



西北旱区流域尺度水资源转化规律 及其节水调控模式

——以甘肃石羊河流域为例

康绍忠 栗晓玲 杜太生 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

西北旱区流域尺度水资源转化规律 及其节水调控模式

——以甘肃石羊河流域为例

康绍忠 栗晓玲 杜太生 冯绍元 佟玲 沈清林 石培泽 杨秀英 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水资源短缺与生态环境恶化是制约我国西北干旱地区经济社会发展的主要因素。本书以甘肃河西走廊石羊河流域为例,通过作者近10年在该流域长期定位研究成果的总结和凝练,系统探索了流域水资源合理配置与节水农业发展模式。全书共分20章,包括石羊河流域基本情况、气候变化与人类活动对流域来用水变化的影响、基于SWAT的杂木河流域分布式水文模型及径流对变化环境响应的模拟、流域地下水动态变化规律及模拟、流域土壤水分运动参数与人渗性能的空间分布规律试验、农作物与沙生植物耗水测算方法及时空变化规律、农田水热平衡与水分传输过程及其模拟、流域灌溉水利用率估算与评价、水资源开发利用对流域水循环的影响及其生态环境效应、流域水生态系统服务价值及生态需水、流域面向生态的水资源合理配置、主要作物水分生产函数与调亏灌溉、作物根系分区交替灌溉节水模式以及田间综合节水技术、节水灌溉条件下土壤水分养分迁移规律与作物高效利用、流域管理节水模式和农业节水技术集成模式及示范应用等内容。

本书可供农田水利、水资源、水文、生态、环境等专业的生产、教学、科研、管理及决策者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式:
以甘肃石羊河流域为例/康绍忠等著. —北京:中国水利
水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6275-2

I. 西… II. 康… III. ①干旱区-流域-水资源-资源
利用-西北地区②干旱区-流域-节约用水-西北地区
IV. TV213.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第017535号

书 名	西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式 ——以甘肃石羊河流域为例
作 者	康绍忠 栗晓玲 杜太生 等 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 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 49.5印张 1174千字
版 次	2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	160.00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

各章编写人员名单

第 1 章	康绍忠	栗晓玲	杜太生	佟 玲				
第 2 章	沈清林	栗晓玲	康绍忠	佟 玲				
第 3 章	康绍忠	佟 玲	马振梅	马黎华	栗晓玲	张 櫓		
第 4 章	王素芬	康绍忠	张 櫓					
第 5 章	冯绍元	康绍忠	霍再林	郝治福	孙 月	杨秀英	石培泽	
第 6 章	康绍忠	贾宏伟	佟 玲	姚立民	杨秀英			
第 7 章	佟 玲	康绍忠	张宝忠	李思恩	张晓涛	刘晓志	杨秀英	
第 8 章	佟 玲	康绍忠	夏桂敏	屈艳萍				
第 9 章	康绍忠	左 强	冯绍元	周青云	王春梅	张宝忠	李思恩	
	王 为	李王成						
第 10 章	康绍忠	吕廷波	佟 玲	栗晓玲	杨秀英			
第 11 章	康绍忠	师彦武	魏晓妹	冯绍元	栗晓玲	霍再林	蒋 静	
第 12 章	栗晓玲	康绍忠	佟 玲	胡 萌	杨秀英			
第 13 章	栗晓玲	康绍忠	杨秀英	沈清林	石培泽			
第 14 章	康绍忠	杜太生	李 霆	石培泽	杨秀英	杨 磊	刘晓志	
	王若水							
第 15 章	康绍忠	杜太生	蔡焕杰	石培泽	杨秀英	刘晓志	杨 磊	
	庞秀明	王若水	孟 毅					
第 16 章	杜太生	康绍忠	王振昌	闫博远	吕桂军	石培泽	杨秀英	
	潘英华	何立绩						
第 17 章	杜太生	王凤新	石培泽	蔡焕杰	杨秀英	郭相平	侯晓燕	
	张振华	张朝勇						
第 18 章	张富仓	刘小刚	李培岭					
第 19 章	沈清林	石培泽	康绍忠	栗晓玲	杨秀英	董平国		
第 20 章	石培泽	杨秀英	沈清林	康绍忠	栗晓玲	杜太生		

