

中国西北云水资源 开发利用研究

张 强 主编



气象出版社

中国西北区域资源 开发利用研究

王 强 主编



中国地质出版社

中国西北云水资源开发利用研究

主 编·张 强

主 编：张 强

副主编：吕世华 黄建平

副主编：吕世华

白虎志 李耀辉

白虎志

会商时指出

乙酉出版社

内容简介

本书收集了 41 篇论文,系国家科技攻关计划“祁连山空中云水资源开发利用研究”课题的主要成果之一。内容包括气候资源与气候特征、云量资源、空中水汽、地表水资源、云微物理特征和陆面过程、人工影响天气、气候变化及其影响等 7 个方面。这些研究成果不仅具有较高的理论水平和学术价值,而且具有较好的实用性。该书可供气象、地理、环境、生态、水利、农业等领域从事相关科学研究和业务部门的专业人员以及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西北云水资源开发利用研究/张强主编. —北京:
气象出版社,2007. 12

ISBN 978-7-5029-4436-0

I. 中… II. 张… III. ①云-水资源-资源开发-西北
地区-文集②云-水资源-资源利用-西北地区-文集
IV. TV211-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 195731 号

出版者:气象出版社

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail:qxchs@263.net

责任编辑:陈 红 章澄昌

终 审:纪乃晋

封面设计:王 伟

责任技编:陈 红

印刷者:北京京科印刷有限公司

发行者:气象出版社

开 本:787×1092 1/16

印 张:25

字 数:617 千字

版 次:2007 年 12 月第一版

2007 年 12 月第一次印刷

书 号:ISBN 978-7-5029-4436-0

定 价:70.00 元

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编:100081

总编室:010-68407112

发行部:010-68409198

本书如存在文字不清,漏印以及缺页,倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前言

我国淡水资源短缺,仅为世界人均占有水量的四分之一,且时空分布不均,区域分布差异大。水资源短缺已严重影响着我国部分地区特别是西北地区经济和社会的持续健康发展,成为经济和社会发展的严重制约因素。

解决水资源短缺主要靠开源和节流,应该说,开源是解决水资源供需矛盾的根本措施。人工增雪是既容易实施又能快速见效的增加水资源的新途径,通过开发利用空中云水资源来提高大气降水效率,从而增加地表水资源。祁连山区是我国西北地区重要的内陆水塔之一,也是主要的水资源发源地。通过对西北地区以及祁连山空中水资源开发利用研究,已获得一批以祁连山为代表的高山地形云和降水物理结构特征、山地天气气候、水汽输送和水循环的试验数据,为合理开发利用该地域空中水资源提供理论支撑和切实可行的实施方案,为西北山地人工增雨雪的技术和方法提供科学决策依据。

本书是国家科技攻关计划“西部开发科技行动”重大项目(2004BA901A16)“祁连山空中水资源开发利用研究”课题的主要成果之一。是从 141 篇论文中精选出 41 篇论文,内容包括气候资源与气候特征、云量资源、空中水汽、地表水资源、云微物理特征和陆面过程、人工影响天气、气候变化及其影响等 7 个方面。这些研究成果不仅具有较高的理论水平和学术价值,而且具有较好的实用性。希望能为高校师生以及相关科研和业务单位人员在从事该领域研究工作有所帮助。

本书由张强、吕世华、黄建平、白虎志、李耀辉、邓振镛、董安祥等人收集、整理、编辑,并得到课题组全体同仁大力协助和支持。本课题得到科技部、中国气象局、甘肃省科技厅、中国气象局兰州干旱气象研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、兰州大学、甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室、中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室以及兰州中心气象台、兰州区域气候中心、甘肃省人工影响天气办公室等单位的资助和支持。气象出版社责任编辑陈红负责编审并作了繁重的文字工作,为此,特表感谢。由于时间仓促,编者水平有限,还有的论文未被选上,在编辑过程中还有错漏,敬请批评指正。

张强

2007 年 11 月

目 录

(112) 张杰 陆登荣 陆登荣	祁连山区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	(42)
前言	祁连山地区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	(42)
(133) 李岩瑛 张强 马元仓等	祁连山地区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	(42)
(133) 李岩瑛 张强 马元仓等	祁连山地区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	(42)
(133) 李岩瑛 张强 马元仓等	祁连山地区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	(42)

