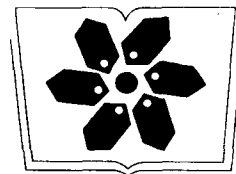


中国西北干旱区 冰雪水资源与出山径流

康尔泗 程国栋 董增川 主编



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

中国西北干旱区 冰雪水资源与出山径流

康尔泗 程国栋 董增川 主编

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书是“九五”国家重点科技攻关计划项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”中“冰雪水资源和出山口径流量及其变化趋势预测研究”专题的成果。书中论述了作为完整冰川系统的西北干旱区“小冰期”和近数十年来的冰川变化量及其地区分布规律；建立了年际波动完全协调一致的微波卫星遥感积雪时间序列和地面气象台站积雪时间序列，并发现了其长期变化的特殊规律；揭示了西北干旱区出山径流的形成和变化规律；建立了基于高山冰雪冻土带和山区植被带的山区流域水文模型，模拟了出山径流对气候变化的响应，进而预测了在气候变化情景下出山径流的可能变化趋势。

本书可供从事气候、全球变化、水文、水资源、环境和持续发展等有关学科的教学、科研人员以及从事西北干旱区未来经济持续发展的决策人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流/康尔泗,程国栋,董增川主编.
-北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010190-1

I. 中… II. ①康…②程…③董… III. ①干旱区-冰-水资源-研究-西北地区②干旱区-雪-水资源-研究-西北地区③干旱区-地面径流-水资源-研究-西北地区 IV. TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 011837 号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2002年7月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—800

字数:470 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)



GLACIER – SNOW WATER RESOURCES AND MOUNTAIN RUNOFF IN THE ARID AREA OF NORTHWEST CHINA

Editors in Chief: Kang Ersi Cheng Guodong Dong Zengchuan



Science Press, Beijing China

2 0 0 2

本专著研究专题名称及承担单位

项 目 名 称：西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究
专 题 名 称：冰雪水资源和出山口径流量及其变化趋势预测研究
承 担 单 位：中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
河海大学

主持及参加人员

专题负责人：	康尔泗	程国栋	董增川		
主要完成人：	康尔泗	程国栋	董增川	刘潮海	李培基
	蓝永超	金会军	叶佰生	康兴成	冯学智
	李 新	杨志怀	陈元芳	梁忠民	包为民
	刘新仁	丁永建	刘时银	史正涛	张其花
参 加 人 员：	李世杰	王金叶	宋克超	张济世	陈仁升
	金博文	陈建民	刘宗香	杨惠安	金明燮
	鲁安新	李文君	柏延臣	王建群	钟平安
	曹丽青	陆宝宏	张秀菊	俞鑫颖	鲁 南
顾 问：	施雅风	谢自楚			

序

我国西北干旱区水资源形成于内陆河流域的上游山区,耗散于山前中游绿洲经济发展带和下游荒漠带,具有明显的垂直景观分带特征。随着全球气候变暖,冰雪水资源和出山径流将如何变化,是西北地区水资源可持续利用研究中必须回答的问题,这对山前地带社会经济发展的水资源保证和生态环境保护具有重要价值。因此,在“九五”国家重点科技攻关计划项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”中,列入了“冰雪水资源和出山口径流量及其变化趋势预测研究”专题,承担单位为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,协作单位为河海大学。在完成本项目研究中,我们开展了必要的野外考察和观测,充分利用现有的区域性观测实验资料和研究结果,选择有代表性的有限区和山区流域进行了较深入的冰雪水资源和出山径流变化及趋势预测研究。专题研究成果通过了国家科技部组织的验收,本书即是根据该项科研成果编写而成。

本书主要反映了以下方面的研究进展。

“小冰期”和近数十年来的冰川面积变化率都有随冰川规模增大而减小的规律性,从而提供了通过代表性冰川作用区冰川变化的研究来估算区域性冰川水资源变化的方法,得出了作为完整冰川系统的西北干旱区“小冰期”和近数十年来的冰川变化量及其地区分布规律。冰川近期变化是“小冰期”以来冰川变化的继续,而近35年来冰川退缩的加快反映了全球变暖对冰川的影响。西北干旱区高山地带属于较稳定的冰川区。在气温升高和降水量有所增加的气候变化情景下,冰川仍以退缩为主,但整体退缩幅度相对较小。

