

内蒙古河套灌区主要作物 水分生产力模拟及种植结构区划

任理 薛静 著

张外借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内蒙古河套灌区主要作物 水分生产力模拟及种植结构区划

任理 薛静 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一部应用农业水文模型对黄河流域内蒙古河套灌区主要作物水分生产力进行模拟，并对种植结构区划开展研究的学术专著，量化地探讨了在减少引黄灌溉量条件下主要作物畦灌的推荐灌溉制度、喷灌模式和基于浅层地下水可开采资源量的咸水灌溉方案，并模拟分析了现状灌溉条件下几种特定的田间排水暗管布设规格，在此基础上以提高三种主要作物水分生产力为目标对种植结构进行了区划。

本书可供水利、农业等学科相关领域的科技工作者和研究生及有关管理部门人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

内蒙古河套灌区主要作物水分生产力模拟及种植结构区划 / 任理, 薛静著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2017.8
ISBN 978-7-5170-5622-5

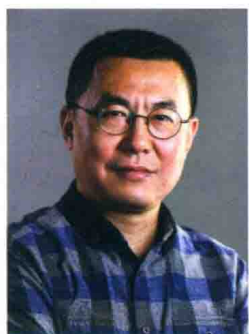
I. ①内… II. ①任… ②薛… III. ①作物—灌溉水—研究—内蒙古②种植业结构—农业区划—研究—内蒙古
IV. ①S274②F329.926

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第172745号

书 名	内蒙古河套灌区主要作物水分生产力模拟及种植结构区划 NEIMENGGU HETAO GUANQU ZHUYAO ZUOWU SHUIFEN SHENGCHANLI MONI JI ZHONGZHI JIEGOU QUHUA
作 者	任理 薛静 著
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 14.25印张 304千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
印 数	001—500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

作者简介



任理 1959年6月生于北京，工学博士，中国农业大学资源与环境学院土壤和水科学系教授，博士生导师。曾受聘：中国科学院地理科学与资源研究所客座研究员（2002—2005年）；中国科学院计算数学与科学工程计算研究所科学与工程计算国家重点实验室客座研究员（2002—2004年）；中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室水文水资源研究方向客座研究员（2004—2007年）。曾受邀担任：中国土壤学会土壤物理专业委员会副主任；国家自然科学基金委员会地球科学部与中国地质

调查局水文地质环境地质部“中国地下水科学战略研究小组”成员。现受邀担任：中国水利学会水资源专业委员会委员；中国地质学会环境地质专业委员会委员；中国地质学会水文地质专业委员会委员；中国自然资源学会水资源专业委员会委员。目前受聘兼任：南方科技大学环境科学与工程学院访问教授；中国科学院农业水资源重点实验室客座研究员。多年担任《水利学报》和《水文地质工程地质》编委。研究领域：土壤物理学、农业水文学。近年来的主要研究方向：农业水土资源环境可持续利用的模拟与评估。为本科生和研究生讲授的课程有：地下水流数值模拟、土壤水动力学、土壤物理、土壤溶质运移。具体指导并获得学位的硕士生29名、博士生17名。此外，独立指导已于2006年出站的印度博士后1名。曾获：中国农业大学本科教学优秀奖励（1998年）；中国农业大学优秀硕士论文指导教师（2002年）；中国农业大学优秀博士论文指导教师（2004年和2006年）。所指导的博士学位论文曾入选“全国优秀博士学位论文提名论文”（2008年）。在国内外学术期刊上发表论文近100篇，出版学术专著1部。



薛静 1986年8月生于山西省太原市。2009年6月本科毕业于山西农业大学农业资源与环境专业，获农学学士学位。2009年9月至2011年6月在中国农业大学土地利用与信息技术专业攻读硕士研究生，获农学硕士学位。2012年9月至2016年6月在中国农业大学土壤学专业攻读博士研究生，获农学博士学位。现为太原理工大学水利科学与工程学院讲师。研究方向：土壤水文学。发表学术论文6篇。

