



# 内蒙古河套灌区微咸水利用模式 及水土环境预测评估

杨树青 史海滨 苏瑞东 马金慧 著



科学出版社

# 内蒙古河套灌区微咸水利用模式 及水土环境预测评估

杨树青 史海滨 苏瑞东 马金慧 著

北 京

## 内 容 简 介

本书以内蒙古河套灌区为背景,分析了微咸水灌溉条件下作物生长性状及土壤水盐环境的动态变化,研究了区域土壤水盐的空间结构性,构建了考虑区域变异的 SWAP-MODFLOW 耦合模型,并预测了中、长期微咸水灌溉条件下的区域环境,提出了微咸水与淡水综合利用的灌溉模式。全书共 8 章,主要包括:微咸水灌溉研究背景及意义;研究区概况与试验设计;微咸水灌溉对作物及生长环境影响的试验研究;MODFLOW 模型的构建与考虑区域变异的非饱和水盐运移模型系统的构建;微咸水灌溉条件下土壤水盐动态、地下水环境变化规律模拟;区域非饱和水盐运移与地下水、溶质运动耦合模型的构建及预测;微咸水与淡水综合利用灌溉模式的研究等。

本书可供水利、农学、土壤专业的本科生、研究生以及相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

内蒙古河套灌区微咸水利用模式及水土环境预测评估/杨树青等著. —北京:科学出版社,2017. 6

ISBN 978-7-03-052986-2

I. ①内… II. ①杨… III. ①咸水灌溉-影响-水土保持-研究-内蒙古②咸水灌溉-水环境-环境预测-研究-内蒙古 IV. ①S274②S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 118010 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:照 望

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张:19

字数:383 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区西部,属干旱、半干旱地区,是我国土壤盐渍化发育的典型地区,盐渍化土地面积 358.23 万亩,占耕地面积的 50%。近年来,随着黄河上游持续干旱少雨,河套灌区灌溉引水矛盾日益尖锐,且根据国家卫生计生委、水利部(1998)2520 号文件所定的配水方案,河套灌区引黄水量减少。因此,在未来的一段时间内,相对缺水和盐渍化是制约河套灌区乃至西北地区可持续发展的两大因素。而河套灌区地下微咸水、咸水较为丰富,以 3g/L 为界,地下水水质小于 3g/L 的面积占总面积的 71.3%,大于 3g/L 的面积占总面积的 28.7%。还有大量的田间排水和退水,这部分水量大部分是咸水,完全可以再利用。开发利用这部分咸水,不仅能减轻黄河水资源的供水压力,更重要的是,通过对咸水的开采,腾空地下库容,使其得以承接降水和其他地表水的补给。补给的淡水或较淡的水将把土壤盐分淋洗,并将淋洗后的咸水驱逐到深层并通过田间排水系统排出区外,使咸水层逐渐淡化,改善了生态环境,在河套灌区开发利用微咸水是非常必要的。本研究在田间试验的基础上,理论与实践相结合,采用先进的研究手段评价微咸水灌溉的环境效应,可对本灌区及类似地区提供重要的理论指导和应用参考。在研究区进行微咸水灌溉的环境效应预测评估的研究将为河套灌区今后的农业灌溉提供策略指导。

本书是作者在连续多年野外大量试验研究的基础上,进行系统凝练的成果。本书以位于内蒙古河套灌区的乌拉特前旗红卫试验区为研究对象,采用土壤水盐实测信息,以地质统计学理论为手段,研究区域土壤水盐的空间结构性;以灌区主要种植作物为供试作物品种,应用田间试验的实测数据检验 SWAP 模型在不同土壤水、盐及地下水边界条件下模拟土壤水、盐动态的可行性,在此基础上构建考虑区域变异的离散化一维垂直非饱和水盐运移 SWAP 模型系统;考虑以地下水(水位及水质)动态变化过程作为非饱和含水层与饱和含水层耦合界面的交互边界条件,建立 SWAP-MODFLOW 耦合模型并研究该耦合模型的运算方法;以红卫试验区为模拟对象,对所研究的计算方法的可行性、可靠性进行检验和分析;利用耦合模型模拟探讨适合河套灌区气候特点和使区域水土环境良性循环的最优咸淡水灌溉方式。

全书共 8 章,第 1 章介绍微咸水灌溉的研究背景及意义,以及微咸水灌溉在国内外的研究现状分析。第 2 章介绍研究区地理位置与试验设计方案。第 3 章分析微咸水灌溉对作物及生长环境的影响。第 4 章分别构建 MODFLOW 模型与考虑

区域变异的非饱和水盐运移模型系统。第 5 章利用非饱和土壤水盐运移模型和地下水水流及溶质运移模型分别对微咸水灌溉条件下土壤水盐动态和地下水环境变化规律进行模拟。第 6 章构建区域非饱和水盐运移与地下水、溶质运动耦合模型,并利用耦合后的模型预测中、长期微咸水灌溉条件下的区域环境。第 7 章提出微咸水与淡水综合利用灌溉模式。第 8 章对全书进行总结与展望。

