

# 天山西部中山带积雪变化趋势与气温和降水的关系 ——以巩乃斯河谷为例

张丽旭, 魏文寿

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:** 根据位于巩乃斯河谷的天山积雪雪崩研究站近 30 a 来的年最大雪深、月平均气温、月降水量观测记录, 用平均差值法、最小二乘法、自回归滑动平均法检验了天山西部中山带积雪、冷季降水、冷季平均气温的变化趋势, 结果表明, 天山西部中山带积雪呈增加趋势, 近 30 a 来年平均增加 1.43 %, 与青藏高原、南极大陆及格陵兰冰盖表面积雪积累增加相一致。天山西部中山带冷季气温和降水的变化趋势也是增加的, 其中冷季降水年平均增加 0.12 %, 而冷季气温升高了 0.8 °C, 积雪与冷季气温之间存在着弱的负相关关系, 而与冷季降水呈显著的正相关关系。积雪的增加主要是因为气候变暖引起的冷季降水的增加对积雪增加的贡献大于由于冷季气温升高而造成积雪减少的贡献的结果。

**关键词:** 天山西部中山带; 积雪; 气温; 降水; 变化趋势; 二元回归分析

**中图分类号:** P463.25; P468.0<sup>+</sup>25

**文献标识码:** A

积雪是气候系统中的一个重要组成部分, 对气候变化十分敏感。在所有可变的地球条件中, 积雪是一个关键的可变因子, 它是人类活动引起区域气候变化的一个指示器。因此, 积雪已经成为检验与监测全球变化的一个重要的指数<sup>[1]</sup>。另一方面, 积雪是气候的产物, 区域积雪的长期波动变化无疑是区域气候长期变化的结果。近百年来, 积雪的变化一直为中外气候学家所关注, 监测积雪变化已成为探测全球变暖、诊断区域气候与积雪相互作用的重要手段。西北干旱区是我国地表水资源极为匮乏的地区, 也是我国积雪资源最丰富的地区。我国三大稳定积雪区<sup>[2]</sup>中, 2/5 的面积位于西北地区, 新疆的积雪更是得天独厚, 占全国积雪资源的 1/3<sup>[3]</sup>。天山, 作为新疆干旱区的“湿岛”, 冬季降雪丰沛, 其西部的降雪比东部丰富<sup>[4]</sup>。据研究, 天山西部伊犁河流域年最大雪深普遍超过 60 cm, 天山积雪雪崩研究站和伊犁年最大雪深高达 129 cm 和 89 cm, 东部的精河和七角井仅为 10 cm 左右<sup>[5]</sup>。同时, 天山冰雪覆盖区是新疆、尤其是北疆许多河流的发源地, 冰雪融水是新疆干旱区农业的命脉, 而区域气候变化导致的积雪变化对春、夏季河川径流的影响将会对

干旱区经济和脆弱生态环境产生严重的后果, 甚至会导致旱涝灾害的频繁发生, 这些影响在干旱区尤为突出<sup>[6]</sup>。因此, 摸清干旱区积雪与气候变化的关系对干旱区的农、牧业和经济的可持续发展具有重要的意义。

本文选用中国科学院天山积雪雪崩研究站的月降水量、月均温(1967~1997 年)和年最大积雪深度(1974~1999 年)实测资料建立时间序列, 来分析天山西部中山带积雪与气温、降水的关系。

## 1 研究区域概况

积雪是降雪在地面净积累的产物, 积雪与某一地区的特定位置、水文特征、植被状况和气候条件等因子密切相关。

巩乃斯河是伊犁河的一条支流, 地处天山西段山地内, 源自天山北坡。巩乃斯山间谷地位于阿夫拉尔山脉之南, 为一东西向第四纪冰川冰水侵蚀的平直纵谷。研究区域位于谷地上游的阿吾拉勒山和那拉提山之间的河谷地带, 前者走向 S75°E, 后者 N75°E, 整个谷地被敞开的山体包围。天山积雪雪崩

