

西北旱区生态水利学术著作丛书

# 旱区农田土壤水盐调控

王全九 单鱼洋 等著

非  
外  
借



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

# 旱区农田土壤水盐调控

王全九 单鱼洋 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

将节水灌溉技术与水盐调控模式及作物生长有机结合是实现水土资源高效可持续利用的重要内容。本书系统地介绍了不同条件下旱区土壤水盐运移基本特征,数学模型和参数确定方法,典型作物耐盐特征,潜水蒸发与土壤盐分累积关系,微咸水和淡水膜下滴灌棉花生长特征和土壤水盐调控措施效果,微咸水和淡水地面灌溉下土壤水盐分布特征与典型作物和牧草生长状况,农田水盐均衡作物生长模型以及旱区土壤水盐调控模式等方面的研究成果。全书共9章,包括绪论,一维土壤水盐运移特征,滴灌土壤水盐运移特征,作物耐盐特征分析,排水地段土壤盐分分布特征,膜下滴灌棉花生长与土壤水盐调控,微咸水地面灌溉土壤水盐分布与作物生长,基于区域水盐平衡的作物生长模型和旱区土壤水盐综合调控模式。

本书可作为农业水利工程、水文与水资源、土壤物理、土地整治与修复、农业生态环境等领域的科研、教学和管理人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

旱区农田土壤水盐调控/王全九等著. —北京:科学出版社, 2017.10

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-054696-8

I. ①旱… II. ①王… III. ①干旱区-农田-土壤-水盐体系-调控-研究 IV. ①S156.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 243852 号

责任编辑: 祝 洁 王良子 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年10月第一版 开本: B5 (720×1000)

2017年10月第一次印刷 印张: 25

字数: 500 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主任：王光谦

委员：许唯临 杨志峰 沈永明  
张建云 钟登华 唐洪武  
谈广鸣 康绍忠

## 《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主任：周孝德

委员：王全九 李 宁 李占斌  
罗兴铨 柴军瑞 黄 强

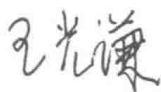
# 总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖泊为主的淡水生态系统。这个占据着少于 1% 地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的 0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此促使生态水利工程的观念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，“西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）”是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决了若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是重点实验室对其研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士



2016年9月

## 总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”国家战略桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与工程实际应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士



2016年9月

# 总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20世纪80年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

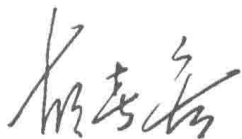
水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及早区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士



2016年9月



# 前 言

我国是一个农业大国,但农业生产受到水资源短缺和土壤盐碱化的双重威胁。将水资源开发利用、高效的节水灌溉技术与土壤盐碱化防治有机结合是实现农业可持续发展和水土资源高效可持续利用的重要内容。我国淡水资源短缺与微咸水储存丰富并存,合理开发利用微咸水资源是缓减我国农业水资源供需矛盾的重要途径之一。微咸水灌溉给农田带入大量盐分,会改变土壤物理和化学特征,影响作物对水分和养分的吸收,进而影响作物的生长过程,但同时这种影响又受到土壤质地、气候条件、种植模式和农田管理水平的制约,因此如何合理科学、高效、安全地利用微咸水进行农田灌溉一直是微咸水利用的核心问题。农田排水方法在干旱半干旱地区盐碱地改良方面发挥了重要作用,但随着淡水资源短缺和生态环境问题日益加剧,农田排水淋洗盐分方法受到挑战。如何将高效节水技术与土壤盐分调控技术有机结合,成为旱区高效节水技术可持续发展和利用的重要研究内容。因此,研究不同条件下土壤水盐运移与水盐调控模式、微咸水灌溉条件下土壤水盐分布特征及调控模式具有重要的科学意义和实际价值。

