

JIESHUI TIAOJIAN XIA MANASI HE LIUYU
SHUI XUNHUAN GUOCHENG MONI YANJIU

节水条件下玛纳斯河流域 水循环过程模拟研究

杨广 何新林 刘兵 李小龙 李鹏飞 赵丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

节水条件下玛纳斯河流域 水循环过程模拟研究

杨广 何新林 刘兵 李小龙 李鹏飞 赵丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书针对节水条件下玛纳斯河流域水循环过程的模拟问题,系统地分析了节水技术对流域降水、径流、入渗和蒸散发水循环要素的影响,提出了节水条件下区域水循环过程模拟模型,分别从现状总结与分析、水循环要素影响、水循环模拟模型构建、模型验证与应用四个方面展开了相关研究,对节水条件下区域水资源持续利用及生态安全具有重要意义。

本书适合于水利、农业、生态等领域内的广大科技工作者、工程技术管理人员参考使用,也可以作为高等院校研究生教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

节水条件下玛纳斯河流域水循环过程模拟研究 / 杨广等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020.9
ISBN 978-7-5170-8932-2

I. ①节… II. ①杨… III. ①玛纳斯河—流域—水循环—流域模型—研究 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第186434号

书 名	节水条件下玛纳斯河流域水循环过程模拟研究 JIESHUI TIAOJIAN XIA MANASI HE LIUYU SHUI XUNHUAN GUOCHENG MONI YANJIU
作 者 出 版 发 行	杨广 何新林 刘兵 李小龙 李鹏飞 赵丽 著 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 印 刷 规 格 版 次 定 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京九州迅驰传媒文化有限公司 170mm×240mm 16开本 11印张 143千字 2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷 55.00 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

前言

FOREWORD

新疆维吾尔自治区位于欧亚大陆腹地，是典型的干旱、半干旱地区，其山盆相间的地貌格局构成了以山地-绿洲-荒漠三大生态系统为基本特征的特殊自然地理单元。水资源发源于山区，在绿洲区消耗与运转，耗散于荒漠，因此，水资源是制约区域经济发展和生态建设的主要因素。作为我国膜下滴灌节水技术的发源地，新疆玛纳斯河流域近年来围绕农业灌溉进行了大规模水资源开发利用措施，修建渠道引水灌溉、兴修水库、渠道防渗以及农田膜下滴灌等一系列水利工程措施，水资源利用效率及农业生产力得到了极大的提高，已发展为新疆最大的绿洲农耕区和我国第四大灌溉农业区，成为我国荒漠变绿洲的典范。

节水技术作为先进的农田灌溉措施，可以以最低限量用水获取最大的农业产量和收益，可以最大限度地提高单位灌溉水量的作物产量和产值，流域规模化节水措施作为重要的人类活动，在迅速推动绿洲化进程的同时，改变了流域水循环要素及水循环方式，也改变了流域水循环自然变化的时空格局和水文系统的整体性，打破了原有脆弱的水文生态平衡，使得脆弱的水资源系统存在更大的不确定性，进而影响区域水文生态系统的稳定。目前，节水技术对水循环要素及水循环过程的影响还未实现精确、定量的分析评估，节水条件对流域水循环的影响

研究仍处于定性或半定量阶段。本书针对节水条件下流域水循环过程的模拟问题，系统地分析了节水技术对流域降水、径流、入渗和蒸散发水循环要素的影响，提出了节水条件下区域水循环过程模拟模型，分别从现状总结与分析、水循环要素影响、水循环模型构建、模型验证与应用四个方面展开了相关研究，对节水条件下区域水资源持续利用及生态安全具有重要意义。