收稿日期: 2001-01-19; 改回日期: 2001-04-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(批准号: 49871004)。

作者简介: 张丽旭(1974-), 男(汉), 河南省禹州市人, 中科院新疆生态与地理研究所读硕士研究生, 专业: 自然地理学。方向: 环境生态。E-mail: zhang3-19@263.net

研究站就位于该河谷,海拔 1 776 m,地理坐标  $83^{\circ}24'E, 43^{\circ}16'N$ 。站区河谷下切深度 700 m ~ 800 m。南北两侧为壮年断块山地,谷宽 100 m 左右,位于天山山地森林垂直带内,优势种为雪岭云杉 (*Piceaschrenkiana*),主要分布于北坡,而南坡则以山地草甸植被为主。站区多年平均气温  $1.3^{\circ}C$ , 1 月和 7 月平均气温分别为  $-14.4^{\circ}C$  和  $13.8^{\circ}C$ 。多年平均降水量 837.3 mm,最大可达 1 112.9 mm (1987 年)。其中冷季 (11 ~ 3 月) 固态降水占年降水量的 30 % 以上。这里是天山中山带的典型代表,具有普遍性。

## 2 积雪的变化趋势

### 2.1 原始资料处理

1. 标准化 为了在趋势分析中消除原始资料由于单位的不同而造成的影响,使它们能在同一水平上进行比较,在实际中常常使用标准化方法<sup>[7]</sup>,使它们变成同一水平的无单位变量,即

$$S_{zi} = \frac{S_i - \bar{S}}{S}, T_{zi} = \frac{T_i - \bar{T}}{S}, P_{zi} = \frac{P_i - \bar{P}}{S} \quad (i=1, 2, 3 \dots n) \quad (1)$$

式中  $S_{zi}$ 、 $T_{zi}$  和  $P_{zi}$  分别表示  $i$  年标准化后的年最大雪深、冷季气温和降水,  $S_i$ 、 $T_i$  和  $P_i$  分别为年最大雪深、冷季气温和降水,  $\bar{S}$ 、 $\bar{T}$ 、 $\bar{P}$  分别为年最大雪深、冬季气温和降水平均值,  $S$  为各原始资料的标准差。其实经过对实测各要素标准化处理,使时间序列变为平均值为 0, 方差为 1 的序列。

2. 均值化 为了进行对比和做多元回归分析和相关分析,弄清积雪的变化和气温与降水之间的函数关系,还要对实测各要素时间序列进行均值化 (无量纲化) 处理<sup>[8]</sup>, 即

$$SI_i = S_i / \bar{S}, TI_i = T_i / \bar{T}, PI_i = P_i / \bar{P} \quad (i=1, 2, 3 \dots n) \quad (2)$$

式中  $SI_i$ 、 $TI_i$  和  $PI_i$  分别为  $i$  年均值化后的年最大雪深、冷季降水和气温,  $S_i$ 、 $T_i$  和  $P_i$  分别为  $i$  年实测的年最大雪深、冷季降水和气温。上述过程实际上是通过将实测各要素进行均值化处理,使得各系列元素的平均值为 1, 从而在做回归分析时消除各时间序列因权重不同和各要素因单位不同所产生的影响,使不同要素及各系列数据之间具有可比性。经过这样处理并不影响各系列之间的相关性。

### 2.2 分析模型与分析方法

#### 2.2.1 分析模型

1. 趋势检验统计模型 在气候变化的探测与预测分析研究中,下面的统计模型被认为最适合于对观测时间序列进行趋势检验<sup>[9]</sup>

$$Y_t = a + bt + E_t \quad (3)$$

式中  $Y_t$  代表年最大雪深、冷季降水和气温的实测值;  $E_t$  表示趋势直线的偏差,通常假定它是均值为 0 的平稳随机过程。

2. 多元线性回归模型 在分析积雪的变化与冷季气温和降水关系时,本文采用多元线性回归模型。由于当年的最大积雪量与上年冷季气温和降水有密切的关系,因此本文用 1974 ~ 1998 年的年最大雪深与 1973 ~ 1997 年冷季降水和气温的均值化时间序列作相关分析并建立回归方程。其基本模型为