自1997年开始,在王文焰教授悉心指导下,在国家自然科学基金、霍英东教育基金项目、国家“863计划”项目、国家“十一五”支撑计划项目、水利部公益项目、新疆维吾尔自治区重大专项等项目的资助下,课题组采取试验研究与理论分析、模拟模型相结合的方法,在陕西、新疆、河北、天津等省(自治区,直辖市)围绕旱区土壤水盐调控理论与方法开展深入研究,系统分析了淡水和微咸水入渗条件下土壤水盐运移机制及其数学模型,构建了适宜的土壤水力参数确定方法;开展了旱区潜水蒸发和排水条件下土壤水盐动态变化特征研究工作,明确了旱区潜水蒸发与气温、土质的关系,土壤盐分累积与地下水埋深和矿化度的关系,覆膜对土壤盐分累积控制的功效。课题组率先开展了膜下滴灌水盐运移机制和滴灌技术参数对土壤水盐运移特征影响研究,揭示了适宜大田膜下滴灌的水盐调控机制,明确了膜下滴灌与化学改良、膜间控盐、冬春灌相结合的综合调控盐分的效果,构建了膜下滴灌棉花生长模型和土壤水盐平衡预测模型。同时,系统研究了旱区典型作物耐盐特征,揭示了微咸水地面灌溉对土壤质量和典型作物生长的影响机制,明确了微咸水地面灌溉与化学改良、生物改良措施相结合的综合调控盐分效果,并构建了微咸水地面灌溉条件下典型作物生长模型,提出了土壤水盐调控综合模式。

本书共9章,其中前言由王全九撰写;第1章由单鱼洋撰写;第2章主要由



王全九、单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有张江辉、吴忠东、毕远杰、付秋萍、王春霞、马东豪、雪静、史晓楠、苏莹、杨艳、刘建军等；第3章主要由王全九、单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有吕殿青、李毅、来建斌、孙海燕、王春霞、巨龙、刘建军等；第4章主要由王全九、单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有毕远杰、王春霞、谭帅；第5章由王全九、单鱼洋、张江辉撰写；第6章主要由王全九、单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有周蓓蓓、张江辉、王新、王春霞、苏李君、谭帅、来建斌、马东豪、巨龙、刘建军、王永杰、丁安川、王升、罗晓东、徐迪等；第7章主要由王全九和单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有叶海燕、马东豪、郭太龙、吴忠东、苏莹、毕远杰、雪静等；第8章主要由苏李君和单鱼洋撰写，参与撰写和相关研究工作的还有王春霞、谭帅、王升等；第9章由单鱼洋撰写。最后由王全九和单鱼洋整理统稿，王全九完成审定。

本书系统总结了课题组有关旱区土壤水盐调控方面近20年的研究成果。在整个研究过程中，得到众多单位、领导、专家和同仁的大力指导、支持和帮助，在此一并表示最真诚的感谢。特别感谢西安理工大学王文焰教授、张建丰教授、史文娟教授、吴军虎副教授，天津理工大学汪志荣教授，新疆维吾尔自治区水利厅副厅长董新光教授，原清华大学党委书记胡和平教授，新疆水利厅彭立新调研员、王新处长、邱胜彬处长、王永增处长，新疆水利水电科学研究院张江辉书记、何建村院长、聂新山副院长、张胜江主任、郭谨处长、白云岗主任、潘瑜所长，新疆塔里木河流域管理局托乎提·艾合买提书记、王新平局长，新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所李冰站长，新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局石泉书记、邓铭江总工，新疆农业大学杨鹏年教授，清华大学倪广恒教授、田富强副教授，武汉大学杨金忠教师，中国矿业大学靳孟贵教授，中国科学院地理科学与资源研究所康跃虎研究员和罗毅研究员，中国科学院南皮生态农业试验站刘小京站长，中国科学院新疆生态与地理研究所田长彦书记，新疆生产建设兵团农八师吴磊老师和何新林老师，新疆生产建设兵团农垦科学院、石河子大学、中国科学院天津静海农田与农业节水试验研究基地有关领导和同仁，在项目设计和实施过程中给予指导、帮助和支持。衷心感谢参加项目研究的各位研究生和工作人员，正是他们的艰辛努力使我们可以“在土壤水盐的迷宫”中自由探索，并提出了适应旱区农业生产的水盐调控模式，为现代农业发展作出了应有的贡献。

由于研究者水平有限，相关问题研究有待进一步深化和完善，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2017年1月