本书由杨树青、史海滨、苏瑞东、马金慧等撰写,最终由杨树青统稿完成。叶志刚、刘德平、唐秀楠、符鲜等也参加了相关的研究工作,其中,符鲜还在本书后期的校核方面做了大量工作。

本书的出版得到国家自然科学基金项目(50969004)、教育部“创新团队发展计划”(IRT13069)、内蒙古自治区水利科技项目、内蒙古自治区科技计划项目等的资助,在此表示感谢。

本书内容涉及多学科的交叉,限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请有关专家与读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 引言</b> .....	1
1.1 微咸水灌溉研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状分析 .....	3
1.2.1 微咸水灌溉概况 .....	3
1.2.2 微咸水灌溉适应性的研究进展 .....	3
1.2.3 咸水灌溉技术与利用方式的研究 .....	4
1.2.4 咸水灌溉对作物产量、品质的影响研究 .....	6
1.2.5 咸水灌溉对作物生长环境影响的研究 .....	7
1.2.6 地质统计学在土壤水盐研究方面的应用研究 .....	9
1.3 研究思路与内容 .....	11
<b>第 2 章 研究区概况与试验设计</b> .....	13
2.1 研究区地理位置 .....	13
2.2 研究区气象及水文地质条件 .....	13
2.3 研究区土壤特征参数 .....	16
2.3.1 土壤水分特征曲线测定 .....	17
2.3.2 土壤水平扩散率的测定 .....	18
2.3.3 土壤质地的测定 .....	19
2.4 试验设计方案 .....	20
2.4.1 粮油作物灌溉方案 .....	20
2.4.2 经济作物灌溉方案 .....	23
2.5 地下水观测井布置 .....	24
<b>第 3 章 微咸水灌溉对作物及生长环境影响的试验研究</b> .....	25
3.1 盐分对作物生长的影响 .....	25
3.1.1 微咸水灌溉模式下粮油作物的生长特性分析 .....	25
3.1.2 微咸水灌溉模式下枸杞生长特性分析 .....	28
3.2 盐分对干物质累积的影响 .....	33
3.2.1 微咸水灌溉模式对粮油作物干物质累积的影响 .....	33
3.2.2 微咸水灌溉模式对枸杞生长量的影响 .....	35
3.3 盐分对产量的影响 .....	39

3.3.1	微咸水灌溉模式对粮油作物产量的影响	39
3.3.2	微咸水灌溉模式对枸杞产量的影响	41
3.4	作物生育期土壤水盐动态	45
3.4.1	小麦试验田土壤水盐动态	45
3.4.2	葵花试验田土壤水盐动态	50
3.4.3	玉米试验田土壤水盐动态	55
3.4.4	枸杞试验田土壤水盐动态	58
3.5	小结	90
<b>第4章</b>	<b>MODFLOW 模型与考虑区域变异的 SWAP 模型的构建</b>	<b>91</b>
4.1	地下水流数值模型的初始参数	91
4.1.1	计算网格剖分	91
4.1.2	研究区边界条件的分析确定	94
4.1.3	初始条件及源汇项的确定	107
4.1.4	初始水文地质参数	110
4.2	地下水流数值模型参数的率定	114
4.3	地下水流数值模型的检验	118
4.4	溶质运移模型的初始参数	122
4.4.1	边界条件及汇源项的确定	122
4.4.2	观测井	125
4.4.3	初始参数	125
4.5	溶质运移模型参数的率定	125
4.6	溶质运移模型参数的检验	129
4.7	区域水盐信息的统计分析	131
4.7.1	区域水盐信息采样设计	131
4.7.2	垂直观测点采样数据统计分析	132
4.7.3	研究区土壤水盐采样数据统计分析	133
4.7.4	试验田土壤水盐采样数据统计分析	134
4.8	研究区水盐信息的空间结构性	135
4.8.1	土壤水盐信息空间结构性	136
4.8.2	土壤水盐、容重在垂直方向上空间结构性及分析	140
4.9	研究区的空间变异性分区	145
4.9.1	研究区土壤水盐变差函数模型	146
4.9.2	模型的检验	147
4.9.3	研究区土壤水盐空间变异分区	154
4.10	SWAP 模型的参数	159