$$SI_i = c + aTI_i + bPI_i \quad (4)$$

式中  $c$ 、 $a$ 、 $b$  为回归方程的回归系数,根据这些系数的大小,可初步判断参变量对积雪量的重要程度,这种方法叫标准系数法。

#### 2.2.2 分析方法

1. 平均差值法 当变化趋势为线性函数时,无偏差趋势估计 ( $B_{AV}$ ) 一般用平均差值法计算

$$B_{AV} = \left[ \frac{1}{M} \right] \times \left[ \left[ \frac{1}{M} \right] \sum_{t=1}^t Y_t - \left[ \frac{1}{M} \right] \sum_{t=1}^M Y_t \right] \quad (5)$$

式中  $t$  为时间序列的长度,  $M = \frac{t}{2}$ 。它适合分析阶式变化序列。

2. 最小二乘法 当然,当趋势线呈线性函数时,也一定可以用最小二乘法来拟合,即

$$b_{ls} = \frac{\sum_{t=1}^T (t - \bar{t}) Y_t}{\sum_{t=1}^T (t - \bar{t})^2} \quad (6)$$

3. 自回归滑动平均法 (ARMA) 当变化趋势线呈非线性时,或者偏差  $\{E_t\}$  具有顺序相关的性质时,变化趋势的探测就变得复杂和困难起来。首先上述两种方法不能区别短期变化和长期变化趋势。其次,会给变化趋势的估计带来误差。当时间序列存在随机变化趋势时,为了探测出它的确定变化趋势,可使用自回归滑动平均模型 ARMA ( $p, q$ )<sup>[7]</sup> 进行分析。因为它不需要假设序列呈线性,其趋势取决于序列自身的相关性。由于积雪、降水、气温的时间序列还不够长,为了简化计算,使用一阶自回归模型 AR(1)<sup>[7]</sup>。通过推导将趋势表示成两个估计的加权平均<sup>[10]</sup>

$$b_{AR(1)} = \frac{W_k b_{ls} + W_{EP} b_{EP}}{W_k + W_{EP}} \quad (7)$$

$$\bar{t} = \frac{T+1}{2}; \rho \text{ 为时间序列的自相关系数。}$$

式中  $W_k = (1 - \rho)^2 T(T + 1)$ ;  $W_{EP} = 6\rho[(1 - \rho) \cdot (T - 1) + 2]$ ;  $b_{EP} = \frac{Y_t - Y_1}{T - 1}$ ;  $T$  为时间序列的长度;

用上述三种方法对标准化后的年最大积雪深度时间序列作趋势分析, 其结果见表 1。

表 1 天山西部中山带积雪三种变化趋势估计方法的检验结果

Table 1 Three trend estimates based on the difference of average, least squares fitting and slope AR(1) process

地区	$B_{AR}$	$b_{ls}$	$b_{AR(1)}$	置信度 $\alpha$
天山西部中山带	0.03044	0.0466	0.0463	0.02

从表(1)可以看出三种检验方法得出的结果均为正值, 这说明天山西部中山带的积雪长期以来是呈增加的趋势。并且根据标准误差检验趋势的显著性结果表明, 趋势估计通过了  $\alpha=0.02$  的显著性水平的检验, 这更充分证明天山西部中山带积雪的变化趋势绝非偶然过程, 它具有确定的长期增长趋势。现将年最大雪深时间序列的变化用最小二乘法作线性拟合(见图 1)。年最大雪深的一元线性回归方程