建立了年际波动完全协调一致的微波卫星遥感积雪时间序列和地面气象台站积雪时间序列。发现了全球变暖导致的东亚冬季风气候条件下干旱半干旱地区积雪年际波动和长期变化的特殊规律。西北干旱区积雪水资源丰富而稳定,在气候变暖的条件下积雪水资源将有所增加。

在分析新疆和河西走廊近40年来气温、降水和出山径流变化状况的基础上,选择有代表性的内陆河流域,在天山伊犁河、乌鲁木齐河和祁连山黑河山区流域进行了冰雪径流和出山径流形成、变化过程和机理的研究。从冰川径流对气候变化的敏感性研究得出,冰川的存在可以在一定程度上抵消或减弱气候变暖对于干旱区水资源的不利影响。通过野外考察和观测,较系统地阐述了冻土和水源涵养林在出山径流形成和变化中的作用。水量平衡模型、水箱模型、统计模型、随机模型、灰色系统分析和树木年轮水文学等模型和方法的综合应用,对山区水文过程、冰雪径流和出山径流的变化进行了较深入的综合研究。在乌鲁木齐河流域成功建立了以数字高程模型为基础的分布式冰雪融水雨水混合补给流域水文模型,以及以热量、液态和固态平衡为基础的水量平衡冰川消长模拟模型,用以模拟径流形成过程和出山径流组成,为进一步对气候和水资源关系的数值模拟研究和划分出山口径流组成提供了方法,打下了基础。

本专题建立的基于高山冰雪冻土带和山区植被带的模拟出山月径流量对气候变化的响应,进而预测在气候变化情景条件下出山径流的可能变化趋势的模型,反映了干旱区内陆河山区流域径流形成过程和特征及其与气候变化的关系。以基本气象站的气温和降水量为初始输入,与 GCMs 气候模型的模拟结果相结合,模拟和预测在气候变化情景条件下月出山径流量及其变化趋势。

冰雪径流和出山径流变化及其对气候变化的响应和模拟计算的结果表明,在气候变暖的条件下,未来 50 年期间西北干旱区山区冰川融水径流将主要呈现出增加的趋势,这对稳定冰川融水补给较多河流的径流量具有重要意义。综合研究表明,在未来 50 年期间气候变暖的条件下,西北干旱区出山径流的变化趋势将有增有减,但总体上不会对出山径流量有大的影响。

正当本项“九五”国家科技攻关项目完成之际,国家开始实施西部大开发战略。西北干旱区出山径流形成过程及其与气候变化的关系极其复杂,且独具特色。出山径流由冰川融水、积雪融水、降雨和地下水组成,除冰川外,冻土和水源涵养林在径流形成和变化中也起着重要的作用,而这些径流组成部分和径流形成过程与气候变化的关系尚有许多问题需要进一步的研究,本专题的研究仅仅是一个开端。本书的出版也仅仅是反映了现今我们所取得的一些初步研究成果,敬请读者批评指正。

本项研究专题执行过程中,始终得到项目专家组刘昌明院士、徐乾清院士、陈志凯院士、石玉林院士、张宗祜院士、梁瑞驹教授、于景元教授、许新一教授、李玉山研究员、夏训诚研究员、段永侯教授和贾泽民教授等专家的指导和帮助;本书由吴三保编审和何兴编审负责编辑出版工作,特此一并致谢。

本书的出版主要由中国科学院科学出版基金资助,部分由甘肃科讯教育出版基金会资助,特此致谢。

程 国 栋

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室)