---

4.10.1	土壤水流模型	160
4.10.2	输入资料	160
4.10.3	空间单元剖分	160
4.10.4	初始条件及边界条件的确定	160
4.10.5	土壤水分初始参数	161
4.10.6	模型的识别	162
4.11	不同区域土壤水溶质运移模型的识别	168
4.11.1	溶质运移方程	168
4.11.2	模型识别	168
4.12	作物模型的识别	173
4.12.1	作物性态	174
4.12.2	模型的识别	175
4.12.3	一维垂直非饱和水盐运移模型系统的构建	175
4.13	小结	177
<b>第5章</b>	<b>微咸水灌溉条件下土壤水盐动态、地下水环境变化规律模拟</b>	<b>179</b>
5.1	基于 SWAP 模型模拟的微咸水灌溉条件下土壤水盐动态的研究	179
5.1.1	正常灌溉定额下土壤水盐动态模拟	179
5.1.2	淋洗灌溉定额下土壤水盐动态模拟	189
5.2	微咸水灌溉的土壤盐分累积预测	197
5.2.1	土壤盐分累积预测方案的选择	198
5.2.2	土壤盐分累积预测	198
5.3	基于 MODFLOW 模型模拟的微咸水灌溉条件下地下水环境模拟	200
5.3.1	平均年法	200
5.3.2	考虑时间序列的预测	217
5.3.3	两种预测方法模拟结果对比	229
5.4	小结	230
<b>第6章</b>	<b>SWAP-MODFLOW 耦合模型的构建及预测</b>	<b>232</b>
6.1	模型耦合的思路	232
6.2	耦合模型的构建	233
6.2.1	数学模型	233
6.2.2	模型算法	234
6.3	耦合模型的检验	235
6.3.1	耦合模型的第一层次检验	235
6.3.2	耦合模型的第二层次检验	243
6.4	中、长期微咸水灌溉条件下区域水土环境预测	251

---

6.4.1	预测方法及预测水平的确定	251
6.4.2	中期微咸水灌溉条件下区域环境预测	252
6.4.3	长期微咸水灌溉条件下区域环境预测	258
<b>第7章</b>	<b>微咸水与淡水综合利用灌溉模式的研究</b>	<b>267</b>
7.1	微咸水和淡水综合利用灌溉模式的田间试验研究	267
7.1.1	土壤水盐的运移规律	267
7.1.2	作物的生长和产量变化	272
7.2	微咸水和淡水综合利用灌溉模式的数值模拟研究	273
7.2.1	灌溉模式的方案设置	273
7.2.2	不同轮灌方案的数值模拟	275
<b>第8章</b>	<b>总结与展望</b>	<b>286</b>
8.1	总结	286
8.1.1	基于耦合模型的微咸水灌溉水土环境效应预测研究	286
8.1.2	内蒙古河套灌区微咸水综合利用灌溉模式的研究	289
8.2	展望	290
<b>参考文献</b>		<b>292</b>

# 第 1 章 引 言

## 1.1 微咸水灌溉研究背景及意义

环境是人类赖以生存和发展的所有要素和条件的集合,人类活动又严重影响着环境。水资源的可再生性是环境的有机组成和控制性因素。水土环境是区域自然生态环境的最基本要素,同时也是农业环境中最为活跃的组成部分;水土环境涉及与人类生活密切相关的最基本自然资源,以及土壤科学、水科学、工程技术与环境科学的交叉。众所周知,土壤盐渍化是一个古老的环境问题。在世界灌溉发展的历史中及我国灌溉大规模发展的 20 世纪 50 年代,都曾有过极其深刻的水土环境恶化的教训,严酷的事实使人们逐渐提高了对人类活动与环境关系的科学认识。灌区土壤盐渍化和水土环境污染的防治也是当前世界普遍关注的问题,并成为实现农业持续发展的重要课题。早在 1989 年 Szabolce 就提出盐渍化及水土环境污染防治提前预测的重要性,他认为“几千年来,既没有足够的认识,又没有很好的技术手段来预测、解释和防治土壤盐渍化过程。结果是问题发生后,要制止这个过程的发展已是被动了。”2020~2050 年,《中国水利发展大纲》中要求“近期的水利科学以技术开发为主,适当考虑应用理论研究,同时要加快发展预测等研究,为宏观决策服务”。

由于淡水资源的短缺和工业用水的竞争,农业生产对劣质水(咸水或城市污水)应用的依赖性日益增加。劣质水灌溉不仅给农作物生长提供了所需的水分,而且也能淋洗掉作物根系层中的部分盐分,有利于作物生长。但长期的劣质水灌溉会增加土壤和地下水中的盐分,不仅导致土壤的次生盐碱化使得作物产量降低,而且也将恶化农业生态环境,阻碍农业生产的可持续发展。在第 15 届世界土壤学年会的土壤盐渍化研究进展主题报告中,预测到“21 世纪土壤盐渍化还会继续发展并将成为世界关注的重要问题之一”,提出要实行节水灌溉和劣质水利用并关注与生态环境的相互关系。因此,微咸水灌溉的环境效应预测评估将为劣质水的安全应用提供技术支撑。

本书所研究的微咸水灌溉属于地表水与地下水联合应用的范畴。地下水与地面水的相互作用是普遍存在的一种自然现象,也是陆地水文循环的一个重要组成部分。1993 年 7 月, MAB 在法国里昂召开了“国际地下水与地表水交错带国际学术研讨会”,在我国该项研究尚属新领域。1974~2001 年,联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)实

