

新疆积雪对气候变暖的响应^{*}

李培基

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

摘 要

积雪对全球变暖的响应是当前正在争论的问题。文中通过地面气象台站和 SMMR 微波卫星遥感两种积雪资料所建立的两个独立的积雪序列的一致性, 证明前者在表现新疆积雪长期变化能力方面具有可靠性。阐明了积雪年际变化特征及其与冬季气温和降水量年际波动的关系, 检验了积雪长期变化趋势。研究表明, 虽然近 50 a 来新疆冬季变暖十分显著, 尤其 20 世纪 90 年代为最温暖的时期, 但是积雪并未出现持续减少的现象; 积雪长期变化表现为显著的年际波动过程叠加在长期缓慢的增加趋势之上。积雪年际波动是冬季降水量和气温两者年际波动共同作用的结果; 冬季气温和降雪量变化受不同的欧亚环流振荡所控制; 积雪增加趋势与降雪量趋势相一致, 这可能是由于全球变暖导致海洋蒸发量增加, 以及在寒冷干燥气候下积雪对降雪量变化更为敏感的缘故。

关键词: 新疆, 积雪年际变化, 气候响应。

1 引 言

人类面临全球变暖及其对大陆积雪产生巨大影响的科学预言^[1,2], 使积雪对全球变暖响应研究成为全球变化研究中的热点。新疆为中国西北干旱区的主体, 也是中国季节积雪水资源最为丰富的地区^[3]。这里的农业灌溉和畜牧业发展主要依赖于积雪融水。气候变暖将可能导致积雪显著减少, 还是积雪稳定状态仍可得以维持, 对西北干旱区经济可持续发展具有重要影响^[4]。

关于积雪对气候变暖的响应, 前人分析了积雪与气温的关系, 但仅从积雪与气温呈负相关来探讨积雪对全球变暖的响应, 预测积雪未来的变化, 并把积雪与气温之间的正反馈循环视为普遍规律。于是气候学家普遍推测全球变暖必将导致大陆积雪的显著减少。然而出乎意料, NOAA 卫星对全球积雪长达 20 a 的监测结果并未发现大陆积雪出现任何减少趋势^[5]。直到 1990 年 Robinson 报导了北半球大陆积雪面积 1987 年以来出现显著减少^[6], 引起广泛关注。接着 Groisman 指出近 20 a 来温带地区积雪的减少和春季积雪的提前消失^[7]。然而 20 世纪 90 年代积雪显著正距平的反复出现终于使他们意识到, 是由于 NOAA 卫星积雪观测资料年代不够长, 误导人们把正常的积雪年代际波动判断为持续减少的趋

* 初稿时间: 1999年2月26日; 修改稿时间: 1999年11月17日。
资助课题: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-06)和方向项目(KZCX2-3-01)

势了^[8,9]。与此同时,越来越多的观测表明,近50 a 来南极冰盖雪积累率在增加^[10],表面物质平衡为正值^[11];格陵兰冰盖表面高程在升高^[12]。冰芯分析发现,末次冰期鼎盛时期两极地区气温比现在低10℃,降雪量仅为现在的一半^[13];而 Younger Dryas 冷期结束时,格陵兰雪积累率突然增加一倍^[14]。高分辨率(50 km × 50 km)大气环流模式模拟结果得出,在未来一百年中南极大陆冰盖表面物质平衡继续维持正值^[15]。似乎降雪量和积雪量的增加成为极寒冷地区气候转暖时期的固有特征。直到现在,全球积雪变化呈现出明显的区域分异,积雪对全球变暖的响应问题仍然是个未解之谜。

2 积雪资料的选择与处理

探讨积雪对气候变化的响应需要观测年代长且连续的积雪资料。同时,其空间分辨率要足够高,以便具备表现积雪空间分布与变化实况的能力。目前,唯有地面气象台站积雪记录基本符合前一个条件。然而台站测雪的弱点是空间上的不连续性,空间分布的不规则性和不均匀性。积雪主要分布在山区,那里积雪年际变化也最为显著,但是通常很少甚至无台站分布。因此单独使用气象台站资料显然难以反映山区积雪地面实况和真实的年际变化。这方面国外学者做了大量的卫星遥感观测资料与地面气象台站观测资料的对比研究工作^[16]。新疆地域辽阔,地形复杂,分布着中国著名的五大山系。用地面气象台站观测资料建立的积雪时间序列,其真实性和可信性如何必须首先得到阐明。

