

基于 EOS/MODIS 积雪遥感监测的 北疆冬季人工增雪效果分析

张 旭¹, 陈爱京¹, 肖继东¹, 廖飞佳², 杨志华¹, 刘文峰³

(1. 新疆生态环境遥感中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 新疆 乌鲁木齐 830002;
3. 新疆维吾尔自治区发改委经济研究院能源与交通研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:在 EOS/MODIS 积雪遥感监测的基础上, 运用图示分析法、序列试验法、区域对比试验法, 分析了 2006—2008 年冬季在北疆进行的飞机人工增雪作业效果。研究结果表明, 作业效果明显, 作业可行; 利用积雪遥感监测数据进行人工增雪效果评价的方法, 能够客观地反映作业区域的积雪变化情况, 可用于飞机人工增雪作业效果的评价业务。

关键词:EOS/MODIS; 人工增雪; 效果分析

中图分类号:P407.8

文献标识码:B

文章编号:1002-0799(2010)01-0048-04

Effects Analysis of Artificial Snowfall in North Xinjiang Based on EOS/MODIS Snow Remote Sensing

ZHANG Xu¹, CHEN Ai-jin¹, XIAO Ji-dong¹, LIAO Fei-ja², YANG Zhi-hua¹,
LIU Wen-feng³

(1. Xinjiang Ecological and Remote Sensing Center, Urumqi 830002, China; 2. Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002, China; 3. Xinjiang Institute of Energy and Transportation, Development and Reform Committee Economic Research Academy, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on EOS/MODIS snow remote sensing, we analyzed the snowfall increase effects of snow-making operation in winter of 2006 to 2008 in North Xinjiang by means of non-random experiment, such as the diagram analysis, sequential test and regional comparative experiment. The results reveal that the effect of artificial snowfall is quite well and the date of EOS/MODIS snow remote sensing is able to describe the status of snow actually and evaluate the effect.

Key words: EOS/MODIS ; artificial snowfall; effect analysis

新疆水资源欠缺, 由于远离海洋, 受高山阻挡, 空中云水含量及其流量也相对较少, 形成了以干旱为特征的大陆性气候。山区降水稳定使新疆水资源比较稳定, 高山永久积雪和冰川的消融水对于河流径流的补给、调节和稳定流量有着非常重要的作

用。冰川分布与山体高度、降水量的分布相配合, 大致是北疆多于南疆, 西部多于东部, 山势越高, 冰川越多。新疆高山冰川面积约为 2.6 万 hm^2 , 冰川储量达 2.8 万亿 m^3 , 每年可融化 198.5 亿 m^3 水量补给河流。天山山区冰川最大, 其面积占全疆冰川面积的 34.9%, 储量占全疆的 35.7%, 容水量占全疆的 48.5%^[1]。利用这些得天独厚的优势, 在冬季开展人工增雪作业, 从战术上说是气象防灾、减灾的有效手

收稿日期: 2009-09-14

作者简介: 张旭(1979-), 男, 工程师, 主要从事生态环境遥感监测与评价研究工作。E-mail: 13899900682@139.com

段;从战略上说是合理开发利用空中水资源,缓解水资源短缺的重要途径。

人工影响天气的效果评估是人工增雨(雪)作业中必不可少的重要环节之一。由于云和降水的自然变率大,评估对象具有不确定性,因此,进行严格的效果检验,在国内外仍然是一个困难的问题。随着卫星遥感技术的不断发展,积雪的遥感监测技术逐步发展和完善,利用遥感手段对人工增雪进行评估成为可能。自2002年以来,冬春季在祁连山东部进行的增雪试验,通过EOS/MODIS卫星遥感检测,从直观上可以看出产生了较为理想的作业效果^[2]。然而目前利用遥感技术针对干旱区还没有形成一套科学的人工增雪效益评估模式。因此,科学地利用遥感手段评价增雪效果的研究十分必要。

1 地理环境与增雪作业

天山山脉东西横贯新疆中部,将新疆分割成南、北疆两大部分,山脊线海拔4 000 m以上,一般高度在4 000~5 000 m之间,最高峰托木尔峰海拔7 455 m。雪线高度,北坡为3 500~3 800 m,南坡为4 000~4 200 m。北坡较陡,有许多河流穿过,形成很深的峡谷。天山山脊线以北约46万km²的北疆年平均降水量只有255 mm^[3],工农业生产基本依赖于天山雪冰融水和山区降水形成的内陆河。