施了五个阶段的国际水文计划(International Hydrological Programme, IHP),第六阶段(2002~2007年)的研究目标是“水的相互作用:来自风险和社会挑战的体系”,其中,主要研究方向是地下水与地表水的相互作用。UNESCO、国际水文地质学家协会(International Association of Hydrogeologists, IAH)、国际地下水基金会、美国环境保护局、美国地质调查局、联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)等都将地表水与地下水的相互作用作为目前研究的重要热点和前沿课题。可见,研究地下水和地表水相互作用在水量和水质两方面的变化规律,对于合理开发利用水资源及水环境的预报均有重要的理论和实践意义。

内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区西部,属干旱、半干旱地区,是我国土壤盐渍化发育的典型地区,盐渍化土地面积 358.23 万亩,约占耕地面积的 50%。灌区地下水埋深较浅,主要受灌溉渗漏影响与制约,年平均地下水埋深为 1.24~1.79m。近年来,随着黄河上游持续干旱少雨,河套灌区灌溉引水量的矛盾日益尖锐,据国家计委、水利部(1998)2520号文件所定的配水方案,河套灌区多年平均分水将降为 40 亿  $m^3$ ,而近十年引水约 52 亿  $m^3$ 。在减少引黄水量的同时,如何保证灌区正常发展是河套灌区面临的首要问题。因此,在未来的一段时间内,相对缺水 and 盐渍化是制约河套灌区乃至西北地区可持续发展的两大因素。而河套灌区地下水微咸水、咸水较为丰富,开发利用这部分咸水,不仅能减轻黄河水资源的供水压力。更重要的是,咸水的开采腾空了地下库容,使地下水得以承接降水和其他地表水的补给。补给的淡水或较淡的水将土壤盐分淋洗,并将淋洗后的咸水驱逐到深层并通过田间排水系统排出区外,使咸水层逐渐淡化,改善了生态环境。在河套灌区开发利用微咸水是非常必要的。据 1/20 万浅层水含水层电测结果,内蒙古河套灌区 40m 以内地下水水质小于 1.5g/L 的面积占总面积的 44.4%;1.5~3g/L 占 26.9%;3~5g/L 占 12.35%;5~10g/L 占 5.6%;大于 10g/L 的占 10.8%。以 3g/L 为界,地下水水质小于 3g/L 的面积占总面积的 71.3%,大于 3g/L 的面积占总面积的 28.7%。还有大量的田间排水和退水,这部分水大部分是咸水,完全可以再利用。

随着我国以及内蒙古自治区经济的飞速发展,水资源供需矛盾也将日益突出。内蒙古河套灌区因其特殊的地理位置,地下咸水、微咸水较丰富,而且地下埋深较浅。按舒卡列夫分类,地下水以 Cl-Na-Mg 型为主,其次为 Cl-Na 型。从含水层岩性看,富水性中等,有一定供水意义。在研究区进行微咸水灌溉的环境效应预测评估的研究将为河套灌区今后的农业灌溉提供策略指导。目前,虽然我国已有一些关于微咸水灌溉的研究,但大部分都停留在局部地区的试验阶段,没有在区域性的计算方法、理论上展开更深入的研究,推广价值非常有限。

本书是在田间试验的基础上,采用先进的研究手段,理论与实践相结合地评价微咸水灌溉的环境效应,可对本灌区及类似地区提供重要的理论指导和应用参考。

## 1.2 国内外研究现状分析

### 1.2.1 微咸水灌溉概况

世界上很多国家或地区淡水资源缺乏,但却有着丰富的咸水资源,如印度、意大利、西班牙、日本、德国、瑞典、突尼斯、摩洛哥、阿尔及利亚、伊拉克、科威特、以色列、荷兰、美国等都有着久远的咸水灌溉历史,咸水灌溉在农业生产中发挥了重要作用。伊拉克使用4g/L的盐水浇灌梨树,效果良好。美国西南部的咸水灌溉已有100多年的历史<sup>[1]</sup>,用于咸水灌溉的范围有棉花、甜菜、苜蓿、树木、牧草和谷类作物等植物;在得克萨斯州西部,地下咸水的含盐量平均为2.5g/L,最高为6g/L,用于灌溉的面积达 $8.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,时间长达30多年;在科罗拉多州、阿肯色州区域集中种植苜蓿、高粱和小麦的地里,使用含盐量1.5~5.0g/L的咸水灌溉,没有引起减产。撒哈拉沙漠地区在有排水措施的条件下利用矿化度1.2~6.2g/L的地下水灌溉玉米、小麦、棉花、蔬菜等作物,效果良好<sup>[2]</sup>。突尼斯 Medjerda 咸水河河水的电导率年均3dS/m,被成功地用于枣椰树、高粱、燕麦、苜蓿和黑麦草的灌溉。Rhoades<sup>[3]</sup>通过对世界范围内的灌溉与含盐量的调查发现,含盐量达到6g/L的水可以成功地用来灌溉。以色列自1970年就开始研究咸水灌溉技术<sup>[4]</sup>,在内盖夫沙漠成立了专门从事咸水研究的中心,组建了由农业研究员、大学老师和农业推广服务系统人员参加的科研队伍,在咸水利用和理论研究上都取得了长足的进展。在印度,季风雨对土壤盐分的冲洗为咸水灌溉创造了条件使咸水灌溉在一些地区普遍应用。