NOAA/NESDIS 北半球数字化周积雪面积图是达到气象业务化和规范化的卫星积雪资料。可惜它仅限于积雪面积,并且还受到云的干扰,在高山地区积雪缺测漏测现象时有发生。积雪资料网格分辨率低(2° × 2° 经纬网格),适合半球和大陆尺度积雪研究,不适合单独用于区域积雪监测,或者在区域积雪研究中把它当作积雪地面实况与台站资料进行对比。鉴于可见光测雪的局限性,微波遥感受到越来越多的关注。与可见光相比,其突出优点是不受云和天空亮度的干扰,能够测量雪深。美国宇航局 SMMR 数字化候积雪深度图分辨率为0.5° × 0.5° 经纬网格,资料连续长达10 a。为了纠正北半球单一雪深反演算式在新疆引起的测雪误差,对它进行了大气厚度订正和斑状浅雪面积订正,在地理信息系统支持下建立起中国西部 SMMR 雪深反演公式^[17]。用1007个0.5° × 0.5° 经纬网格经过新疆雪深反演公式计算出雪深,建立起新疆1978~1987年SMMR逐候积雪深度时间序列。

为了对地面气象台站积雪资料进行质量控制,从百余个台站中每2° × 2° 经纬网格选取一个代表台站。其观测年代要尽可能长,最好是最长的一个。并要求其站址无变更,资料无缺测、漏测。这样在平面网格上共选出38个台站。考虑到山地对积雪分布的重要影响,又选取海拔高程在2000~4000 m 之间的8个高山台站作为对平面台站网的加密措施。用这46个代表台站空间平均方法,进一步消除积雪资料可能存在的不均匀性,建立起1951~1997年新疆地区自然年度(9月1日到次年8月31日)年积雪日数和年累加日积雪深度时间序列。

用 SMMR 候积雪贮量的年累加值时间序列对其检验的结果(图1)表明,尽管两个积雪参数气候含义有别,两者的观测原理和方法完全不同,但是在相同的观测时期(1979~1986)内所测得的积雪年际变化过程却相当一致,相关系数达0.59。积雪变化越明显的年

份(无论是正距平年还是负距平年)两者的一致性越好。同样年积雪日数序列与年累加日积雪深度序列相关系数达0.72。这充分证明它们的建立方法是可行的,每个序列都是均匀的,能够代表气候变化导致的新疆积雪长期变化的真实情况。为本文所用的积雪资料的可靠性提供了令人信服的证据。

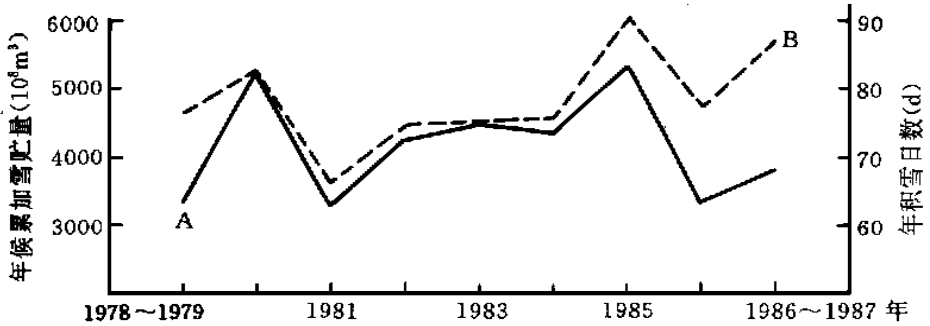


图1 新疆地面气象站年积雪日数与SMMR微波卫星遥感年累加积雪量两个时间序列的对比

3 新疆积雪以及冬季气温和降水量长期变化特征

从年积雪日数和年累加日积雪深度序列(图2)可以看出,积雪长期变化为正常随机波动过程,正距平和负距平围绕平均值交替出现,出现过3次偏多年份:1958/1959年~1959/1960年,1975/1976年~1977/1978年和1984/1985年~1987/1988年;3次偏少年份:1961/1962年~1965/1966年,1973/1974年~1974/1975年和1980/1981年~1983/1984年。最多雪年为1987/1988年和1959/1960年;最少雪年集中出现在20世纪60年代后期至70年代初期,如1967/1968年,1973/1974年等。既不存在固定的变化周期,也不存在主导变化周期,这一特征与青藏高原积雪不同,那里积雪年际变化具有2~3a主导周期。这是因为热带环流,尤其是季风环流具有显著的一年变化周期,ENSO具有3~4a周期的缘故^[18],更没有发现任何气候“突变”事件。引起学术界广泛关注的所谓“自1987年以来北半球积雪出现显著的持续减少以及春季积雪提前消失的现象”在新疆并不存在。相反,1987/1988年为近50a来的最大雪年。仅在20世纪80年代末至90年代初积雪有所减少,但偏少的程度不及在此之前出现过的3次少雪年份,完全属于正常的年际波动范围。

