

气候变化与人类活动 对新疆玛纳斯河流域 水文生态过程影响研究

包安明 刘海隆 陈曦 王玲 等 编著



气象出版社
China Meteorological Press

气候变化与人类活动对新疆 玛纳斯河流域水文生态过程影响研究

包安明 刘海隆 陈 曦 王 玲 等 编著

内 容 简 介

本书以玛纳斯河流域为研究区,以气候变化与人类活动对新疆玛纳斯河流域水文和生态的影响为研究重点,以遥感和地理信息系统技术为支撑,基于水文模型模拟,探讨了气候变化对区域水文循环的主要要素(降水、蒸发和径流)的影响,建立了水灾害的快速监测与评估方法,并进行了系统研发与应用;在此基础上,分析了人类活动对绿洲水文及生态的影响,为合理高效用水提供理论依据。

本书适用于地理学、环境科学、水利工程、农业和遥感与地理信息系统应用等学科的大中专学生、教师和科研工作者使用,对相关行业的技术人员及管理者也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化与人类活动对新疆玛纳斯河流域水文生态过程
影响研究/包安明等编著. —北京:气象出版社,2013.5
ISBN 978-7-5029-5712-4

I. ①气… II. ①包… III. ①气候变化-影响-玛纳
斯河-水文环境-环境生态学-研究②人类活动影响-玛
纳斯河-水文环境-环境生态学-研究 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 100031 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:崔晓军 姜 昊

封面设计:博雅思企划

责任校对:华 鲁

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:406 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版

定 价:60.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:14.75

彩 插:9

印 次:2013 年 5 月第 1 次印刷

前 言

我国干旱区主要分布在新疆、甘肃、青海、宁夏和内蒙古等地,约占我国陆地总面积的 30%。因气候干旱、风大沙多、土地贫瘠,是我国生态环境最为严酷和脆弱的地区。由于自然和历史的原因,我国干旱区的社会经济发展极不平衡,尤其是农业生产水平较低,文化教育、基础设施相对落后,贫困加剧,人地关系矛盾非常尖锐。近半个世纪以来,在人口压力和全球气候变化的影响下,生态系统恶化,荒漠化迅速发展,环境退化日益严重,不仅危及当地人民的生存发展,加重贫困程度,更对我国区域协调发展和生态安全构成严重威胁。人们对水资源的依赖程度也不断增加,绿洲规模不断扩大,生态用水被生产和生活用水挤占,人类活动快速增加与自然系统用水减少的矛盾正在成为制约我国干旱区可持续发展的瓶颈。

西北干旱区内陆河流域是国家资源安全体系、粮食安全体系举足轻重的一翼和我国经济发展的重要支点,其发展事关我国现代化建设全局,具有重大的经济意义和政治意义。水资源是内陆河流域社会经济发展的命脉和生态环境变化的主导要素,在气候变暖的背景下,以积雪融水为基础的内陆河水资源系统非常脆弱和敏感,融雪水变化导致的水资源变异,正改变着水资源时空分布和水循环过程,极端水文事件发生频率和强度不断上升,水资源供需矛盾日益突出并成为制约区域发展的瓶颈。西北内陆河流域与中亚邻国同属西风环流区,水资源的形成区与消耗区相互交叠,跨境河流广布,该区域不断的水冲突及气候变化对水循环的影响成为国际关注的焦点。

干旱区降水少、蒸发强烈,极端干旱地区的蒸发能力是降水量的 60~80 倍,湖泊、河滩、湿地草甸等湿地面积大量减少,许多湖泊湿地出现萎缩甚至消亡。西北区主要湖泊大幅度萎缩并趋于干涸,如塔里木河下游的台特玛湖于 20 世纪 70 年代初干涸,玛纳斯湖和艾丁湖于 20 世纪 70 年代末干涸,水域面积曾超过 400 km² 的许多大型湖泊,如卓尔湖、西居延海在 20 世纪 70 年代初就已干涸而成为盐漠。根据统计资料,20 世纪 50 年代新疆全境天然湖泊面积约 97 万 hm²,到 2000 年湖泊面积减少到 58.89 万 hm²,50 a 间减少了约 38 万 hm²。导致干旱区湖泊水面及湿地减少的主要原因,除蒸发强烈外,过度的水资源开发利用是导致下游尾间湿地消失的另一个重要因素。

干旱区水资源主要形成于山区,而在盆地内进行开发利用,这种异地产水异

地利用的西北水资源特点,使得水资源在空间分配上具有可变性。在全球变化和人类活动加剧的大背景下,径流的年际和年内分配、水资源的开发利用规模和方式都发生了很大变化,导致水资源数量及时空分配的变化,并引起一系列的生态环境问题。内陆河流域水文循环过程及其生态效应是国内外研究的热点,对于干旱区水资源的有效开发和利用具有重要意义。