2002 年 3 月 10 日

目 录

序	程国栋	(1)
第一章 绪论	康尔泗 程国栋 董增川	(1)
第一节 专题研究的现状及发展趋势		(1)
第二节 专题研究的总体目标		(6)
第三节 专题研究的技术路线		(6)
第四节 攻关的主要成果		(8)
第二章 西北干旱区冰川水资源及其变化		
刘潮海 谢自楚 刘时银 陈建明 沈永平		(14)
第一节 西北干旱区山地冰川资源及其分布现状		(14)
第二节 小冰期百年时间尺度的冰川变化		(18)
第三节 冰川近数十年来的变化		(21)
第四节 冰川物质平衡及其变化趋势		(37)
第五节 冰川径流变化及其趋势		(47)
第六节 冰川水资源变化及其环境效应评价		(51)
第三章 西北干旱区积雪水资源变化	李培基	(55)
第一节 引言		(55)
第二节 积雪资料的选择与处理		(56)
第三节 积雪贮量的估算、空间分布与季节变化		(62)
第四节 积雪、冬季气温和冬季降水量的长期变化		(66)
第五节 积雪对气候变化的响应		(68)
第六节 结论		(71)
第四章 积雪量的估算与融雪径流		
冯学智 史正涛 李文君 鲁安新 柏延臣 王丽红		(73)
第一节 北疆地区的积雪分布特征		(73)
第二节 雪盖遥感信息的提取		(75)
第三节 积雪深度的反演与雪水当量的估算		(81)
第四节 融雪径流的模拟与预测		(87)
第五节 玛纳斯河流域径流变化趋势分析		(94)
第六节 结语		(95)
第五章 冰雪径流和出山径流对气候变化的响应	叶佰生	(97)
第一节 西北干旱区冰川径流变化特征		(97)
第二节 冰川及其径流对气候变化的敏感性		(102)
第三节 冰雪径流对气候变暖的响应		(111)

第四节	气候变化对河川径流的影响——以伊犁河流域为例	(118)
第六章	冻土和水源涵养林在径流形成中的作用	金会军 王金叶 (125)
第一节	冻土在山区径流形成中的作用	(125)
第二节	水源涵养林在山区径流形成中的作用	(137)
第七章	树木年轮出山口径流变化研究	康兴成 张其花 (156)
第一节	引言	(156)
第二节	样点的选择、取样和树轮年表的建立	(157)
第三节	树木年轮与径流量和降水量的关系	(165)
第四节	重建黑河过去径流量的变化	(169)
第八章	西北干旱区出山径流形成和模拟	董增川 刘新仁 包为民 梁忠民 陈元芳 (181)
第一节	出山口径流的形成模拟	(181)
第二节	出山口径流的组成分析	(191)
第三节	出山口径流的变化规律	(206)
第九章	河西内陆河出山径流变化和趋势	蓝永超 康尔泗 (218)
第一节	引言	(218)
第二节	出山径流的变化特征	(219)
第三节	出山径流的变化周期分析	(225)
第四节	气候变化对河西出山径流的影响	(230)
第五节	融雪径流与河西主要河流年径流量预报预测	(237)
第十章	内陆河山区流域降水、蒸发和径流计算	杨志怀 (248)
第一节	黑河山区流域降水的变化规律	(249)
第二节	黑河山区流域蒸发的变化规律	(254)
第三节	黑河山区流域主要水循环变量的年际变化	(260)
第四节	黑河上游山区流域月径流计算	(262)
第十一章	出山径流变化趋势预测模型	康尔泗 程国栋 蓝永超 (270)
第一节	模型结构	(270)
第二节	出山径流模拟计算	(275)
第三节	出山径流对气候变化响应的模拟结果	(283)
第四节	结论和讨论	(293)
参考文献		(295)

CONTENTS

Foreword	Cheng Guodong (i)
Chapter 1 Introduction	Kang Ersi Cheng Guodong Dong Zengchuan (1)
1.1 Present researches and perspective	(1)
1.2 General aims	(6)
1.3 Methodology	(6)
1.4 Main achievements	(8)
Chapter 2 Glacial water resources and their change	
... Liu Chaohai Xie Zichu Liu Shiyin Chen Jianming Sheng Yongping	(14)
2.1 Water resources of mountain glaciers and their distribution	(14)
2.2 Change of glaciers in the time scale of hundred years since the Little Ice Age	(18)
2.3 Mass balance of glaciers and its change trend	(21)
2.4 Change of glacial runoff and its trend	(37)
2.5 Impacts of change of glacial water resources on the environment	(47)
2.6 Change of glacial water resources and the evaluation of its environmental effects	(51)
Chapter 3 Change of snow water resources	Li Peiji (55)
3.1 Introduction	(55)
3.2 Selection of snow cover data and evaluation	(56)
3.3 Estimation of snow storage, spatial distribution and seasonal variation	(62)
3.4 Long time change of snow cover, winter air temperature and precipitation	(66)
3.5 Response of snow cover to climate change	(68)
3.6 Conclusion	(71)
Chapter 4 Estimation of snow water equivalent and snow-melt runoff	
Fen Xuezhi Shi Zhengtao Li Wenjun Lu Anxin Bo Yanchen Wang Rihong	(73)
4.1 Distribution of snow cover in the north Xinjiang	(73)
4.2 Extract of snow cover information by remote sensing	(75)
4.3 Inversion of snow depth and estimation of snow water equivalent	(81)
4.4 Simulation and forecast of snow-melt runoff	(87)
4.5 Change trend of runoff of the Malas River basin	(94)
4.6 Conclusion	(95)
Chapter 5 Response of glacier and snow runoff and mountain runoff to climate change	Ye Baisheng (97)
5.1 Change of glacial runoff in the arid regions of northwest China	(97)
5.2 Sensibility of glaciers and their runoff to the climate change	(102)