新疆冬季气温和降水量时间序列也是根据1951~1997年46个代表台站月平均气温和月降水量计算的各站积雪季节气温和降水量的空间平均值建立起来的(图3)。它清楚地表明新疆冬季变暖十分显著,增温过程和全球冬季气温以及全球平均气温变化相当一致。近50a来新疆冬季气温升高1.7℃,而且和全球一样,变暖并非是平稳均匀过程,而是主要发生在1977年至今^[19]。增温也发生得相当迅速,幅度空前。从1976/1977年冬至1980/1981年冬,4个年度全疆冬季气温就升高4.1℃。20世纪90年代为全球近百年来最温暖的10a,也是新疆近50a来冬季气温最高的时期。全球近百年来4个最温暖的年份均出现在20世纪90年代,即1998,1997,1995和1990年。新疆近50a来4个最温暖的冬季几乎与它相差无几,仅1980/1981年暖冬与北极地区相一致。新疆冬季气温与全球气温变化的同步

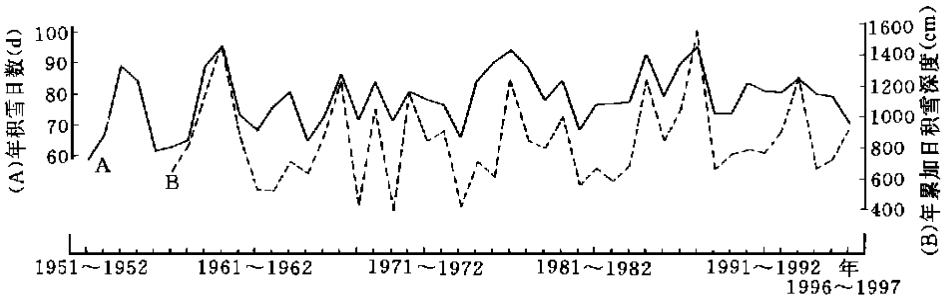


图2 新疆年积雪日数和年累加日积雪深度长期变化

性是由于近50 a 来全球增温最强烈的地区出现在亚洲北部及东部，以及冬季增温在全年增温中最为显著的缘故。更为有趣的是，冬季降水量的变化却与气温变化之间不存在相关关系，相关系数仅为0.008。降雪量丰欠既出现在冷冬也出现在暖冬。冬季冷暖和干湿状况具有随机性，有时冬季为暖干或暖湿，有时为冷干或冷湿。这一重要事实的含义是很深远的，它表明，冬季降雪量的年际波动并非是由于冬季气温年际波动所引起的；反过来，降雪量的变化也未能对冬季气温构成影响，降雪量变化导致的积雪变化对气温的影响不大，积雪与气温之间正反馈作用在这里并不重要。这是因为新疆冬季降雪量并不丰富，年平均仅47.0 mm。积雪层较薄，空间分布不连续，呈斑块状。连续持续时间不够长，全冬积雪日数平均只有77 d。因此积雪对大气的致冷作用就全疆范围而言并不显著。作者曾经指出，正是上述积雪特征使青藏高原积雪对高原热力作用的影响并不突出，高原积雪与印度季风的负相关关系并非像过去认为的那样明显^[20]。

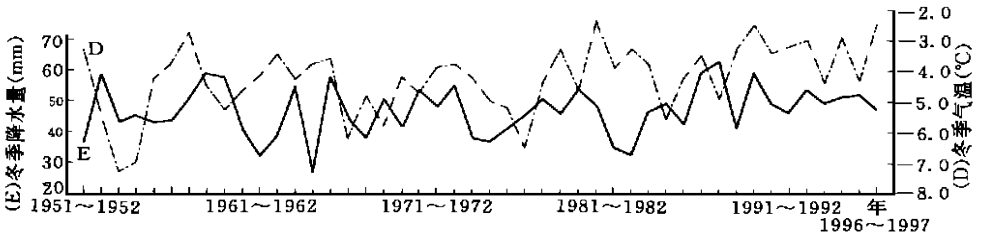


图3 新疆冬季积雪季节气温和降水量的长期变化

(- · - 气温，—降水量)