受地理条件的制约,我国干旱半干旱地区地表水资源表现出以融雪径流为主的特点,内陆河流域生态环境演变是绿洲演变的代表性问题。在全球气候变暖的背景下,气象要素波动引起的融雪径流季节性变化导致水资源时空变异,同时由于历史原因,西部干旱区水利基础设施不足和管理技术落后,使日益突出的水资源供需矛盾成为制约区域发展的关键因素。近年来,极端天气气候事件发生频度和强度急剧增加,导致了干旱区的自然灾害频发,制约了干旱区绿洲经济的可持续发展。如何定量评估气候变化对于干旱区水资源的影响及有效评估灾后损失,已成为目前干旱区水文生态过程研究的焦点之一。

干旱区内陆河产流区主要集中在高海拔山区,人类活动集中的绿洲区是水资源消耗的主要地带,荒漠区则是水资源的自然耗散区。内陆河流域特殊的产汇流和耗散区空间分布,使得流域内水平衡状态易受人类活动影响,在自然条件下,盆地间地下水资源分布达到自然平衡,并维系盆地内的生态环境平衡。历史上干旱区的人类活动基本是“依水而居”,人类大规模开发绿洲之前,自然绿洲水草丰美,呈现出“风吹草低见牛羊”的西部风情。近 50 a 来人类对天然绿洲索取加剧,生产、生活用水剧增,生态用水被大量挤占,天然绿洲面积急剧减少,导致洪水、沙尘暴、干热风等自然灾害频发,严重影响了人居生活质量。随着水资源开发利用,人工绿洲不断扩大,打破了原来的平衡,各类生产用水的增加必将导致天然生态系统的需水不能得到满足,也势必导致自然生态系统的退化与生态服务价值的降低。地下水位下降、土地退化、生态环境恶化等一系列问题,使得人类自身的生存与发展空间受到越来越强烈的威胁。定量评价人类活动对绿洲水文及生态环境的影响,对于干旱区的可持续发展具有现实意义。

气候变化是否会大幅度改变内陆河水循环与水系统? 极端气候、水文事件可否引发内陆河水系统崩溃? 如何适应气候变化提出水资源调控对策? 如何调控水资源以维持绿洲可持续发展? 针对以上问题,本书进行了尝试性分析。

玛纳斯河流域位于新疆准噶尔盆地西南部,该流域既有中温带大陆性干旱气候特征,又有垂直气候特征,流域内山区是产流区,出山口以下为径流散失区,是典型的干旱区内陆河流域。夏汛主要表现为融雪性洪水,出山口以下的水资源受人类活动影响很大,现全流域地表水引用量为 16.2 亿 m^3 , 水库调节水量为 5.17 亿 m^3 , 地下水开采量达到 4.4 亿 m^3 。玛纳斯河流域面积 1.98 万 km^2 , 其中流域

内山区面积 0.515 万 km², 平原面积 1.465 万 km², 流域内绿洲总面积约为 1.08 万 km², 耕地面积扩大到 28 万 hm²。流域内现有总人口 98 万人, 是新疆重要的粮棉基地和经济开发区之一。

本书分为上、下两编, 共 14 章内容。上编主要研究气候变化对玛纳斯河流域水文过程的影响, 其中第 1 章由包安明和王玲完成; 第 2 章由包安明和程维明完成; 第 3 章由陈曦和李琴完成; 第 4 章和第 5 章由包安明和陈晓娜完成; 第 6 章由陈曦和于梅艳完成; 第 7 章由包安明、张红利和刘海隆完成; 第 8 章由包安明和刘海隆军完成。下编主要分析人类活动对绿洲水文生态的影响, 其中第 9 章由包安明、程维明和刘海隆完成; 第 10 章由包安明和梁立功完成; 第 11 章和第 12 章由王玲和刘海隆完成; 第 13 章和第 14 章由包安明、王玲和柳梅英完成。全书由包安明、刘海隆、陈曦和王玲负责统稿和校稿, 胡汝骥、王亚俊、王新乐和李恒山等参加本书的整理和编辑工作。

本书是在“十一五”国家支撑计划项目“水资源与水灾害空间信息服务系统研发”(2007BAH12B03)、“十二五”国家支撑计划项目“新疆重大突发事件应急响应技术与应用”(2012BAH27B03)、国家自然科学基金项目“地形地貌对山区降水的影响——以开都河流域为例”(41161013)与国家外专局-中国科学院“干旱区特殊生态过程样带研究创新团队”项目的共同资助下完成的。

本书的主体内容来源于课题相关研究报告, 部分内容来源于研究生毕业论文。书中少部分阶段性成果已在国内外刊物上发表。本书在写作过程中参考了国内外研究论文和相关网站资料, 在此对相关作者表示衷心感谢。虽然作者试图在参考文献中把所引参考资料全部列出并在文中标明出处, 但难免有疏漏之处, 望能谅解。本书虽几易其稿, 但作者水平有限, 不妥之处仍在所难免, 恳请读者批评指正。