目 录

第 1 章 绪言	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状综述	3
1.2.1 畦灌灌溉制度的研究现状	4
1.2.2 喷灌灌溉制度的研究现状	8
1.2.3 咸水灌溉模式的研究现状	9
1.2.4 排水暗管规格的研究现状	11
1.3 研究目标、内容和技术路线	13
1.3.1 研究目标	13
1.3.2 研究内容和技术路线	14
第 2 章 材料与方法	16
2.1 研究区域	16
2.2 SWAP 模型简介	17
2.2.1 水分运动模块	17
2.2.2 盐分运移模块	18
2.2.3 作物蒸腾与土面蒸发	18
2.2.4 作物生长模块	20
2.2.5 灌溉模块	21
2.2.6 排水模块	21
2.2.7 下边界条件	22
2.3 模型输入	22
2.3.1 气象	23
2.3.2 土壤	25
2.3.3 土地利用	25
2.3.4 作物和灌溉	35
2.3.5 地下水	38
2.3.6 渠道与排水沟	40
2.3.7 分布式 SWAP - WOFOST 模型的构建	43

2.4	灵敏度分析的公式和率定与验证的思路	44
2.5	水管理响应指标	46
2.6	“Z-score”标准化方法	46
2.7	经济效益的计算公式	47
第3章	参数的灵敏度分析和率定及验证	48
3.1	参数的灵敏度分析	48
3.2	参数的率定	51
3.2.1	土壤水分运动参数	51
3.2.2	土壤盐分运移参数	52
3.2.3	作物生长参数	53
3.3	模型的验证	56
3.3.1	作物产量	56
3.3.2	农田蒸散量	57
3.3.3	地下水埋深	57
3.3.4	排水量与排盐量	58
第4章	引黄灌溉量减少条件下河套灌区主要作物的畦灌推荐灌溉制度及种植结构区划	60
4.1	畦灌的灌溉情景设置	60
4.2	畦灌的灌溉情景分析	61
4.2.1	春小麦	61
4.2.2	春玉米	67
4.2.3	向日葵	71
4.3	推荐的灌溉制度分析	78
4.3.1	蒸散量、产量和水分生产力	78
4.3.2	水盐平衡	83
4.3.3	水管理响应指标	86
4.4	种植结构区划	90
4.5	经济效益分析	92
4.6	小结	94
第5章	引黄灌溉量减少条件下主要作物的喷灌模式及种植结构区划	97
5.1	喷灌的灌溉情景设置	97
5.2	喷灌的灌溉情景分析	98
5.2.1	灌溉量	98
5.2.2	蒸散量、产量和水分生产力	106
5.2.3	水盐平衡	112

5.2.4 水管理响应指标	115
5.3 种植结构区划	121
5.4 经济效益分析	125
5.5 小结	126
第6章 基于浅层地下水可开采资源量的主要作物咸水灌溉模式 及种植结构区划	129
6.1 咸淡水轮（混）灌模式设置	129
6.2 咸淡水轮（混）灌情景分析	129
6.2.1 蒸散量、产量和水分生产力	129
6.2.2 土壤盐分	135
6.2.3 水管理响应指标与水盐平衡	138
6.3 种植结构区划	142
6.4 经济效益分析	145
6.5 小结	146
第7章 田间排水暗管布设规格对主要作物水分生产力的影响及种植结构区划 ...	149
7.1 田间排水暗管布设规格的情景设置	149
7.2 暗管间距和埋深对三种作物产量和水分生产力的影响	149
7.3 推荐的暗管布设规格分析	155
7.3.1 推荐的暗管布设规格	155
7.3.2 蒸散量、产量和水分生产力	156
7.3.3 水盐平衡	164
7.3.4 水管理响应指标	164
7.4 种植结构区划	169
7.5 经济效益分析	172
7.6 小结	174
第8章 灌溉排水条件下以提高主要作物水分生产力为目标的 种植结构综合区划	176
8.1 基于三种畦灌的灌溉制度下的种植结构	176
8.2 基于两种畦灌和一种喷灌的灌溉制度下的种植结构	179
8.3 基于三种畦灌和一种喷灌的灌溉制度下的种植结构	184
8.4 基于四种灌溉制度和推荐的排水暗管规格下的种植结构	189
8.5 小结	195
第9章 结论	197
参考文献	199
致谢	210