4 气温、降水和积雪变化与大气环流振荡

从20世纪90年代中期以来，积雪与大气环流相互作用研究成为全球积雪研究的主攻方向。在北欧与北美季节积雪波动与大气环流低频振荡的关系方面的研究初步取得令人鼓舞的结果^[21]。在研究中发现，形成新疆气温、降水和积雪波动特征的直接原因恰恰在于支配它们的大气环流低频振荡模态众多，每一种模态对它们的影响各不相同，以及环流振荡自身为高度非平稳随机波动过程等。

众所周知，影响北半球冬季气候的环流主导模态有两个，一是与 ENSO 遥相联系的太平洋北美振荡 (PNA)。在 ENSO 成熟阶段，阿留申低压的加深及其向西部和极地的伸展有利于诱导西伯利亚冷空气南下，形成中国多雪冬季^[22]。但对新疆降雪和积雪影响甚

小。PNA 主要影响范围为北美地区, 通过影响气旋路径对积雪波动产生显著影响。二是与大西洋海温变化相联系的北大西洋振荡 (NAO), 它是控制欧亚大陆冬季气候的重要环流。在正相位时, 冰岛低压和亚速尔高压均加强北移, 北大西洋西风加强使大西洋海气耦合作用加剧, 强大的暖湿气流为北欧带去大量降雪, 并使西伯利亚和中国冬季变暖; 相反, 在负相位时, 两个活动中心皆减弱南移, 大西洋上西风减弱, 海气耦合作用停止, 使大西洋影响大大减弱, 北欧降雪量减少, 欧亚气温偏低。新疆冬季平均气温的年代际变化与北大西洋振荡指数年际变化相一致。从图4和图3对比可以看出, 在20世纪60年代 NAO 负相位空前时, 新疆出现近50 a 来寒冷冬季持续时期; 从1980~1994年转变为空前的正相位时, 新疆和西伯利亚地区一样, 成为全球增温最强烈的地区。年际变化之间的关系也很明显。1994/1995年冬为正相位时, 新疆冬季气温为 -2.9 ; 1995/1996年冬为负相位时, 北欧冬季气温下降了 $2\sim 4$ ^[24], 人们感到小冰期来了, 新疆全区气温下降到 -4.3 。值得注意的是, NAO 对欧亚大陆气温和降水量的影响是有差别的。对气温的影响地域相当广泛, 对降雪量的影响主要局限于北欧和地中海地区, 对新疆降雪量和积雪的影响不明显。影响中国降雪量和积雪变化的是与欧亚振荡和西伯利亚振荡有关的欧亚长波振幅变化, 以及气旋活动^[25]。此外, Morlet 子波分析表明, 北大西洋振荡有众多个时间尺度, 不同时期频率并不相同, 它们对NAO的贡献也随时间变化^[26,27], 也就是说, 北大西洋振荡本身具有随机性。

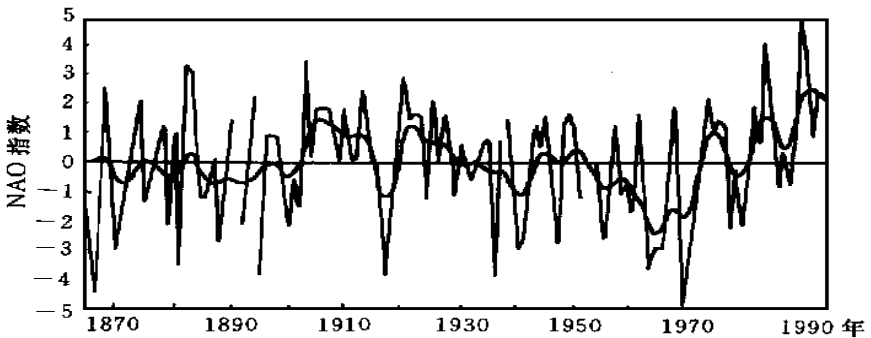


图4 1864~1994年冬季(12~3月)NAO指数的变化(引自Hurrell^[23])

5 积雪年际波动与冬季气温和降水量变化的关系

宏观上说, 低温(0)与降雪是积雪得以形成和维持的天气气候条件, 积雪的年际波动自然与冬季积雪季节气温和降雪量的变化密不可分。了解积雪与气候的相互关系, 阐明积雪对气温和降雪量变化的敏感性, 是探讨积雪对气候变化响应的核心内容之一, 也是预测积雪未来变化的基础。在现行气象观测中并不进行降雪量的专项观测, 不得不用冬季积雪季节降水量来近似地代替。