包安明
2013 年 2 月

目 录

前言

上编 气候变化对玛纳斯河流域水文过程的影响

第 1 章 绪论	(3)
1.1 干旱区水文过程特征	(3)
1.2 干旱区水文过程研究现状	(3)
1.3 干旱区水资源开发利用面临的主要问题	(9)
第 2 章 玛纳斯河流域基本特征	(13)
2.1 地质构造及地貌特征	(13)
2.2 土壤和植被特征	(15)
2.3 气候特征	(19)
2.4 水文水资源特征	(22)
2.5 土地利用特征	(28)
第 3 章 玛纳斯河流域蒸散的时空变化	(33)
3.1 蒸散估算模型简介	(33)
3.2 蒸散的遥感反演模型研究及验证	(39)
3.3 蒸散反演	(45)
3.4 蒸散时空分布	(47)
第 4 章 气候波动条件下流域固态水资源变化	(50)
4.1 时间序列分析与积雪遥感数据处理	(50)
4.2 近 50 a 流域气候变化特征	(53)
4.3 流域积雪时间变化特征	(55)
4.4 流域积雪空间变化特征	(58)
4.5 流域积雪时空变化的成因分析	(62)
4.6 流域冰川变化特征	(64)
第 5 章 玛纳斯河流域径流量变化及其过程模拟	(66)
5.1 基于 SRM 模型的流域融雪径流模拟	(66)
5.2 改进的 SRM 模型与应用	(78)
第 6 章 不同气候情景下的流域水资源变化趋势预测	(84)
6.1 气候情景与气候变化模拟模式	(84)
6.2 流域气象数据预处理	(86)

6.3	不同气候情景下雪盖及径流过程模拟	(88)
第7章	流域水文灾害模拟与评估	(100)
7.1	洪水灾害评估研究进展	(100)
7.2	洪水遥感监测原理与信息提取	(103)
7.3	流域洪水演进过程模拟	(106)
7.4	流域洪灾经济损失评估	(111)
7.5	流域洪灾损失评估模型	(113)
7.6	流域洪水灾害损失评估	(116)
第8章	流域水资源与水灾害管理系统的理论与实践	(118)
8.1	系统目标与结构	(118)
8.2	系统总体设计	(119)

下编 人类活动对绿洲水文生态的影响

第9章	玛纳斯河流域绿洲形成与演变	(127)
9.1	绿洲的定义	(127)
9.2	玛纳斯河流域绿洲的形成与演变	(128)
第10章	玛纳斯河流域地下水资源评价	(131)
10.1	水文地质条件	(131)
10.2	地下水资源及可开采量的计算与评价	(135)
第11章	土地利用与覆盖变化对流域绿洲水资源利用的影响	(151)
11.1	玛纳斯河下游绿洲土地利用类型特征	(151)
11.2	土地利用变化对水资源利用的影响	(152)
第12章	节水灌溉对绿洲灌区地下水的的影响	(156)
12.1	水资源转化研究方法	(156)
12.2	灌区特征与数据准备	(157)
12.3	节水灌溉对地下水的的影响	(159)
12.4	盐碱土分布及水资源分布对其成因的影响	(164)
第13章	绿洲盐碱化遥感反演及其影响因素	(174)
13.1	玛纳斯河流域土壤盐分光谱特征分析	(174)
13.2	玛纳斯河流域土壤含盐量及其影响因素分析	(178)
第14章	盐分胁迫条件下绿洲生物量时空变化	(185)
14.1	基本概念	(185)
14.2	生物量估算模型	(186)
14.3	统计模型和生物量遥感模型原理	(188)
14.4	生物量观测与地物解译	(190)
14.5	绿洲区作物生物量遥感估算	(198)
14.6	绿洲作物生物量与盐分胁迫的关系	(205)
参考文献		(212)

上编 气候变化对玛纳斯河流域水文过程的影响

第1章 绪论

1.1 干旱区水文过程特征

我国干旱区面积约占陆地面积的 $1/3$, 其中平原地区年降水量一般在 150 mm 以下, 不能产生径流。但是在干旱区周沿分布着像阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等高大山体, 能够截获较多的降水, 最高年降水量可达 $1\ 000\text{ mm}$ 以上, 这些降水产生了大量的径流, 发育着众多的河流。河川径流是干旱区极其宝贵的自然资源, 也是干旱区经济发展的主要制约因素。

我国干旱区与世界上大多数干旱区相比, 其河川径流有两大特点: 一是除了雨水及地下水补给外, 还有高山冰雪融水和季节性积雪融水的补给, 这种河川径流补给来源的多样化, 使得河川径流具有年径流变差系数小、径流量高度集中于夏季及洪水成因类型复杂等特点; 二是水文的垂直地带性规律显著, 我国干旱区的河流除额尔齐斯河以外, 虽都同属于内陆河流域, 但由于地域广阔, 各地自然条件不尽相同, 河川径流的水文情势也有差异(汤奇成 1985)。