5.3	Response of glacier and snow runoff to the climate warming	(111)
5.4	Impact of climate change on the mountain river runoff—an example of the Yili River basin	(118)
Chapter 6	Role of permafrost and water retaining forests in the mountain runoff formation	Jin Huijun Wang Jinye (125)
6.1	Role of permafrost in the mountain runoff formation	(125)
6.2	Role of water retaining forests in the mountain runoff formation	(137)
Chapter 7	Studies of the change of mountain runoff by the dendrochronology method	Kang Xincheng Zhang Qihua (156)
7.1	Introduction	(156)
7.2	Sampling and the tree ring time series	(157)
7.3	Relationship of tree ring with runoff and precipitation	(165)
7.4	Restoration of the past runoff change in the Heihe River	(169)
Chapter 8	Formation and simulation of mountain runoff in the arid regions of northwest China	Dong Zengchuan Liu Xinren Bao Weiming Liang Zhongming Chen Yuanfang (181)
8.1	Formation and simulation of mountain runoff	(181)
8.2	Composition of mountain runoff	(191)
8.3	Change of mountain runoff	(206)
Chapter 9	Change trend of mountain runoff of the inland rivers at the Hexi Corridor	Lan Yongchao Kang Ersi (218)
9.1	Introduction	(218)
9.2	Characteristics of mountain runoff variation	(219)
9.3	Period analysis of mountain runoff variation	(225)
9.4	Impact of climate change on the mountain runoff	(230)
9.5	Prediction of snow – melt runoff and river runoff	(237)
Chapter 10	Calculation of precipitation, evaporation and runoff in the mountain watersheds of the Heihe River basin	Yang Zhihui (248)
10.1	Precipitation variation	(249)
10.2	Evaporation variation	(254)
10.3	Yearly variation of the main variables of water cycle	(260)
10.4	Calculation of monthly runoff	(262)
Chapter 11	A model for the projection of mountain runoff change	Kang Ersi Cheng Guodong Lan Yongchao (270)
11.1	Model structure	(270)
11.2	Simulation of the mountain runoff	(275)
11.3	Simulation results of response of mountain runoff to climate change	(283)
11.4	Conclusion and discussion	(293)
References		(295)

第一章 绪 论

康尔泗^① 程国栋^② 董增川^③

我国西北干旱区深居内陆,远离海洋,是我国最干旱的地区。该地区高山高原和山前平原盆地相间的地形特征,形成了地球干旱地带中独具特色的水文和水资源系统,水资源分布于若干相对独立的内陆河流域。我国西北干旱区水资源系统的主要特征表现为山区为冰川发育和降水较多的水资源形成区,包括高山冰雪冻土带和山区植被带,而山前干旱地带的平原盆地则为水资源耗散区,包括山前绿洲带和内陆河流域下游地区的荒漠带。山区的冰雪融水和降水成为山前地带水资源的主要来源。因此,内陆河流域的出山口径流量基本上代表了内陆盆地的水资源总量。

水资源是随气候变化而变化着的动态资源,而其变化又受着人类活动的影响。干旱区水资源对气候变化十分敏感。20世纪以来,我国西北内陆干旱区出现了明显的波动性增暖变干趋势,表现为冰川后退,河川径流量减少,大量湖泊萎缩,而这种变化又具有时空分布的不均匀性和变化趋势的复杂性(施雅风和张祥松,1995)。由于西北干旱区人类活动主要是集中在山前绿洲带,因此出山径流的变化更直接地与气候变化相联系。

西北地区经济和社会发展的最大制约因素是水。在全球变暖的背景下,出山径流量的变化对山前地带的社会经济发展和生态环境保护有着直接和决定性的影响。所以,必须研究冰雪水资源和出山口径流量的未来变化趋势,以回答西北内陆干旱区未来可持续发展的水资源保证问题。