插图目录

图 1.1	应用分布式 SWAP - WOFOST 模型在内蒙古河套灌区开展模拟研究的技术路线	15
图 2.1	河套灌区耕地和试验站及模拟研究所用的国家基本气象站地理位置	16
图 2.2	河套灌区三种作物生育期内最低气温、降水量和参考作物蒸散量	24
图 2.3	河套灌区耕地土壤质地	26
图 2.4	河套灌区耕地土壤可利用的水容量	27
图 2.5	河套灌区耕地土壤饱和含水量	28
图 2.6	河套灌区耕地土壤残余含水量	29
图 2.7	河套灌区耕地土壤饱和水力传导度	30
图 2.8	河套灌区耕地土壤水力学参数 α	31
图 2.9	河套灌区耕地土壤水力学参数 n	32
图 2.10	河套灌区耕地土壤水力学参数 λ	33
图 2.11	河套灌区土地利用类型分布	34
图 2.12	2000—2010 年河套灌区种植结构	36
图 2.13	1995—2008 年河套灌区五个旗县区的降水量、灌溉量和各灌域地下水埋深的多年月平均动态	39
图 2.14	1995—2008 年河套灌区各灌域地下水埋深的年际变化	39
图 2.15	1995—2008 年河套灌区引黄水及五个灌域地下水矿化度的年际变化	40
图 2.16	内蒙古河套灌区骨干渠道和排水沟的分布	40
图 2.17	河套灌区耕地 SWAP - WOFOST 模型的分布式模拟分析单元	44
图 3.1	五个试验站的土壤含水量模拟值与实测值的对比	51
图 3.2	两个试验站的土壤盐分浓度模拟值与实测值的对比	53
图 3.3	五个试验站三种作物叶面积指数的模拟值与实测值的对比	53
图 3.4	五个试验站三种作物产量的模拟值与实测值的对比	54
图 3.5	河套灌区三种主要作物产量的模拟值与实测值对比	56
图 3.6	河套灌区各旗县区年平均地下水埋深的模拟值与实测值的对比	58
图 4.1	2000—2010 年河套灌区畦灌的三种模拟情景下春小麦的平均产量和水分生产力	63
图 4.2	畦灌的三种模拟情景下春小麦生育期平均的降水量和灌溉量及实际	

	和潜在蒸发量、实际和潜在蒸腾量、土壤剖面 105cm 深度处的水流通量和地下水埋深的变化	64
图 4.3	河套灌区春小麦种植条件下畦灌的三种模拟情景中地下水的平均埋深动态	66
图 4.4	2000—2010 年河套灌区畦灌的三种模拟情景下春玉米的平均产量和水分生产力	69
图 4.5	畦灌的三种模拟情景下春玉米生育期平均的降水量和灌溉量及实际和潜在蒸发量、实际和潜在蒸腾量、土壤剖面 105cm 深度处的水流通量和地下水埋深的变化	70
图 4.6	河套灌区春玉米种植条件下畦灌的三种模拟情景中地下水的平均埋深动态	72
图 4.7	2000—2010 年河套灌区畦灌的三种模拟情景下向日葵的平均产量和水分生产力	73
图 4.8	畦灌的三种模拟情景下向日葵生育期平均的降水量和灌溉量及实际和潜在蒸发量、实际和潜在蒸腾量、土壤剖面 105cm 深度处的水流通量和地下水埋深的变化	74
图 4.9	河套灌区向日葵种植条件下畦灌的三种模拟情景中地下水的平均埋深动态	76
图 4.10	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下生育期内多年平均蒸散量	79
图 4.11	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下的多年平均产量	80
图 4.12	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下的多年平均水分生产力	81
图 4.13	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时所推荐的灌溉制度相比基本情景生育期内多年平均蒸散量的变幅	81
图 4.14	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时所推荐的灌溉制度相比基本情景多年平均产量的变幅	82
图 4.15	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时所推荐的灌溉制度相比基本情景多年平均水分生产力的变幅	82
图 4.16	河套灌区耕地在推荐的灌溉制度下主要作物生育期内平均的相对蒸腾、降水贡献和灌溉贡献动态	87
图 4.17	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下生育期内多年平均的相对蒸腾	88
图 4.18	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下生育期内多年平均的降水贡献	88

