

文章编号: 1000-0240(2012)02-0247-10

中国近 50 a 积雪日数与最大积雪深度的 时空变化规律

王春学, 李栋梁*

(南京信息工程大学 大气科学学院/气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏, 南京 210044)

摘要: 通过 REOF 和非参数 Mann-Kendall 趋势检验法, 以 1958/1959—2007/2008 年度中国 557 个气象站的积雪观测资料为基础, 对中国积雪日数与最大积雪深度的时空演变规律进行分析. 结果表明: 东北、新疆北部和青藏高原中东部为中国积雪日数和最大积雪深度的 3 个大值区; 近 50 a 来, 春、秋季中国积雪日数和最大积雪深度在整体上呈现缓慢减少的趋势, 冬季积雪日数和最大积雪深度呈现增加的趋势. 气温是影响积雪产生和维持的重要因素.

关键词: 积雪日数; 最大积雪深度; REOF; Mann-Kendall 检验

中图分类号: P426.63⁺5 **文献标识码:** A

0 引言

冰冻圈是气候系统五大圈层之一, 在天气气候的研究中具有重要地位. 冰雪覆盖大大减少了下垫面接受的太阳短波辐射, 同时阻碍了下垫面与大气之间的热量交换, 并且冰雪融水引起的水文效应也会改变下垫面的状况. 冰雪的这些作用会引起气温下降, 冰雪多时气候偏冷; 冰雪少时气候偏暖.

近几年, 冰冻圈的研究引起了广大学者的关注. 许多针对北半球积雪的研究表明, 春季积雪减少是最明显的. 其中 Brow^[1] 使用加拿大、美国、前苏联、中国的历史资料和重建资料对北半球 (40°~60°N) 研究发现, 北美冬季的积雪范围从 1915 年开始有增加的趋势, 但是春季积雪范围在 1980—1990 年显著减少; 欧亚大陆 4 月积雪范围从 1922—1997 年随着春季增暖而明显减少. 在最近 20 多年中, 春、夏两季积雪覆盖发生了明显的衰退. Gutzler 等^[2] 用 1972—1990 年北半球卫星可见光积雪资料研究表明, 北半球 12 月和 1 月的积雪没有明显的变化趋势, 欧亚 2 月的积雪有显著减少的趋

势. Dye^[3] 也认为北半球 (1972—2000 年) 最大积雪面积月份从 2 月变为 1 月, 春季融雪时间每 10 a 提前 5~6 d. 马丽娟等^[4] 的数值模拟表明, 未来 50 a 欧亚大陆整体的雪水当量呈现一致的减少趋势.

中国的积雪与北半球积雪的变化不完全同步. 李培基等^[5-6] 研究指出, 中国地域辽阔、地形多变, 而积雪的分布和变化易受到局地气候和地形的影响, 所以中国积雪的分布和变化更为复杂. 中国雪量变化存在地区性差异, 变暖时期中国冬季降雪量和积雪量是增加的, 但这并不意味着各地都增加. 由于研究区域、时间或资料等的不同, 得到的中国积雪变化规律也不尽相同. 有些研究表明中国局部地区积雪有增加的趋势, 如王秋香等^[7] 的研究表明, 新疆北部最大积雪深度从 1960—1980 年表现为缓步上升, 从 1980 年开始增速加快. 李培基^[8] 的研究表明, 1957—1992 年青藏高原积雪变化呈普遍增加趋势, 并且与北半球冬季气温呈正相关. 高原积雪的增加与北半球温带低地春季积雪面积自 1980 年代后期的减少形成了鲜明的对比. Qin 等^[9] 的研究表明, 1951—1997 年中国西部积雪表现为

收稿日期: 2011-09-13; 修订日期: 2011-11-29

基金项目: 2010 年公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201006038); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2007CB411506); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD) 资助

作者简介: 王春学 (1985—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 2009 年毕业于南京信息工程大学, 现为硕士研究生, 主要从事短期气候变化与预测的研究. E-mail: W.chunxue@gmail.com