第一节 专题研究的现状及发展趋势

一、研究现状

1. 与水资源变化有关的国际全球变化研究核心计划

20世纪80年代末以来,国际上特别重视全球变化对水资源变化影响的研究,并在过去研究地表水流域尺度模型的基础上,进而研究影响水资源形成和变化的各种因素的

① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。

② 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室。

③ 河海大学。

时空变化规律及过程,评价气候变化对水资源的影响(陈家琦,1992)。在山区的水文过程研究方面,国际上强调要深入研究地形和下垫面不均匀性的影响,其中包括气候变化与冰川、积雪变化和山区水资源变化的关系(BAHC,1993)。现今国际全球变化研究计划中,一个重要的方面就是要解决区域性的水循环和水资源问题,如国际地圈生物圈计划(IGBP)中的一个核心计划就是围绕水循环的生物圈方面(BAHC)(孙成权和张志强,1994)计划开展山区气候-水文-生态系统相互作用的研究,强调要研究山区流域地形、冰川、积雪、冻土和植被在水资源形成和变化中的作用(BAHC,1993)。世界气候计划(WCRP)中的全球能量与水循环试验(GEWEX)(孙成权和张志强,1994)正组织研究建立不同时间和空间尺度的气候和水文模型的镶嵌和耦合模型,以期对气候和水资源预测的理论和方法问题的研究获得重大的进展和突破(刘春蓁,1992)。

2. 冰川和积雪水资源变化研究

世界上许多国家都非常重视冰川变化的监测研究,并把它作为全球气候变化响应的主要研究对象。国际地圈-生物圈计划(IGBP)和国际水文计划(IHP)均把冰川(或冰盖)的变化监测列入全球范围的研究计划。国际冰雪委员会(ICS/IAHS)下设了冰川监测服务处(WGMS)的常设机构,以收集和出版世界冰川变化资料。我国已完成了全国的冰川编目工作,但冰川编目仅反映了20世纪50年代末和60年代初的冰川水资源状况。我国开展冰川变化监测研究较晚,并停留在个别定点的冰川监测上。结合野外考察工作,利用固定标志和重复地面立体摄影等方法,也取得了个别冰川某一时段的平均变化资料,而布局合理的具有足够代表性的冰川变化观测网还未建立。利用冰川物质平衡和动力模型模拟冰川变化量仅限于具有较长系列观测资料的冰川。近年来,利用航空像片对比成图方法获得了乌鲁木齐河、四棵树河、喀什河等流域的冰川长度、面积和储量的变化资料,填补了若干地区完全缺乏冰川资料的空白。冰川变化必然引起其融水径流的变化,除野外考察和若干短期的观测外,系统开展其观测研究的仅有乌鲁木齐河源1号冰川。利用水量平衡法、冰川融水径流模数法、流量与气温关系法和热量平衡等方法在典型冰川上进行过冰川径流的估算。在多年工作的基础上,系统总结和推算了我国冰川融水资源量及其分布(杨针娘,1991)。

人类面临全球气候变暖及其对积雪水资源产生巨大影响的科学预言(IPCC,1996a; IPCC,1996b),使积雪对气候变化响应的研究成为全球环境变化和经济可持续发展研究中的热点。尤其是农业灌溉高度依赖积雪融水的干旱区半干旱区,气候变暖可能导致的积雪水资源的进一步减少将会给十分脆弱的生态环境带来极其严重的损害。中国西北地区正是这样的气候敏感区。那里地表水资源极为匮乏,西北干旱区面积约占全国总面积的1/4,地表水资源量却仅为全国的3.3%,并且高度集中地分布在高山地区(施雅风和张祥松,1995)。在极其有限的地表水资源中,季节积雪是其中最为重要的一个组成部分。我国的三大稳定积雪区,即青藏高原地区、天山-北疆地区和东北-内蒙古地区(李培基,1983)的2/5的面积位于西北地区。尤其是新疆积雪水资源更是得天独厚,占全国积雪水资源总量的1/3(李培基,1988)。直到目前,关于全球积雪是在减少还是在增加的问题尚无定论,积雪对全球变暖的响应也就仍然是一个存在争议的问题。揭示和预测积雪过去、现在和将来的变化依然是积雪研究所面临的严峻挑战。但是,人们也