我国北方干旱、半干旱地区用咸水灌溉最早可以追溯到80多年前<sup>[2]</sup>,宁夏同心县和海原县用矿化度3~7g/L的咸水灌溉韭菜、芹菜和甘蓝;1969年,宁夏南部山区开始因地制宜地利用咸水灌溉大麦和小麦,比在干旱地种植有所增产。河北省沧州市自1976年开始利用矿化度小于5g/L的咸水灌溉小麦<sup>[5]</sup>,与旱地相比增产幅度一般在10%~30%,最高可达49%。中国农业科学院土壤肥料研究所从1991年开始,在山东乐陵、河北燕山、天津静海等地利用咸水灌溉粮棉农田,到1993年,灌溉农田累计约 $8.7 \text{ 万 hm}^2$ ,增产粮食 $5.13 \times 10^4 \text{ kg}$ ,棉花 $513 \times 10^4 \text{ kg}$ ,获得经济效益2.5亿元。近年来,大连等地也开展了白菜、韭菜等蔬菜的咸水灌溉试验<sup>[6,7]</sup>,为咸水的合理利用提供了依据。此外,山西、陕西、甘肃、河南、内蒙古、辽宁等地都有咸水灌溉的试验或生产实践。

### 1.2.2 微咸水灌溉适应性的研究进展

微咸水是否适宜于灌溉<sup>[8]</sup>,主要取决于咸水中盐分的含量及成分。此外,还与气候、土壤特性、作物种类及品种、灌水方法、灌水时间和耕作措施有关。国内外试

验研究认为<sup>[7~9]</sup>:矿化度小于 1g/L 的水适用于所有作物的灌溉;矿化度 4~6g/L、Cl<sup>-</sup> 含量 1~3g/L 的水,如果冲洗、排水条件好,可用于灌溉棉花、苜蓿、麦类、水稻;如果地质、水文条件较好且有专门灌排设施的地块,可用矿化度 5~15g/L 的咸水灌溉。

我国河北省东部地区试验和实践证明<sup>[10]</sup>,矿化度 2~3g/L 的咸水可用于灌溉。在土质、排水条件较好的阿普歇伦半岛利用咸水的矿化度为 5~7g/L<sup>[11]</sup>。在成熟的农业技术指导下,以色列采用滴灌技术用于灌溉的咸水矿化度高达 6~8g/L,并获得了理想的作物产量,这说明咸水灌溉的水质评价有很强的地域性特点<sup>[12]</sup>。在世界各地能够用于灌溉的咸水盐度范围存在着明显的差异。自然和生产条件不同,微咸水灌溉对水土环境效应显著不同,所以需要通过试验,并根据当地的土壤性质、灌水方法、耕作措施及气候条件来制定适应于各地区的灌溉水质标准。

意大利学者在 Licata 地区对过量利用咸水灌溉黏质土壤进行研究,表明咸水灌溉对土壤理化性状和土壤肥力均产生不利影响,作物产量明显降低且质量变差。日本学者的研究认为,沙质土壤用咸水灌溉以后,白天由于高温在沙粒孔隙间产生水蒸气,随着夜晚到早晨温度的降低,水汽便开始冷凝成水滴,这些水滴就可以直接被作物吸收利用,而残留下来的盐分则可被后续大量的灌溉水所冲洗;黏质土壤则因透水性、通气性差而不具备这些条件。这些研究表明,与黏质土壤相比,沙质土壤更适合于咸水灌溉。

不同作物的耐盐能力是不同的<sup>[9]</sup>,一般而言,向日葵、甜菜最耐盐,而胡萝卜、苜蓿耐盐性最差。同种作物在不同生育阶段的耐盐能力也有很大差异<sup>[13]</sup>,一些作物如水稻、玉米、大麦、小麦和高粱等,在幼苗期及生殖生长期的耐盐能力最差,而在生长后期耐盐能力变强。不同地区作物的耐盐性也有很大差异<sup>[14]</sup>,一些环境因子与盐度相互作用会影响作物的耐盐能力,长在贫瘠土壤的作物比长在适宜肥力条件下的作物更耐盐。无论土壤是否受盐分影响,适当施肥都会增加产量,但在没有盐分影响下给土壤施肥,增产幅度会更大。因此,土壤的肥力对咸水灌溉的效果有很大的影响。

### 1.2.3 咸水灌溉技术与利用方式的研究

Rhoades<sup>[1]</sup>在美国进行咸水喷灌的结果表明,在干旱炎热的条件下,白天喷灌容易引起作物叶面的灼伤,黄昏或夜间进行喷灌的效果较好。Patela 等<sup>[14]</sup>采用渗灌技术用电解质为 1~9dS/m 的咸水在沙质土壤上对土豆进行渗灌,结果表明,不同灌水浓度下土豆产量差异并不明显。美国得克萨斯州的沟灌试验研究表明,如果将适当的灌水技巧与农技措施相结合,会获得更理想的效果。这些灌水技巧及农技措施包括:①采用隔沟灌溉,将盐分压到靠近没有灌溉的沟一边的苗床;②在