新疆人工影响天气工作起步早,规模大,效果显著,深得各级政府的大力支持和广大群众的赞誉和欢迎,其主要技术服务手段是人工增雨(雪)和人工防雹。其中冬季飞机人工增雪主要在北疆平原地区和浅山区进行,其目的是保护冬小麦安全越冬、牲畜越冬饮水和增加平原与山区积雪,增加来年春季土壤墒情和河水径流。2006年11月—2008年1月,新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室在机组成员、库尔勒机场航空调度、乌鲁木齐空军指挥所以及其他备降场的大力协助下,成功地组织实施了飞机人工增雪作业21架次(表1),作业时间累计98 h,作业面积累计覆盖39.3万km²,共释放烟弹2 183枚、烟条145根,播撒碘化银共计18 kg,取得显著效果。

2 积雪遥感监测及检验方法

2.1 积雪遥感监测

根据多年的积雪资料以及我国西北地区的气候特征研究,西北非常年积雪区冬季积雪深度一般在30 cm以内。多项早期研究表明,深度在30 cm

表1 北疆冬季增雪作业基本情况

序号	时间	作业区域	持续时间/h
1	2006-11-22	博州、昌吉、乌市、	3
2	2006-11-23	阿克苏、巴州	3
3	2006-11-24	塔城、博州、昌吉、阿克苏	5
4	2006-12-05	博州、昌吉、乌鲁木齐、阿克苏	4
5	2006-12-06	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	4
6	2006-12-17	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	3
7	2006-12-26	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	7
8	2007-01-19	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	4
9	2007-01-20	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	4.5
10	2007-01-21	昌吉、乌鲁木齐、吐鲁番、哈密	6
11	2007-01-25	哈密、昌吉、吐鲁番	6
12	2007-11-23	塔城、昌吉、乌鲁木齐	4
13	2007-12-07	博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐、哈密	6
14	2007-12-24	昌吉、乌鲁木齐	5
15	2007-12-25	阿勒泰、博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐	5
16	2007-12-26	阿勒泰、博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐、哈密	6
17	2008-01-10	阿克苏、巴州	4
18	2008-01-14	阿勒泰、博州、塔城、昌吉、乌鲁木齐、阿克苏	6.5
19	2008-01-15	昌吉、乌鲁木齐、哈密	4
20	2008-01-18	阿勒泰、昌吉、乌鲁木齐、巴州	5
21	2008-01-20	阿克苏、巴州	3

以内的雪面在可见光波段的反射率与深度之间存在较好的线性关系。利用EOS/MODIS可见光、近红外及短红外多通道资料,在考虑积雪性质包括积雪粒子相态、积雪年龄等的差异以及积雪区的下垫面条件不同的情况下进行积雪分类,在此基础上,建立EOS/MODIS积雪深度反演模型,并对模型的反演结果进行了验证。结果表明,利用该模型对30 cm以内的积雪进行深度反演计算,其精度能达到80%以上^[4-5],现在此模型已经在新疆生态环境遥感中心投入业务化运行。

2.2 效果检验时段的选择和资料的处理

人工影响天气作业时间段为2006—2008年冬季,作业的月份为1月、11月、12月。所用资料包括1990—2004年AVHRR遥感资料和2004—2008年冬季EOS/MODIS遥感监测数据,数据经过解包、定标、定位等预处理后进行投影转换,投影后的局地文件进入积雪深度反演模型计算生成雪深及雪覆盖文件,对多天的雪深文件进行去云合成,最终得到用于此次增雪效果评估检验的雪深数据产品。

2.3 效果检验方法的确定

冬季实施的业务性人工增雪作业,为了得到较好的效果,作业时间和地点的选择主要依据天气过

程的发展,从效果检验角度划分,它属于一种非随机试验,可以采用一些公认可行的方法进行检验^[6-9]。以遥感积雪监测数据为基础,本文采用图示分析法、序列试验法和区域对比法对试验区增雪效果进行评估检验。