开始认识到,积雪对全球变暖的响应不能仅仅用积雪与气温呈负相关的道理来解释,全球变暖导致寒冷地区降雪量增加的反馈机制也是不容忽视的。随着全球变暖,不同气候区统一的积雪减少趋势是不可能存在的,但积雪的变化必将呈现出显著的地区差异。

3. 气候变化对水文系统影响研究的进展

政府间气候变化专门小组(世界气象组织/联合国环境规划署)的气候变化影响评估和对策第二工作组的报告中,总结了气候变化对水文系统影响研究的进展(Fisher et al., 1996)。该报告指出,水文系统对气候变化是非常敏感的。虽然估计气候变化的水文效应存在着许多不确定性,许多问题尚待研究和解决,但对其敏感性仍可归纳出一些一般的结论。这些结论包括:气温升高将导致蒸散发力的增加,而实际蒸散发力的变化将取决于土壤湿度;一般来讲,气候愈干旱,水文状况对气候变化的敏感性愈大;气候和水文变化的年内分布是不一致的,降雨强度的增加可能导致洪水的发生率增加,而干旱季节的径流量可能由于前期降水量的增加而有所增加;在一些大陆和山区,冬季和春季的降雪量可能发生变化,从而影响春季径流的出现时间;气候变化如何影响地下水的补给尚待进一步的研究。

利用树木年轮方法重建水文和气候要素序列是近年来在国际上弥补水文和气候观测资料短缺而常用的方法之一。国内也已开始这方面的分析研究。它的特点是所得资料序列连续,分辨率高,取样相对简便,方法成熟,结果可靠性大等。目前这一方法已被国际气候研究计划 PAGES 子计划列为从事古气候和环境变化研究的重要手段之一。其研究成果获得了科学家的一致认可。

4. 气候变化对区域性水资源影响的研究

(1) 气候变化的区域水文响应

在新近出版的《区域水文对气候变化响应》(Regional hydrological response to climate change)(Jones et al., 1996)一书中,系统总结了现今在全球变化对区域水资源影响研究方面的进展,包括地球水圈对全球变化的敏感性,全球变暖的区域影响,降水变化,全球变暖对冰川积雪和融水的影响,以及对区域水平衡和水资源的影响。从 20 世纪 80 年代到 90 年代,大气环流模型(GCMs)预测,全球变暖将导致气温和降水的变化,从而引起区域性的水量平衡、河川径流和水资源的变化。因此,将 GCMs 气候模型模拟的气候情景转化为对区域,从而对流域尺度的水量平衡和径流变化的估计是气候变化的区域响应的主要研究课题(Jones, 1996a)。预测全球变暖的水文效应是现今的迫切需要。虽然 GCMs 气候模型的预测有很大的不确定性,而将其预测结果输入水量平衡和降水-径流模型则将产生更大的不确定性,但可以肯定的是,未来 50 年的气候变暖将对区域性的水资源产生非常大的影响,从而在作未来发展计划时必须给予密切的关注和认真的考虑(Jones, 1996b)。

(2) 气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响

中国向 IPCC 提交《气候变化对中国的影响评估和对策》的国家报告中,中国科学院兰州冰川冻土研究所编写了《气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响评估》报告(程国栋等, 1997)。报告中指出,近百年来,CO₂ 和其他温室气体在大气中含量的不断

增加,导致全球出现缓慢的但是越来越明显的增温趋势,而我国积雪量年际波动变化趋势准确地反映了全球和北半球温度的变化。在 20 世纪 60 年代中叶之后的全球增温时期,我国降雪量和积雪量均表现出增加的趋势,但各地区表现不一样。据估计,未来增温有可能导致我国最北部和高山地区降雪量增加。自 19 世纪后半期以来,冰川普遍明显退缩。在气候变暖的背景下,连续的多年冻土区温度略有上升,而一些不连续的岛状冻土消失。目前,气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响评估,还存在着很大的不确定性。这种不确定性,一方面来自区域气候预测的不确定性;另一方面则因为我们对积雪、冰川和冻土对气候变化的响应的了解尚有很多须加深之处(程国栋等,1997)。