前 言

水资源短缺和生态环境恶化已成为制约我国西北内陆河流域社会经济可持续发展的核心问题。内陆河流域有限的水资源承载了过多的人口及经济活动,使水循环过程发生了深刻变化,进而影响受水控制的生态系统,带来生态环境的巨大改变。

石羊河流域是甘肃河西内陆河流域人口最多、经济社会发达、水资源开发利用程度高、用水矛盾突出、生态环境问题严重、水资源对社会经济发展制约性强的流域。随着人口增长和社会经济的发展以及水资源的过度开发利用,流域水资源已严重超载,经济用水挤占生态用水,使得进入下游民勤绿洲的水量逐年锐减,致使下游地下水位下降,植被衰退,绿洲萎缩,进而引起土地沙漠化、荒漠化、盐碱化的扩展等一系列生态环境问题,威胁着流域的可持续发展,危及当地人们的生存环境。如何在有限的水资源条件下通过其合理配置与有效保护以及实施高效用水,实现生态系统良性循环及经济社会的可持续发展,已成为该流域目前最紧迫的任务。

为了探讨石羊河流域水资源合理利用与节水农业建设模式,加速先进节水技术的示范与推广,促进科技与生产的紧密结合,中国农业大学和甘肃省水利厅石羊河流域管理局、甘肃省武威市水务局等单位密切合作,建设了“石羊河流域农业与生态节水试验站”。先后在国家自然科学基金重点项目“西北旱区农业与生态节水应用基础研究(50339030)”、国家自然科学基金委员会中国西部环境与生态科学重大研究计划项目“西北绿洲农业发展对流域尺度水循环的影响及生态环境效应(90202001)”、国家自然科学基金委员会海外青年学者合作研究基金项目“西北旱区流域尺度耗水对人—地关系变化响应的实验与模拟(50528909)”、国家自然科学基金面上项目“西北旱区果园不同尺度耗水估算模型的建立及其耦合研究(50679081)”、“局部灌溉时果树根系吸水补偿效应与水分高效利用机制研究(50279043)”、“西北旱区灌区节水改造对区域水循环的影响及生态环境效应研究(40771034)”、“果园水分品质响应机理与控水调质灌溉模式研究(50709038)”、国家高技术发展研究计划(863计划)课题“作物高效用水生理调控与非充分灌溉技术研究

(2002AA6Z-3031)”、“基于作物健康生命需水信息的非充分灌溉技术(2006AA100203)”、“十一五”国家科技支撑计划课题“灌区节水改造环境效应及评价方法研究(2006BAD11B08)”、教育部创新团队计划项目“农业节水与水资源高效利用(IRT0657)”、教育部科学技术研究重点项目“西北旱区流域尺度生态水文过程与节水生态重建的水资源优化配置理论研究(重点02075)”、国家农业科技成果转化基金项目“作物控制性根系分区交替灌溉技术中试与示范(03EFN217100328)”以及台胞朱英龙先生捐助项目的资助下,对石羊河流域水资源转化规律与节水调控模式进行了研究。

我们的研究针对过去只注重考虑局部节水效应、忽视上下游水转化关系、就节水谈节水的状况,强调在考虑流域水循环过程和生态需水的基础上,科学确定全流域不同地区适宜的农业节水模式;针对过去较多追求高标准渠道防渗的状况,强调减少全流域作物总耗水 ET 和提高 WUE 的真实节水,更加关注农艺与生物节水在解决流域缺水问题中的作用;针对过去单纯考虑节水的经济效应,强调区域节水后的生态环境效应评价。以认识流域尺度水转化与消耗规律、进行面向生态的水资源合理配置、建立基于流域尺度水循环和生态需水的农业高效用水新模式、开拓基于生命需水信息的作物高效节水调控新途径、减少奢侈耗水而提高灌溉水利用效率为研究主线,通过室内野外结合、点面结合、定位试验与现场示范相结合,理论研究与技术开发应用相结合,系统探索石羊河流域水资源合理配置与节水农业发展模式。从1997年开始,先后开展了包括“石羊河流域土壤水分物理参数与入渗特性空间分布试验”、“地下水位深埋区土壤水与地下水转化关系试验”、“石羊河流域邓马营湖区地下水动态变化规律试验”、“不同尺寸微型蒸渗器和入渗仪测定土壤蒸发与入渗试验”、“不同灌溉方式条件下灌溉水—土壤水转化关系试验”、“不同衬砌条件下渠道渗漏量观测试验”、“不同矿化度地下水灌溉对作物及土壤盐分迁移与积聚影响试验”、“干旱荒漠区典型防风固沙植被水分关系与耗水规律试验”、“流域典型防风固沙植物对水盐胁迫的响应机理与微咸水灌溉制度试验”、“流域蒸发蒸腾量时空尺度效应试验”、“基于涡度相关法估算干旱荒漠区植被耗水试验”、“利用波文比—能量平衡法估算植被耗水试验”、“玉米控制性根系分区交替灌溉节水机理与效应试验”、“棉花根系分区交替灌溉技术试验”、“葡萄根系分区交替灌溉节水机理与模式试验”、“春小麦调亏灌溉指标与模式试验”、“苹果梨树耗水规律与调亏灌溉模式试验”、“西瓜耗水规律与调亏灌溉模式试验”、“膜下滴灌棉花需水规律与灌水模式试验”、“民勤绿洲区温室蔬菜耗水规律与灌溉模式试验”、“苜蓿耗水规律与水分生产