图 4.19	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的灌溉制度下生育期内多年平均的灌溉贡献	89
图 4.20	河套灌区耕地在推荐的灌溉制度下三种主要作物的种植结构	90
图 4.21	河套灌区耕地在推荐的灌溉制度下三种主要作物的种植比例	91
图 4.22	河套灌区耕地在推荐的灌溉制度下三种主要作物的种植结构所节省的年引黄灌溉量	92
图 4.23	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植和同时种植时在推荐的灌溉制度下多年平均单位面积经济效益	93
图 5.1	河套灌区主要作物生育期的降水量和喷灌量	100
图 5.2	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下生育期内多年平均喷灌量	105
图 5.3	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比基本情景生育期内多年平均灌溉量的变幅	105
图 5.4	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比畦灌的推荐灌溉情景生育期内多年平均灌溉量的变幅	106
图 5.5	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下生育期内多年平均蒸散量	108
图 5.6	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下的多年平均产量	109
图 5.7	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下的多年平均水分生产力	109
图 5.8	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比基本情景生育期内多年平均蒸散量的变幅	110
图 5.9	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比畦灌的推荐灌溉情景生育期内多年平均蒸散量的变幅	111
图 5.10	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比基本情景的多年平均产量的变幅	111
图 5.11	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比畦灌的推荐灌溉情景的多年平均产量的变幅	112
图 5.12	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比基本情景的多年平均水分生产力的变幅	113
图 5.13	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下相比畦灌的推荐灌溉情景的多年平均水分生产力的变幅	113
图 5.14	河套灌区主要作物种植条件下水量平衡分项和地下水埋深动态	116
图 5.15	河套灌区耕地在喷灌情景下主要作物生育期内平均的相对蒸腾、降水贡献和灌溉贡献动态	119

图 5.16 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下
生育期内多年平均的相对蒸腾 120

图 5.17 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下
生育期内多年平均的降水贡献 120

图 5.18 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在喷灌模式下
生育期内多年平均的灌溉贡献 121

图 5.19 河套灌区耕地在喷灌模式下三种主要作物的种植结构 122

图 5.20 河套灌区耕地在喷灌模式下三种主要作物的种植比例 122

图 5.21 河套灌区耕地在喷灌模式下三种主要作物种植结构中的喷灌次数 122

图 5.22 河套灌区耕地在喷灌模式下三种主要作物种植结构的
田间每年所节省的引黄灌溉量 124

图 5.23 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植和同时种植时
在喷灌模式下多年平均单位面积经济效益 126

图 6.1 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下生育期内多年平均蒸散量 131

图 6.2 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下的多年平均产量 131

图 6.3 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下的多年平均水分生产力 132

图 6.4 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下相比基本情景生育期内多年平均蒸散量的变幅 132

图 6.5 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下相比基本情景多年平均产量的变幅 133

图 6.6 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下相比基本情景多年平均水分生产力的变幅 133

图 6.7 河套灌区五个旗县区在咸淡水轮（混）灌模式下主要作物收获时
0~100cm 土壤溶液中盐分浓度的动态 137

图 6.8 河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌情景下主要作物生育期内平均的
相对蒸腾、降水贡献和灌溉贡献动态 139

图 6.9 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下生育期内多年平均的相对蒸腾 140

图 6.10 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下生育期内多年平均的降水贡献 141

图 6.11 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在咸淡水轮（混）
灌模式下生育期内多年平均的灌溉贡献 141