作物出苗前用金属链或金属棒拖曳田面,除去田面的盐分硬壳,以利出苗;③由于苗床高处容易积盐,而靠近沟低处的盐分浓度低,因此,可将作物种植在盐分浓度低的地处。在咸水灌溉技术方面,咸水同淡水一样,可采用地面灌溉、地下灌溉和喷微灌等各种灌水技术。研究表明,同地面灌溉相比,咸水更适合采用渗灌或地下灌溉。

目前,对咸水的利用主要有以下几种方式:直接利用咸水灌溉、咸水与淡水混合灌溉、咸水与淡水交替灌溉(轮灌)。甘肃省民勤县从1995年开始<sup>[15]</sup>,连续3年开展了苦咸水用于棉花灌溉的试验研究。以不灌试验为对照,结果表明,在每年一次淡水浇地压盐的条件下,棉花的产量随灌水次数及灌溉定额的增加而增加。对土壤剖面盐分状况的进一步观测表明,采用灌一次及两次水,在有一次淡水压盐灌溉的情况下,土壤均处于脱盐状态,而灌3次水,在干旱年份土壤处于积盐状态。因此,应根据降雨情况确定灌水次数及灌水定额。

1988年,山西省运城市西南部开始进行咸水灌溉试验研究<sup>[16]</sup>,根据土壤质地及地下水文条件,按地下咸水水质及土质,将面积为236.2km<sup>2</sup>的湖区灌区分为4种类型区,在每个类型区进行适宜的咸水灌溉方案调查,并选择典型区开展不同灌水方式的咸水灌溉。试验表明,利用咸水浓度小于7g/L的咸水进行灌溉的关键是,每年播前灌1次较大定额(2700~3600m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)的河水,进行压盐,使0~60cm土层脱盐20.7%~33.6%,土壤含盐率维持在0.6%以下,以保证小麦的正常出苗。咸水适宜的灌溉定额为825~975m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌区上游矿化度小于3g/L的微咸水适宜的灌水次数为4次;灌区中游矿化度3~5g/L的咸水适宜的灌水次数为2~3次;灌区下游矿化度5~7g/L的咸水灌水次数最多不能超过1次。

1980~1983年,甘肃省民勤县连续4年开展了咸水灌溉试验<sup>[17]</sup>,分别用中定额(82.5mm/次)和大定额(112.5mm/次)进行了灌两次水、3次水和4次水的对比试验。试验表明:①作物产量随灌水次数的增加而增加,灌4次水的产量分别比灌两次水和3次水的产量高14.3%和5%;②咸淡水轮灌比直接利用咸水灌溉的产量高,3次灌水的平均情况为,咸淡水轮灌的产量比咸水灌溉的产量高5%。此外,还对小麦苗期利用咸水灌溉和不灌溉进行的调查分析结果表明,在干旱年份,利用6g/L以下的咸水进行灌溉比不灌溉平均增产两倍。

1992~1995年,汾河三坝灌区开展了先淡后咸(作物苗期灌淡水,中后期灌咸水)、先咸后淡(作物苗期灌咸水,中后期灌淡水)和直接咸水灌溉的试验<sup>[18]</sup>,咸水的矿化度为6.8g/L。试验表明,以先淡后咸的灌水方式作物产量最高;其次为先咸后淡。同先咸后淡灌水方式相比,采用先淡后咸的灌水方式冬小麦、春玉米和棉花分别增产6.6%、4.2%和5.2%。主要原因是作物在苗期的耐盐能力差,先灌溉淡水有利于作物的全苗。等到中后期作物的耐盐性增强,特别是秋作物,由于秋天的降水量增大,使盐分得到淋洗,再灌溉咸水,使作物少受盐害或者不受盐害。该

地区的实践表明:在淡水资源许可的情况下,采用咸淡水轮灌,要尽可能保证苗期的灌溉,在有河水的地方,汛后可用河水进行秋季洗盐或采用大定额冬灌压盐,有利于防止土壤积盐。如果咸水灌溉后土壤有积盐趋势,进行淡水压盐与洗盐更有必要。Minhas<sup>[19]</sup>通过大量的试验分析证明,在同样盐分水平下,咸淡水轮灌的作物产量高于咸淡水混灌的产量。

2001~2002年,内蒙古红卫田间试验区进行了混灌试验,试验区土壤质地为沙壤土,并有不同程度的盐渍化。混灌定额为 $55\sim 75\text{m}^3/\text{亩}$ ,秋浇采用黄河水灌溉,秋浇定额为 $120\text{m}^3/\text{亩}$ 。灌溉水源为黄河水与地下咸水,5次试验混灌后的矿化度分别为 $0.992\text{g/L}$ 、 $2.25\text{g/L}$ 、 $1.59\text{g/L}$ 、 $1.75\text{g/L}$ 、 $1.34\text{g/L}$ 。试验结果表明,咸水灌溉增加土壤盐分,但通过控制咸水灌溉定额及进行秋浇灌溉,试验田内土壤盐分含量能够实现年内平衡,再加上合理的淋洗盐分措施,可以实现土壤盐分多年补排平衡。在咸水灌溉条件下,作物产量基本不减产。