# 目 录

总序一

总序二

总序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 国内外滴灌研究进展	2
1.2.2 国内外微咸水研究进展	5
1.2.3 土壤水盐调控措施	11
1.3 研究方法	14
1.3.1 综合调查法	14
1.3.2 试验研究	14
1.3.3 数值模型模拟	14
参考文献	14
第 2 章 一维土壤水盐运移特征	21
2.1 淡水入渗土石混合介质水盐运移特征	21
2.1.1 土石混合介质水分运动特征研究	22
2.1.2 水平入渗法确定土石混合介质水力参数	28
2.1.3 水平入渗法确定土石混合介质的扩散率	33
2.1.4 土壤入渗代数模型在土石混合介质中的适用性研究	36
2.1.5 土石混合介质垂直一维积水入渗土壤盐分运移特征	41
2.2 微咸水入渗土壤水盐运移特征	45
2.2.1 非盐碱化土微咸水入渗特性	45
2.2.2 微咸水间歇特征分析	46
2.2.3 咸淡交替入渗对土壤水盐运移的影响	53
2.2.4 微咸水入渗模型的研究	55

2.2.5	次生碱土微咸水入渗特性及数学模型	66
2.2.6	微咸水入渗数学模型	74
2.3	潜水蒸发条件下土壤水盐运移特征	80
2.3.1	潜水蒸发特征分析	80
2.3.2	土壤输水特性对潜水蒸发的影响	87
2.3.3	潜水蒸发数学分析	96
2.3.4	潜水蒸发与盐分累积	100
2.4	潜水蒸发与土壤盐分积累特性研究	110
2.4.1	试验设计	110
2.4.2	土壤盐分积累特性研究	110
	参考文献	121
<b>第3章</b>	<b>滴灌土壤水盐运移特征</b>	<b>123</b>
3.1	淡水滴灌土壤盐分分布特征	123
3.1.1	试验方法	123
3.1.2	点源交汇条件下土壤水盐运移特征	124
3.2	微咸水滴灌土壤水盐运移	140
3.2.1	试验方法	140
3.2.2	灌水矿化度对土壤水盐分布的影响	141
3.3	滴灌施加改良剂对土壤盐分分布影响	145
3.3.1	试验方法	145
3.3.2	随水滴钙对土壤水盐运移特征研究	146
3.3.3	随水滴钾对土壤水盐运移特征研究	151
	参考文献	159
<b>第4章</b>	<b>作物耐盐特征分析</b>	<b>161</b>
4.1	棉花耐盐特征	161
4.1.1	试验材料与方法	161
4.1.2	棉花种子发芽期耐盐性	163
4.1.3	土培棉花出苗的耐盐性	163
4.1.4	大田棉花出苗状况及耐盐性分析	167
4.2	灌溉水矿化度与土壤含盐量对作物及牧草生长的影响	169
4.2.1	试验方法	169
4.2.2	灌溉水矿化度和土壤含盐量对作物及牧草出苗情况的影响	170
	参考文献	184

第 5 章 排水地段土壤盐分分布特征	186
5.1 排水地段基本特征和试验系统布设	186
5.1.1 试验地基本情况	186
5.1.2 排水系统布设	186
5.1.3 排水地段土壤理化特性	187
5.1.4 地下水观测井布设与地下水埋深与矿化度	188
5.1.5 灌溉方案	192
5.2 排水系统排水效果分析	192
5.2.1 排水地段地下水水位变化特征	192
5.2.2 排水沟影响范围分析	193
5.2.3 排水沟深度与间距关系分析	194
5.3 排水地段土壤含盐量与地下水淡化特征	197
5.3.1 土壤含盐量变化特征	197
5.3.2 土壤含盐量与地下水埋深间关系	197
5.3.3 土壤含盐量与氯离子和硫酸根离子含量关系	199
5.3.4 覆膜种植抑制盐分的效果分析	200
5.3.5 地下水矿化度变化特征	202
5.3.6 土壤含盐量与埋深和地下水矿化度的关系	202
5.4 地下水允许深度和合理排水沟深度确定	204
5.4.1 作物耐盐性	204
5.4.2 地下水允许深度确定	205
5.4.3 排水沟深度	205
5.4.4 排水沟间距	205
参考文献	205
第 6 章 膜下滴灌棉花生长与土壤水盐调控	207
6.1 微咸水滴灌棉田土壤水盐分布与棉花生长特征	207
6.1.1 试验方法	207
6.1.2 微咸水轮灌与混灌对土壤水分分布及耗水量的影响	208
6.2 化学改良对棉田土壤水盐分布与棉花生长影响	222
6.2.1 试验方法	222
6.2.2 化学改良对表层土壤容重的影响	223
6.2.3 化学改良对土壤含水量的影响	224
6.2.4 化学改良措施下土壤盐分分布特征	231