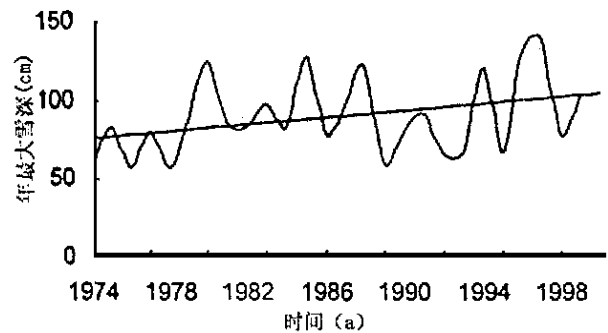
$$Y_s = 1.1326X_t + 74.978$$


图 1 天山西部中山带年最大积雪深度时间序列及其拟合直线

Fig. 1 Time series of annual mainum snocover depth in the Middle Mountains Belt of western Tianshan and its fitting line

根据线性回归方程, 近 26 a 来天山西部中山带年最大雪深平均增长 1.43 %。

虽然, 随着全球的变暖, 北半球大陆积雪面积自 1987 年以来显著减少<sup>[1]</sup>, Aizen 等指出西天山积雪储量和持续也在减少<sup>[11]</sup>, Groisman 等也指出近 20 年来北半球温带低地春季积雪减少 10 %<sup>[12]</sup>。但, 据李培基研究近 50 a 来新疆年积雪日数和年累积雪深分别增加 8.9 d 和 20.8 cm<sup>[13]</sup>。就大范围来说, 气温上升可能导致干旱区降水增多<sup>[14]</sup>、青藏高原积雪变化趋势和格陵兰冰盖表面高程增加<sup>[15]</sup>, 以及南极大陆冰盖积累率的增加<sup>[16]</sup>。同时, 海气环流模式模拟结果表明, 随着 CO<sub>2</sub> 导致的全球变暖, 高纬度地区和高山地区降雪量将增加, 温带地区冬季降雪量也将增加<sup>[6]</sup>。这些表明, 积雪随气候变暖而增加的趋势可能成为寒冷区中高山带固有的特征。

3 积雪与气温和降水的关系

3.1 冷季气温与降水的变化趋势

为了避免气温、降水的季节变化对积雪的影响, 研究积雪年际变化与气温和降水年际变化的关系, 首先用上述三种方法对冷季气温和降水的时间序列作变化趋势分析, 结果见表 2。

表 2 天山西部中山带冷季气温和降水三种变化趋势估计方法的检验结果

Table 2 Three trend estimates based on the difference of average, least squares fitting and slope AR(1) process

气候指标	$B_{AR}$	$b_{ls}$	$b_{AR(1)}$	置信度 $\alpha$
冷季气温	0.0088	0.0237	0.0236	0.05
冷季降水	0.0131	0.0039	0.0042	0.07

从表 2 可以看出, 天山西部中山带冷季气温和降水时间序列都呈长期增加的趋势, 这与徐俊荣等

的研究相一致<sup>[4]</sup>。与前面积雪的变化趋势比较可知, 积雪长期增加的趋势值比冷季气温和降水的变

化趋势值都大, 积雪长期变化的增加趋势更加显著。对降水、气温时间序列的变化也作线性拟合(图 2, 3)。冷季气温和降水的一元回归方程

$$Y_T=0.0268X_t-9.3872; Y_p=0.2318X_t+190.77$$

根据这些线性回归方程, 天山西部中山带近

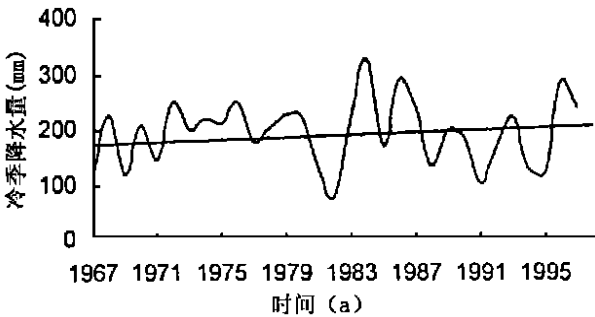


图 2 天山西部中山带冷季降水时间序列及其拟合直线  
Fig. 2 Time series of precipitation in the Middle Mountains Belt of western Tianshan and fitting line during the cold season