对新疆积雪、冬季气温和降水量时间序列的相关分析结果(表1)表明, 积雪与冬季气温呈负相关, 与冬季降水量(更确切地讲为降雪量)呈正相关, 与冬季气温和降雪量二者复相关关系更为密切。积雪年际波动的 $\frac{1}{2}$ 到 $\frac{1}{3}$ 可以用冬季降雪量和气温的线性变化来解释。年积雪日数与气温关系更为密切, 说明气温在积雪维持方面更为重要; 年累加日

积雪深度更加依赖于降雪量。积雪数量比积雪持续时间对气候变化更为敏感。

表1 新疆积雪与冬季气温和降水量的相关关系

	冬季气温	冬季降水量	冬季气温与降水量	序列长度
年积雪日数	- 0. 55	+ 0. 42	0. 70	1951 ~ 1997年
年累加日积雪深度	- 0. 51	+ 0. 62	0. 81	1956 ~ 1997年

通过二元回归分析, 新疆积雪与冬季气温和降水量的关系如下:

$$S_d = 20.86P - 150.29T - 738.8$$

$$S_n = 0.48P - 4.51T + 35.2$$

式中 S_d 和 S_n 分别表示年累加日积雪深度 (cm) 和年积雪日数 (d); P 代表当年冬季积雪季节降水量 (mm), 确切地讲为降雪量; T 为当年冬季积雪季节气温 (°C)。它们表明冬季降雪量和负温两者对积雪的贡献都是正的, 降雪量越多, 负温越低, 贡献也越大。相反, 正温和降雨量二者对积雪皆产生负的贡献。湿而冷的冬季最有利积雪的发育, 积雪偏多; 暖而干的冬季最不利于积雪的形成和维持, 积雪偏少; 在暖湿和冷干两种情况下, 积雪变化由降雪量和气温两者影响的大小来决定。如果把用回归方程计算的积雪序列与观测序列进行对比 (图5), 就会发现两者相当吻合, 预报误差在10%上下。这一事实充分证明积雪年际波动是冬季气温和降雪量变化二者共同作用的结果。同时, 如在资料选择中所阐述的那样, 二者是相互独立的, 相互不可替代的气候变量。过去仅从积雪与气温的关系探讨积雪对气候变化的响应是片面的。把积雪与气温正反馈循环夸大为普遍现象也是不恰当的。

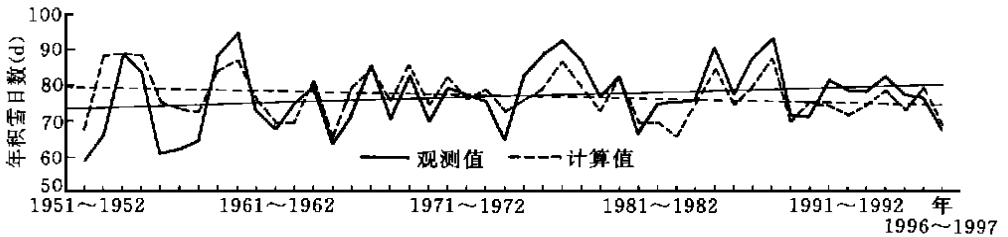


图5 新疆的年积雪日数计算值与观测值的对比

6 积雪长期变化趋势

检验积雪长期变化趋势在研究积雪对气候变化的响应中占有更为重要的地位, 因为它可能揭示出控制积雪长期变化的气候强迫。当前, 在气候环境变化趋势探测中, 下面的统计模式被认为适合对观测序列进行趋势检验^[28]。

$$Y_t = a + bt + E_t$$

式中 Y_t 代表 t 年积雪或气候的观测值, E_t 表示与趋势直线的偏差。

当变化趋势为线性时, 无偏差趋势估计可以用平均差值法计算, 或使用最小二乘法拟合。当变化趋势为非线性时, 或者偏差 $\{ |E_t| \}$ 具有顺序相关性时, 变化趋势的探测就变得复杂和困难起来。首先上述方法不能区别短期趋势与长期趋势, 其次是会给趋势估计带来误差。因此, 当序列存在随机变化趋势时, 为了探测出其确定的变化趋势, 可选用 P 阶自回归- Q 阶滑动平均模式 ARMA($P \cdot Q$) 进行趋势分析。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^[29]。