6.2.5	化学改良措施下棉花生理生长指标及数学模型	243
6.3	膜间调控对棉田土壤水盐分布与棉花生长的影响	251
6.3.1	试验方法	251
6.3.2	膜间处理对土壤水分的影响	252
6.3.3	膜间处理对土壤盐分的影响	256
6.3.4	膜间处理对棉花生长的影响	260
	参考文献	264
<b>第7章</b>	<b>微咸水地面灌溉土壤水盐分布与作物生长</b>	<b>266</b>
7.1	微咸水灌溉对冬小麦生长的影响	266
7.1.1	试验方法	266
7.1.2	微咸水混灌土壤水盐分布与冬小麦生长特征	268
7.1.3	微咸水轮灌土壤水盐分布与冬小麦生长特征	276
7.1.4	波涌灌土壤水盐分布与冬小麦生长特征	283
7.2	微咸水灌溉对油葵生长的影响	294
7.2.1	试验方法	294
7.2.2	微咸水灌溉对土壤水盐分布与油葵生长的影响	296
7.2.3	调控方法对土壤水盐分布和作物生长的影响	320
	参考文献	336
<b>第8章</b>	<b>基于区域水盐平衡的作物生长模型</b>	<b>337</b>
8.1	气象模块	339
8.1.1	有效积温	339
8.1.2	参考作物蒸发蒸腾量	340
8.2	水量平衡模块	341
8.2.1	地表	342
8.2.2	根区	342
8.2.3	过渡区	343
8.2.4	含水层	344
8.2.5	地下水位的计算	344
8.2.6	灌溉效率和灌溉充分性	345
8.3	盐分平衡模块	346
8.3.1	根区盐分	346
8.3.2	过渡区盐分	347
8.3.3	排水及井水浓度	347

8.4	作物模块	348
8.4.1	叶面积指数模型	348
8.4.2	叶面积指数与地上生物量的关系	349
8.4.3	作物收获指数	349
8.4.4	根系吸水	350
8.4.5	基于收获指数的产量模型	352
8.5	作物生长模型	353
8.5.1	试验方法	353
8.5.2	基于有效积温的棉花相对叶面积指数增长模型	353
8.5.3	叶面积指数与地上生物量的关系	355
8.5.4	产量模型	355
8.6	模型预测	356
8.6.1	参数确定	357
8.6.2	地下水位对棉花产量的影响	358
8.6.3	地下水矿化度对棉花产量的影响	359
	参考文献	360
第9章	旱区土壤水盐综合调控模式	362
9.1	膜下滴灌开发利用盐碱地技术体系	362
9.1.1	冬灌土壤水盐分布特征	362
9.1.2	长期膜下滴灌土壤含盐量分布特征	368
9.1.3	膜下滴灌土壤水盐调控模式	374
9.2	微咸水安全利用技术体系	376
9.2.1	微咸水地面灌溉安全利用模式	376
9.2.2	微咸水滴灌安全利用模式	378
	参考文献	379

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

淡水资源匮乏是世界性问题，对农业生产和生态环境构成了严重的威胁。虽然我国是一个水资源大国，但人均淡水资源占有量及单位土地面积水资源拥有量远远低于世界平均水平，属于十三个贫水国家之一。同时，受气候变化和自然条件影响，区域性缺水和季节性缺水表现得较为严重。我国也是土壤盐碱化危害较为严重的国家，全国约有盐碱土地 2700 万  $\text{hm}^2$ ，其中有 770 万  $\text{hm}^2$  以上分布于农田之中，占耕地面积的 7% 左右，占全国中低产田面积的 13.7%。在土地盐碱化防治方面，目前已有 561.2 万  $\text{hm}^2$  得到初步治理，还有 200 万  $\text{hm}^2$  以上未得到治理。此外，在发展灌溉的同时，灌区的次生盐碱化面积也有不同程度的增加，占灌溉土地面积的 11%~15%。因此，将水资源开发利用、发展高效的节水灌溉技术与防止土壤次生盐碱化调控有机结合，是实现水土资源高效而可持续利用的重要内容。