(3) 气候变化对我国区域性水资源的影响研究

为对水资源条件作出适用于规划和制定政策的有益估计(其中包括对农业影响的估计,水资源管理系统的设计,以及对作出准确合理的水供应的估计),研究气候变化对我国区域性水资源的可能影响是当务之急。由施雅风、刘春蓁和张祥松编著的《气候变化对西北华北水资源的影响》一书,根据华北和西北地区不同的区域特征,采用不同的方法,分别对两区气候变化对水资源的影响进行了研究(施雅风主编,1995)。在西北地区,通过对冰芯中古气候信息、冰川、积雪、河川径流和湖泊的变化及其趋势的研究,指出自小冰期结束以来,在全球变暖和气温波动上升的背景下,我国西北内陆干旱区大量冰川后退,湖泊萎缩,低地和盆地积雪量减少,而高山高原积雪量有所增加。河川总径流量减少,但 20 世纪 80 年代后期又有增加迹象。在此基础上,预测了在未来气候继续变暖的条件下,降水增减的不确定性将增大,但增加的可能性大于减少的可能性。

5. 气候变化对水资源影响的模拟

现今模拟气候变化对水资源的影响,是在一定的气候情景条件下,根据相似原理,用水文模型来模拟径流的可能变化。因此,首先要选择和确定未来的可能气候变化情景,然后要建立表征水文和水资源变量与气候变量之间数量关系的水文模型(张冀等,1993)。气候情景的确定可根据假设的气候情景,GCMs 气候模型模拟的气候情景,以及根据历史和古气候重建的气候情景(张冀等,1993)。对水文模型的分类,一种是将其分为统计模型、分析模型和数值模型三类(刘昌明和傅国斌,1993),其中第三类模型尚处于研究阶段。另一种是将其分为经验的(统计的)模型、水量平衡模型、概念性集总参数模型和以过程为基础的分布参数模型(Leavesley,1994),其中第二和三种模型可视为分析模型,第三种属于数值模型。在我国,傅国斌和刘昌明(1991)、赖祖铭和叶佰生(1991,1994)、刘春蓁等(1995)等,曾用水量平衡模型研究了河川径流变化对气候变化的响应问题。

二、发展趋势

3S 技术的应用,将在未来 10 年内完成我国冰川水资源新的编目工作,从而为研究冰川水资源的变化提供新的依据。冰川与气候、径流相互关系模型是在具有长系列观测资料的冰川上建立的,而把这种模型用于冰川系统(流域或区域)的研究,提供这一系

统的冰川及其径流状态资料,以及预测其可能的变化趋势,在理论和实践上都具有重要意义,标志着冰川水资源研究发展的新趋势。

中国西北地区积雪发育在亚洲冬季季风气候条件下,它对全球变暖的响应很可能具有自己的区域特征。今后,随着我国西部经济发展力度的加大,西北干旱区水资源短缺的问题将变得越来越突出。西北地区冬季积雪贮量究竟有多少?分布在什么地方?稳定程度如何?全球变暖已经、正在和将要引起积雪水资源的什么样的变化?这些都是需要我们必须做出明确回答的问题。

在我国,树木年轮水文学方面的研究还比较欠缺。进行树木年轮水文学的研究,其意义和科学性十分明显。因为,在国民经济建设中,尤其是处于干旱或半干旱的我国西北地区,人口的增长,能源的利用,土地的开发与规划,工业交通的发展,人类生存的环境等等,都需要对水资源的变化作出预测。就当前人类科学知识和认识水平来讲,对未来水资源的预测,还不能给予十分定量的答复。这其中的主要原因之一是一些河流或湖泊的水文观测站点少,水文资料的时间序列较短,对水量变化的历史不十分清楚。由此,迫使人们找寻可用以研究水文和气候变化的替代资料,而树木年轮应是较为理想的方法之一。所以年轮水文学方面的研究在我国应是不可缺少的,尤其对西北地区更应重视。另外,还应探讨如何将冰芯中的气候记录序列转化为水文序列的问题。

气候变化对水资源影响的研究将是全球变化和水资源研究的重要方面。对未来气候变化情景的数值预测的工具是 GCMs 气候模型,但由于其分辨率低,对许多复杂过程还缺乏认识,因此其预测结果的不确定性较大,特别是用以研究区域水资源的变化困难较多。近年来对 GCMs 气候模型的研究取得了较大的进展,并将继续取得快速的进展。在这方面有代表性的是新近由英国 Hadkey 气候预测中心以新一代的较高分辨率的 GCMs 气候模型所作的气候模拟,其中包括了尘埃和硫酸盐气溶胶离子的作用,从而使得由温室气体导致的全球变暖有一定程度的减缓。进一步,对 GCMs 气候模型的研究将改进对主要水文变量的预测,包括降水、土壤湿度以及控制蒸发、空气湿度、风速和太阳辐射的主要因子 (Jones, 1996a)。