气候资源与气候特征

祁连山区 1997—2004 年积雪面积和雪线高度变化分析	张杰 韩涛 王建	(3)
西北地区东部夏季降水日数的变化趋势及其气候特征	白虎志 李栋梁 陆登荣等	(11)
中国西北地区气候变化与同期气象场异常的关系	陶健红 吴洪宝 白虎志	(18)
中国黄土高原地区降水时空演变	林纾 王毅荣	(25)
模式水平分辨率对祁连山区降水模拟影响的初步分析	李锁锁 吕世华 高艳红等	(34)
祁连山地区降水强度与年降水量和海拔高度之间的关系	李岩瑛 张强 马元仓等	(42)
祁连山南北坡气候差异研究	王毅荣 林纾	(56)
石羊河流域 10000 年以来气候演变	徐启运 郭慧 尹宪志等	(65)
青藏高原东北部区域性大到暴雨的诊断分析及数值模拟	谌芸 李泽椿	(76)

云量资源

祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析	张杰 张强 田文寿等	(91)
多通道卫星云图云检测方法的研究	马芳 张强 郭锐等	(99)
中国北方云量四季分布及其对降水的相关影响	吴伟 王式功	(110)
西北地区空中云水资源的时空分布特征	陈勇航 黄建平 陈长和等	(130)
西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系	陈勇航 黄建平 王天河等	(140)
祁连山区夏季总云量的气候变化与异常研究	陈少勇 董安祥 王丽萍等	(152)
祁连山空中云水资源开发利用效益预测与评估	王静 尉元明 郭锐等	(160)

空中水汽

祁连山区空中水汽分布特征研究	张强 张杰 孙国武等	(171)
----------------	------------	-------

- 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化 王宝鉴 黄玉霞 陶健红等 (183)
- 近年来西北中东部水汽及其输送特征 李照荣 陈添宇 陈乾等 (191)
- 卫星资料反演大气水汽密度的应用研究 陈添宇 陈乾 李宝梓 (200)

地表水资源

- 祁连山及内陆河流域绿洲的水循环特征 张强 俞亚勋 张杰 (211)
- 关于西北干旱区水循环与水资源 张强 赵映东 张存杰等 (220)
- 河西内陆河流量对高原加热场强度的响应 钟海玲 李栋梁 (231)
- 祁连山北坡内陆河径流量对气候变化响应的情景预测 郭慧 张强 冯建英等 (237)
- 河西内陆河径流量变化及其对气候变化的响应 冯建英 陆登荣 赵映东 (246)
- 黑河洪峰变化及其对全球气候变暖的响应 曹玲 董安祥 窦永祥等 (256)

云微物理特征与陆面过程

- 飞机增雨催化作用对层云宏观物理特征影响研究 张强 张杰 刘世祥等 (265)
- 西北地区云和降水微物理特征个例分析 李淑日 (277)
- 中国北方沙尘气溶胶对云和降水的数值模拟研究 康凤琴 银燕 周秀骥等 (283)
- 降水过程对半干旱雨养农田与大气碳交换的影响 王润元 杨兴国 张强等 (296)
- 夏季草原和戈壁水汽与 CO_2 通量比较分析 王润元 赵鸿 张强等 (302)

人工影响天气

- 甘肃省降水性层状云催化的数值试验分析 李宝梓 王劲松 孙旭映 (313)
- 飞机增雨过程中云宏观特征的时空变化 张杰 张强 李照荣等 (322)
- 甘肃省秋季飞机人工增雨天气系统分型 王璉 李宗炎 王劲松等 (332)
- 多普勒雷达产品在祁连山区一次人工增雨作业中的应用分析 曹玲 李国昌 郭建华等 (337)
- 河西走廊东部冬春季人工增雪试验效果评估 钱莉 王文 杨永龙等 (344)

气候变化及其影响

- 祁连山地区生态环境恶化对环境影响的数值模拟 李锁锁 吕世华 高艳红等 (355)
- 我国干旱、半干旱地区沙漠化与气候变化 李耀辉 孙国武 张良等 (363)
- 气候变暖对甘肃种植业结构和农作物生长的影响 邓振镛 张强 刘德祥等 (369)
- 气候变化对祁连山北坡农林牧业结构的影响与对策研究 邓振镛 王鹤龄 王润元等 (377)
- 气候变暖对河西走廊棉花生产影响的成因与对策研究 邓振镛 王鹤龄 辛吉武等 (387)