我国淡水资源短缺与微咸水储存丰富并存，合理开发利用微咸水资源是缓减我国农业水资源供需矛盾的重要途径之一。微咸水开发利用不仅有利于缓解水资源短缺问题，而且有利于地下水资源更新、淡水存储和环境生态建设与保护。然而与传统的农业淡水灌溉相比较，微咸水灌溉一方面提供了作物生长所需要的水分，另一方面增加了土壤中的盐分，造成土壤潜在盐渍化的危险。微咸水农业利用的两重性决定了微咸水灌溉的特殊性与复杂性。微咸水灌溉容易引起土壤次生盐碱化，使耕层的土壤含盐量或土壤溶液浓度超过作物的耐盐度，从而影响作物生长和产量。因此，对微咸水的处理及科学利用，防治土壤次生盐碱化，保持土地资源的可持续发展，成为微咸水开发利用的核心问题。

膜下滴灌技术是一种既能提高水分效率又能够有效调节作物根区土壤盐分累积的高效节水技术。随着滴灌技术的逐年实施，一些研究结果显示，根区土壤盐分呈现累积的现象。在干旱半干旱地区，如何将膜下滴灌高效节水技术与土壤盐分调控和土壤改良技术有机结合，成为旱区高效节水技术可持续发展和利用的重要研究内容。

综上所述，如何更加合理处理灌水方式、灌水水质和土壤水盐调控措施之间的关系，是实现农业的可持续发展和土地可持续利用的重要内容。因此，研究不



同条件下土壤水盐运移与水盐调控模式, 微咸水灌溉条件下土壤水盐分布特征及调控模式具有重要的科学意义和实际价值。

## 1.2 研究进展

### 1.2.1 国内外滴灌研究进展

#### 1.2.1.1 滴灌土壤水分运动研究

20 世纪 60 年代, 以色列发展了滴灌技术, 并将这种技术不断完善并传播到世界各地。由于滴灌技术具有节水、高产、省肥等优势, 得以广泛的应用。对水分运动的研究要追溯到 19 世纪 60 年代, 法国水力学家 Darcy 通过大量实验得出了饱和土壤水流条件下, 渗流速率与水力梯度成正比的关系<sup>[1]</sup>。然而在自然界中, 水分运动不都是在饱和条件下进行, 为此 Richards 将达西定律引入非饱和土壤水分运动当中, 得到非饱和土壤水分流动的达西定律。滴灌条件下的水分运动同样遵循达西定律和质量守恒定律。对于点源入渗条件下的水分运动, 利用达西定律和质量守恒定律推求出非饱和水分运动的基本方程。为了更好地了解水分运动的机理, 一些复杂的条件被简化, 方程的表达形式也有所改变, 主要有以基质势为因变量的基本方程, 方程的表达形式: 以基质势为变量的土壤水分运动方程、以柱坐标或球坐标系表示的土壤水分运动方程。方程的选定、影响因素和初始条件的确定组成了点源入渗求解方程。通过计算便可以了解土壤水分在时间和空间上的分布规律、湿润锋的推进规律以及累积入渗量随时间的变化规律等。Brandt 等建立了一种理论模型研究单点源多维短时间入渗, 研究结果显示, 随着滴头流量的增加和水平湿润范围的增加, 土壤湿润深度减少, 湿润体积是典型的球状<sup>[2]</sup>。Healy 等提出的利用数值计算结果来拟合入渗历时与土壤湿润体特征值的方法, 可以将离散的数值结果转化为直观的函数结果<sup>[3]</sup>。Schwartzman 等研究认为滴灌湿润范围是由灌水量、滴头流量以及饱和导水率决定的, 并且建立了经验公式模拟湿润体的范围<sup>[4]</sup>。刘晓英等对滴灌条件下的水分运动进行了研究<sup>[5]</sup>。吕殿青等对滴头流量、灌水量、土壤初始含水量及土质对水分运动的影响进行了评价, 发现滴头流量越大, 越有利于水平扩散, 而不利于垂直入渗<sup>[6]</sup>。灌水量、初始含水量与湿润体的大小呈正相关。吕殿青等对滴灌积水条件下水分的入渗进行了研究, 发现积水范围与滴头流量、时间存在一定的函数关系, 并且发现从某一时刻起积水半径基本上不再发生变化<sup>[7]</sup>。对不同方向上湿润锋的推进速度及距离进行研究发现, 水平、垂直湿润锋与时间呈幂函数的规律。水平湿润锋随着灌水时间和滴头流量的增加而增加, 垂直湿润锋距离随时间的增加也是增加的, 但是增加幅度却随着

