量和滴头流量下,随着土壤初始含水率的增加,脱盐区水平距离变化甚微。

盐分在垂直方向的运移规律:滴灌形成的湿润体形状为半圆的椭球体,在球体的顶端,即滴头下方形成一个脱盐区,因为滴头下方受到水分淋洗程度较强,表层盐分向周围运移,在土壤深处形成一个积盐区,在湿润锋的边缘处又形成一个高盐区,其盐分含量高于盐渍化土壤的初始含盐率。

张琼^[37]对不同灌水频率、不同初始含盐率条件,膜下滴灌的水盐在生育期内运移进行了研究。认为相同的灌水量,含盐率较高农田棉花在花铃期高频灌溉与低频灌溉相比,棉花增产28%;而对于低盐土,灌溉频率对产量无显著影响。其原因在于滴灌的灌水次数多、频率高,具有稀释土壤盐分浓度的能力,可以将盐分排移到作物根系层以外区域。

马玲等^[38]研究了棉花膜下滴灌水盐运动规律,灌水前各时期,棉田膜内表层和下层含水量均高于裸地,而盐分含量及变化略低于裸地,接近灌水期上层高于下层。灌水后,各个时期无论是表层或下层含水率均高于裸地,上层盐分含量降低,下层盐分增加,膜内上层盐分降幅大于裸地,停水后,土壤水分减少,土壤盐分处于相对稳定状态。

王全九^[39]认为在滴灌水分的带动下,土壤盐分分布存在明显的积盐区和脱盐区,并给出了地面滴灌条件下的土壤盐分分布及含盐率分布等值线。为了分析滴灌压盐过程中淋洗盐分所消耗水的有效性,提出了淋洗水效率的概念,即单位水从作物主根系土体中携带到主根系以下的盐分数量。吕殿青^[40]针对新疆盐碱地的改良特征,通过室内膜下滴灌土壤盐分运移试验,初步研究了土壤脱盐过程,滴头流量、灌水量等对脱盐过程的影响。结果表明:膜下滴灌土壤盐分分布可划为达标脱盐区、未达标脱盐区及积盐区3个区域,土壤含盐率分布具有水平脱盐距离大于垂直脱盐距离的特点;滴头流量、土壤初始含水量以及土壤初始含盐率的增加不利于达标脱盐区的形成;灌水量的增加有助于土壤脱盐。李毅^[41]通过非充分供水条件下滴灌入渗的三维水盐运移试验,分析了湿润锋运移的函数特征和椭圆方程,并对径向含水率剖面进行了研究。基于水分特征,分析了入渗中径向含盐率、径向浓度和径向 Na^+ 浓度剖面,并做出了相应水盐特征的等值线图。

周宏飞等^[42]对塔里木灌区棉田水盐动态和水盐平衡问题进行了探讨,认为灌溉定额

小于 $2700\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，常规地面沟灌的积盐率和膜下滴灌棉田在生育期 $0\sim60\text{cm}$ 土层积盐，膜下滴灌的积盐率要高于常规地面沟灌的积盐率，为了保持农田的水盐平衡，在极端干旱区需要进行非生育期以淋洗盐分为目的的灌溉。刘新永等^[43]根据实地调查和观测资料，初步探讨了膜下滴灌条件下改良风沙土的盐分年际变化及分布特点。研究表明，在膜下滴灌与冬灌、春灌相结合的条件下，土壤表层 $0\sim30\text{cm}$ 盐分逐年下降，但脱盐率也在降低；盐分在土壤分层明显，在水平方向，距离滴头越远，盐分累积严重；在垂直方向，土壤盐分最低处位于 $20\sim40\text{cm}$ 处。在表层 $0\sim40\text{cm}$ 的土层中，靠近薄膜边缘盐分差异较大；不同滴灌年限的深层压盐区变化不大，膜间聚盐区位于膜间裸地并延伸到膜内，位于土壤表层 $0\sim40\text{cm}$ 。

陈小兵^[44]对新疆阿拉尔灌区土壤次生盐碱化防治及其相关问题进行了研究，以田间水盐平衡模型为依据较深入分析了灌区土壤盐分动态、盐碱化趋势及效应问题。根据区域水盐平衡理论估算区域尺度上的灌排比，还探讨了排水的出路问题；在综合分析的基础上，提出了基于可持续灌溉农业和遏制灌区农业负效应目标小的对策与建议。

通过滴灌棉田土壤中水盐运动研究的不断深入，掌握土壤水盐运动规律，定量分析土壤水盐的迁移对于保证作物的正常生长、建立合理的灌溉制度、发展节水农业、防止土壤盐渍化和次生盐渍化、实现我国农业的可持续发展等都有十分重要的意义。在新疆广大地区都存在着次生盐渍化的威胁，农业的生产成为核心问题。如何改良盐碱地成为新疆农业发展面临的关键问题。控制土体蒸发和减少灌溉水量是控制土壤次生盐渍化的重要途径。滴灌也是近十几年来发展起来的新的节水灌溉技术，它的灌水定额较低，在很大程度上减少了水分深层渗漏，而且滴灌淡化了作物主根区的盐分，为作物正常生长提供了良好的水盐环境。膜下滴灌技术应用于农业种植、节水灌溉和盐碱地开发利用方面，作为一种前景甚好的新思路，其理论和实践中还有诸多的问题亟待解决和探索。