气候资源与气候特征

祁连山区 1997—2004 年积雪面积 和雪线高度变化分析

张杰¹ 韩涛¹ 王建²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:利用 1997—2004 年 5—8 月的 NOAA-AVHRR 和 EOS-MODIS 卫星资料、周边气象台站气象数据、人工增雨雪等相关资料,对河西内陆河流域上游的祁连山区积雪、冰川的光谱特征进行了判识,并分析了积雪面积和雪线高度变化。结果表明:6—8 月祁连山西、中、东部的积雪面积都呈下降趋势,5 月积雪面积有所升高;雪线高度处的气温在 5 月为降低趋势,6 月和 8 月略有升高,7 月升高最快;5—8 月随时间的变化,祁连山区累计降水量都呈现出不同程度的增加;祁连山西、中部积雪面积和雪线高度随降水和气温的变化有明显的响应,并且中部较西部明显。人工增雪作业对祁连山雪消融具有缓冲作用。

关键词:积雪面积 雪线高度 人工增雨雪 效果检验 祁连山

1 引言

祁连山深居欧亚大陆腹地,山麓周围被高原、戈壁、沙漠、绿洲等环抱,山区降水丰富,发育有现代冰川,每年有 $72.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的出山径流通过石羊河、黑河、疏勒河三大内陆河水系和 56 条内陆河流浇灌着 $70 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 耕地,养育着 400×10^4 人民^[1]。随着社会经济的发展,水资源的合理开发利用等一系列问题逐步受到重视,尤其是内陆河流域的径流^[2~4]、山区积雪、冰川变化等问题更受到关注^[5,6]。

近年来,国家实施人工增雨、雪工程,以期开发空中云水,增加山区的积雪量,弥补淡水资源不足对农业生态发展的影响^[7,8]。然而,在全球气候变暖的大背景下,冰雪消融期延长,融雪径流量增加^[9],但积雪、冰川的累积量如何变化还不确定。本研究利用 NOAA-AVHRR 资料和 EOS-MODIS 资料,对 1997—2004 年的积雪面积进行了连续的监测,分析了祁连山区雪线高度变化及积雪面积变化与人工增雨雪工程的关系。

2 数据来源和原理方法

2.1 数据来源

研究区域位于疏勒河、黑河、石羊河流域源头的祁连山区, $36^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$, $96^{\circ} \sim 103^{\circ} \text{E}$ 的区域内, 区域的划分根据 1:25000 的地形图划分, 见图 1。

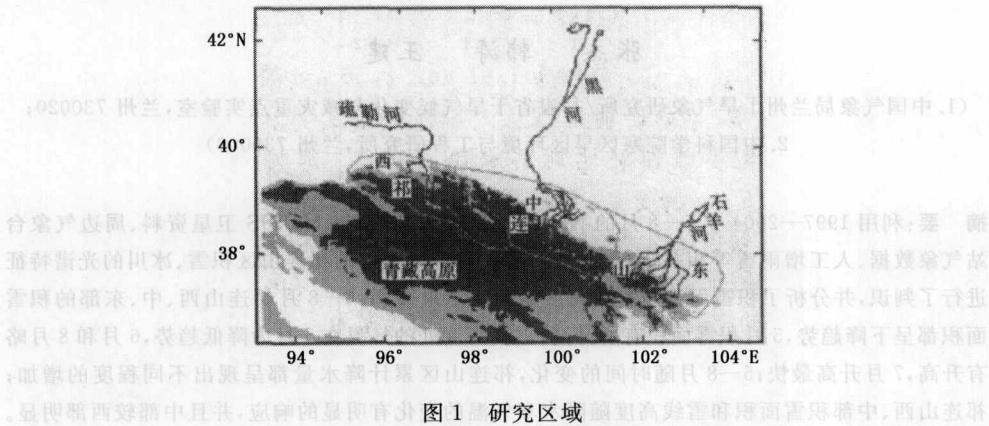


图1 研究区域

气象台站主要选用了疏勒河流域的托勒、酒泉站, 黑河流域的祁连、张掖、民乐站及石羊河流域的门源、武威、永昌站。在分析冰雪面积变化时, 参考流域内的上述气象台站的地面降水量、温度和高空资料(1997—2004年)。气象资料由甘肃省气象局兰州中心气象台提供, 卫星资料分别为 1997—2004 年 5—8 月逐旬的 NOAA-AVHRR 和 EOS-MODIS 资料, 由中国气象局兰州干旱气象研究所遥感中心提供。

2.2 遥感监测积雪的方法

准确识别云雪是进行积雪研究的基础工作。史培军等^[10]采用可见光通道最小亮度法提取积雪, 周咏梅^[11]借助 AVHRR 的红外通道采用多光谱资料识别积雪和云, 积雪识别精度在 80% 以上。延昊等^[12]采用了 NOAA 系列卫星的通道 3, 它是由 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $3.7 \mu\text{m}$ 两通道组成, 白天发送 $1.6 \mu\text{m}$ 探测值, 夜晚发送 $3.7 \mu\text{m}$ 探测值, 而云雪在该波段范围的反射差异, 对区分云雪效果很好。本研究用 NOAA-AVHRR 资料检测积雪的方法参见文献^[12]。