* 通讯作者: 李栋梁, E-mail: lidl@nuist.edu.cn

缓慢增加的趋势,且存在较大的年际变化。但是,有的研究表明中国局部地区积雪存在减少的趋势,如李栋梁等^[10]对黑龙江积雪初终日研究表明,积雪初日有逐渐偏迟的趋势,终日在 1975—1997 有明显的提前趋势。赵春雨等^[11]对辽宁省积雪的研究表明,辽宁省积雪期呈缩短的趋势。王颖等^[12]的研究指出,1961—2007 年辽宁省降雪量没有明显的变化趋势,降雪日数明显减少。惠英等^[13]的研究表明,河套地区积雪日数也整体呈减少的趋势。王澄海等^[14]的研究指出,2002—2050 年总体上新疆北部地区的积雪深度呈减少的趋势。另外,还有的研究表明我国积雪没有明显的变化趋势,车涛等^[15]认为中国积雪储量在 1993—2002 年没有明显的减少或增加趋势,但是存在年际间的波动。有的学者认为积雪的变化规律应该分季节讨论,王叶堂等^[16]指出 2000—2005 年高原积雪年际变化差异较大,积雪面积总体上呈现冬、春季减少,夏、秋季增加的趋势。此外,很多学者研究了积雪对气温的响应程度。Robinson 等^[17]认为积雪对气温的变化的是非常敏感的,积雪与气温之间存在正反馈循环,所以全球变暖必将导致大陆积雪显著减少。而李培基^[18]、井立红等^[19]的研究结果却与此相反。

对中国积雪已有的研究中,大都针对中国的局部地区,并且研究资料、研究方法存在显著差异,使得对中国积雪的变化规律的研究无法得到统一的结论。本文试图对中国积雪的空间分布规律和时间演变特征有一个全面的认识,研究 1958/1959—2007/2008 年度中国积雪日数和最大积雪深度的空间分布和时间演变规律。此外,本文还将进行积雪对气温、降雪变化响应的初步分析。

1 资料方法

本文以安迪等^[20]统计的中国气象站点逐日积雪观测资料为研究资料。积雪日数是以积雪深度为标准定义的,即日积雪深度 ≥ 1 cm 则计为一个积雪日数;季节最大积雪深度定义为该季节内观测到的日积雪深度最大值,年最大积雪深度定义为该年观测到的日积雪深度最大值。为了便于使用 REOF 分析方法,并且考虑气象站建站时间,开始观测积雪的时间不同,本文选择了全国 557 个气象站 1958/1959—2007/2008 年的观测资料,图 1 为站点分布图。同时考虑到积雪的时间累积性,定义上一年的 8 月 1 日到当年的 7 月 31 日为一个积雪年。

REOF 分析由于能够清晰的显示气候变量场不

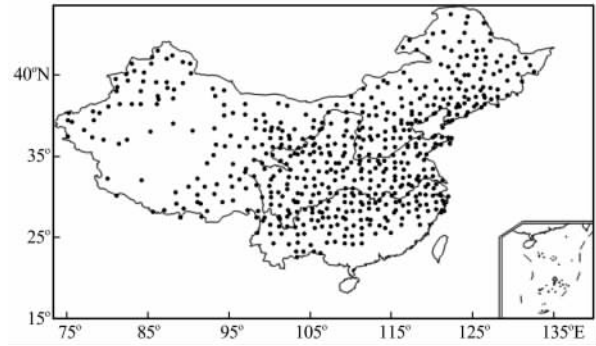


图 1 中国 557 个气象站分布
Fig. 1 Distribution of the 557 weather stations in China

同地理区域的特征,而被广泛用于气候变量场分区的研究中^[21-23]。本文首先分析 1958/1959—2007/2008 年度平均积雪日数和最大积雪深度的分布,然后对中国年积雪日数进行标准化距平处理,进行 EOF 展开,再对前 11 个载荷向量(累积方差贡献率达到 60%)进行 REOF 分析,在 0.01 信度水平下对中国积雪的分布进行分区。