从上述各地的咸水灌溉及应用情况来看,主要有以下经验:①与不采取任何灌溉措施相比,在干旱地区,采用 $6\text{g/L}$ 以下的咸水灌溉,均有不同程度的增产;②播种前采用一次大定额的淡水灌溉来冲洗土壤剖面上的盐分,有利于播种储墒及保证作物的出苗;③作物早期耐盐能力差,在播种前及作物出苗和幼苗期,宜采用淡水进行灌溉,后期采用咸水灌溉;④在干旱地区进行咸水灌溉时,较多的灌水次数对作物生长有利;⑤要有较好的排水条件,将地下水位控制在临界深度以下,以避免返盐;⑥平整土地,提高灌溉水的效率。

#### 1.2.4 咸水灌溉对作物产量、品质的影响研究

土壤中盐分过多将显著抑制作物的正常生长发育,最终降低作物经济产量<sup>[20]</sup>。从宏观上看,生长在盐渍化土地上的作物往往植株低矮、叶小茎粗、长势不旺、产量下降。作物各个部分对盐分的反应并不相同,一般作物地上部分比地下部分易受盐分的影响,从而使根冠比增大。盐分在各个生育阶段对作物均有影响,但作物对盐分的敏感性随生育阶段的不同而不同。不同作物在相同生育阶段对盐分的敏感性也有较大的差异。例如,水稻、燕麦、玉米在发芽、成熟阶段有较强的耐盐性,在苗期和营养生长期对盐分特别敏感,而甜菜、红花在发芽期则耐盐性较弱。土壤中盐分较少对作物并无影响,而当盐分含量较大时才会使作物生长发育受到抑制并使产量降低此时的盐分含量称为临界含盐量,是确定作物耐盐性的指标。不同作物的临界含盐量是不同的,当土壤盐分超过临界含盐量后,盐分对作物产量影响的程度也不同。Mass等<sup>[21]</sup>对大量试验资料分析比较,确定了大部分作物的临界含盐量,同时提出作物产量随含盐量的增加呈线性下降,并给出了产量降低速率。

1975~1984年,甘肃省民勤县分别在咸水浓度不同的地区进行咸水灌溉试验<sup>[17]</sup>。试验结果表明:灌溉水的矿化度为2g/L左右的地区,作物可以获得正常产量,作物的产量比不灌增产3.82t/hm<sup>2</sup>;灌溉水的矿化度为4~5g/L的地区,在种植之前采用大定额淡水灌溉,作物的产量比不灌增产2.22t/hm<sup>2</sup>;灌溉水的矿化度为6~10g/L的地区,在种植之前采用大定额淡水灌溉,作物的产量比不灌增产1.93t/hm<sup>2</sup>。1974~1977年,华北农业大学(现为中国农业大学)在河北曲周利用不同矿化度的咸水对小麦进行了对比试验<sup>[21]</sup>,在小麦拔节期和灌浆期用咸水灌溉,灌水量为40m<sup>3</sup>/亩。结果表明,同淡水灌溉相比,3g/L的咸水灌溉不减产,4~6g/L的咸水灌溉减产在5%~12%。在淡水资源紧张时,3~6g/L的咸水是可以利用的资源。河北黑龙港的试验结果表明<sup>[22]</sup>,同淡水灌溉相比,采用2~4g/L的咸水灌溉,均有不同程度的减产。其中,小麦减产的幅度为40%~60%,玉米减产的幅度为25%~40%。但同不灌相比,却有大幅度增产。其中,小麦采用咸水灌溉比不灌增产2.58~1.67t/hm<sup>2</sup>,玉米增产1.72~0.66t/hm<sup>2</sup>。大连市对黄瓜进行咸水灌溉的试验研究表明<sup>[23]</sup>,当灌溉水的矿化度为0.70g/L以下时,黄瓜减产很少;当灌溉水的矿化度为1.10g/L以上时,黄瓜会出现大幅度的减产。汾河三坝灌区利用微咸水(3~5g/L)对小麦、玉米、棉花、高粱进行灌溉的试验表明<sup>[24]</sup>,同只灌一次淡水相比,采用灌一次淡水再加上两次咸水,作物每亩增产30%左右,同时也表明,可用于灌溉的咸水浓度对不同的作物有不同的值,最高可达10g/L。在供试的作物中,小麦、枸杞、棉花等均具有较强的抗盐性能,其次是高粱和玉米,黄瓜的耐盐性较差;在水资源紧缺的地区,与不灌相比,采用咸水灌溉能获得显著的增产,若配合适当的播前灌溉、平整土地等,则会收得更好的效果。