MODIS 有 36 个波段, 在可见光到部分中红外波段的分辨率为 250 m 和 500 m, 提高了光谱分辨率, 所以监测积雪的面积相对较准确。雪/云判别技术是建立在云和雪/冰反射率及辐射率的基础上, 云在可见光和近红外部分一般有高的反射率, 而雪的反射率在短波红外部分明显降低, 所以利用这一特征可以进行云、雪检测^[13]。基于这一方法, 建立了归一化差积雪指数 NDSI:

$$NDSI = \frac{\rho_{0.56} - \rho_{1.64}}{\rho_{0.56} + \rho_{1.64}} \quad (1)$$

式中 $\rho_{1.64}$ 、 $\rho_{0.56}$ 分别为 $1.64 \mu\text{m}$ 、 $0.56 \mu\text{m}$ 波段的反射率。NDSI 能把积雪从大量模糊的云

中分离出来,但不能很好地判别薄卷云和积雪。薄卷云在 $1.375 \mu\text{m}$ 波段上,具有非常强的吸收,能使之与其他目标包括积雪进行区分的能力^[14]。另外,根据雪的光谱特征,本研究增加了 $1.375 \mu\text{m}$ 、 $2.1 \mu\text{m}$ 、 $3.7 \mu\text{m}$ 的波段反射率特征,总体判别依据为:

云判别:

$$0 < NDSI < 0.5 \text{ 且 } \rho_{3.7} - \rho_{2.1} < 0; \rho_{3.7} - \rho_{1.375} < 0 \quad (2)$$

雪/冰判别:

$$NDSI > 0.5 \text{ 且 } \rho_{3.7} - \rho_{2.1} > 0; \rho_{3.7} - \rho_{1.375} > 0.50 \quad (3)$$

基于上述判断条件,雪冰的遥感判识基本可以实现。

2.3 积雪面积和雪线高度的转化原理

山区地形复杂,而卫星观测的资料只能反映与卫星观测方位角有关的地表信息。如果在资料选取中尽量考虑取接近于星下点的资料,那么卫星方位角的影响可以忽略不计。在进行积雪面积和雪线高度的转化时,首先假设山体面积服从三角形模型,考虑积雪分布在角度为 θ 的坡面上(图 2):

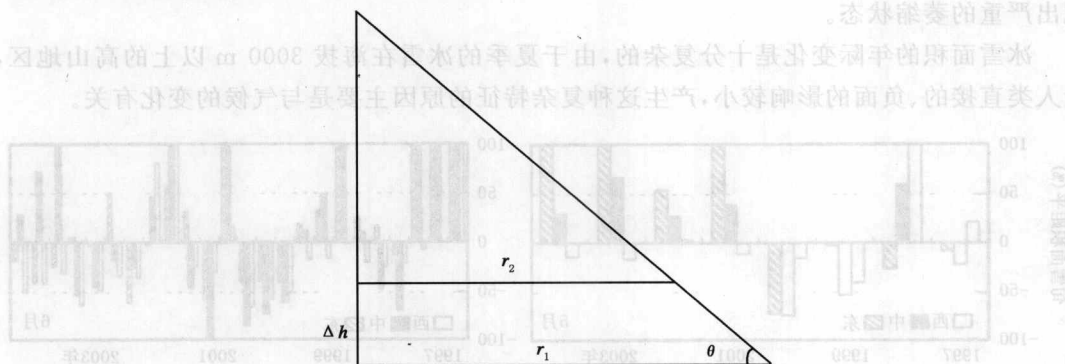


图 2 山体三角模型

$$\Delta S = \pi \left(\frac{r_1}{\cos \theta} \right)^2 - \pi \left(\frac{r_2}{\cos \theta} \right)^2 \quad (4)$$

$$\Delta h = (r_1 - r_2) \operatorname{tg} \theta \quad (5)$$

式中 ΔS 为祁连山积雪面积变化; Δh 为雪线高度变化;其他符号如图 2 所示。通过公式代换计算,得出面积变化和高度变化的关系式:

$$\Delta h = \sin \theta \sqrt{\frac{\Delta S}{\pi}} \quad (6)$$

由于山体本身不是规则的,所以根据实际情况将 θ 角定义为随高程变化的坡度,这里我们以 1 km 的格点为中心,以 $r=5 \text{ km}$ 为半径的圆内所有各点相对于气象站点的最大坡度值^[2],高程数据从 $1:250000$ 电子地图上读取。