图 6.12 河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌模式下三种主要作物的

种植结构	143
图 6.13 河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌模式下三种主要作物的 种植比例	143
图 6.14 河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌模式下三种主要作物种植结构的 田间每年所需引黄水和地下水资源量	144
图 6.15 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植和同时种植时 在咸淡水轮（混）灌模式下多年平均单位面积经济效益	145
图 7.1 田间排水暗管的间距和埋深对三种主要作物产量的灵敏度分析	151
图 7.2 五个试验站田间排水暗管的间距和埋深对春小麦产量和水分 生产力的影响	152
图 7.3 五个试验站田间排水暗管的间距和埋深对春玉米产量和水分 生产力的影响	153
图 7.4 五个试验站田间排水暗管的间距和埋深对向日葵产量和水分 生产力的影响	154
图 7.5 河套灌区耕地主要作物生长条件下推荐的田间排水暗管布设规格	156
图 7.6 推荐的暗管排水情景与基本情景下主要作物生育期平均的降水量、 灌溉量、作物蒸腾量、土面蒸发量及地下水埋深的变化	158
图 7.7 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下生育期多年平均蒸散量	160
图 7.8 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下的多年平均产量	160
图 7.9 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下的多年平均水分生产力	161
图 7.10 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下相比基本情景多年平均蒸散量的变幅	161
图 7.11 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下相比基本情景多年平均产量的变幅	162
图 7.12 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下相比基本情景多年平均水分生产力的变幅	162
图 7.13 河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下主要作物生育期内 平均的相对蒸腾、降水贡献和灌溉贡献动态	166
图 7.14 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下生育期内多年平均的相对蒸腾	167
图 7.15 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水 暗管布设规格下生育期内多年平均的降水贡献	168
图 7.16 2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植时在推荐的田间排水	

	暗管布设规格下生育期内多年平均的灌溉贡献	168
图 7.17	河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下三种主要 作物的种植结构	169
图 7.18	河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下三种主要作物种植 结构中的暗管布设规格	170
图 7.19	河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下 三种主要作物的种植比例	171
图 7.20	河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下三种主要作物 种植结构中生育期内的平均地下水埋深	171
图 7.21	2000—2010 年河套灌区耕地主要作物单一种植和同时种植时 在推荐的田间排水暗管布设规格下多年平均单位面积经济效益	172
图 8.1	河套灌区耕地在三种畦灌的灌溉制度下主要作物的种植结构	179
图 8.2	河套灌区耕地在三种灌溉制度下主要作物的种植结构	184
图 8.3	河套灌区耕地在四种灌溉方案下主要作物的种植结构	189
图 8.4	河套灌区耕地在灌溉排水条件下以提高主要作物水分生产力为 目标的种植结构	195

表 格 目 录

表 2.1	收集的河套灌区相关数据及其来源	22
表 2.2	1990—2010 年河套灌区磴口县、杭锦后旗、临河区和五原县气象 要素变异性	24
表 2.3	河套灌区土地利用情况	34
表 2.4	2000—2010 年河套灌区各旗县区种植结构	35
表 2.5	河套灌区三种主要作物的生育期	38
表 2.6	河套灌区各旗县区三种主要作物的现状灌溉制度	38
表 3.1	河套灌区五个试验站作物生长参数对叶面积指数的灵敏度分析排序结果	49
表 3.2	河套灌区五个试验站作物生长参数对产量的灵敏度分析排序结果	50
表 3.3	河套灌区五个试验站模型参数率定的效果	51
表 3.4	河套灌区五个试验站率定后的土壤水分运动和盐分运移参数	52
表 3.5	河套灌区五个试验站率定后的主要作物的参数	55
表 3.6	1995—2010 年河套灌区各旗县区春小麦产量模拟验证精度	56
表 3.7	1995—2010 年河套灌区各旗县区春玉米产量模拟验证精度	57
表 3.8	2000—2010 年河套灌区各旗县区向日葵产量模拟验证精度	57
表 3.9	2000—2008 年河套灌区各旗县区地下水埋深验证的统计结果	58
表 4.1	2000—2010 年河套灌区不同模拟情景下春小麦的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力	62
表 4.2	2000—2010 年河套灌区春小麦不同模拟情景下的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力变幅	62
表 4.3	2000—2010 年河套灌区不同模拟情景下春玉米的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力	68
表 4.4	2000—2010 年河套灌区春玉米不同模拟情景下的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力变幅	68
表 4.5	2000—2010 年河套灌区不同模拟情景下向日葵的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力	77
表 4.6	2000—2010 年河套灌区向日葵不同模拟情景下的平均灌溉量、 蒸散量、产量和水分生产力变幅	77
表 4.7	河套灌区三种作物推荐的畦灌灌溉制度	77