模型试验”、“滴灌条件下马铃薯耗水规律与灌溉模式试验”、“不同灌溉模式对作物养分吸收与土壤微生物影响试验”、“保水剂在节水灌溉中的应用及对作物水分利用影响试验”、“农田不同覆盖方式的水分温度效应及其对玉米水分利用影响试验”、“温室蔬菜耗水规律与节水调质灌溉模式试验”等 20 多项野外定位科学试验，积累了宝贵的野外科学试验数据。同时，通过野外调查和考察，收集了石羊河流域 8 条山水河的径流、地下水、气象、社会经济、灌溉试验、各部门用水、遥感影像、土地利用、数字高程模型等空间信息数据。在此基础上，建立了石羊河流域水资源与试验数据管理信息系统。上述野外定位试验与调查资料为研究水资源转化消耗规律与节水调控模式奠定了基础。

我们的研究涉及人类活动和气候变化对石羊河流域径流的影响与模拟、流域地表水—土壤水—地下水转化实验与模拟、流域不同尺度农作物和防风固沙植物耗水规律与估算模型、流域主要农作物和温室蔬菜及特色瓜果的耗水规律与节水高效优质灌溉模式、面向生态的流域水资源合理配置理论与模式、流域水资源管理与节水型社会建设等若干亟待解决的科技与生产实际问题，在此基础上进行了水资源高效利用和节水农业技术与模式的系统示范推广，取得了具有一定创新性并在流域水资源管理与节水农业建设中发挥了重要作用的研究成果。

计算与分析了石羊河流域灌溉水利用率和灌溉水生产率的时空分布，为流域节水灌溉规划提供了科学依据；系统分析并模拟了气候变化和人类活动对石羊河流域来用水变化的影响，为流域水资源合理利用提供了数据支撑；通过对流域地表水—地下水—土壤水转化的实验与模拟，获得了流域土壤物理参数的单参数模型和土壤转换函数及参数空间分布，以及不同灌溉规模与地表来水量时的地下水位动态变化；通过大田作物耗水与节水灌溉模式的系统试验研究，获得了石羊河流域主要农作物的耗水指标与节水优质高效灌溉模式，为石羊河流域节水农业建设提供了控制指标与示范样板；通过减少作物的奢侈蒸腾和 ET ，提高了灌溉水利用效率，挖掘了流域真实节水的潜力；通过设施农业和葡萄等特色果业耗水规律与节水调质灌溉模式的研究，获得了流域内几种设施蔬菜和特色果品生产的经济需水量和节水优质高效的灌溉模式，为流域农业结构调整提供了科学数据；通过生态植被耗水试验，获得了石羊河流域几种天然植被和人工灌溉植被的耗水规律与耗水量计算模型，为流域生态建设及生态需水计算积累了基础数据；提出了石羊河流域水资源开发的水土环境效应综合评价指标体系；建立了石羊河流域考虑生态需水的水资源合理配置模型，在考虑全流域地下水均衡及民勤绿洲地下水正均衡的