用上述3种趋势估计方法对标准化后的积雪和气候序列的检验结果列在表2中。根据标准误差对趋势显著性检验、趋势估计都通过了0.01信度。检验结果证明,近50 a来新疆积雪变化具有确定的长期增加趋势。虽然增加得非常缓慢,但在统计意义上足以否定减少趋势的存在。积雪缓慢增加趋势与冬季降水量缓慢增加的趋势相一致,与冬季显著变暖趋势大相径庭。表面看来,新疆积雪长期变化趋势的分析结果似乎与全球和新疆气候变暖相矛盾。其实不然,它恰恰表明,积雪的增加趋势正是大气中CO₂含量不断增加导致的全球变暖引起海洋蒸发量的增加,全球水循环加速,以及寒冷地区降雪量增加的结果。新疆地区冬季寒冷而干燥,积雪对气温变化并不敏感,对降雪量变化却十分敏感。全疆积雪季节平均气温为-4.3,最冷年份下降到-6.5,最暖也达-2.4。近50 a来冬季气温虽然升高了1.7,但维持积雪稳定的负温条件仍能得到充分的满足。而冬季积雪季节平均降水量只有47.0 mm,最多冬季为63.1 mm,最少冬季仅有26.8 mm,冬季降雪次数也很少,降雪量对积雪稳定性起着决定性作用。新疆积雪长期缓慢增加趋势带有普遍意义,它正确地反映了当前全球积雪变化存在着显著的区域差异,积雪普遍减少的趋势并不存在这样一个客观事实。实际上,即使是积雪自1987年以来出现减少的地区(冬季积雪季节气温接近0的地区),正如NOAA积雪监测结果表明的那样,也仅仅是春秋积雪减少了,冬季(12~2月)积雪并未发生变化^[30],仍然处于稳定状态。

表2 新疆积雪与气候变化趋势估计结果

	趋势估计方法			ρ (自回归系数)	时间序列年代
	b_{ARMA}	b_{LS}	b_{AV}		
年积雪日数	+ 0.0221	+ 0.0214	+ 0.0276	0.2821	1951 ~ 1997年
年累加日 积雪深度	+ 0.0018	+ 0.0018	+ 0.0016	0.0200	1956 ~ 1997年
冬季气温	+ 0.0318	+ 0.0324	+ 0.0246	0.4182	1951 ~ 1997年
冬季降水量	+ 0.0147	+ 0.0144	+ 0.0102	0.1910	1951 ~ 1997年

7 积雪对气候变化响应研究面临的两个问题

7.1 降雪量观测误差的问题

在建立积雪与气温和降雪量回归方程方面,遇到了降雪量观测误差的严峻挑战。国内外大量对比观测表明,由于风的干扰雨量筒对降雪量观测误差过大,观测值偏低达30%以上^[31]。这就妨碍了积雪与气温和降雪量之间准确的定量关系的建立。降低了降雪量变化对积雪的影响程度,还相对地夸大了气温的影响程度,从而使回归方程丧失了预测积雪未来变化的能力。如图5所示,计算的积雪序列具有减少的趋势,与实际观测结果是相反的,根源就在于此。由于积雪长期变化趋势数值只有1%上下,没有高精度降雪量观测资料,预报方程给出的趋势预测的可信程度令人值得怀疑。

7.2 气候突变的问题

直到现在,积雪对气候变化的响应仍然建立在气候的不稳定性是一个长期缓慢变化过程的概念上。最近几年来,格陵兰冰芯和高分辨率深海沉积证实,全球大部分地区Younger Dryas冷期转入暖期是在不到20 a的时间里完成的^[32]。关于气候突变的原因,权

威学者主导看法是大洋环流模态的快速转变。在末次冰期里,高纬度大陆冰盖的活动曾引起洋流模态频繁而剧烈的改变,冷期(冰段)和暖期(间冰段)的快速转换多达24次^[33]。近7000多年来气候稳定性之好,持续时间之长是历史上罕见的。但是小的转冷事件也偶有发生,例如“小冰期”。现在,由于人类活动使大气中CO₂含量之高是过去42万年以来从未出现过的^[34]。它导致的全球变暖引起的大洋蒸发和降水量的变化在21世纪里可以造成 Labrador 海深水形成的停止和北大西洋热盐环流突然变弱^[35]。因此 Broecker 警告说,气候系统对温室效应的响应将以北大西洋环流突然转换和气候突然变冷为结局^[36]。那时降雪量也将突然减少一半左右,许多地区积雪融水数量可能大大减少。这样一个对社会经济造成重大破坏的结局是当前积雪响应尚未涉及到的。21世纪积雪对气候突然变冷的响应,是人们面临更大的挑战。