Mann-Kendall 非参数检验是提取序列变化趋势的有效工具,其特点是更加客观,不必事先假定数据的分布特征,因此被广泛用于气候和水文序列的分析^[24-27]。本文利用 Mann-Kendall 检验分析中国不同分区积雪的时间变化规律。统计检验公式如下^[25]:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S < 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)]/18 \quad (4)$$

式中: x_k 和 x_i 为连续数据值; n 为数据集合的长度; t 为“结”的宽度; 式中 $Z_c > 0$ 表示有上升的趋势, $Z_c < 0$ 表示有下降的趋势; $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态方差; α 为显著性检验水平。

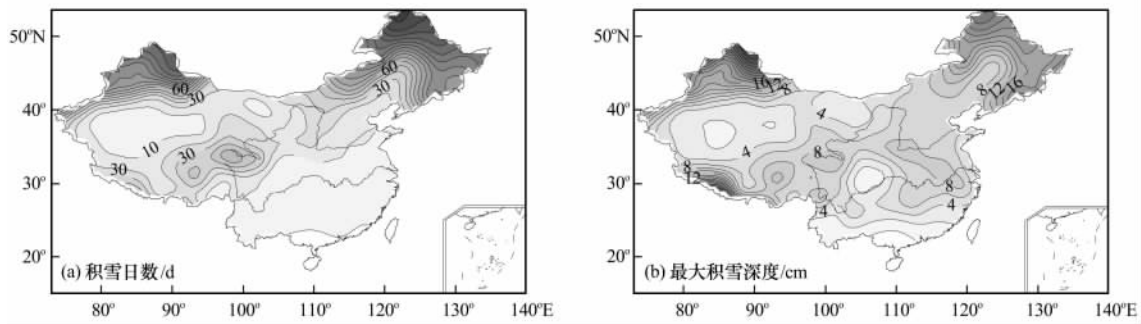


图 2 1958/1959—2007/2008 年度年平均积雪日数(a)和最大积雪深度(b)分布

Fig. 2 Distribution of the annual mean snow cover days and the maximum depth of snow cover from 1958/1959 to 2007/2008 a. the snow cover days (day); b. the maximum depth of snow cover (cm)

2 中国积雪分布特征

一般采用年积雪日数 60 d 作为稳定积雪和不稳定积雪的阈值。从图 2(a)中可以看出,中国稳定积雪区主要分布在三个地区:新疆的天山以北地区;东北的大小兴安岭以北、长白山以东地区;青藏高原的唐古拉山和巴颜喀拉山地区。三者的最大积雪深度都在 10 cm 以上。前两个地区基本位于 40° N 以北,最后一个地区的海拔在 4 000 m 以上,这表明纬度和海拔是中国积雪分布的直接影响因素。稳定积雪区经常发生的“白灾”是对当地牧区生产的一大危害,新疆的春季积雪融水经常引发春汛,但是稳定积雪的融化对当地农业灌溉与河流补给有重要作用^[28-29]。中国不稳定积雪区的南界在 24° N 的南岭一线。在不稳定积雪区的北部,积雪的覆盖对农作物的保墒和顺利越冬有重要作用,而南部的大雪降温天气则往往带来冻害^[30]。福建省、广东省、广西省和云南省的南部、四川省的部分地区以及海南省和台湾为无积雪区。年平均积雪日数的最大值出现在黑龙江省的漠河站,为 168 d;年平均最大积雪深度的最大值出现在新疆的青河站,为 35 cm。

3 积雪分布区划

3.1 一级区划

早在 1983 年,李培基等^[5]就利用有限的资料讨论了中国积雪的分布问题,近期也有一些研究^[31-32]涉及到这方面的问题。参考前人的研究结果,本文首先将中国积雪分为以下三个大区: I 区. 高纬稳定积雪区,包括中国东北地区 and 新疆北部地区,由于纬度较高冬季寒冷,积雪日数大都在 60 d 以上,最大积雪深度大都在 10 cm 以上; II 区. 高原