3 效果检验

3.1 图示分析

2007年冬季开展的人工增雪作业从2006年11月22日开始至2007年1月25日结束,期间共作业11架次,作业覆盖范围主要包括博州、塔城地区南部、昌吉州、乌鲁木齐和巴州的部分山区和平原。

利用积雪深度遥感反演模型对2007年1月26日—28日的EOS/MODIS数据进行计算处理,计算生成的雪深文件以28日为主去云合成生成积雪深度分布图。在作业区内主要有两条作业航线,一条沿天山山脉浅山区东西分布,另一条穿越准噶尔盆地南北。两条作业航线影响范围内都有较好的积雪覆盖,其中从南北分布的作业区可以看出积雪覆盖中心区域位于系统移动的下方,可以定性的说明作业后在其下风处催化效果较好。

由于冬季增雪作业所针对的云层均为系统性的、大范围的层状云系,符合进行作业效果垂直分布图的要求。从图1可以看出,2007年冬季人工增雪后的积雪深度垂直分布表明飞机播撒催化剂增雪是有效的,其影响范围大致在下风方向的50 km以内。

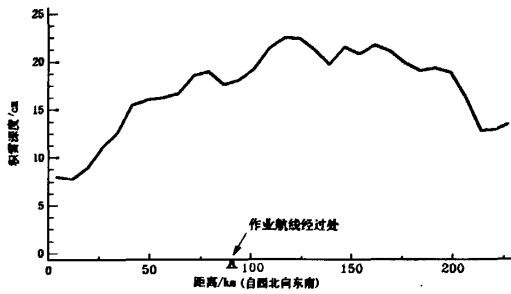


图1 2007年冬季增雪作业垂直效果分析图

3.2 序列试验

3.2.1 增雪面积统计

以昌吉、乌鲁木齐、博州和塔城地区作为序列试验区,处理2006年11月—2008年1月的试验区EOS/MODIS卫星资料,计算统计得到实施作业期间各旬的积雪覆盖面积为 X ;取试验区1990年至2004年冬季(1月、11月、12月)积雪覆盖面积各旬

15 a平均值计为 Y ,作为试验期积雪覆盖面积的估计值;1990—2004年冬季各旬积雪覆盖面积由AVHRR遥感资料反演得到。根据公式:

$$\Delta R = \bar{X} - \bar{Y}, \tag{1}$$

$$E = (\Delta R) / \bar{Y}, \tag{2}$$

计算得到此次增雪作业期间积雪覆盖面积的绝对增值 ΔR 和相对增值 E (表2)。

表2 人工增雪序列试验检验

地区	$\Delta R/\text{km}^2$	$E/\%$
塔城	1.5×10^4	24.6
博州	0.5×10^4	37.5
昌吉	0.7×10^4	13.7
乌鲁木齐	-462.9	-8.4
合计	2.6×10^4	67.4

3.2.2 效果显著性检验

平均值的显著性检验在概率统计中一般有大样本检验(统计量近似遵从正态分布)和小样本检验(统计量遵从 t 分布)。在气象上,由于通常使用的样本量不大,一般情况下,大多使用 t 分布统计量^[9]。

本次序列试验效果检验采用 t 检验,公式为:

$$t = (r - \frac{n}{2}) / \sqrt{\frac{\pi}{4}}. \tag{3}$$

假设 $H_0: X=Y$,得出统计结果(表3)。

从表3可以看出,当显著度取 $\alpha=0.05$ 时, t_α 的置信区间为 $(-1.960, 1.960)$,除乌鲁木齐地区 t 在置信区间内,其他作业区 t 位于置信区间之外,拒绝原假设。则说明北疆大部分作业区实施增雪作业后积雪覆盖面积与过去15 a均值有显著性差异,且信度在95%以上。

表3 人工增雪序列试验各参数

T 检验参数	n	n^+	n^-	r	t
塔城	9	8	1	1	-3.95
博州	8	8	0	0	-4.51
昌吉	10	7	3	3	-2.26
乌鲁木齐	9	3	6	3	-1.69

3.3 区域对比试验

3.3.1 试验区 and 对比区的确定

人工增雨(雪)试验是在自然条件无法控制,甚至难以预测的大自然环境中进行的试验。为了科学的进行这类试验,人们往往求助于随机化试验设计,将适于作业的对象随机地分出一部分不作业,保持其自然状态作为对比样本,并据此检验作业样本的