干旱区各水文过程的特点与湿润地区有较大区别, 相对重要性随时空具有很大变异性。干旱区水循环过程的主要特点有: ①降水总量不多, 但强度往往很大, 并且时空分布不均匀; ②地表植被稀疏, 截留和集水效应造成水分的空间分布更加不均匀, 直接蒸发损失较大; ③干旱区复杂的地表状况, 包括裸沙地区、结皮层地区和石质地区及灌丛地区等, 对水文过程的影响各异; ④干旱区水分蒸发不仅决定于大气蒸发能力, 更主要的是取决于地表水分的供给情况(王帅等 2008)。

1.2 干旱区水文过程研究现状

1.2.1 全球气候变化

21 世纪, 全球气候变化及其不利影响正日益受到国际社会的普遍关注。工业革命以来的人类活动, 尤其是发达国家在工业化过程中大量消耗能源, 导致大气中温室气体浓度增加, 引起全球气候近百年来以变暖为主要特征的显著变化。IPCC(2007a)第四次评估报告指出, 全球地表平均温度近百年来(1906—2005 年)升高了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中大部分的升温发生在 20 世纪的后 40 a。而在不同区域、不同季节升温幅度也不同, 陆地升温比海洋明显, 高纬度升温比低纬度明显, 冬季比夏季明显, 最低温度升温幅度比最高温度升温幅度明显。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的研究, 温室气体[主要包括二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等]浓度升高是全球变暖的关键原

因;工业革命前全球大气 CO_2 浓度为 280 ppm*, 而当前已达到 356 ppm, 每年约增加 2 ppm。人类每年往大气中排放 1 Gt 碳, 大气 CO_2 浓度会增加 0.47 ppm。当大气温室气体浓度达到 400 ppm 时, 温度会增加 1.7~2.3 °C; 当大气温室气体浓度达到 500 ppm 时, 温度会增加 1.9~4.0 °C; 当大气温室气体浓度达到 600 ppm 时, 温度会增加 2.2~5.0 °C。

全球气候变化是引起气候要素异常变化的主要原因(Folland 等 2001)。IPCC(2007a)研究表明, 气候变化引起了形成水资源的关键气象和水文要素的变化, 如温度、降水、辐射、积雪和冰川消融等。大量气候模式对水循环的预估结果一致表明, 随着海温的上升, 未来热带气旋(飓风或台风)可能将变得更强, 并伴随更强的降水; 同时多数模式的预估也表明, 由于全球变暖, 冰雪盖和冰川融化, 冰湖增加, 多年冻土面积明显减小和收缩, 且融化深度增加(Bates 等 2008)。随着全球变暖, 大部分高纬度地区降水量增加, 异常降水事件和频率也相应增加(Bates 等 2008), 进而导致以融雪径流为基础水源的内陆河流域水循环的异常变化。

1.2.2 气候变化对内陆河流域融雪径流过程的影响

积雪对气候环境变化十分敏感, 大范围积雪对全球变暖具有明显的反馈响应, 特别是季节性积雪所产生的融雪径流, 既是最活跃的环境影响因子, 也是最敏感的环境变化响应因子(Fichefet 等 1999, 高卫东 等 2005)。区域的积雪过程与分布取决于地形地貌、植被覆盖、风等因子及其之间的相互作用。

在我国西北干旱区, 山区降雪为内陆河流域提供比较丰富而稳定的融雪径流, 山区降水与积雪融水是干旱区内陆河流域的主要水源(Gao 等 1992, 程国栋 等 2001, 陈梦熊 2001)。对于中高纬度和高海拔地带季节性降雪和融雪的流域, 温度变化对流域融雪径流水资源及其规划管理的影响远比降水变化的影响要大(Barnett 等 2005), 温度不仅影响降水形式(雨或雪)和积雪融化速率(Nijssen 等 2001), 还将造成积雪在春季提前融化(Horton 等 2006), 从而减弱积雪作为蓄水的功能和年内径流的分配(Barnett 等 2004, 2005; Stewart 等 2004)。受全球气候变化的影响, 我国西北干旱区出现了较大幅度的异常温度变化和降水过程变化(施雅风 等 2002, 翟盘茂 等 2003), 这一趋势必将对区内的积雪消长过程带来不确定的影响。