3 数据分析

3.1 5—8 月雪冰面积变化特征

一年中积雪面积变化一般分为 3 个阶段,9 月到次年 4 月为冰雪积累期,5 月基本为过渡期,6—8 月为相对稳定的冰雪消融期,所以 5—8 月这个时期内主要以冰川为主。为了尽量减少降雪过程对面积测量的影响,选用 5—8 月的资料代表性比较好,利用 1997 年以来 5—8 月的逐旬资料,对流域的雪/冰面积变化进行分析,结果如图 3 所示。1997—2004 年祁连山西、中、东部雪/冰面积的年变化和月变化有一定差异。5 月西部疏勒河流域雪/冰面积有比较小幅度的增加趋势,而中部黑河流域和东部石羊河流域为明显增加趋势;6—8 月除了中部黑河流域有增加趋势外,其余时间都为减少的趋势,随时间变化,在距平图上基本为负距平变化,并且有些时段小于 -0.5 ,所以面积减小的幅度是很大的;7 月积雪面积基本为减少趋势。结果说明,在 5 月略有增加,6—8 月基本为减少趋势,目前祁连山的冰川面积呈现出严重的萎缩状态。

冰雪面积的年际变化是十分复杂的,由于夏季的冰雪在海拔 3000 m 以上的高山地区,受人类直接的、负面的影响较小,产生这种复杂特征的原因主要是与气候的变化有关。

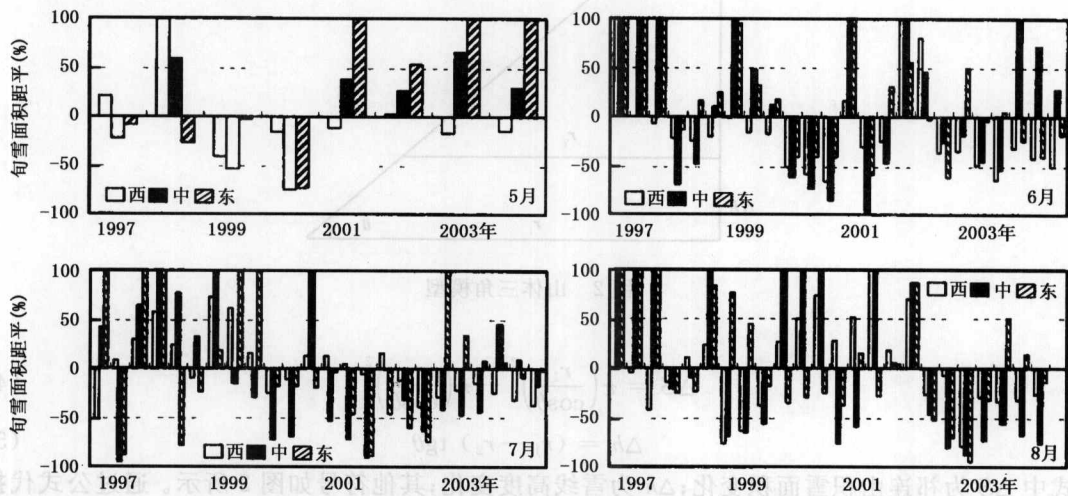


图 3 1997—2004 年 5—8 月祁连山积雪面积变化距平

3.2 气候特征分析

3.2.1 雪线高度处的气温变化特征

积雪面积的变化导致了雪线高度的变化,在 5—8 月如果不受降水过程的影响,祁连山区雪线高度基本在海拔 4000 m 以上^[4]。对于祁连山西、中部区的酒泉和张掖站,5—8 月 600 hPa 的平均高度基本在海拔 4300 m 左右,因而 600 hPa 气温与雪线高度的温度十分接近。由于祁连山东段没有高空站,主要分析祁连山西、中段的情况。从图 4 可知,5 月祁连山

西、中部 600 hPa 高度的旬平均气温基本为负,并且呈减小的变化趋势,并且西部气温较中部低。说明 5 月份雪线高度处的气温为负,不利于积雪的消融,可以认为积雪仍属于积累阶段。气温随年际的变化呈下降趋势,也说明祁连山区西部和中部的 0℃ 层高度在降低,雪线高度在降低;6 月 600 hPa 高度的气温逐渐向平均值接近,并趋于平缓,高温值降低,低温值升高;8 月 600 hPa 高度的气温在波动中略有上升,7 月 600 hPa 高度的气温在波动中上升最快,但 2001—2002 年的变化十分平缓。从 5—8 月的 600 hPa 高度的气温变化来看,冰雪消融量在 7 月最强,8 月次之,最后是 6 月,5 月仍为积雪积累期;从 6—7 月的温度差来看,1999 年以前温度差相对较小,而之后有所增加,说明 6—7 月冰雪消融量急剧增加,并且雪线高度上升最大。