条件下,获得流域灌溉规模及上中下游用水分配方案、生态与经济用水分配方案以及农业种植结构的优化模式,为流域水资源的合理配置提供了决策依据;开发了基于 Visual Basic 的石羊河流域水资源管理信息系统,该系统不仅包括了水文气象等基本信息和长期观测资料,而且包括大量试验研究资料 and 空间属性资料,实现了数据的多样化查询和满足不同用户的需求以及数据共享;提出了“兼顾经济生态用水,合理配置有限水量,以水定地适水种植,以田间节水为重点,以减少净耗水为核心,以提高水效益为根本,以水权改革作保证”的流域水资源可持续利用战略,通过应用“以提高有限降水的效益为核心的流域上游集雨高效利用模式”、“以降低单位面积灌溉定额为重点的流域中游渠灌高效节水模式”、“以控制灌溉面积为重点的流域下游井灌高效节水模式”、“以提高单位用水量的经济效益为核心的温室瓜菜高效节水模式”,构建了石羊河流域不同类型的农业高效节水技术集成模式,通过“总量控制、定额管理、以水定植、配水到户、超用加价、以水定电、以电控水”和建立农民用水者协会的管理制度改革,大幅度提高了水的利用效率,为实现流域水资源可持续利用提供了技术支持。上述研究成果在生产中得到了较大面积的推广应用,取得了显著的经济、社会与生态效益。

该项成果在《Journal of Hydrology》、《Hydrological Processes》、《Hydrological Sciences Journal》、《Agricultural Water Management》、《Irrigation Science》、《Agricultural and Forest Meteorology》、《Plant and Soil》、《Arid Land Research and Management》、《水利学报》、《生态学报》、《农业工程学报》、《应用生态学报》、《水科学进展》等国内外重要刊物上发表学术论文 100 余篇,有的论文在学术界产生了一定的影响。为了促进科学技术与生产实际的衔接,2005 年 8 月和 2007 年 3 月,项目组分别在甘肃武威和北京主持召开了“石羊河流域水资源合理配置与节水农业建设”第一届、第二届学术研讨会。水利部农水司、清华大学、日本东京大学、香港浸会大学、兰州大学、中国农业科学院农田灌溉研究所、中国科学院发育生物学研究所农业资源研究中心、北京林业大学、中国农业大学、西北农林科技大学、甘肃省水利厅、石羊河流域管理局以及武威市(县、区)水利管理部门等 20 个单位的代表参加了会议。会议以本项目研究成果交流和咨询为主,对项目的研究工作以及整个石羊河流域的水资源合理配置与节水农业建设产生了积极的作用。为了推广普及研究成果,还进行了面向基层灌溉管理技术人员和农民的节水农业技术培训和推广,组织编写了《武威市节水型社会建设实用技术指南》、《武威市建设节水型社会科普知识问答》、《武威市建设节水型社会宣传手册》等推广与培训教材,对当

地节水农业发展和灌溉用水管理水平的提高起到了重要的作用，对改变人们的用水观念、增强节水意识产生了较好的社会效果。

先后参加该项研究的有：中国农业大学中国农业水问题研究中心康绍忠、杜太生、佟玲、冯绍元、王素芬、王凤新、唐泽军、霍再林、左强、任理、毛晓敏、黄冠华、丁日升、李王成、夏桂敏、周青云、张宝忠、李思恩、张晓涛、胡萌、刘晓志、许小燕、王峰、孙月、王春梅、来建斌、张彦群、曾颀婷、蒋静、陈绍军、刘杰、郝治福、马振梅、吕廷波、鲍兴、侯晓燕、王为、刘晓东、闫博远、王若水、孙俊华、韩江江、田磊、唐敏华、刘春伟、陈峰、邱让建、张鑫等；西北农林科技大学栗晓玲、魏晓妹、蔡焕杰、张富仓、王密侠、李志军、梁宗锁、屈艳萍、姚立民、贾宏伟、潘英华、师彦武、庞秀明、李霆、陈俭煌、王锋、马岚、王振昌、马黎华、杨磊、康敏、陈平、张朝勇、孟毅、张振华、赵永、李培岭、贾运岗、刘小刚、张赟、于海燕、郭维华等；广西大学李伏生；香港浸会大学张建华；澳大利亚 CSIRO 水土研究所张櫓；武威市节约用水办公室杨秀英、王兴成、张霖、苏兴礼、钱艳；甘肃省水利厅石羊河流域管理局沈清林、张永明；武威市水务局石培泽；武威市水利技术服务中心董平国、韩万海、胡铁民等。