稳定积雪区,位于平均海拔 4 000 m 的青藏高原地区,由于海拔高冬季寒冷,加之西南暖湿气流的影响,唐古拉山和巴颜喀拉山地区日数大都在 60 d 以上,最大积雪深度在 6 cm 以上; III 区. 不稳定积雪区,包括新疆南部到内蒙古中西部以及我国东部地区,温度、降雪以及地形等多种因素导致该区积雪日数基本在 30 d 以下,最大积雪深度大都在 10 cm 以下,积雪年际变化很大。由于中国积雪的局地性很强,所以要对其进行全面细致的研究有必要进行二级区划。

3.2 二级区划

从表 1 中可以看出,中国积雪日数 EOF 第一载荷向量方差贡献率为 16.84%,前 11 个载荷向量的累积方差贡献率为 60%,收敛速度较慢,这正说明中国积雪空间分布的局地差异性很大,有必要对其进行分区研究。为了尽可能反映局地的变化特征,我们选择前 11 个载荷向量进行旋转。可以看到,旋转后各个载荷向量的方差贡献率的差别变小,但是总的方差贡献率不变,这样每个载荷向量就尽可能的反映出局地积雪分布的特征。最后将中国积雪在三个大区的基础上又分为 11 个二级区,如图 3。

1 区在大、小兴安岭以北,包括中国的寒温带,既有温带大陆性气候又有温带季风气候。北方冷空气可以直接到达这里,并且由于地形的阻挡导致冷空气堆积,中国年积雪日数的极大值出现在该区; 2 区在天山山脉以北,其特征与 I 区相似,属于温带大陆性气候,中国最大积雪深度的极大值出现在这里; 3 区在大、小兴安岭以南,属于温带季风气候。这里虽然纬度较高,但是由于山脉对北方冷空气的阻挡,积雪较同纬度的 2 区偏少; 4 区在天山以南和青藏高原的西北部,包括温带大陆性气候和

表 1 积雪日数 EOF、REOF 前 11 个载荷向量的方差贡献率和累计方差贡献率
Table 1 The contribution of single variances and the cumulative variances of the first 11 loading vectors (rotated loading vector) of EOF (REOF) with snow cover days

LV	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5	LV6	LV7	LV8	LV9	LV10	LV11
个别方差	16.84	10.34	6.12	5.58	4.19	3.47	3.16	2.89	2.63	2.53	2.24
累积方差	16.84	27.18	33.3	38.88	43.06	46.55	49.71	52.6	55.23	57.76	60
RLV	RLV1	RLV2	RLV3	RLV4	RLV5	RLV6	RLV7	RLV8	RLV9	RLV10	RLV11
个别方差	14.32	9.36	5.98	5.55	4.02	3.98	3.84	3.7	3.59	2.93	2.73
累积方差	14.32	23.68	29.66	35.21	39.23	43.21	47.05	50.75	54.34	57.27	60

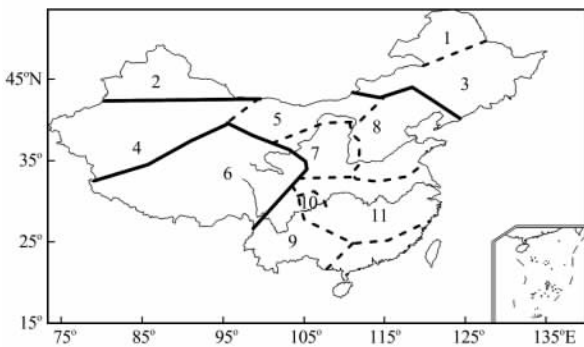


图 3 中国积雪气候分区(黑实线是一级区划分界线, 虚线是二级区划分界线)

Fig. 3 Climate divisions of snow cover in China (solid line for the first-order division and the dashed line for the second-order division)