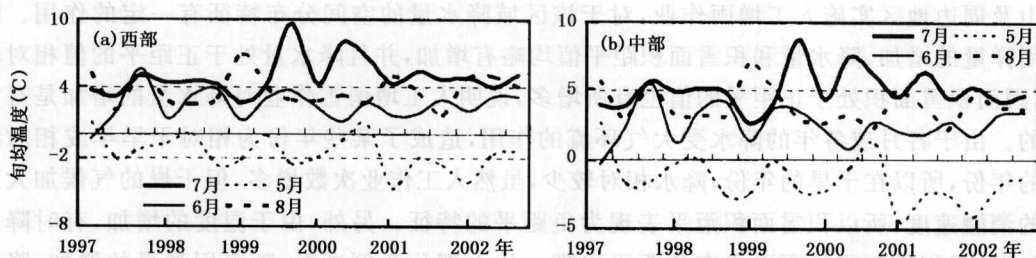


图 4 1997—2002 年 5—8 月祁连山西、中代表站 600 hPa 高度温度特征

3.2.2 祁连山区降水的变化特征

根据祁连山西、中、东部积雪高度的特征,选取与其高度最接近的托勒、祁连、门源站的降水资料,用以分析积雪区域的降水量变化情况。因为 9 月到次年 4 月为积雪累积期,所以在分析 5—8 月降水与冰/雪面积变化关系时,应该考虑累积期降水的影响。本研究用累计降水量来分析,也就是 5 月累计降水量为本月降水量与前一年 9 月到该月降水量的累加来表示。1997—2003 年 5—8 月祁连山积雪区累计降水距平如图 5 所示,结果表明,5 月祁连山西部和中部累计降水距平变化出现年际波动,但总变化趋势是增加的;而东部,累计降水

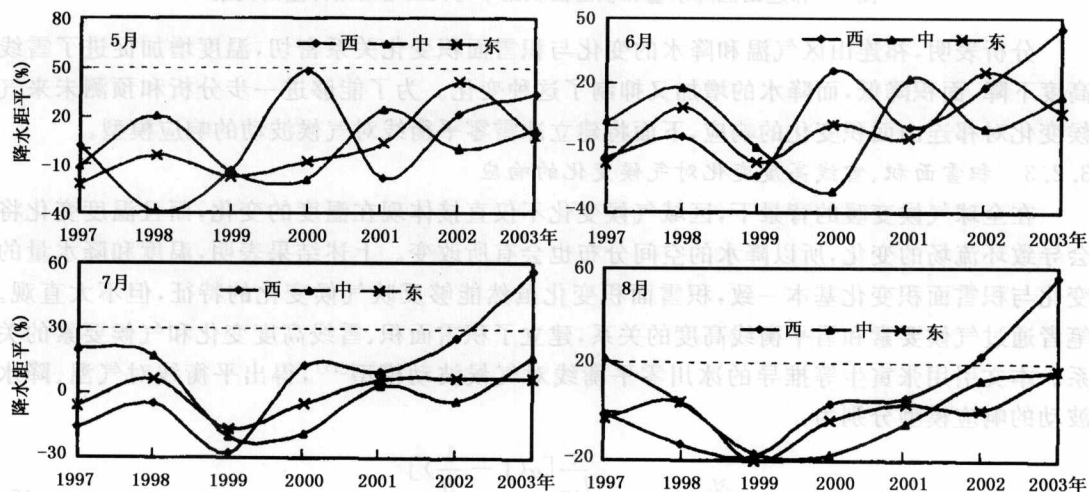


图 5 1997—2003 年 5—8 月祁连山积雪区累计降水量距平图

量距平基本为一致的增加趋势,并且在2001年之后基本都呈正距平的变化;6月累计降水距平与5月相似;7月和8月累计降水距平在1999年以前为减少趋势,而1999年之后,祁连山西、中、东部基本表现为一致的增加趋势,并且在2001年之后基本都为正距平的变化特征。说明在积雪的累计期,祁连山区降水基本为增加的趋势,并且在1999年之后变化趋势最为显著。原因可能与2000年以来在祁连山及周边地区大力投资实施人工增雨、增雪作业有关。