该书由上述参加石羊河流域水资源转化规律及其节水调控模式项目的研究人员集体撰写，由康绍忠、栗晓玲、杜太生、冯绍元、佟玲、沈清林、石培泽、杨秀英、霍再林等负责整理统稿。张宝忠、田磊、康敏等在书稿编排和资料收集等方面作了一些具体工作。在书稿付梓出版之际，感谢和我一起为石羊河流域水资源转化规律及其节水调控模式研究付出辛勤努力的同志们和同学们，特别是在石羊河流域农业与生态节水试验站创建初期与运行管理过程中付出艰辛劳动的杜太生、李王成、夏桂敏、刘晓志、周青云、张宝忠、胡萌、田磊等同志。没有大家从 2000 多 km 的首都北京到石羊河流域，每年 6~7 个月坚持在条件十分艰苦的基地进行野外试验观测与研究，就没有书稿中第一手宝贵的资料！回忆起同志们在野外试验时埋设 3m 深的土壤水分测管、开挖几米深的土壤剖面、站在 4~5m 高的梯子上测定植物光合作用、在荒无人烟的沙漠边缘进行土壤水分运动参数与入渗测定、通宵坚持在试验地记录灌水和日变化数据，顶着烈日，流淌着汗水，……此时，我的心里充满着对大家的钦佩，眼里饱含着对大家感激的泪水！还要感谢武威市人民政府陈明副市长，武威市水务局原局长张献庆、张发基局长、范文智副局长、左凤章、魏志荣，凉州区水务局杨东局长、张虎如副局长、王兴柱、王成、王淑萍、何大章、丁杰、张建成，民勤县水务局田国兴副局长、魏多玉书记、

姜有忠、张克生、潘从新，古浪县水务局余曰海局长，金昌市水务局李光俊副局长等在我们课题组试验研究、技术推广以及资料收集与调研过程中给予的大力帮助与支持！感谢中国工程院院士、清华大学雷志栋教授，中国工程院院士、长安大学李佩成教授对我们研究工作给予的指导！

在石羊河流域的研究工作中得到了国家自然科学基金委员会、科技部、教育部、水利部、甘肃省水利厅、武威市人民政府、台湾嘉隆事业有限公司董事长朱英龙先生以及中国农业大学领导和相关部门的大力支持与帮助。为了本书的系统性，除了近年项目组的研究成果外，还引用了有关单位关于石羊河流域的部分研究成果和相关基础数据，在此一并表示感谢。

由于研究者水平和时间及经费所限，所取得的成果仅仅是西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式研究领域中的某几个方面，对有些问题的认识和研究还有待于更进一步深化，错误和不足之处亦必颇多，恳请同行专家批评指正。

康绍忠

2008年8月26日

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 石羊河流域水资源转化规律与高效利用研究的总体思路	2
1.3 取得的主要进展	12
1.4 石羊河流域高效农业节水发展模式	29
参考文献	30
第 2 章 石羊河流域基本情况	33
2.1 石羊河流域概况	33
2.2 石羊河流域水资源概况	38
2.3 石羊河流域水资源开发利用现状	45
2.4 石羊河流域土地覆被情况	47
2.5 石羊河流域灌区概况	50
参考文献	51
第 3 章 气候变化与人类活动对石羊河流域来用水变化的影响	52
3.1 气候变化与人类活动对石羊河流域出山径流影响的研究	52
3.2 近 50 年石羊河流域农业耗水量的变化分析	66
3.3 石羊河流域用水结构演变及其预测	79
参考文献	86
第 4 章 基于 SWAT 的杂木河流域分布式水文模型及径流对变化环境 响应的模拟	88
4.1 水文模型及研究区概述	88
4.2 基于 SWAT 的杂木河流域分布式水文模型构建	91
4.3 杂木河流域径流模拟数据	92
4.4 模型评价	96
4.5 出山口径流对土地利用变化响应的模拟	103
4.6 出山径流对气候变化响应的模拟	107
4.7 结论	117
参考文献	118