全书共分6章：第1章主要介绍研究背景，研究目的和意义，国内外研究现状分析，主要研究内容、技术路线和整体组织结构；第2章主要从玛纳斯河流域概况、水资源开发利用分析、土地资源开发利用分析和水土资源开发利用存在的问题这四个方进行总结与分析，为节水条件下流域水循环研究提供背景基础；第3章主要借助遥感解译方法反演流域下垫面变化过程，分析流域土地利用动态度，确定流域下垫面变化驱动因素，综合评价流域绿洲稳定性，为节水条件下流域水循环模拟提供土地数据支持；第4章主要研究节水条件下流域水循环要素规律。从降水、径流、入渗和蒸散发影响因子入手，分析节水技术对水循环要素的影响，为节水条件下流域水循环模拟提供降水、蒸发和入渗参数支持；第5章根据数据分析和试验结果构建山区径流模拟模型和绿洲区地下水数值模拟模型，对模型的精度进行验证。根据流域不同节水程度灌水方案开展节水条件下流域水循环过程模拟研究，确定不同节水条件下地下水均衡及地下水位降深，为流域农业可持续及水资源合理利用提供科学依据；第6章结论与展望。

本书先后得到国家自然科学基金-新疆联合基金重点项目

“干旱区膜下滴灌农田生态系统水盐与养分运移及环境效应”(U1803244)、国家水资源重点研发专项“多水源开发利用关键技术试验与示范”(2017YFC0404303)、兵团中青年科技创新领军人才(2018CB023)、兵团优秀青年基金项目(CZ027204)、兵团重点领域科技攻关计划项目(2018CB023; 2018BC007)、石河子大学青年创新人才培养计划项目(CXRC201801)和石河子大学高层次人才计划项目(RCZK2018C22)的资助。

本书由杨广、何新林、刘兵、李小龙、李鹏飞、赵丽统稿,参加本书著作撰写的还有王翠、杨明杰等人。本书在撰写过程中查阅了相关领域研究成果,均在参考文献中标注,在此谨向有关参考文献的作者表示衷心的感谢。

在本书成稿之际,笔者向所有为本书出版提供帮助和支持的同仁表示衷心感谢。由于研发条件和时间所限,所取得的研究成果还存在一定的局限性,相关研究仍需深入开展,对一些问题的认识还有待进一步深入。同时,受学识视野和水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请同行专家批评指正。

作者

2020年1月

[目录]

CONTENTS

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状及其分析	5
1.3 研究内容与技术路线	15
1.4 本书的章节安排	19

第 2 章 节水条件下玛纳斯河流域水土资源开发 利用分析	21
2.1 玛纳斯河流域概况	21
2.2 节水条件下水土资源开发利用分析	28
2.3 节水条件下玛纳斯河流域绿洲稳定性评价	42
2.4 本章小结	48

第 3 章 节水条件下玛纳斯河流域下垫面变化分析	50
3.1 研究方法	50
3.2 节水条件下玛纳斯河流域下垫面变化特征	54
3.3 节水条件下流域土地利用动态度分析	62
3.4 节水条件下流域下垫面变化影响因素分析	65
3.5 本章小结	67

第 4 章 节水条件下玛纳斯河流域水循环要素 规律分析	69
4.1 径流	69
4.2 降水	73

4.3	入渗	76
4.4	蒸散发	79
4.5	本章小结	97
第 5 章	节水条件下玛纳斯河流域水循环过程模拟	99
5.1	玛纳斯河流域水循环过程分析	99
5.2	玛纳斯河流域山区径流过程模拟分析	101
5.3	节水条件下玛纳斯河流域地下水数值模拟模型	114
5.4	不同节水条件下玛纳斯河流域地下水数值模拟	128
5.5	本章小结	145
第 6 章	结论与展望	147
6.1	结论	147
6.2	展望	150
参考文献		152

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

新疆维吾尔自治区位于欧亚大陆腹地，是典型的干旱、半干旱地区，其山盆相间的地貌格局构成了以山地-绿洲-荒漠三大生态系统为基本特征的特殊自然地理单元。水资源发源于山区，在绿洲区消耗与运转，耗散于荒漠，因此，水资源是制约区域经济发展和生态建设的主要因素。玛纳斯河流域位于新疆天山北麓中段，准噶尔盆地南缘， $N43^{\circ}27' \sim N45^{\circ}21'$ ， $E85^{\circ}01' \sim E86^{\circ}32'$ ，流域总面积 34050km^2 ，主要包括石河子市、玛纳斯县和沙湾县及周边团场。近 70 年来，流域围绕农业灌溉进行了大规模水资源开发利用措施，修建渠道引水灌溉、兴修水库以及渠道防渗等一系列水利工程措施，尤其是 1996 年膜下滴灌技术在玛纳斯河流域下野地灌区 121 团问世以来，水资源利用效率及农业生产力得到了极大的提高，20 年间流域耕地面积扩大 0.55 倍，有力地推动了绿洲化进程。目前，玛纳斯河流域已经变成我国第四大灌溉农业区和绿洲农耕区，工、农业经济均取得了巨大成就，成为我国荒漠变绿洲的典范。流域节水措施的大面积推广，在有力推动绿洲化进程的同时，也改变了流域水循