滴头流量的增加而减小,这就说明滴头流量的增加不利于水分向下迁移。由于湿润体的水平湿润距离容易观测,而垂直距离不易观测,如果能够获得水平距离与垂直距离的比值,同样可以判定湿润体的形状。通过在同一滴头流量下水平湿润半径和垂直湿润深度的对比,湿润体水平湿润距离与垂直湿润距离之比与时间符合幂函数关系,也分析得出了滴灌条件下水平湿润半径和垂直湿润深度与时间符合幂函数关系。湿润体体积随灌水量、土壤初始含水量的增加而增大。为了更好地了解水分的入渗及分布特征,许多经验模型、数值模型被广泛地应用到模拟水分运动当中。李光永等建立了滴灌土壤湿润体特征值的数值算法<sup>[8]</sup>。张振华等建立了地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解,并发现湿润体体积和灌水量之间存在显著的线性关系<sup>[9]</sup>。胡和平等通过实验建立了滴灌条件下湿润体的经验模型,湿润体体积与灌水量成正比,比例系数与土壤饱和含水率、初始含水率正相关,与滴头流量负相关,湿润锋比和灌水量之间呈幂函数关系<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.1.2 滴灌土壤盐分运移的研究

土壤本身是一个非闭合系统,不断与外界发生能量交换。土壤中的盐分作为该系统中的重要组成部分,对能量的交换起着至关重要的作用。自然条件下,土壤中的盐分主要通过灌溉、降水、施肥、地下水补给及植物残留等方式进入土壤,而土壤中的盐分通过植物吸收及农田措施等方式输出<sup>[11]</sup>。此外,人类活动对盐分的迁移也产生了重要的影响,主要表现为水土流失、土壤次生盐碱化及荒漠化等。

土壤中盐分的运移主要以水分运动为载体。因此,单点滴灌条件下的盐分运移同样遵循三维空间的分布规律。一般情况下,盐分的运移主要包括两个过程:一是灌水过程,盐分随水进入土壤,向四周扩散,同时灌水也携带着土壤中原有的盐分向四周迁移,这一过程为盐分的淋洗过程;二是返盐过程,当灌水结束时,盐分随水分继续在土壤中迁移,然而在植物吸收和外界大气蒸发作用的影响下,盐分随着水分向上移动,水分通过植物根系或地表进入大气,而将盐分存留于土壤中,这一过程称为盐分的累积<sup>[12]</sup>。盐分的运移同样符合质量守恒定律和能量守恒定律。土壤中的物质主要以固、液、气三种状态存在于土壤介质当中。利用通量方程和质量守恒方程描述了土壤溶质迁移的对流弥散方程(convective-dispersion equation, CDE)<sup>[13]</sup>。该方程中考虑了所有的影响因素,在应用时可根据实际情况进行选择。Paulo等利用无网格法模拟不均匀介质条件下盐分的运移<sup>[14]</sup>。Huang等根据有限体积法模拟裂隙岩石中化学物质的运移<sup>[15]</sup>。Wang等利用蒙特卡罗方法评价化学物质在多元化介质中的运移。另外许多研究人员通过实验研究化学物质的迁移<sup>[16]</sup>。Ben-Asher假定土壤均质、各向同性,溶质完全随水分运动,忽略了弥散和吸附作用,水流运动符合达西定律,提出了滴灌点源溶质的等效半球模型。该模型以达西定律和水分连续方程为基础,经过一系列变换和引入无量纲变