甘肃省自2000年开始投入人工增雪作业,目的就是增加祁连山的积雪量,增加内陆河流量,为西北干旱区提供更多的工农业和生态用水。通过分析2000年来祁连山及周边地区的增雨情况、区域平均降水量以及区域面积变化,得到了12个样本(图6)。结果表明,在祁连山及周边地区实施人工增雨作业,对于该区域降水量的空间分布特征有一定的作用。随着用弹量的增加,降水量和积雪面积距平值均略有增加,并且降水量处于正距平的值相对较多,因而积雪面积处于正距平的值也有所增多,说明人工增雨雪作业对降水量的增加是有贡献的。由于各月或各年的降水受大气环流的作用,造成了某些年份为相对干旱年或相对湿润的年份,所以在干旱的年份,降水相对较少,虽然人工作业次数增多,但干燥的气候加大了雪的消融速度,所以积雪面积距平表现为负距平的特征。另外,由于温度的增加,有时降水增加了,但积雪面积的距平仍有负距平出现。从大部分个例来看,随着用弹量的增加,降水量和积雪面积距平值有增加趋势,说明人工作业增加了降水量,并且对山区积雪面积的增加和维持有一定的促进作用。

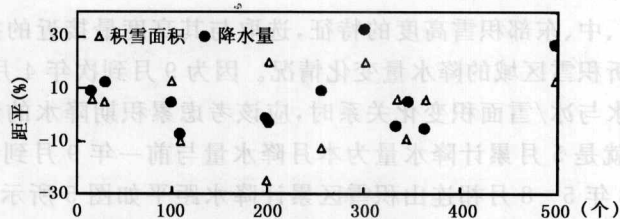


图6 祁连山区降水量和积雪面积距平与人工增雨雪作业量的关系

分析表明,祁连山区气温和降水的变化与积雪面积变化关系密切,温度增加促进了雪线高度下降、面积降低,而降水的增加又抑制了这种变化。为了能够进一步分析和预测未来气候变化对祁连山面积变化的响应,下面将建立冰雪零平衡线对气候波动的响应模型。

3.2.3 积雪面积、雪线高度变化对气候变化的响应

在全球气候变暖的背景下,区域气候变化不仅直接体现在温度的变化,而且温度变化将会导致环流场的变化,所以降水的空间分布也会有所改变。上述结果表明,温度和降水量的变化与积雪面积变化基本一致,积雪面积变化虽然能够反映气候变化的特征,但不太直观。笔者通过气候要素和雪平衡线高度的关系,建立了积雪面积、雪线高度变化和气候要素的关系。本文引用张寅生等推导的冰川零平衡线对气候波动模型^[15],得出平衡线对气温、降水波动的响应模型分别为:

$$\frac{\partial h}{\partial T_a} = \frac{\frac{\tau}{L_m} [\alpha(1 - \frac{1}{\beta})]}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\tau}{L_m} [\alpha(1 - \frac{1}{\beta}) \frac{\partial T_a}{\partial z}]} \quad (7)$$

$$\frac{\delta h}{\delta c} = \frac{-1}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\tau}{L_m} \left[\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \frac{\partial T_a}{\partial z} \right]} \quad (8)$$

式中 δh 为冰川零平衡线的波动值(m); T_a 为冰川近冰面气温(K); c 为冰川物质积累(mm); z 为高程(m); α 为块体交换系数($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); β 为鲍文比; τ 为消融期天数(d); L_m 为冰雪融化潜热(常数,其值为 $0.335 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

对于祁连山区,据文献资料^[4]、高空资料及卫星的监测结果,得出: $\alpha = 0.374 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $\beta = -1.5586^{[16]}$; $\tau = 50 \text{ d}$; $\frac{\partial c}{\partial z} = 1.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$; 祁连山西部 $\frac{\partial T_a}{\partial z} = 0.1388 \text{ K} \cdot (100\text{m})^{-1}$, 中部 $\frac{\partial T_a}{\partial z} = 0.1501 \text{ K} \cdot (100\text{m})^{-1}$ 。将上述两式中的参数值代入,得到祁连山西、中部雪线对气温波动的响应值 $\frac{\delta h}{\delta T_a}$ 分别为 $27.92 \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $31.9 \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$; 祁连山西、中部雪线对降水波动的响应值 $\frac{\delta h}{\delta c}$ 分别 $-0.3 \text{ m} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $-0.348 \text{ m} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