第 5 章 石羊河流域地下水动态变化规律及模拟	121
5.1 区域地下水动态变化及模拟研究进展	121
5.2 石羊河流域地下水的动态变化规律	124
5.3 基于 ANN 与 FEFLOW 的民勤绿洲地下水位动态模型及模拟	136
5.4 基于 MODFLOW 的邓马营湖区地下水位动态模拟与预报	158
参考文献	173
第 6 章 石羊河流域土壤水分运动参数与入渗性能的空间分布规律	177
6.1 土壤水分运动参数空间变异研究方法评述	177
6.2 石羊河流域土壤基本参数的空间特征	183
6.3 土壤入渗特性的空间变异研究	194
6.4 土壤水分运动参数的空间变异研究	200
参考文献	212
第 7 章 石羊河流域农作物耗水测算方法及时空变化规律	215
7.1 利用热脉冲技术和微型蒸渗仪测定果树耗水的研究	216
7.2 利用波文比—能量平衡法测定作物耗水的试验研究	226
7.3 利用涡度相关法测定作物耗水的试验研究	233
7.4 估算作物耗水量的作物系数法	241
7.5 不同耗水估算模型的比较与分析	251
7.6 石羊河流域作物耗水量的空间尺度转换方法研究	265
7.7 区域作物耗水分布监测的遥感方法	276
参考文献	295
第 8 章 石羊河流域沙生植物耗水规律及测算方法	302
8.1 试验研究方法	302
8.2 天然沙生植物的耗水规律分析	305
8.3 人工种植沙生植物的耗水规律分析	326
参考文献	346
第 9 章 石羊河流域农田水热平衡与水分传输过程及其模拟	347
9.1 农田水热平衡与水分传输过程研究进展	347
9.2 葡萄园和玉米田冠层能量平衡分量的变化特征	350
9.3 植物根系生长与根系吸水模型	357
9.4 土面蒸发测定及其影响因素	382
9.5 不同尺度表层土壤含水量合理取样数目的估算方法	387
参考文献	395
第 10 章 石羊河流域灌溉水利用率估算与评价	398
10.1 国内外灌溉水利用率研究进展	398

10.2	石羊河流域灌区灌溉制度与灌溉方法·····	400
10.3	灌溉水利用率测算方法·····	401
10.4	石羊河流域灌溉水利用率计算与分析·····	403
10.5	基于 GIS 的石羊河流域灌溉水利用率计算·····	414
10.6	石羊河流域作物水分利用效率与灌溉水生产率的变化分析·····	418
参考文献·····		419
第 11 章 水资源开发利用对石羊河流域水循环的影响及其生态环境效应·····		421
11.1	水资源开发利用对内陆河流域水循环的影响及生态环境效应概述·····	421
11.2	水资源开发利用对石羊河流域地表水—地下水转化关系的 影响及其模拟·····	422
11.3	石羊河流域水资源开发的水土环境效应评价·····	428
11.4	咸水非充分灌溉对农田土壤水盐的影响·····	445
参考文献·····		450
第 12 章 石羊河流域水生态系统服务价值及生态需水·····		452
12.1	生态系统服务价值与生态需水研究进展·····	452
12.2	石羊河流域水与植物生长的关系·····	456
12.3	石羊河流域水生态系统服务功能与价值评估·····	462
12.4	内陆河流域生态需水计算理论与方法·····	468
12.5	石羊河流域生态需水计算实例·····	473
参考文献·····		483
第 13 章 石羊河流域面向生态的水资源合理配置·····		487
13.1	面向生态的水资源合理配置理论与方法·····	487
13.2	石羊河流域水资源系统模拟模型·····	494
13.3	考虑生态需水的水资源配置多目标决策模型·····	497
13.4	基于生态经济效益统一度量的水资源合理配置模型·····	503
13.5	石羊河流域水资源配置多目标决策模型的应用·····	504
13.6	石羊河流域基于生态经济效益统一度量的水资源配置模型的应用·····	513
参考文献·····		516
第 14 章 石羊河流域主要作物水分生产函数与节水高效灌溉模式研究及应用·····		519
14.1	作物水分生产函数研究进展·····	519
14.2	石羊河流域主要作物全生育期的水分生产函数·····	521
14.3	石羊河流域主要作物分阶段的水分生产函数·····	524
14.4	石羊河流域主要作物节水高效灌溉模式·····	530
参考文献·····		536
第 15 章 石羊河流域主要作物调亏灌溉节水模式研究及应用·····		538
15.1	作物调亏灌溉的研究进展·····	538