高原季风气候。除了南疆盆地外, 大部分是荒漠无人区, 受到西风气流的影响较大; 5 区在内蒙古高原的中西部, 属于温带大陆性气候。这里纬度高、气温较低, 积雪相对较丰沛; 6 区在青藏高原的东部, 属于高原季风气候。这里基本在海拔 4 000 m 以上, 温度较低, 相对于同纬度的其他地区积雪较多, 是中国除了东北和新疆北部的第三大积雪大值区; 7 区在黄河中游的黄土高原地区, 属于温带季风气候。虽然该区水汽比较匮乏, 但是由于纬度和海拔较高, 所以积雪也相对较多; 8 区位于环渤海地区, 属于温带季风气候。这里海拔高度低, 但是纬度较高、来着海洋的水汽充足, 积雪较多; 9 区在云贵高原地区, 属于亚热带季风气候。这里地处中低纬度, 虽然水汽充足, 但是北方的冷空气对其影响较小, 积雪不多; 10 区在四川盆地, 属于亚热带季风气候。由于盆地的特殊地形导致不易形成降雪, 所以只有在个别年份出现积雪; 11 区位于长江中下游地区, 属于亚热带季风气候。这里是水汽充足, 对北方冷空气异常敏感, 容易产生较大的降雪, 但是由于气温偏高, 所以积雪融化速度很快,

与相同最大积雪深度的其他地区相比, 积雪日数偏少。

4 1958—2008 年积雪变化特征

本文对中国 11 个积雪分区各季节积雪日数、年积雪日数、各季节最大积雪深度、年最大积雪深度分别进行 Mann-Kendall 趋势检验, 计算反映变化趋势的 Z_c 值。 Z_c 值为正表明呈上升趋势, Z_c 值为负表示呈下降趋势, 并且进行了显著性分析, 结果如表 2。

4.1 积雪日数趋势分析

从表 2 中可以看出, 1~8 区的全年积雪日数的 Z_c 值为正, 表示这几个区的全年积雪日数有增加的趋势, 9~11 区的全年积雪日数 Z_c 值为负, 表示这几个区的积雪日数有减少的趋势; 在秋季, 除了 1 区和 10 区, 其他各区的积雪日数 Z_c 值为负, 表明秋季中国积雪整体上有减少的趋势, 9 区的减少更显著; 冬季积雪日数 Z_c 值除了 9, 10 区外, 都为正值, 反映出中国冬季积雪日数整体有增加的趋势, 1、2、5 区的增加趋势更加显著; 春季除了 6、7、9、10 区, 其他各区积雪日数 Z_c 值为负, 说明春季中国大部分地区的积雪日数有减少的趋势, 其中 2、4 区的减少更显著。

由此可见, 近 50 a 中国春、秋季积雪日数有减少的趋势, 冬季积雪日数有增加的趋势, 全年积雪日数表现为增加的趋势。徐兴奎^[33]的研究也指出, 1970—2000 年我国绝大部分地区年降雪量总体呈现增加趋势, 可见冬季积雪日数的变化趋势主导了全年积雪日数的变化趋势。

4.2 最大积雪深度趋势分析

从表 2 中可以看出, 除了 5、7、10 区外, 其他各区的全年最大积雪深度 Z_c 值都为正值, 表示近 50 a 中国年最大积雪深度整体表现出增加的趋势,

表 2 各积雪区全年和各个季节的积雪日数和最大积雪深度 Mann-Kendall 趋势检验 Z_c 值

Table 2 The Mann-Kendall trends test value Z_c of the seasonal and annual snow cover days and the maximum depth of snow cover in the eleven snow cover areas represents significance level

区号	积雪日数 Z_c 值				区号	最大积雪深度 Z_c 值			
	秋季	冬季	春季	全年		秋季	冬季	春季	全年
1	0.03	2.82*	-0.85	0.78	1	0.65	3.4*	0.79	3.59*
2	-1.59	2.38*	-1.72**	0.12	2	-0.04	1.86**	-0.7	1.71**
3	-1.02	0.96	-0.65	0.37	3	-1.40	1.56	-0.16	1.17
4	-1.35	0.41	-1.77**	0.40	4	-3.14*	0.22	-2.39*	0.44
5	-0.87	2.02*	-0.83	1.41	5	-1.38	0.30	-0.96	-0.49
6	-1.33	1.49	0.90	1.20	6	-1.65**	0.84	-0.11	0.73
7	-1.00	0.80	0.28	0.36	7	-1.93**	0.71	-0.73	-0.77
8	-0.45	0.49	-1.56	0.51	8	-1.57	0.03	-1.33	0.13
9	-2.06*	-0.66	0.10	-1.05	9	-1.31	0.38	-0.19	0.42
10	0.00	-0.15	0.00	-0.15	10	0.00	-0.18	0.00	-0.18
11	-0.21	0.08	-0.36	-0.07	11	-0.73	0.15	-1.68	0.02