融雪径流模拟是国际水文学富有挑战的研究, 早期的融雪模拟研究主要集中于站点上的积雪水热过程理论的创立和不同区域条件下积雪水热过程的模拟(Martinec 等 1998)。近年来, 以能量过程模拟为核心的空间分布积雪水热过程模拟成为模型发展的主要方向, 如 Snow Model(Liston 等 2006)、ALPINE 3D(Lehning 等 2006)等模型。这些模型开始考虑地形及周边环境在积雪演化中的作用, 越来越注重模拟结果的尺度转换及气候变化的模拟评估。然而, 所有模型在融雪汇流时均采用单点直接向栅格尺度转换的参数化方案, 虽然单点积雪水热过程模拟很好, 但不同下垫面条件下积雪水热过程和雪水汇流就有了很大的区别。目前大多数融雪径流水文模型的汇流过程仍然沿用经典的汇流方法, 对冻土与积雪的相互作用、下垫面性质、冻土及季节性冻融土壤等在汇流中的作用考虑不足, 模拟效果都很不理想(Liston 等 2006, Horton 等 2006)。因此, 如何将单点上的雪—热—水过程模拟扩展到流域上, 如何建立全新的融雪水的汇流模式成为融雪径流模拟的最大挑战。

* ppm: 此处指每 100 万个干燥空气分子中所含温室气体的分子数目, 下同。

1.2.3 山区积雪空间动态遥感监测

自20世纪60年代遥感技术问世以来,积雪遥感为雪情监测提供了重要的基础数据,积雪监测成为遥感应用的一个重要方面。目前,遥感技术已经成为一种有效的积雪观测手段,以其多平台、多时相、多谱段、多尺度等优势,在积雪监测中发挥着重要作用。不仅能及时、有效地监测全球积雪覆盖信息,同时可以监测到雪深、雪水当量等积雪参数。

全球冰雪覆盖面积的年变化非常明显,就北半球而言,1月冰雪覆盖面积最大,2和3月变动不大,4月大陆冰雪覆盖面积显著退缩,此后随着太阳辐射的增强,冰雪面积逐月减少,到9月初达到全年最低值(Hall等2007)。大范围的积雪主要分布于中高纬度的山区,其中大部分地区气象站点稀少,实地观测难以进行,无法实时、全面、准确地掌握积雪的分布状况,尤其是无法掌握大陆范围乃至全球的积雪覆盖信息,因此早期对积雪的研究也相对较少。

1.2.3.1 积雪遥感数据

可见光卫星遥感数据用于积雪监测与空间分布制图的研究已有30多年的历史。积雪的光谱特征比较独特,在可见光和近红外波段具有高反射率,这与除云以外的多数其他自然地物有明显的不同;而在 $1.55\sim 1.75\mu\text{m}$ 的近红外波段上,云和雪的反射率有较大的差异,在这一光谱范围内,云反射来自太阳的辐射,而积雪吸收太阳辐射,因此利用遥感数据在可见光范围内进行积雪监测是可行的。Hall等(1995)基于雪的这种特性,提出了“SNOMAP”方法并对Landsat TM (Thematic Mapper)资料进行积雪提取,达到了很高的精度。归一化差分积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI)是SNOMAP算法中的核心内容,也是目前光学遥感提取积雪信息的通用方法,能有效地分辨雪和许多其他地表,对于阳光下和阴影下的雪都能很好地监测。MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)积雪制图算法是在分析TM影像的基础上,采用阈值技术划分积雪和其他目标,基于归一化差分积雪指数(NDSI)和一个近红外通道的反射率进行判别。

AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)是持续观测时间最长、应用最为广泛的光学传感器之一,也被用作积雪监测。最早使用AVHRR进行雪盖制图都是采用人工解译的方法,使用其第1波段数据划分积雪区域。基于积雪在可见光范围内的高反射率,比较容易将其与地表其他覆盖物区分开。为了有效识别云层,基于积雪和云层在红外区域的反射率差异,使用波段3(A) ($1.58\sim 1.64\mu\text{m}$)进行云检测。随着对云、雪特性的进一步了解及计算方法的发展,AVHRR雪盖制图开始使用多阈值检测方法自动识别雪盖(Gesell 1989, Droz等2002, Baumb 1999)。积雪在通道1的光谱特征明显,反射率很高,其他地物(除云、冰和沙漠以外)的反射率一般低于30%,因此,采用阈值法将积雪(包含云)与其他地物分开。对于云和雪的区分主要是基于亮温,通常情况下云顶温度比雪表面温度低,特别是高云尤为明显,一般通过对比分析通道3和通道4的亮温特征,采用阈值法实现云和雪的区分。

1.2.3.2 积雪遥感参数

积雪深度是研究积雪水文效应的重要参数,也是天气和水利数值模式运行的必要参数,一直以来都是由地面气象站观测得到,但气象站布点稀少,难以提供当前中尺度模式所需的积雪深度分布数据。随着积雪微波遥感技术的发展,这一问题得到了很好的解决。美国科罗拉多大学及美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的研究