31 a来冷季降水年平均增长率为0.12 %, 冷季气温平均升高了 0.8 ℃。

3.2 积雪年际变化与冷季气温和降水年际变化的关系  
对均值化后的积雪、冷季(11月~次年3月)气温和降水时间序列作相关分析, 其结果如表 3。

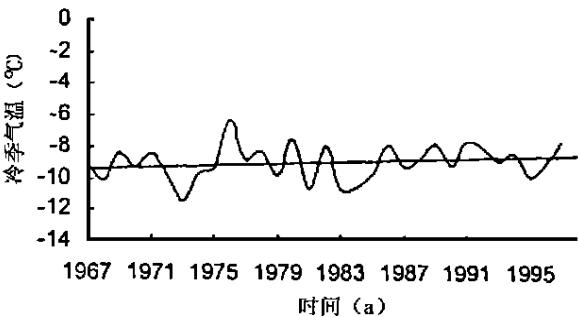


图 3 天山西部中山带冷季气温时间序列及其拟合直线  
Fig. 3 Time series of temperature in the Middle Mountains Belt of western Tianshan and fitting line during the cold season

表 3 积雪、降水和气温的相关分析结果<sup>1)</sup>

Tab. 3 The consequence of the correlation-analysis on the snowcover, the cold season precipitation and temperature

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$X_1$	1		
$X_2$	0.51991	1	
$X_3$	-0.40704	-0.16379	1

1)表中,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分别为年最大雪深、冷季降水和气温时间序列。

通过表 3 可知, 积雪的年际变化与冷季气温的年际变化呈弱的负相关关系, 而与冷季降水的年际变化呈显著的正相关关系。且根据标准误差检验, 积雪的年际变化与冷季降水的年际变化的相关系数通过了 $\alpha=0.02$ 的显著性检验。也就是说, 积雪会随着冷季降水的增加而显著增加; 而随着冷季气温的升高而减少, 但减少的趋势不十分显著。根据公式(4)对积雪、冷季气温和降水的时间序列作二元回归分析, 其方程

$$Y_s=0.3772X_p-0.75595X_t-0.12815$$

根据标准误差检验, 该回归方程通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 这表明回归的整体效果显著。根据标准系数法, 从气温  $X_t$  与降水  $X_p$  的回归系数可以看出, 积雪会随着中山带气候的变暖而减少, 但是还会随着由变暖而引起的中山带冷季降水的增加而增多。对此回归方程作进一步分析, 根据影响因子分析法<sup>[8]</sup>

$$C=STib_i/e_i$$

式中  $C$  为影响因子;  $ST_i$  为冷季气温的符号, 对于冷季降水  $ST_i=1$ ; 对于冷季气温,  $ST_i=-1$ ;  $b_i$  为方程中不同要素的回归系数;  $e_i$  为各个回归系数的标准误差值。通过计算冷季降水的影响因子为 2.46913, 而冷季气温的影响因子为 1.75356。因为影响因子  $C$  越大,  $b_i$  所对应的参变量对回归方程的贡献越大, 即对因变量的影响程度越大, 所以根据分析可知, 冷季降水对积雪增加的贡献比由于冷季气温升高而造成积雪减少的贡献大。因此, 从总体上的来看, 天山西部中山带的积雪长期以来呈增加的趋势。

4 结 论

随着全球的变暖, 天山西部中山带的积雪与青藏高原、南极大陆冰盖和格陵兰冰盖一样, 积雪的积累有所增加, 这与 Aizen 的结论<sup>[11]</sup> 相反。这可能与资料的来源和序列的长短不同有关。天山西部中山带年最大积雪深度与该区冷季气温呈弱的负相关关

系, 而与该地区冷季降水呈显著的正相关关系。近 31 a 来天山西部中山带冷季气温升高了  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 同时冷季降水量年平均增长率为  $0.12\%$ 。近 26 a 来中山带年最大积雪深度年平均增长率为  $1.43\%$ 。二元回归方程分析也明显的表明, 在全球变暖的总体背景下, 该区冷季降水量增加而导致的积雪量增加, 大于本区由于冷季气温升高引起的积雪量的减少, 所以从总体上看积雪仍然是呈增加的趋势。

参考文献:

[1] Robinson D A et al. Recent secular variations in the extent of northern hemispheresnow cover[ J] . Geophysical Research Letters, 1990, 17 (10): 1 557 ~ 1 560.