注: *表示显著性水平 $\alpha=0.05$; **表示显著性水平 $\alpha=0.1$.

其中 1、2 区的增加趋势更显著. 秋季最大积雪深度 Z_c 值除了 1、10 区外, 其他各区都为负值, 反映出中国秋季最大积雪深度有减少的趋势, 其中 4、6、7 区的减少最显著; 冬季最大积雪深度 Z_c 值 10 区为负, 其余各区为正, 说明冬季最大积雪深度有增加的趋势, 其中 1、2 区更加明显; 春季最大积雪深度除 1、10 区外, Z_c 值都为负值, 表示春季最大积雪深度有减少的趋势.

由图 4 可以看出, 高纬稳定积雪区(1~3 区)的积雪变化较为一致, 无论积雪日数还是最大积雪深度基本都呈现出春、秋季减少, 冬季和全年增加的趋势, 这可能是与秋季初雪日期延后和春季终雪日

期提前有关. 但是其中 1 区积雪在春、秋季也表现出增加的趋势, 可能是由于该区位于中国最北方的寒温带地区, 对全球变暖更加敏感, 增温有利于降雪, 而对积雪融化的影响则相对较小. 高原稳定积雪区(6 区)冬季和全年的积雪日数和最大积雪深度都呈现增加的趋势. 春季的积雪日数表现出增加的趋势, 最大积雪深度却呈现减少的趋势; 春季也是高原的主要积雪期, 来自西南的暖湿气流很容易到达这里, 与高原上的冷空气相遇产生降雪. 但是在全球变暖的背景下, 冷空气变弱, 这可能是导致最大积雪深度减少的原因. 不稳定积雪区(4、5、7~11 区)积雪变化相对复杂, 主要表现为秋季积雪日

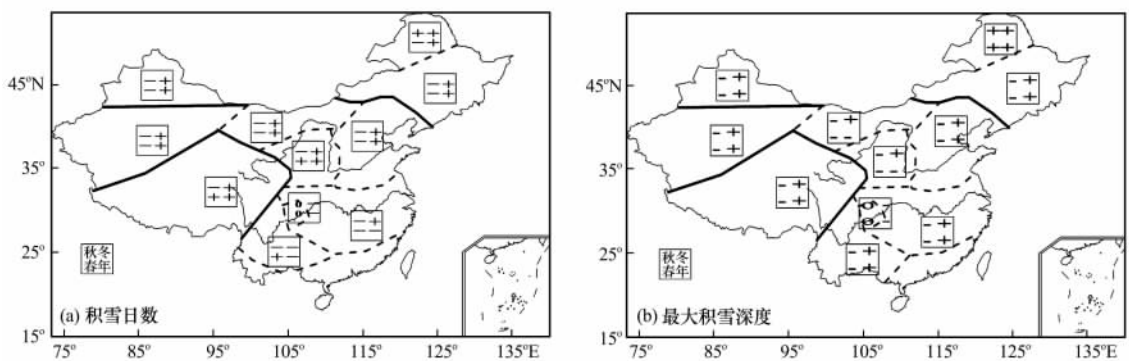


图 4 各个季节和年积雪日数(a)、最大积雪深度(b)变化趋势示意图

+表示有上升趋势; -表示有下降趋势; 0表示无趋势

Fig. 4 The schematic maps of the trends of seasonal and annual snow cover days(a) and the maximum depth of snow cover(b) + represents increasing, - represents decreasing and 0 represents no trend

数和最大积雪深度减少,年积雪日数减少而年最大积雪深度增加;这可能是春、秋季北方冷空气偏弱,而冬季冷空气偏强的原因.该区南部属于亚热带季风气候,水汽充沛,北方冷空气南下容易产生降雪;但是气温较高,所以积雪会迅速融化;2008年的南方冰冻雨雪灾害就发生在这里.