同淡水灌溉相比,咸水灌溉同样会对作物的质量产生影响。Rhoades等<sup>[1]</sup>指出,咸水灌溉会减少作物收获物的体积、颜色、外观及成分。然而,如果灌溉水的盐度在一定的范围内,咸水灌溉对作物品质的影响是有利的。Saysel等<sup>[25]</sup>的资料表明,花生的籽粒体积随咸水电导率的增加而减少,但电导率在3dS/m内时,其出油率随电导率的增加而增加;Shalhevet<sup>[26]</sup>对番茄的研究也得到类似的结论,番茄的体积随咸水电导率的增加而减少,但单株番茄果实的数量不变,但电导率在100dS/m以内时,番茄提取液中可溶性固体的浓度随电导率的增加而增加。Rhoades等<sup>[1]</sup>也发现,采用咸水灌溉,小麦、瓜类、苜蓿的质量均有所改善。

### 1.2.5 咸水灌溉对作物生长环境影响的研究

咸水灌溉对环境的影响问题,目前主要集中在将土壤的盐分浓度控制在作物盐度临界之内,通过适当的冲洗及排水措施来维持作物根系活动层的盐分在年内或多年的补排平衡。近年来,在区域尺度上采用微咸水灌溉对环境的影响受到关注,有学者分析了咸水灌溉可能在区域尺度上带来的环境问题,提出了包括减少淋

洗量、排水再利用、种植耐盐作物、对咸水进行淡化处理等减少向地下水体及下游排放盐分、维持区域盐分平衡的多种措施,以及将这些措施在区域上进行合理规划布局的设想。但微咸水灌溉在区域尺度上的安全问题还缺乏足够的理论及试验研究。

目前,国内外对咸水灌溉土地的改良措施主要包括排水洗盐、工程措施和耕作措施、生物脱盐、添加化学物质。排水洗盐,利用咸水灌溉能增加土壤下渗的水分,但同时也会增加土层中的含盐量。试验表明,在下垫面及排水条件一定的情况下<sup>[11]</sup>,土壤盐分增加量取决于灌溉水的矿化度、灌水次数和灌水量。研究表明,在半干旱地区<sup>[27]</sup>,在季风气候控制条件下,土壤可溶性盐旱季蒸发积累与雨季降雨淋溶的过程交替发生,土壤盐渍化的状况取决于蒸发积累与淋溶脱盐两种作用的对比。咸水灌溉后,蒸发蒸腾作用使盐分聚集在土壤中,形成土壤积盐,淡水灌溉或降雨对土壤中盐分起淋洗作用。小定额的灌溉,沙壤土的积盐比中壤土高,大定额灌溉,沙壤土的脱盐效果比中壤土好;随着灌水定额的增加,从咸水带入土中的盐分渗透到植物根层以下的盐量增多。雨季为土壤自然脱盐的季节,经过降雨的淋洗后,土壤的含盐量可降到灌前的水平,周年内 0~60cm 土层不发生盐分积累,并且在大定额春季河灌及汛期降雨的淋洗下又可脱盐。在山西汾河三坝灌区 0~60cm 土层内,河灌一次的脱盐率达 30.3%,土体脱盐量随着灌溉定额的增大而增大;年均 90.6m<sup>3</sup>/亩的灌水定额下的土体脱盐率为 20.1%,年均 92.7m<sup>3</sup>/亩的灌水定额下的土体脱盐率为 27.5%,年均 109.3m<sup>3</sup>/亩的灌水定额下的土体脱盐率为 42.5%。

在工程措施和耕作措施方面,研究表明<sup>[28]</sup>,咸水具有钠离子危害,咸水灌溉后,在降雨或淡水灌溉淋洗期间土壤会产生较大的块状结构和结壳现象。此外,我国还总结了一些实践经验,对咸水灌溉地的改良也很有帮助,这些经验包括<sup>[17]</sup>:①实行井渠结合,井渠轮灌。其中,渠灌的水量采用淡水,而井水采用地下咸水。井灌有利于降低地下水位,腾出地下库容蓄纳淡水,从而达到改造地下水的目的;②实行深灌溉、深翻晒、深施肥和平整土地;③在钠离子含量较高的咸水灌溉地区深施泥炭、风化煤等腐质酸类肥料,使之与钠离子反应生成腐质酸钠,将有害钠变成养料。

在生物脱盐方面<sup>[29]</sup>,由于蒸发蒸腾作用,土壤水的含盐量一般会超过灌溉水含盐量数倍,不可能使渗透性很低的细质土壤剖面得到充足的水通过以实现淋洗。在这种情况下,进行种植制度的调整是一种有效的途径。美国加利福尼亚州帝国河谷<sup>[30]</sup>为了提高苜蓿产量,采用苜蓿蔬菜轮作,由于采用的蔬菜根系短,蒸发蒸腾强度低,且在冬季生长,因此耗水量低。对蔬菜进行灌溉时所实现的充分淋洗可以维持几年的苜蓿生产。另一种方式是使用牧草与绿肥轮作<sup>[18]</sup>,绿肥可增加有机质,疏松土壤,不仅提高了土壤的肥力使作物的抗盐性增加,而且增加了土壤的渗