8 结 论

(1) 用地面气象台站建立的新疆地区积雪时间序列与美国宇航局高分辨率 SMMR 微波卫星遥感积雪序列具有可比性和高度一致性。这表明前者具有表现广大的新疆地区积雪年际变化实况的能力。用它来研究近50 a 来积雪长期变化是可信的。

(2) 虽然自20世纪80年代以来新疆冬季增温为全球最显著的地区,但是引起气候界普遍关注的所谓自1987年以来北半球大陆积雪持续显著减少的现象在这里并不存在。积雪稳定状况并未受到破坏。

(3) 积雪年际波动是冬季气温和降水量变化两者共同作用的结果。积雪年际波动的 $\frac{1}{2}$ 到 $\frac{2}{3}$ 可以用冬季气温和降水量的线性变化来解释。在新疆地区,冬季气温和降水量为两个互不相关的相互独立的气候变量,彼此是不可相互替代的。在研究积雪对气候变化响应中它们是缺一不可的。

(4) 近50 a 来新疆积雪长期变化表现为一个显著年际波动的随机过程叠加在一个缓慢地长期增加趋势之上。前者受大气环流自然振荡所制约,后者可能是全球变暖、海洋蒸发量增加、全球水循环加剧的结果。积雪的长期缓慢增加趋势与冬季降水量长期增加趋势相一致,与冬季变暖趋势背道而驰。这也是处于严寒干燥气候下的积雪对降雪量变化十分敏感,对气温变化不够敏感的表现。这一研究结论合理地解释了全球积雪变化趋势的区域分异特征。

(5) 当前积雪对气候变化响应研究受降雪量观测误差和温室效应可能导致的气候突然变冷的挑战。

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 572pp
- 2 IPCC. Climate Change 1995: Chapter T. The cryosphere. In: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 572pp
- 3 李培基. 中国季节积雪资源初步评价. 地理学报, 1988, 43(2): 108~119
- 4 施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. 中国科学(B辑), 1995, 25(9): 968~977
- 5 Barry R G. Snow cover, sea ice and permafrost. In: Ad Hoc committee. Ice Sheets and Sea Level: Effect of A CO₂- In-

- duced Climatic Change. Washington: United States Department of Energy, 1985, 241 ~ 254
- 6 Robinson D A, Dewey K F. Recent secular variations in the extent of Northern Hemisphere snow cover. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(10): 1557 ~ 1560
 - 7 Groisman P Y, Karl T R, Knight R W. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures. *Science*, 1994, 263: 198 ~ 200
 - 8 Robinson D A, Frei A. An analysis of the NOAA satellite-derived snow cover record, 1972– present. In: NASA Conference Publication 3318. 1995. 61 ~ 64
 - 9 Hughes N G, Robinson D A. Historical snow cover variability in Great Plains region of the USA: 1910 through to 1993. *Int J Climat*, 1996, 16: 1005 ~ 1018
 - 10 Thompson E M, Paskievitch J F, Gow A J, et al. Late 20th century increase in South Pole snow accumulation. *J Geophys Res*, 1999, 104(D4): 3877 ~ 3886
 - 11 Vaughan D G, Bamber J L, Giovinetto M, et al. Reassessment of net surface mass balance in Antarctica. *J Climate*, 1999, 12: 933 ~ 946
 - 12 Davis C H, Kluever C A, Haines B J. Elevation change of the southern Greenland ice sheet. *Science*, 1998, 279: 2086 ~ 2088
 - 13 Lorins C, Jouzel J, Ritz C, et al. A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 1985, 316: 591 ~ 596
 - 14 Alley R B, Meese D A, Shuman C A, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event. *Nature*, 1993, 362: 527 ~ 529
 - 15 Ohmura A, Wild M, Bengtsson L. A possible change in mass balance of Greenland and Antarctic ice sheets in the coming century. *J Climate*, 1996, 9: 2124 ~ 2135
 - 16 Foster J, Liston G, Koster R, et al. Snow cover and snow mass intercomparisons of GCMs and remotely sensed datasets. *J Climate*, 1996, 9: 409 ~ 426
 - 17 Chang A T C, Li Peiji, Robinson D A. The use of microwave radiometer data for characterizing snow storage in western China. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 215 ~ 219
 - 18 柯长青, 李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征. *地理学报*, 1998, 53(3): 209 ~ 215
 - 19 Jones P D, New M, Parker D E, et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev Geophys*, 1999, 37(2): 173 ~ 199
 - 20 Li Peiji. Comments on "An apparent relationship between Himalayan snow cover and summer monsoon rainfall over India". *Acta Meteor Sinica*, 1995, 9(3): 360 ~ 367
 - 21 Serreze M C, Clark M P, Mcginnis D L, et al. Characteristics of snowfall over the eastern half of the United States and relationships with principal modes of low-frequency atmospheric variability. *J Climate*, 1998, 11: 234 ~ 250
 - 22 Li Peiji. A preliminary study of snow mass variations in China over the past 30 years. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 6(2): 231 ~ 237
 - 23 Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, 269: 676 ~ 679
 - 24 Kushnir Y. Europe's winter prospects. *Nature*, 1999, 398: 289 ~ 290
 - 25 Clark M P, Serreze M C, Robinson D A. Atmospheric controls on Eurasian snow extent. *Int J Climate*, 1999, 19: 27 ~ 40
 - 26 Appenzeller C, Stocker T F, Anklin M. North Atlantic oscillation dynamics recorded in Greenland ice cores. *Science*, 1998, 282: 446 ~ 449
 - 27 Highuchi K, Huang J, Shabbar A. A wavelet characterization of the North Atlantic oscillation variation and its relationship to the North Atlantic sea surface temperature. *Int J Climat*, 1999, 19: 1119 ~ 1129
 - 28 Woodward W A, Gray H L. Global warming and the problem of testing for trend in time series data. *J Climate*, 1993, 6: 953 ~ 962
 - 29 Bloomfield P, Nychka D. Climate spectra and detecting climate change. *Climatic Change*, 1992, 21: 275 ~ 287