[2] 李培基. 中国积雪分布[ J] . 冰川冻土, 1983, 5(4): 9~ 18.

[3] 李培基. 中国季节积雪资源初步评价[ J] . 地理学报, 1998, 43 (2): 108~ 119.

[4] 徐俊荣, 仇家琪. 天山地区 30 年来冬季降雪波动研究[ J] . 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 123 ~ 128.

[5] 仇家琪, 孙希华. 天山积雪初步研究[ J] . 干旱区地理, 1992 15 (3): 9~ 20.

[6] IPPC. Climate change1995 adaptations and mitigation of climate change

[ C] . Cambr-idge: Cambridge University Press 1995.

[ 7] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[ M] . 北京: 气象出版社, 2000 (第 2 版)

[ 8] 丁永建等. 祁连山区流域径流影响因子分析[ J] . 地理学报, 1999, 54(5): 432 ~ 433.

[ 9] Woodward W A, Gray H L. Global waming and the problem of testing for trend in timeseries dat[ J] . Journal of Climate, 1993, 6: 953~ 962.

[ 10] Bloomfield P, Nychka D. Climate spectra and detecting climate change [ J] . Climat-ic Change, 1992, 21: 275 ~ 287.

[ 11] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M. Climatic and hydrologic changes in the Tianshan, Central Asia[ J] . J Climate, 1997, 10: 1 393 ~ 1 404.

[ 12] Groisman P, Karl T R, Knight R W. Observed impact of snow cover on the heat balanceand the rise of continental spring temperatures[ J] . Science, 1994 263: 198 ~ 200.

[ 13] 李培基. 1951 ~ 1997 年中国西北地区积雪水资源的变化[ J] . 中国科学(D 辑), 1999, 29(1): 63 ~ 69.

[ 14] 王承义. 新疆降雪资源[ A] . 见: 中国干旱、半干旱地区气候、环境与区域发展研究[ C] . 北京: 气象出版社, 100 ~ 103.

[ 15] Zwally H J, Brenner A C, Major J A, et al. Growth of Greenland ice sheet; Measureme-nt and interpretation[ J] . Science 1989 246: 1 587 ~ 1 591.

[ 16] Morgan V I et al. Evidence from Antarctic ice cores for recent increase in snow accumulation[ J] . Nature, 1991, 354: 58 ~ 60.

Variation Trends of Snowcover in the Middle Mountains of Western Tianshan and Their Relations to Temperature and Precipitation  
——Take the Valley of Gongnaisi River as Example

ZHANG Li-xu and WEI Wen-shou

(Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of science, Urumuqi 830011 China)

**Abstract:** On the basis of observed records of daily snowcover depth, monthly average temperature and monthly total precipitation at Tianshan Mountains Snowcover and Avalanche Station in the valley of Gongnaisi River, three trend estimates about the snowcover depth, cold season precipitation and cold season temperature by using the difference of average, least square fitting and slope AR(1)process are made. The results show that an increasing trend of the snowcover depth is very significant in the middle mountains of western Tianshan in the last 30 years or so. The change trend coincides with the snowcover change trend over the Tibetan Plateau, and the snowcover accumulation increases in Antarctica and Greenland. The secular trend of cold season temperature and precipitation is increasing as well. In the last 30 years, the annual accumulation of snowcover increases  $1.43\%$ , the annual increasing rate of cold season precipitation is  $0.12\%$ , the cold season temperature has increased  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A significant positive correlation exists between snowcover and cold season precipitation, but the correlation between snowcover and cold season temperature is negative weakly. The increases of snowcover mainly result from the increases of cold season precipitation with climate warming.

**Key words:** the middle mountains belt of western Tianshan; snowcover; temperature; precipitation; variation trends; multiple linear regressive analysis