效果。对于系统性降水过程,可以采用区域趋势对比分析方法评估作业效果,即选择云系结构与作业区相似的临近地带作为对比区。

根据对比区与试验区选择的基本条件,增雪试验区选定为塔城地区南部作业影响区内(图2)。对比区的选择满足以下条件:(1)出现的降水系统和主要云系相似;(2)地理特征相似;(3)不受试验区催化剂影响;(4)遥感资料与试验区同步。

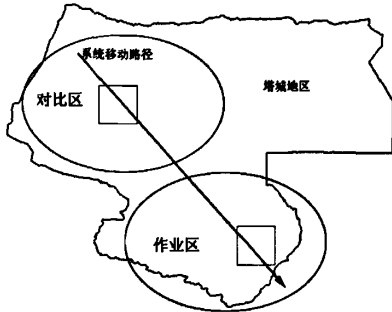


图2 对比试验示意图

3.3.2 增雪效果统计

在作业区和对比区中选择相同面积的矩形区域对作业期间的雪深资料进行统计计算得到区域内雪量信息(表4)。从对比试验结果中可以看出作业期间作业区的雪量 a 与对比区的 b 相比有较明显的增加,增雪效果最大为58%。

表4 人工增雪对比试验结果

作业区 $a/10^8\text{m}^3$	对比区雪量 $b/10^8\text{m}^3$	评定	$a-b/10^8\text{m}^3$	$(a-b)/b$
2.03	3.55	-	-1.52	
2.22	2.13	+	0.09	0.04
2.03	2.02	+	0.01	0.005
1.25	2.20	-	-0.95	
2.86	2.69	+	0.17	0.06
3.74	2.36	+	1.38	0.58
3.48	2.54	+	0.94	0.37
3.99	3.81	+	0.18	0.05
3.50	3.04	+	0.45	0.15

3.3.3 增雪效果检验

假设 $H_0: a=b$, 即作业区与对比区雪量无显著差

异。增雪作业的次数 $n=9$, 增雪为正效果的个数 $n^+=7$, 增雪为负效果的个数 $n^-=2$, $r=\min(n^+, n^-)=2$, 采用 t 检验, 计算统计量 t :

$$t=(r-\frac{n}{2})/\sqrt{\frac{\pi}{4}}=-2.82 \tag{4}$$

当显著度取 $\alpha=0.05$ 时, t_α 的置信区间为 $(-1.960, 1.960)$ 。由于 $t=-2.82$ 处于置信区间之外, 拒绝原假设。说明作业区雪量与对比区雪量有显著性差异, 且信度在95%以上。

4 结果及讨论

运用图示分析法、序列实验法、区域对比法对增雪效果进行检验, 均有显著的增雪效果, 研究结果表明, 冬季在北疆实施的飞机增雪作业, 增雪效果明显, 作业可行。

以 EOS/MODIS 积雪遥感监测数据替代台站实测数据进行人工增雪效果分析是可行的, 能够客观地反映作业区域的积雪状况, 可用于飞机人工增雪作业效果的评价业务。

分析结果表明北疆冬季实施的人工飞机增雪作业在浅山区和山区产生了明显的效果, 平原地区受到作业范围不固定以及作业次数较少的影响, 增雪效果不够显著。

参考文献:

[1] 任宜勇.新疆决策气象服务指导手册[M].乌鲁木齐:新疆大学出版社,2006:11.
[2] 钱莉,王文,张峰,等.河西走廊东部冬春季人工增雪试验效果评估[J].干旱区研究,2006,23(2):349-354.
[3] 张学文,张家宝.新疆气象手册[M].北京:气象出版社,2006:72.
[4] 李三妹,傅华,黄镇,等.用EOS/MODIS资料反演积雪深度参量[J].干旱区地理,2006,29(5):718-725.
[5] 傅华,李三妹,黄镇,等.MODIS雪深反演数学模型验证及分析[J].干旱区地理,2007,30(6):907-914.
[6] 叶家东,范蓓芬.人工影响天气的统计数学方法[M].北京:科学出版社,1982.
[7] 中国气象局科技发展司.人工影响天气岗位培训教材[M].北京:气象出版社,2003.
[8] 章澄昌.人工影响天气概论[M].北京:气象出版社,1992.
[9] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,2000.