在水文研究方面,须研究降水和蒸发的变化。在 GCMs 气候模型的分辨率尚不够高,从而其模拟结果还不能直接用于水文目的以前,还须同时充分利用统计和随机的方法。更多的工作将需要致力于大流域物理水文模型的研究,使其空间分辨率和 GCMs 气候模型的输出相吻合。与此同时,要将 GCMs 气候模型、遥感的方法、区域性的地理信息系统和水文模拟模型相结合。水文状况对气候变化的响应还包括研究下垫面的变化、农业和土地利用等方面 (Jones, 1996b)。

加强野外观测试验,建立自动观测系统并和 3S 技术相结合,是国际水文和水资源研究计划的重要方面。我国西北干旱区的野外观测试验工作相对薄弱,今后将不断加强对内陆河水文和水资源系统的观测研究工作,特别是选择典型的内陆河流域在山区水资源形成区的高山冰雪冻土带和山区植被带,以及山前平原盆地水资源耗散区的绿洲带和荒漠带,深入进行这方面的综合观测试验和研究工作。

在水文模型的研究方面,须加强水文过程及水文水资源系统的物理、化学、生物和人类活动等过程的相互作用的研究,从而建立分布水文模型。在此基础上,研究尺度转换问题,建立气候-水文耦合模型,以期对气候变化和水资源变化关系和趋势进行数值

模拟和预测。

第二节 专题研究的总体目标

为对我国西北地区水资源条件作出适用于合理开发利用和生态环境保护以及规划和制订政策的科学估计,回答未来可持续发展的水资源保证问题,专题研究的总体目标是评估西北内陆干旱区冰雪水资源和出山径流量的变化状况,并作出未来变化趋势的预测和判断。

(1) 冰川水资源变化

定量评估近 40 年来新疆和河西走廊地区代表性冰川作用区冰川水资源的变化状况,并对未来到 2030 年的变化趋势作出判断。

(2) 积雪水资源变化

定量评估近 40 年来新疆和河西走廊地区积雪水资源的变化状况,并对未来到 2030 年的变化趋势作出判断。给出北疆天山北坡代表性流域积雪量的估算方法。

(3) 冻土和水源涵养林在径流形成中的作用

研究冻土和水源涵养林在径流形成和变化中的作用。进行树木年轮分析,延长气候和水文系列。

(4) 出山径流形成、分布和评价研究

以天山乌鲁木齐河为重点,研究出山径流形成、分布和近 40 年来的变化规律。

(5) 出山径流变化及趋势预测

定量评估近 40 年来新疆和河西走廊气候和代表性内陆河流域冰雪径流和出山径流的变化状况。以祁连山黑河山区流域为重点,建立用以预测不同气候变化情景条件下出山径流量变化趋势的水文模型。

第三节 专题研究的技术路线

西北干旱区山区观测资料少,水文和水资源形成过程复杂。紧紧围绕专题研究的总体目标,开展必要的野外考察和观测;充分利用现有的观测实验资料,选择有代表性的有限区域进行冰川变化的时空对比研究,认识西北干旱区区域性的冰川水资源变化规律;利用遥感方法提取积雪参数;进行树木年轮采样和分析,延长山区气候和水文系列;在代表性山区流域进行冰雪径流和出山径流及径流形成和时空分布的研究;建立典型山区流域出山径流变化趋势预测模型,是本专题研究的基本技术路线。本专题分以下 5 个子专题来完成总体的研究任务。

1. 冰川水资源变化研究

获取有一定代表性的冰川或流域的冰川变化资料是“冰川水资源变化研究”的基础。选择具有重复拍摄航空像片的冰川区,在托普卡绘图仪上进行大比例成图,在图上量算冰川长度、面积和储量的变化。为了分析不同规模、末端高度、雪线高度和坡向对冰川变化量的影响,选择天山婆罗科努山脉南(喀什河流域)北坡(四棵树河流域)的