三、滴灌土壤水盐运移数值模拟研究进展

Richards 为研究土壤非饱和流运动，以连续性水流方程替代瞬流方程，将连续性定理应用于 Darcy 定律，建立了土壤水分运动的基本方程，即等温方程，表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q \tag{1-5}$$

Klute 在 Richards 等温方程基础上，进行了非等温扩散流方程改进，很多研究者将之用于温差液体扩散率的测定，质能平衡基础上的模型和不可逆热力学基础上的线形方程，在此基础上得以发展，后来发现不可逆热力学模型在由微观方程向宏观连续方程的转化中并非十分严谨^[45]。

Philip 与 De Vries^[46]提出建立在质能平衡基础上的水-气-热耦合运移理论，水流和热流的耦合方程可表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [D(\theta) \nabla \theta] + \nabla (D_T \nabla T) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S_r \tag{1-6}$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (K_h \nabla T) \tag{1-7}$$

式中： ∇T 为温度梯度； $\nabla \theta$ 为含水率梯度； $D(\theta)$ 为由水势梯度引起的土壤水分扩散率； D_T 为由温度梯度引起的土壤水分扩散率； $K(\theta)$ 为土壤导水率； S_r 为根系吸水率； C_v 为土壤的溶剂热容量； K_h 为导热率； z 为深度坐标； t 为时间坐标。

1980 年以后，田间覆盖及耕作措施下的土壤水热耦合运移模型得以发展，二维土壤水热耦合模型在一维土壤水热耦合模型基础上得以建立，田间水热运移规律得以揭示。

随着计算机软件技术的发展，各类模型软件已经成为各个领域必不可少的研究手段之一。美国国家盐改中心开发的 Hydrus 软件，通过前人的改进和完善，如今在国内外模型研究领域得到了广泛应用^[47-49]。Hydrus 软件是一套用于模拟非饱和多孔介质中土壤水分、溶质以及能量运移的仿真型数值模型^[50]。

尹大凯、胡和平针对青铜峡银北灌区盐渍化的成因，通过 Hydrus-1D 软件进行多方案的计算模拟，对不同盐碱程度下，不同灌溉模式和灌溉水量对土壤盐碱改良效果的进行预测^[51]。毕经纬、李久生、马军花、胡克林等分别应用 Hydrus-1D、Hydrus-2D 模型，模拟了农田土壤水肥运移特征，分析了滴灌农田施肥土壤水渗漏及硝态氮淋失特征、降雨对冬小麦灌溉农田水分渗漏和氮淋失情况、作物生长对土壤水氮运移影响以及水力学和矿化参数空间变异对土壤水氮运移的影响，模拟的土壤含水率和硝态氮分布与实测值吻合良好，可以提供有效的预测分析^[52-55]。池宝亮和张林分别应用 Hydrus-1D 对点源地下滴灌土壤水分运动^[56]和多点源滴灌条件下土壤水分运动进行了数值模拟及验证^[57]，模拟结果能够较为真实地反映单点或多点源滴灌条件下的土壤水分运动变化。李亮通过 Hydrus-2D 软件生育期对土壤水分平衡和盐分的弥散作用进行了研究，结果表明该模型能够很好地反映出水盐运移规律，并且得出水盐运移相关物理量的变化动态^[58-59]。李红、王薇利用 Hydrus-2D 模拟了地下滴灌条件下不同的土质、灌水量、滴头流量、初始含水率和滴头埋深情况下土壤水分运动和分布^[60-61]。虎胆·吐马尔白等通过室内试验，利用 Hydrus 模型和土壤水分特征曲线相结合，利用反演计算的方法对粉壤土的土壤水力传导度进行确定^[62]。吴元芝利用 Hydrus-1D 模型模拟了 3 种土壤（壤黏土、黏壤土和砂壤土）中不同玉米生长状况（包括叶面积指数、根系深度和根系剖面分布）或蒸发力条件下根系吸水速率随含水率的动态变化，确定了不同条件下根系吸水速率开始降低的临界含水率^[63]。周青云在大田试验研究中考虑了根吸水的影响，运用 Hydrus-2D 模型软件并结合田间实测的数据来分析比对，模拟值和实测值具有一定的相关性^[64]，因此提出该模型可以较好地适合田间土壤水盐的预测并为今后的研究提供依据。

第三节 主要研究内容

一、不同灌溉处理对滴灌棉田水盐运移的影响

通过田间试验观测数据分析灌水前后的土壤水盐变化，了解土壤水盐的总体变化；通过对不同时间段、不同位置的土壤水分盐分监测，分析灌水对不同深度的土壤水盐运移规律的影响；通过不同灌溉制度试验分析不同灌溉处理下土壤水盐变化特征。