祁连山区降水、气温和雪线的关系总体为:年均气温升降 1°C 可使雪线在西、中部分别升降 27.92 m 和 31.9 m ; 降水量增减 100 mm , 可使雪线在西、中部分别升降 30 m 和 34.8 m 。根据面积变化和高度变化的关系,祁连山区西、中部雪线对气候波动的响应模型为:

$$\begin{aligned} \delta h &= 27.9\delta T_a - 0.35\delta c \text{ (西部)} \\ \delta h &= 31.9\delta T_a - 0.348\delta c \text{ (中部)} \end{aligned} \quad (9)$$

积雪面积对气候波动的响应为:

$$\begin{aligned} \delta S &= (\pi/\sin^2\theta) (27.9\delta T_a - 0.35\delta c)^2 \text{ (西部)} \\ \delta S &= (\pi/\sin^2\theta) (31.9\delta T_a - 0.3485\delta c)^2 \text{ (中部)} \end{aligned} \quad (10)$$

基于上式的计算,就可以根据气候的变化特征来推测雪线高度变化和积雪面积变化的特征。

4 结论

通过对 NOAA-AVHRR 数据和 EOS-MODIS 数据的分析,实现了不同卫星对积雪面积的判别,并且结合 DEM 地形资料,实现了通过面积监测来分析雪线高度变化的一条途径。

祁连山西、中、东部地区积雪面积变化的特征和趋势有所不同,6—8 月积雪面积都呈下降趋势,5 月积雪面积有所升高。

雪线高度处的气温变化随时间不同有明显不同,5 月为降低趋势,6—8 月略有升高,7 月升高最快;积雪区域的降水量变化具有一致性的特点,5—8 月祁连山西、中、东部累计降水量的变化趋势基本为增加趋势,并且自 1999 年以来特征更明显。

祁连山西、中部雪线高度随降水和气温的变化有明显的响应,随气温变化的响应值分别为 $27.92 \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $31.9 \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$, 随降水变化的响应值分别为 $-0.3 \text{ m} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $-0.348 \text{ m} \cdot \text{mm}^{-1}$, 并且中部较西部明显。

积雪累积期的人工增雨雪作业有利于祁连山区的积雪积累,并且 5—8 月的增雨作业也

利于抑制气候变暖的气候背景下的积雪消融速度。

参考文献

- [1] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟等. 祁连山水源涵养林水分传输规律研究. 中国生态农业学报, 2004, **12**(2): 289—296
- [2] 张杰,李栋梁. 黑河流域祁连山区局地降水量的空间结构和变化分析. 高原气象, 2004, **23**(1): 81—88
- [3] 王亚军,陈发虎,勾晓华. 黑河 230 年以来 3—6 月径流的变化. 冰川冻土, 2004, **26**(2): 202—206
- [4] 高前兆,杨新源. 甘肃河西内陆河径流特征与冰川补给. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 5 号. 北京: 科学出版社, 1985, 131—141
- [5] 杨针娘. 祁连山冰川水资源及其在河流中的作用. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 7 号. 北京: 科学出版社, 1992, 10—20
- [6] 程瑛,李栋梁,胡文超等. 祁连山冰川消融与高空气温变化的关系. 高原气象, 2002, **21**(2): 217—221
- [7] 孙鸿娉,闫世明,张立军等. 一次强降水过程的人工增雪作业. 山西气象, 2003, **64**(3): 22—24
- [8] 王吉宏,班显秀. 辽宁冬季人工增雪的可行性分析. 辽宁气象, 2003, **4**: 19—21
- [9] 王建,沈永平,鲁安新等. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 28—33
- [10] 史培军,陈晋. 1RS 与 GIS 支持下的草地雪灾监测试验研究. 地理学报, 1996, **51**(4): 296—305
- [11] 周咏梅,贾生海,刘萍. 利用 NOAA-AVHRR 资料估算积雪参量. 气象科学, 2001, **21**(1): 117—121
- [12] 延昊,张国平. 像元分解法提取积雪边界线. 山地学报, 2004, **22**(1): 110—115
- [13] Gao B C. Cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 μm water vapor band. *Geophysical Research Letters*, 1993, **20**(4): 301—304
- [14] Rossow W B, Garder L C. Cloud detection using satellite measurement of infrared and visible radiances for ISCCP. *J. Clim.*, 1993, **6**: 2341—2369
- [15] 张寅生,蒲健辰,姚檀栋. 我国大陆型山地冰川对气候变化的响应. 冰川冻土, 1998, **20**(1): 3—8
- [16] 吴豪,虞孝感,许刚. 长江源区冰川对全球气候变化的响应. 地理学与国土研究, 2001, **17**(4): 1—5