环自然变化的时空格局和水文系统的整体性，打破了原有脆弱的水文生态平衡，造成了河道下游水量减少、尾间湖泊干涸，生态环境质量下降，绿洲与荒漠之间的生态交错带被破坏，出现了地下水位下降、天然植被局部退化等生态环境负面影响。

玛纳斯河流域灌溉技术发展大致经历了四个阶段：①1949—1958 年，引用河水灌溉阶段。该阶段主要引用河水灌溉的新绿洲被相继开发，流域内的主要灌溉方式为大水漫灌和沟灌。②1959—1976 年，水库渠系联合灌溉阶段。流域实施开荒扩大耕地面积，自然河道径流引水已经不能满足灌溉需要，此时进入水库渠系联合灌溉阶段。③1977—1998 年，渠、库、井联合灌溉阶段。该阶段主要渠道也进行了防渗处理，推行畦灌和细流沟灌。④1999—2017 年，膜下滴灌阶段。膜下滴灌技术推广过程中滴灌系统代替农渠系统，耕地面积得到有效增加，同时减少了灌溉用水量。耕地内部的农渠、斗渠和排水渠失去原有功能而被填埋，流域水土资源利用效率得到了显著提高。流域水资源开发利用伴随着灌溉方式的进步而发展，目前流域水资源开发利用存在如下显著特点：

(1) 地表水资源开发利用率达 90% 以上。1959 年玛纳斯河东岸大渠修成，渠道利用率多年保持在 96% 以上。

(2) 高效节水灌溉面积达 90% 以上。2016 年流域现有灌溉面积 382 万亩，其中节水灌溉面积 362.3 万亩，约占 94.8%。

(3) 农业用水比例高达 90% 以上。自 1999 年以来，流域用水总量基本维持在 25 亿 m^3 ，农业用水比例虽然由 1990 年的 96.5% 下降到 2015 年的 94%，用水比例依然很高。

节水技术作为先进的农田灌溉措施，可以最低限量用水获取最大的农业产量和收益，还可以最大限度地提高单位灌溉水量的作物产量和产值，流域规模化节水措施作为重要的人类活动，在迅速推动绿洲化进程的同时，改变了流域水循环要素及水循环方式，使得

脆弱的水资源系统存在更大的不确定性，进而影响区域水文生态系统的稳定。因此，分析节水措施下流域水土资源开发过程及下垫面变化，阐明节水技术对流域水循环要素的影响，模拟节水条件下流域水循环过程，对节水条件下区域水资源持续利用及生态安全具有重要意义。

1.1.2 研究意义

人类活动干扰下区域水文生态效应会造成本就脆弱的干旱区水资源系统具有更大的不确定性^[1]。玛纳斯河流域具有降水量少、蒸发量大、径流时空分配不均等显著水资源特征，干旱的自然环境背景，使得区域生态环境极为脆弱。过去 70 年来，为了生存人类进行了高强度的人类活动，流域人工绿洲大面积扩张及生态环境发生显著变化，绿洲的进一步发展需要解决节水条件下水资源如何合理利用的关键问题^[2]。人工绿洲的扩张进程是与水资源开发利用水平密切相关的，节水工程措施支撑人工绿洲发展同时，干扰了流域原有的水循环过程^[3]。玛纳斯河流域农业产业的开发，改变了流域上、中、下游水资源的自然分配格局，一方面充分发挥了水资源利用的潜力，扩大了人工绿洲面积，创造了适于人类生存和农业生产的人工绿洲小气候；另一方面，人类不合理的开发活动，对水资源的过度开发，造成地域水量分配平衡、盐量分布平均、生态平衡稳定的状态被打破，对人类生存环境与经济社会发展产生一定的影响^[4]。因此，分析节水条件下玛纳斯河流域节水措施对流域水循环过程的影响对于合理调配人工绿洲用水以及下游荒漠生态环境需水具有重要意义。