15.2	春小麦调亏灌溉指标与模式研究·····	540
15.3	覆膜棉花调亏灌溉指标与模式研究·····	545
15.4	籽瓜调亏灌溉指标与模式研究·····	548
15.5	西瓜调亏灌溉指标与模式研究·····	551
15.6	苜蓿调亏灌溉指标与模式研究·····	562
15.7	苹果梨调亏灌溉指标与模式研究·····	578
15.8	温室作物调亏灌溉指标与模式研究·····	584
15.9	温室作物水分—品质—产量关系与节水调质灌溉模式·····	598
参考文献·····		603
第16章 石羊河流域主要作物根系分区交替灌溉节水模式研究及应用 ·····		607
16.1	作物根系分区交替灌溉的研究进展·····	607
16.2	作物根系分区交替灌溉的基本原理与技术体系·····	613
16.3	玉米隔沟交替灌溉节水模式研究与应用·····	616
16.4	棉花根系分区交替灌溉节水模式研究与应用·····	624
16.5	葡萄根系分区交替灌溉节水模式研究与应用·····	645
16.6	根系分区交替灌溉技术在盐碱土地区的适应性研究·····	657
参考文献·····		668
第17章 石羊河流域田间综合节水技术研究与应用 ·····		672
17.1	棉花膜下滴灌技术研究与应用·····	672
17.2	玉米膜下滴灌技术研究与应用·····	675
17.3	马铃薯覆盖节水技术研究·····	680
17.4	化控节水技术研究与应用·····	685
17.5	畦田灌水技术改进研究·····	704
参考文献·····		708
第18章 节水灌溉条件下土壤水分养分迁移规律与作物高效利用 ·····		710
18.1	国内外研究进展·····	710
18.2	调亏灌溉对土壤养分运移与作物利用的影响·····	714
18.3	不同沟灌方式对棉田土壤氮素运移和氮素吸收的影响·····	724
参考文献·····		730
第19章 石羊河流域管理节水模式研究及应用 ·····		733
19.1	建立合理的水价与运行机制·····	733
19.2	确定初始水权,建立水市场·····	735
19.3	调整作物布局·····	739
19.4	建立灌区自动化管理系统·····	741
19.5	量水技术研究与应用·····	742
19.6	井灌区地下水管理与开采量控制·····	745

19.7 推进民主参与式管理, 组建农民用水者协会.....	748
19.8 石羊河流域管理节水的成效.....	750
参考文献	750
第 20 章 石羊河流域农业节水技术集成模式及示范应用	751
20.1 不同区域的农业节水技术集成模式.....	751
20.2 不同区域的节水示范工程与应用效益.....	767
参考文献	773

第1章 概述

1.1 研究目的与意义

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河流域之一,位于河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北麓,即祁连山东段与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠南缘之间,总面积 4.16 万 km^2 ,占甘肃省内陆河流域总面积的 15.4%。流域属大陆性温带干旱气候,太阳辐射强、日照充足、夏季短而炎热、冬季长而寒冷、温差大、降水少、蒸发强烈、空气干燥;流域主要分属武威、金昌两市,武威市以发展农业为主,金昌市是我国著名的有色金属生产基地。2003 年全流域总人口 226.89 万人,农田灌溉面积 30.00 万 hm^2 ,人均 GDP 6102 元^[1]。

流域多年平均自产地表水资源量 15.75 亿 m^3 ,与地表水不重复的地下水资源量 1.1 亿 m^3 ,自产水资源总量 16.85 亿 m^3 。亩均水资源 272 m^3 ,人均水资源 743 m^3 ,远低于全国亩均 1476 m^3 和人均 2135 m^3 的水平。2003 年全流域实际供水量 28.77 亿 m^3 ,其中蓄水工程、引水工程及地下水工程分别占总供水量的 37.8%、11.3%及 50.3%;其他工程占总供水量的 0.6%;实际用水量为 28.77 亿 m^3 ,其中农业灌溉、林牧渔、工业、城市生活以及农村生活用水量分别占总用水量的 86.4%、4.5%、5.4%、1.6%和 2.1%。水资源开发利用率高达 170% (含重复利用),远高于国际公认的、不影响生态环境的河道水资源开发利用不超过 40% 的标准。即使在外调水 1.01 亿 m^3 和地下水超采 4.32 亿 m^3 的情况下,现状依然缺水 1.98 亿 m^3 ^[1]。

该流域是甘肃省河西内陆河流域中人口最多、水资源开发利用程度高、用水矛盾突出、生态环境问题严重、水资源对经济社会发展制约性强的地区。随着人口增长和经济社会的发展,水资源已严重超载,经济社会发展用水严重挤占生态用水,致使流域的生态环境日趋恶化,导致地下水位下降、沙生植物萎缩死亡,沙尘暴活动频繁,危害程度和范围日益扩大,已严重影响到当地经济和社会的可持续发展,也对当地群众生存构成严重威胁。