表 4.8	2000—2010 年河套灌区耕地在基本情景下三种主要作物生育期内 饱和-非饱和带土壤水盐平衡项	84
表 4.9	2000—2010 年河套灌区耕地在推荐的灌溉制度的模拟情景中三种 主要作物生育期内饱和-非饱和带土壤水盐平衡项	85
表 4.10	2000—2010 年河套灌区耕地在推荐的灌溉制度下三种主要作物 分别种植条件下平均的水管理响应指标	89
表 4.11	在推荐的种植结构中河套灌区三种主要作物的种植面积及其比例	90
表 4.12	2000—2010 年河套灌区耕地基于推荐的灌溉制度的种植结构中 三种主要作物多年平均单位面积经济效益	94
表 5.1	2000—2010 年河套灌区在喷灌模式下三种主要作物单一种植情形的 平均灌溉量、蒸散量、产量和水分生产力	99
表 5.2	2000—2010 年河套灌区三种主要作物喷灌情景相比基本情景平均 灌溉量、蒸散量、产量和水分生产力的变幅	99
表 5.3	2000—2010 年河套灌区三种主要作物喷灌情景相比畦灌的推荐灌溉 情景平均灌溉量、蒸散量、产量和水分生产力的变幅	102
表 5.4	河套灌区在不同的降水水平下春小麦的喷灌日期	102
表 5.5	河套灌区在不同的降水水平下春玉米的喷灌日期	103
表 5.6	河套灌区在不同的降水水平下向日葵的喷灌日期	104
表 5.7	2000—2010 年河套灌区耕地在喷灌模式下三种主要作物生育期内 饱和-非饱和带土壤水盐平衡项	114
表 5.8	2000—2010 年河套灌区耕地在喷灌情景中三种主要作物分别种植 条件下的平均水管理响应指标	115
表 5.9	推荐的种植结构中河套灌区三种主要作物的种植面积及其比例	123
表 5.10	2000—2010 年河套灌区耕地基于喷灌模式的种植结构中三种 主要作物多年平均单位面积经济效益	125
表 6.1	2000—2010 年河套灌区在咸淡水轮（混）灌模式下三种主要作物 单一种植情形的平均蒸散量、产量和水分生产力	134
表 6.2	2000—2010 年河套灌区三种主要作物咸淡水轮（混）灌情景相比 基本情景平均蒸散量、产量和水分生产力的变幅	134
表 6.3	2000—2010 年河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌模式下三种主要 作物生育期内饱和-非饱和带土壤水盐平衡项	136
表 6.4	2000—2010 年河套灌区耕地在咸淡水轮（混）灌情景中三种主要 作物分别种植条件下平均的水管理响应指标	142
表 6.5	咸淡水轮（混）灌模式下河套灌区三种主要作物的 种植面积及其比例	143
表 6.6	2000—2010 年河套灌区耕地基于咸淡水轮（混）灌模式的种植	