(1) 分析节水条件下水土资源开发过程及下垫面变化影响因素，对于客观全面认识节水措施对流域生态环境的影响具有基础意义。

干旱内陆河流域水资源转化过程和生态水文效应具有特殊性和脆弱性，工农业生产规模的持续扩大以及区域人口数量的不断增加，水资源需求程度大幅提升，以节水措施为核心的水资源利用活动所导致的水资源重新配置过程较一般地区更为强烈，这一长期强烈的人类活动叠加在水文生态要素自然演变的基础上，影响着区域土地利用覆被变化演变过程，流域生态格局发生改变，因此研究玛纳斯河流域节水条件下水土资源开发利用过程及下垫面变化影响因素，对于全面客观认识流域节水措施对生态环境影响的解读具有基础意义。

(2) 分析节水条件下流域水循环要素变化规律，对于认识节水措施对流域水循环过程的影响具有重要意义。

水循环要素改变是水文生态过程变化的连接纽带和重要体现，也是评价水资源开发利用过程中用水效率的关键环节和重要基础，在水分循环和能量循环过程中发挥着重要作用。流域膜下滴灌技术的大面积推广改变了流域水循环要素规律，尤其是影响了农田土壤水分入渗及蒸散发环节。因此，深入了解节水条件下流域水循环要素变化规律是变化环境下流域水文循环研究的基础，对于流域水资源管理研究工作具有重要的基础意义。

(3) 深入了解流域水循环过程，通过水文模型刻画节水灌溉措施对流域水循环过程的影响，对于维持变化环境下流域水循环系统健康及经济社会可持续发展具有重要意义。

分析节水条件下水循环过程，构建水文模型表征流域下垫面和水文要素输入条件的时空分布变异性，结合节水条件下径流、土壤入渗、蒸发及下垫面变化的水文响应，充分理解节水条件下流域水循环过程的改变，模拟不同节水程度下流域水循环过程的响应，对深入认识流域水循环过程及节水条件下水资源的持续开发利用具有重要意义。

1.2 国内外研究现状及其分析

1.2.1 土地利用覆被变化研究进展

土地利用覆被变化是土地利用演变过程、功能结构和演变驱动力研究的基础^[5]。土地利用早期研究主要集中在植被覆盖调查与分类方面^[6-7]。最早开展大面积土地利用研究的是英国,1931—1939年英国统一将土地利用类型细分为林地、耕地、草地等九种类型^[8]。20世纪50年代以来,苏联科学家利用不同地区的综合开发规划情况,将土地利用类型进一步细化分为农业用地、非农业用地、林业用地、城市居民点用地和水利资源用地五大类^[9-10]。随后,欧洲各国家前后开展了土地利用的调查分析^[11-14]。1995年,全球变化人文计划和国际地圈与生物圈计划一起提出了《土地利用土地覆盖变化科学研究计划》的提议,土地利用覆被状况时空演变的描述与分析正式成为该领域重要研究方向和内容。美国密歇根大学 D Skole 教授和克拉克大学 B L Turner 教授首先从全球角度出发,定性研究宏观尺度上全球土地利用以及植被覆盖变化趋势,并从一定程度上分析了全球变化环境对土地利用和覆被变化影响^[15-16]。1994年, B L Turner 教授提出强烈人类活动影响下土地的利用及覆被变化是全球环境变化影响下的结果,同时也是全球气候变化的重要组成部分^[17];随着各国在土地利用研究领域各种新的技术手段和方法的逐步应用,各国学者对土地利用覆被变化研究也在不断深入和加强,比如地理信息系统技术、多分辨率及高分辨率的空间探测技术、全球卫星定位技术、遥感技术等^[6-7,15]。土地利用研究也从初级的信息整理及数据分析深入历史反演、成果应用等各个环节的更偏重于系统、综合与跨学科的集成研究^[18]。