人员,利用1978年升空的Nimbus-7航天飞机携带的多波段微波辐射仪(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)1978—1987年内观测的亮温,研究出全球雪深监测模型。在此之后,许多学者根据不同地区林地覆盖率、积雪密度、雪粒大小等参数,对上述模型进行了一些修正。另外,用于积雪研究的微波遥感数据,目前主要有合成孔径雷达(Spaceborne Imaging Radar-C, SAR-C),美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)的微波成像专用传感器(Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I),以及EOS系列Aqua上先进的微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing, AMSR-E)等。

在目前遥感观测手段的基础上,国外对积雪的研究侧重于以下方面:①利用可见光遥感数据和微波遥感信息,大范围、全天候地监测冰川和积雪的空间分布特征;②在全球范围内,收集冰川和积雪等方面的数据,用于区域或全球气候变化的研究。国内在积雪遥感制图方面的研究始于20世纪80年代,并取得了一些成就,如利用AVHRR、MSS(Multispectral Scanner)、TM、SAR(Synthetic Aperture Radar)数据进行积雪遥感制图方法的研究与应用(李震等1996,李新等1997,王建等2001a);利用AVHRR数据进行雪灾的监测和评估(冯学智等1997)。梁继等(2007)提出了一种基于NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)背景场提取MSS雪盖面积的新方法,提高了积雪监测的空间分辨率,同时也将积雪遥感制图延续到20世纪70年代,为长时间序列且小尺度上积雪消融的研究提供了基础。

1.2.4 区域水循环模式及融雪径流模型

1.2.4.1 区域水循环模式

在全球气候变化下,水文学家和水资源管理者越来越关注气候变化在大区域上对水循环过程的影响,希望获得在大区域尺度上空间分辨率精度较高的水文参数(Arnell 1999)。然而,由于用来直接估算水文参数的区域数据几乎不存在,目前区域和GCM(General Circulation Model)中的水文模块难以有效地描述水文过程,而流域水文模型在尺度上难以满足气候变化对区域水循环影响的研究需求,因此,发展一种尺度介于GCM和流域水文模型之间的区域水循环模式就显得格外重要(Jin等2008a)。

区域水循环模式目前主要通过水文参数区域化建立,即利用统计方法将有资料区或小流域的模型参数部分或完全转换到更大尺度的流域,或是从无资料区的物理属性信息推测得到(Bloschl等1995)。参数区域化方法有代表流域法、空间插值法、聚类法和回归法等(Jin等2008b)。其中回归法最常用,但其有两个局限性:一是估算得到的参数精度差;二是因为有些参数值与物理测量值之间的相关性差而难以估算(Abdulla等1997,Gotzinger等2006)。虽然水文学家应用各种统计方法试图解决区域参数问题,但都未能在两种局限性上取得突破,区域模拟效果不尽理想(Burn等1993, Servat等1993, Vandewiele等1995, Post等1999, Fernandez等2000),其原因是由于缺乏模型校正和验证所需要的数据。目前成功的流域水文模型的区域化较少见,原因是多数情况下模型参数和流域性质的相关性低(Merz等2004)。例如,Braun等(1992)将HBV模型应用到瑞士不同地方的五个流域,结果表明流域特征和模型参数之间没有相关性。有两个原因可以解释模型参数与流域属性之间差的相关性及因此造成的流域模型在无资料区的不适用性(Merz等2004):一是所选用的流域属性可能与流域响应不是密切相关;二是校正参数值可能具有明显的不确定性,结果造成校正模型参数与流域属性

之间的关系的不确定(Gottschalk 2002)。随着遥感技术的发展,区域上的土壤水分、蒸散、降水、温度、热辐射、土地覆被等水文信息都能够被较好地反演(Gotzinger 等 2006),而且空间和时间精度越来越高,这为建立真正具有物理意义的区域水循环模式奠定了基础(Merz 等 2004,Jin 等 2008b)。流域水文模型的区域化并不简单,尤其是无水文测站资料的区域水文模拟是当前水文研究中关键而突出的科学难题,而基于物理意义的区域水循环模式更待建立(Sivapalan 等 2003)。

迄今为止,流域模型的区域化和基于物理结构的区域水循环模式仅取得了有限的进展(Merz 等 2004)。在区域化方法、合适水文物理属性的选择及模型参数的不确定性分析、区域尺度水循环物理结构模式、遥感水文参数反演等方面还有诸多科学难题需要深入研究。具体到干旱区的研究,由于流域属性差别大、大范围水文气象资料稀少,在干旱区建立一个有效的区域水循环模式显得尤为迫切,这对研究全球气候变化对水系统、生态系统等的影响及采取相应的应对策略具有重要的科学意义。