5 积雪变化趋势对气温和降雪响应

气温和降雪是影响积雪产生和维持的重要因素,其中气温又可以影响到降雪,所以研究积雪变化对气温变化敏感性的问题已经得到许多人的关注^[34-35].为了研究中国积雪变化对气温和降雪的响应,本文选择了1区的冬季,2区的春季以及6区的秋季.因为这3个地区分别位于东北北部、新疆北部和高原中东部,是中国积雪分布的大值区,前两个序列都通过了显著性检验,6区积雪日数虽然没有通过显著性检验,但是其 Z_c 值也相对较大;并且该区最大积雪深度通过了显著性检验,又考虑的高原的特殊地理位置,所以也选择了该区.这3个区是具有典型代表意义的.其中2区春季和6区秋季的最低气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(图5),所以统计了这两个区的平均气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的降水量代表降雪.

从表3中可以看到 Z_c 值全为正,说明气温序列皆为增加的趋势;而且除了2区春季最低气温以外都通过了 $\alpha=0.01$ 的信度检验.从表4中可以看到总降水量的 Z_c 值都为正值,但是2区和6区在气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的降水量 Z_c 值为负.1区冬季最高气温都在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,可知降水有增加的趋势;2区春季和6区秋季降水量有增加的趋势,但是降雪量则有减少的趋势.与对应的积雪变化趋势比较可以看

表3 1区冬季、2区春季和6区秋季最高、最低气温 Mann-Kendall 趋势检验 Z_c 值

Table 3 Mann-Kendall trend test value Z_c of the maximum and minimum temperatures in Area 1 (winter), Area 2 (spring) and Area 6 (autumn)

区号	季节	要素	时间	Z_c	显著性
1	冬季	最高气温	1958/1959—2007/2008	3.75	*
1	冬季	最低气温	1958/1959—2007/2008	2.89	*
2	春季	最高气温	1958/1959—2007/2008	3.51	*
2	春季	最低气温	1958/1959—2007/2008	1.31	
6	秋季	最高气温	1958/1959—2007/2008	4.94	*
6	秋季	最低气温	1958/1959—2007/2008	3.21	*

注: *表示通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验.

表4 1区冬季、2区春季和6区秋季降水量 Mann-Kendall 趋势检验 Z_c 值

Table 4 Mann-Kendall trend test value Z_c of the maximum and minimum temperatures in Area 1(winter), Area 2(spring) and Area 6 (autumn)

区号	季节	要素	时间	Z_c	显著性
1	冬	降水量	1958/1959—2007/2008	2.69	*
2	春	降水量	1958/1959—2007/2008	1.09	
2	春	$\bar{T}<0$ 时降水量	1958/1959—2007/2008	-0.39	
6	秋	降水量	1958/1959—2007/2008	1.09	
6	秋	$\bar{T}<0$ 时降水量	1958/1959—2007/2008	-1.02	

注: *表示通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验; \bar{T} 为平均温度.

出,气温的变化趋势最为明显.

从图5(a)中可以看到1区冬季最高气温在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,最高气温和最低气温都有增加的趋势,80年代至今增加趋势更为显著;积雪日数在这段时间大多达到90d以上,甚至达到极大值93d.这可能是由于冬季气温的升高加大了南北气流的交换,南方水汽更容易到达这里,所以导致降雪偏多.从图5(b)中可以看到2区春季的最高气温在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,20世纪90年代以前没有明显的变化趋势,之后出现增加的趋势;最低温度在90年代以前在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下徘徊,之后不断升高,维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,积雪日数波动较大,在90年代后期出现下降的趋势.2区春季的降雪较少,积雪主要来自前冬积雪的延续.春季是积雪消融的季节,由于夜间温度较低,积雪消融主要发生在白天.最高温度的升高会导致春季积雪消融的加快,而最低气温维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上又减小了降雪的几率,很可能是由于这两方面的原因导致2区春季积雪减少.图5(c)可以看出6区秋季最高和最低气温在近50a呈现出缓慢增加的趋势,积雪日数呈现减少的趋势.青藏高原积雪的年内分配表现为“双峰”型,春、秋季是主要的积雪季节.从图5(c)中可以看到青藏高原秋季最高气温在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最低气温在 $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,秋季高原积雪的产生主要靠降雪,而降雪对零下温度的依赖很大.最低温度逐渐增加导致降雪减少,最高温度的增加有加剧了积雪的消融,从而导致高原秋季积雪表现为减少的趋势.