- 30 Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring: An update. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74 (9): 1689 ~ 1696
- 31 杨大庆, 施雅风, 康尔泗等. 天山乌鲁木齐河流域降水观测系统误差分析和修正. 见施雅风等编. 乌鲁木齐山区水资源形成与估算. 北京: 科学出版社, 1992. 14 ~ 40
- 32 Taylor K. Rapid climate change. *Americal Scientist*, 1999, 87: 320 ~ 327
- 33 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250- kyr icecore record. *Nature*, 1993, 364: 218 ~ 220
- 34 Petit J R, Jouzel J J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429 ~ 436
- 35 Wood R A, Keen A B, Mitchell J F B, et al. Changing spatial structure of the thermohaline circulation in response to atmospheric CO₂ forcing in a climate model. *Nature*, 1999, 399: 572 ~ 575
- 36 Broecker W S. Thermohaline circulation: the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, 1997, 278: 1592 ~ 1598

RESPONSE OF XINJIANG SNOW COVER TO CLIMATE CHANGE

Li Peiji

(Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

How snow cover will react to global warming is presently a controversial issue. Here two homogeneous time series of Xinjiang snow cover were created separately from a 46-selected synoptical station network and by using revised passive microwave satellite data derived from SMMR. They compared favorably with each other that confirms the ability of the station data to accurately represent the ground truth of the snow cover variability. Then a multiple linear regression analysis was conducted to show the association between the snow cover and wintertime temperature as well as precipitation during the period between 1951 and 1997. Further, a statistical model consisting of a possible trend plus noise are fitted to the snow and climate time series to testing for their long-term trends. Results indicate that Xinjiang did not experience any continuous decrease in snow cover during its recent greatest warming period from 1977 to 1997, as well as in the warmest 1990s. It is of interest to note that no any correlation was identified between the cool season temperature and precipitation in the study area. However snow cover responds to both of precipitation (snowfall) and temperature. About one-half to two-third of the total snow cover variance are able to be explained by the linear variations of corresponding precipitation and temperature. The long-term variability of Xinjiang snow cover is characterized by a large interannual fluctuation superimposed on a small positive trend. It displays fluctuation on multiple timescales around the mean, and the anomalies did not appear to be outside the range of natural variation. No persistent and dominant frequencies were found. It represents simply a stochastic variability. The snow cover fluctuation is largely controlled by atmospheric circulation oscillation. While positive snowfall and negative temperature relationships were found in year-to-year fluctuation, the long-term trend exhibits a gradual increase that is more closely linked to the snowfall trend. This suggests that snow cover in continental climate region is more sensitive to snowfall than to temperature. The snow cover positive trend is a consequence of CO₂-induced global warming which causes an increase in ocean evaporation and more intense hydrological cycle with more frequent heavy snowfall events.

Key words: Xinjiang, Snow cover variability, Response to climate warming.