我国学者一直对土地利用覆被变化相关研究非常关注^[19-25]。相关土地利用问题研究时间始于 20 世纪 30 年代,地理学家胡焕庸较为系统地调查了我国土地利用情况。自 20 世纪 90 年代末,随着新技术的发展,许多学者对我国不同区域土地利用覆被演变特征及驱动力进行分析研究,尝试分析和描述影响土地利用覆被变化的驱动力机制^[26-31]。陈钦峦等应用遥感资料分析了山西文峪河流域下垫面地理因素的方法及其对地表水资源估算的意义^[32]。顾大辛等从森林、农业、草原、工业化和都市化的变化对水循环中各个系统所产生的作用分析了土地利用对水文情势的影响^[33]。李秀彬分析了土地利用覆被变化在全球环境变化中的内涵以及在全球环境变化中发挥的作用,并全面分析了国外有关研究项目的进展与成果情况^[34]。陈育峰通过地理信息系统以及全国 NDVI 数据建立了土地利用覆被空间变化的梯度指标,通过主成分分析和因子分析,得出中国土地覆被演变过程以及土地利用空间差异存在季相变化^[35]。依据地球表面能量和水分平衡理论,周广胜等探讨了土地利用变化对于全球气候变化的响应研究^[36]。李克让等得出了中国土地覆被特征参数 NDVI 年际变化与区域气候因子变化的关系^[37]。史培军等应用美国农业部水土保持局 (Soil Conservation Service) 研制的小流域设计洪水 SCS 模型对深圳市部分流域进行了径流过程的模拟,通过土地利用类型、土壤质地分类、雨前土壤含水量、降雨量等因素探讨其对于降雨—径流过程的影响^[38]。角媛梅等反演了三江并流区土地利用/覆被变化过程并分析了其变化原因^[39]。王建群等利用现代遥感、地理信息系统等多种数字技术,获取秦淮河流域空间分布的下垫面信息和中间状态信息,细致地刻画了流域内的水文循环过程,建立了研究区域数字水文模型,定性和定量地反映各种土地利用变化对水资源系统尤其是对水量平衡和防洪情势的影响程度^[40-41]。张钰等从土地利用与覆被变化幅度、变化速率及动态度等角度,定量描述了

黑河流域上、中、下游及全流域总体土地利用与覆被变化特征^[42]。潘晓玲等借助 FVC 植被指数分析新疆维吾尔自治区生态景观格局时空分布特征^[43]。程维明等借助遥感和地理信息系统等,恢复了玛纳斯河流域过去不同时期的生态分布格局和动态演化过程^[2]。赵峰以遥感影像为主要信息源,利用 GIS 空间分析技术,定量分析了吉林省中部土地利用/覆被变化过程及其变化速率,分析了该演变过程对自然和社会经济的影响力^[44]。郭宗锋等结合西双版纳地形图,利用 GIS 和 1988 年、2003 年两期 TM/ETM 卫星影像解译获取的土地利用数据,通过分析模型参数 CN 值的变化来分析土地利用演变对径流的影响^[45]。李丽娟等分析了 LUCC 水文效应的研究方法,然后从土地利用/覆被变化的驱动力方面:造林与毁林、城市化过程与农业开发活动以及水土保持等,概述了 LUCC 水文效应的研究进展^[46]。葛全胜等研究了过去 300 年间我国土地利用与覆被情况,得出过去 300 年我国土地利用情况发生了较大变化,该变化趋势对陆地生态系统的碳循环产生了重要的影响^[47]。张琳采用遥感和 GIS 技术,利用 1980 年和 2000 年两期土地利用类型图,全面分析了海河流域土地利用现状特征及 20 年间土地利用动态变化趋势,阐明了海河流域 20 年来各类土地利用数量变化的幅度、速度和区域差异以及土地利用的时空变化过程^[48]。陈晓宏等针对人类活动导致的水文要素变异问题分析了该领域研究进展,提出了加强人类活动和气候变化对水文要素变异驱动机理及贡献分解的量化研究,加强变化环境下的水文要素时空分异特性的分析诊断^[49]。赵锐锋等对新疆塔里木河干流区土地利用/覆被变化过程以及生态环境效应进行了分析^[50];陈耀亮等应用 Bookkeeping 模型分析了三种 LUCC 方式对中亚森林碳库的影响^[51]。赵忠贺等从土地覆被类型转移和土地覆被碳密度变化两方面模拟了西藏生态系统碳蓄积动态变化,并进行归因分析^[52]。丛鑫等以济南市锦绣川流域为例利用 SWAT 模型模拟