1.2.4.2 融雪径流模型

融雪模型分为概念模型和物理模型。事实上近年来发展的物理模型和概念模型比较多,SRM(Snowmelt Runoff Model)、TOPMODEL(TOPography based hydrological MODEL)、SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes)、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)等都是不错的模型。Alpine3D 高分辨率的地表过程模拟模型、SNOWPACK 模型(Nishimura 等 2005)等也应用广泛。其中 SRM 模型已在 25 个国家的近 80 多个流域得到应用(Schaper 等 1999,Gomez-Landesa 等 2002,Li 等 2008)。SWAT 模型适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件的复杂大流域,并能在资料缺乏的地区建模。夏军(2002)等将 SWAT 模型成功地用于马连河各子流域径流过程的模拟;王中根等(2003)也曾探讨了 SWAT 模型的水文学原理和模型的结构及其独特的分布式运行控制方式,并成功地应用于西北寒区(黑河莺落峡以上流域)的日径流过程模拟。

各种模型由于理论基础不同,在实际应用中效果也有差别。根据流域本身的条件选择合适的模型是融雪模拟中比较重要的环节。总体而言,物理模型在实际应用中经常受到参数获取的限制。比如,需要大量的观测数据以便进行模型的标定和验证,但是在很多流域要获取足够的数据是很困难的,于是在积雪模拟过程中常采用经验性的参数化方案(Anderson 等 1977)。然而,任何准确的参数化方案都不能解决基本观测数据缺失的问题,如雪深、风吹雪量等。相对过程描述复杂的物理模型而言,概念模型需要的参数比较少,近年来在监测资料不足的地方应用相当广泛。

1.2.5 干旱区生态水文过程研究

生态水文过程涉及径流和侵蚀等地表过程的水平通量,以及蒸发、入渗、渗漏、补给和蒸腾等水文过程的垂直通量(Wilcox 等 2005),其核心是生物与水分之间的关系(Baird 等 1999)。水文过程控制着基本的植被分布格局和生态过程(Rodriguez-Iturhe 2000),植被作为水循环中最活跃的调节者,通过根系吸收水分及叶片蒸腾水分而参与水循环(Nobel 1991,Kramer 1993)。

土壤水分是连接气候波动和植被动态的关键因子,不同植被的蒸散量随土壤湿度而变化(赵文智 等 2001)。内陆河流域的绿洲和荒漠区,以降水贫乏且变异大为特征,干旱区植物具

有适应这种环境与水分条件的特殊生态功能与生理机制(Evenari 1985, Rodriguez-Iturhe 2000)。研究表明,在水分胁迫下,不同的群落都有一些相同的响应方式,植物根系的深度和年降水量影响着土壤水分动态和植物水分胁迫程度。我国对于干旱内陆河流域的生态水文研究主要集中于河源山区的森林生态水文过程,干旱区典型植物的水分利用机理、水分胁迫的响应特征等尺度相对微观的生态水文,以及不同景观带植被生态系统的蒸散及其年内变化规律等方面(Xu 等 2007)。

由于生态过程和水文过程都有各自的尺度域,生态水文研究中的水文尺度和生态尺度在时空域上的匹配和转换已成为一个难点。在小尺度上不同时间植物对气候变异的响应机制(Kremer 等 1996)和在小流域尺度上植被如何影响干旱区径流(Wainwright 1996)的试验研究较容易实施。对于干旱区大尺度生态水文过程而言,尤其在研究小尺度的生态水文过程与大尺度上植被-土壤-大气水汽传输的相互作用,以及水文过程对全球变化的反馈机制等方面具有很大的挑战性(Mulligan 2006)。因此,在长时间尺度上,研究干旱区植被群落演替过程与气候变化的关系、山区植被产流关系、荒漠绿洲防护林体系的水资源代价及维系天然绿洲的生态需水等生态水文问题成为干旱区生态水文学研究的重要命题(赵文智 等 2008)。

1.2.6 内陆河流域水循环时空变异与气候变化的关系

全球和区域水循环过程与气候变化有着密切的关系,尤其与温度、降水和辐射平衡的变化紧密联系。评估气候变化对水循环的影响通常采用探讨水文过程变化的规律来实现(Caballero 等 2007)。目前还无法确定全球气候变化对水文循环的影响程度,但可以确认气候变化正在加速水循环(Trenberth 等 2003, 丁一汇 等 2006)。近几十年的陆面观测表明,大尺度水循环受到气温升高的影响,包括降水形式、降水强度和频率、雪盖面积、冰川冻土融化与径流均发生了较大变化(Bates 等 2008)。20 世纪 80 年代以来,我国西北干旱区降水量也有不同程度的增加趋势(程国栋 等 2006)。蒸发皿观测资料显示,在过去的 50 a,面上的蒸发力呈稳步减少的趋势(Hobbins 等 2004),这与预期的因温度升高导致的蒸散增加不一致(Stocker 等 2005)。土壤水分在影响潜热和显热通量的蒸散分配方面发挥着重要的作用,并影响地表径流的产生与地下水的形成(Hlavinka 等 2008)。有研究表明,夏季降水对地表过程有很强的依赖性,特别是在区域极端事件的模拟中(Gutowski 等 2004)。通过对 600 多个站点观测资料的分析发现,前苏联、中国和美国中部表层 1 m 土壤水分呈增加趋势,模型分析发现,降水与气温的增加量不能够解释这种现象,而太阳辐射的变化与降水形式的改变可以解释大部分的趋势(Li 等 2007)。Thodsen(2007)和 Steele 等(2008)在丹麦和爱尔兰流域的研究结果表明,气候变化造成的径流过程变化规律具有明显的流域特征,不同流域的径流对于相同的降水事件的响应不同,响应迅速的流域更容易形成异常洪水等水文过程。由于地形地貌和区域尺度等因素的影响,区域水循环要素对气候变化的响应关系会有很大的不同(Zhang 等 2001, Thodsen 2007)。