	结构中三种主要作物多年平均单位面积经济效益	146
表 7.1	河套灌区三种主要作物田间排水暗管布设规格的模拟情景设置	150
表 7.2	2000—2010 年河套灌区在推荐的排水暗管布设规格下三种作物 单一种植情形的平均蒸散量、产量和水分生产力	157
表 7.3	2000—2010 年河套灌区三种主要作物推荐的暗管排水情景相比 基本情景平均蒸散量、产量和水分生产力的变幅	157
表 7.4	2000—2010 年河套灌区耕地在推荐的田间排水暗管布设规格下 三种主要作物生育期内饱和-非饱和带土壤水盐平衡项	165
表 7.5	2000—2010 年河套灌区耕地在推荐的暗管排水情景中三种主要 作物分别种植条件下平均的水管理响应指标	167
表 7.6	推荐的排水暗管布设规格下河套灌区三种主要作物的 种植面积及其比例	170
表 7.7	2000—2010 年河套灌区耕地基于推荐的田间排水暗管布设规格 下的种植结构中三种主要作物的多年平均单位面积经济效益	173
表 8.1	河套灌区耕地在三种畦灌的模拟情景下主要作物的种植结构及其 灌溉方案	176
表 8.2	河套灌区耕地在三种灌溉模拟情景下主要作物的种植结构及其 灌溉方案	180
表 8.3	河套灌区耕地在四种灌溉模拟情景下主要作物的种植结构及其 灌溉方案	185
表 8.4	河套灌区耕地在灌溉排水条件下以提高作物水分生产力为目标的 种植结构及灌溉与排水方案	190

第1章 绪 言

1.1 研究目的和意义

内蒙古河套灌区作为中国乃至亚洲最大的一首制自流灌区,其灌溉面积达 57.4 万 hm^2 ,是我国重要的商品粮基地 (Yu 等, 2010; Xue 等, 2013)。灌区农业灌溉用水量几乎占灌区总用水量的 98%,是典型的没有灌溉就没有农业的地区。黄河水是其主要的灌溉水源,2000 年以前引黄水量占内蒙古河套灌区用水总量的 97% (阮本清等, 2008)。自 20 世纪 90 年代以来,由于引黄水量的增加和径流量的减小,每年雨季前黄河干流、主要支流下游均出现了长期的频繁断流现象 (Zhu 等, 2003; 刘昌明, 2004; Yang 等, 2010)。灌区每年现状灌溉用水量为 55.81 亿 m^3 ,规划灌溉用水量为 43.69 亿 m^3 (水利部农村水利司和水利部水利水电规划设计总院, 2006),为缓解黄河流域水资源供需矛盾和黄河下游频繁断流的严峻形势,规划灌区多年平均年引黄水量将削减 10 亿~12 亿 m^3 (水利部农村水利司和水利部水利水电规划设计总院, 2006; Luo 和 Sophocleous, 2011)。此外,随着经济水平的提高,城市、工业和环境需水量不断增加,又必将大大削减用于农业灌溉的有效水资源量 (International Water Management Institute, IWMI, 2000)。因此,内蒙古河套灌区水资源短缺将成为影响作物生产的主要限制因素 (Zhang 等, 2013)。如何利用有限的水资源以保证灌区粮油生产的稳定成为灌区亟待解决的问题之一,而提高作物的水分生产力则是解决问题的重要途径。水分生产力 (Water Productivity, WP),是作物产量与作物生育期内的农田耗水量之比,即 $WP = Y/ET_a$, WP 是分析作物产量增加和灌溉农业节水的重要指标,可用于定量评价干旱-半干旱地区农田管理措施所产生的影响 (Droogers 和 Bastiaanssen, 2002; Kijne 等, 2003; Molden 等, 2003; Singh 等, 2006a; van Dam 等, 2006)。提高单位耗水量所获得的作物产量或减少水分消耗的同时保证作物产量稳定,均可以有效地提高作物的 WP (Kijne 等, 2003; Rijsberman, 2006)。

对于内蒙古河套灌区而言,该地区的灌溉方式多年来以地面渠灌为主且大部分采用大水漫灌,灌溉水利用系数仅为 0.30~0.35,水资源浪费较为严重 (阮本清等, 2008; 王康, 2012)。因此,采用科学合理的灌溉制度和高效的灌溉技术将是实现该区域节省灌溉水资源的重要途径。针对农作物不同生长阶段对水分需求的差异,适当调整灌区的传统畦灌灌溉制度,对保证作物正常生长的同时发挥田间节省灌溉水的潜力有着重要作用。喷灌作为一种先进的节水灌溉技术已在世界各地得到广泛的应用,截