石羊河流域有限的水资源承载了过多的人口与经济活动,使水循环过程发生了深刻的变化,进而影响受水控制的生态系统的演变。在有限的水资源条件下,如何通过水资源的合理配置和高效率用水,实现生态系统良性循环及经济社会可持续发展,已成为该流域目前最紧迫的任务。研究流域水资源转化规律以及节水高效利用技术与模式,对于深刻认识该区域水循环演变的过程和机制,确定合理的绿洲灌溉农业规模,促进水资源持续高效利用、改善脆弱生态环境更具有重要的现实意义,同时对西北干旱内陆区其他流域也具有借鉴与参考价值。

1.2 石羊河流域水资源转化规律与高效利用研究的总体思路

内陆河流域水资源及水文循环过程是决定流域经济结构、土地利用和生态环境状况的主导因素。流域地表水与地下水资源多次相互转化,使水资源能够多次重复利用,改变了水资源的转化与利用格局,影响受水控制的生态系统。水资源合理配置和节水生态农业建设必须考虑流域水资源转化关系和水资源利用格局的变化。石羊河流域水资源转化规律与节水调控研究的总体思路就是要针对过去只注重考虑局部节水效应、不考虑上下游水转化关系、就节水谈节水的状况,强调在考虑流域水循环过程和生态需水的基础上,科学确定全流域不同地区适宜的农业节水模式;针对过去盲目追求高标准渠道防渗的状况,强调减少全流域作物总耗水 ET 和提高 WUE 的真实节水,更加关注农艺与生物节水在解决流域缺水问题中的作用;针对过去单纯考虑节水的经济效应,强调区域节水后的生态环境效应评价。以认识流域尺度水转化规律、进行面向生态的水资源合理配置、建立基于流域尺度水循环和生态需水的农业高效用水新模式、开拓基于生命需水信息的作物高效节水调控新途径、减少奢侈耗水而提高灌溉水利用效率为研究主线,通过室内野外结合、点面结合、定位试验与现场示范相结合,理论研究与技术开发应用相结合,系统探索石羊河流域水资源合理配置与节水农业发展模式。

1.2.1 石羊河流域水资源转化规律与节水调控的研究状况

新中国成立以来,石羊河流域的水资源问题已引起有关部门的高度重视,不同部门从不同方面对流域水资源、农业节水灌溉及生态问题进行了研究。20世纪60年代初,武威地区制定了石羊河流域上下游分水协议;20世纪80年代,由甘肃省水电勘测设计院制定了石羊河流域初步水利规划和水中长期供求计划,经甘肃省水利厅批准并执行;1984年,中国科学院兰州沙漠研究所在开展的“河西走廊水土资源利用与生态环境现状调查”研究项目中,摸清了石羊河流域水土资源和生态环境的基本状况,并提出了水土资源的开发利用潜力^[2];20世纪90年代,地质部门计算了石羊河流域环境劣化经济损失,进行了水资源与环境经济综合规划^[3],20世纪90年代中后期制定了河西走廊地区农业节水灌溉总体规划并逐步实施;国家“九五”科技攻关项目专题“石羊河流域水资源承载能力与可持续发展研究”^[4]在宏观层次上对流域水资源承载能力进行了计算,并对生态环境状况进行了调查评价,初步提出了流域以水资源为主线的资源、环境、经济相协调的可持续发展模式及生态环境保护方案,并重点提出了民勤的生态环境保护方案及治理对策。20世纪90年代中期,兰州大学进行了沙丘水平衡及沙丘治理和开发利用研究^[5],合肥工业大学对流域地下水转化模型及其时空转化关系进行了研究^[6]。近年来,中国农业大学和西北农林科技大学对石羊河流域典型试验区进行了流域尺度水循环模型参数的原位试验,在全流域不同代表性点观测土壤入渗特性参数、非饱和土壤导水率、土壤水分特征曲线、非饱和土壤水扩散率等,分析研究了石羊河流域的土壤水分运动参数的空间分布规律^[7],研究了参考作物蒸发蒸腾量的时空变化规律^[8],初步建立了基于遥感与GIS的作物耗水分布式模型^[9],