内陆河流域极端洪水形成的气象因子不仅有暴雨,还有急剧升温,因而洪水有暴雨型、急剧升温造成的融雪型、暴雨与急剧升温并发的综合型、高山冰碛湖垮坝型(张家宝 等 2002b)。在全球温度上升和北半球中高纬度地区降水增加这一大的背景下,土壤水分在冬季将增加、夏季将减少(Bates 等 2008)。气候变化促使冰川运动与积雪分布产生相应的波动(Chen 2005),温度升高意味着雪盖将减少并且冻融提前,影响春汛发生的时间和强度(Barnett 等 2005),并

导致河川径流季节性分配特征发生改变,冬季流量将增加,而夏季流量将减少。未来极端降水事件强度增大、重现期缩短(Trenberth 等 2003, Thodsen 2007)等特点,将导致极端洪水事件加强(Roy 等 2001, Caballero 等 2007)、最小流量进一步减少、枯水季提前、枯水期延长等(Douville 等 1999),给河川径流变幅带来异常变化(Nash 等 1991, Steele 等 2008)。同时,温度升高使得植物生长季与无霜期增长,将引起植物在海拔与纬度上的迁移(Metznal 等 2006),从而改变原有的蒸散时空格局。

由此可见,气候变化正极大地改变着我国西北干旱区内陆河流域水循环过程,大量观测事实已经证明了这一现象,但气候变化对内陆河流域水循环影响的机理尚待阐明。

1.2.7 全球气候变化下水资源脆弱性研究

气候变化与水资源的脆弱性研究由来已久,早期的研究侧重于气候变化和供水之间的相互关系(US Academy of Science 1977),以及水文水资源系统对气候变化的敏感性(WMO 1987)。自 IPCC 在 1988 年成立以来,全球气候变化对水文水资源的响应及水资源系统的脆弱性成为 IPCC 的重要研究内容(IPCC 2007)。其他一些国际组织(如国际气候变化影响、评估与适应组织)及科研机构在国家、区域、流域层面上评价了水资源对气候变化的脆弱性及应对策略(Leary 等 2008)。

我国水资源最脆弱地区主要是由于用水与供水严重失衡、径流年际变化大及蓄水工程不足等所导致,并表现出对降水的敏感性远大于气温,西北多个省份的水资源脆弱性将进一步加剧(王国庆 等 2005)。对于气候变化的响应,北方地区显得更为敏感(刘昌明 2002)。目前我国大多数研究集中在水资源脆弱性评价指标体系的建立上,尚未将水资源供给、需求、管理的变化等诸多因素纳入评价体系中(唐国平等 2000)。最近有些研究综合考虑了水文、气候、用水冲突和水资源管理等因素来评价水资源的脆弱性(Yin 等 2008)。

由于系统的复杂性和非线性,同时缺少对脆弱性关键过程及其相互作用的研究,多数研究仅考虑线性关系和一一对应的变量来定量评价脆弱性,结果导致气候变化引起的资源脆弱性评价结果存在很大的不确定性(Patt 等 2005),建立的指标体系呈现不可比较性(Polsky 等 2007)。IPCC(2007)报告中提出的关键脆弱性概念及识别和选择关键脆弱性的标准,为科学评价水资源对全球气候变化的脆弱性提供了重要的指导依据。

由此可见,为降低脆弱性评价的不确定性,使建立的方法具有可比性和更广泛的适用性,脆弱性研究的一个主要任务是搞清楚气候变化对水系统影响的机理,识别决定脆弱性的关键过程和环节,分析水资源量与可供水量和需水量之间的动态及制约关系,简化所研究的系统,建立具有可比性和推广性的关键脆弱性模式。

此外,伴随着全球逐渐变暖,气候突变事件的频度和强度都在增加,而针对快速突变的气候变化的脆弱性研究极少(Arnell 等 2005),因此在气候突变下水系统的脆弱性也是一个需要优先开展的研究(Editorial 2008)。

1.3 干旱区水资源开发利用面临的主要问题

在我国西北内陆干旱区,生态系统由人工绿洲和天然绿洲两部分组成,水是决定绿洲发生、发展、变迁的根本原因,直接关系到区域社会、经济与生态环境的协调发展。水资源的开发