流域径流过程, 通过遥感影像分析 1988 年、1996 年、2002 年、2009 年、2014 年夏季的系列土地利用和覆被变化, 利用率定后的模型模拟降水条件相同而下垫面条件不同时的流域径流过程, 定性评价流域土地利用和覆被变化的水文响应^[53]。贾静等通过构建分布式水文模型分析了秦皇岛地区土地利用/覆被变化对径流的影响^[54]。土地利用/土地覆被变化研究 1970 年前主要以土地利用现状调查和土地利用制图为主, 着重于土地用途的差异分析; 1970 年后随着遥感和计算机技术的发展, 主要以土地覆被为主的分类系统为主, 更多着重于土地类型的差异、影响及驱动力的分析。

1.2.2 变化环境下水循环要素研究进展

人类活动的剧烈影响, 造成了水文循环过程很大程度的改变^[55-58]。国际水文科学协会 (International Association of Hydrological Sciences, IAHS)、联合国环境规划署 (The UN Environment Programme, UNEP)、世界气象组织 (WMO)、联合国开发计划署 (The United Nations Development Programme, UNDP) 和联合国教科文组织 (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO) 等国际组织前后开展实施了一系列国际水文科学方面的合作项目或研究计划, 如国际地球生物圈计划 (International Geosphere – Biosphere Programme, IGBP)、国际水文计划 (International Hydrological Programme, IHP)、政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)、世界气候研究计划 (World Climate Research Programme, WCRP) 和全球水系统计划 (Global Water System Programme, GWSP) 等, 分别从全球、区域和流域等不同空间尺度探讨变化环境下的水循环影响机理和资源环境相关问题^[59]。我国也相应地积极开展了一系列的水资源领域相关科学研究计划, 围绕变化环境 (全

球变化和人类活动)对水循环的影响研究开展了大量研究工作,旨在探讨变化环境下的水循环过程及水资源演变机理,系统评价各种驱动因子的相对作用与贡献。这些研究工作对于我国水资源合理利用及规划管理,防灾减灾及保证国民经济可持续发展具有重要意义。

国内外围绕变化环境下水循环要素变化的监测及驱动力分析方面开展了大量的研究工作,如变化环境下水循环要素的演变规律及趋势预测,量化与分离气候变化和人类活动对水循环过程变化贡献率,其中多数研究集中于分析两者对单一水循环要素的影响^[49,60-61]。陈荷生考虑水资源条件和生物因素的关系,采用综合的分析方法,建立环境管理,水资源调控和监测系统以提高环境生态识别能力^[62]。蔡丽敏从环境水文学的观点出发,应用水量平衡理论对福建省的水循环进行探讨,分析了福建省水汽输送,降水、蒸发及径流特性、地理分布和年际变化趋势,阐明了人类活动对水循环的影响以及水循环过程诸要素之间的相互关系,并对水量供需平衡进行分析^[63]。冷疏影等在国家自然科学基金“21世纪核心科学问题”论坛提出研究区域变化环境对全球变化环境的影响和响应过程,其中包括人类活动对区域自然环境的影响机理^[64]。张娜等建立了多尺度的空间显式景观过程模型,对中国东北长白山自然保护区生态系统碳-水循环变量和生产力的时空格局进行了模拟,其中年平均蒸发量和蒸散量的空间格局是模型的主要两个输出结果^[65]。黄领梅对新疆和田河流域的气候、径流、耗水、人类活动的现状及演变规律进行研究,在此基础上分析了该地区的水量供需状况,确定了和田绿洲适宜的规模与灌溉面积^[66]。贾仰文等开发了黑河流域水循环系统的分布式模拟模型,从水循环过程和能量循环过程对模型各要素的过程模拟进行了阐述,其中水循环过程包括蒸发蒸腾、入参与径流、地下水运动、地下水流出和地下水溢出、坡面汇流与河