6 结论与讨论

(1) 中国积雪日数和最大积雪深度分布不均匀,受下垫面状况影响很大,纬度和海拔高度是直

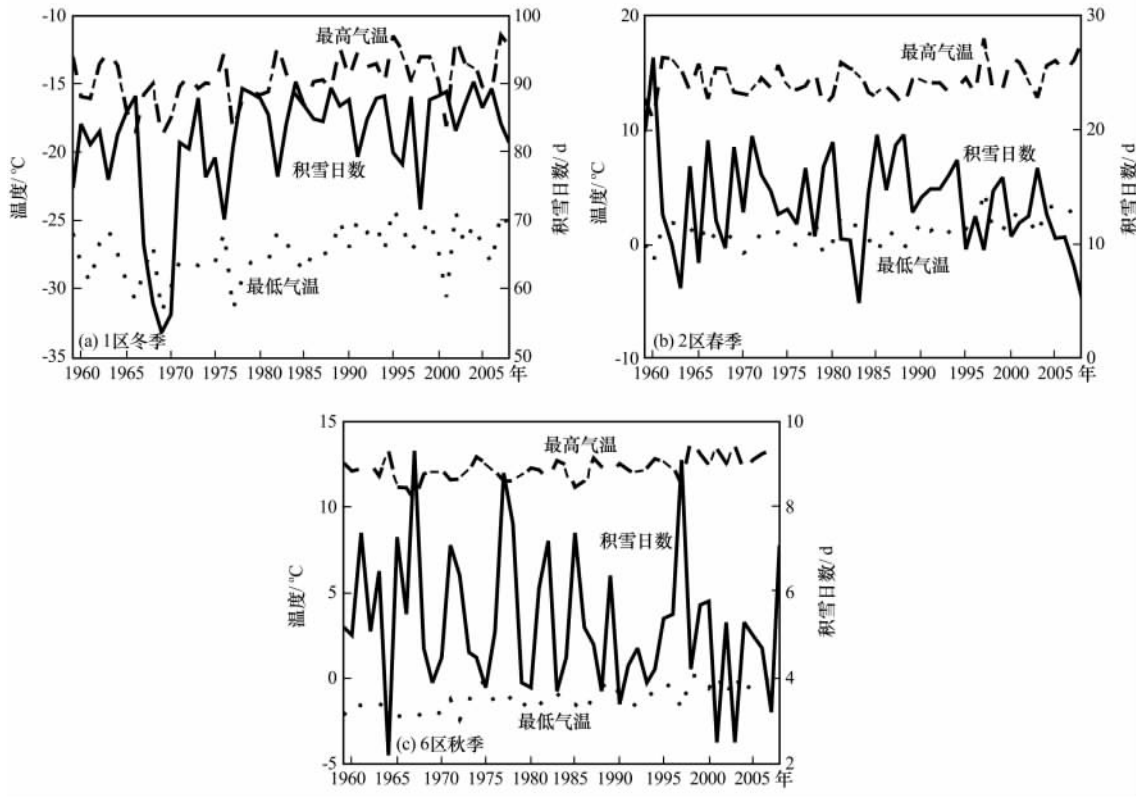


图 5 1958/1959—2007/2008 年度代表区域最高、最低温度和积雪日数年际变化

Fig. 5 Annual changes of the maximum temperature, the minimum temperature and the snow cover days at the representative areas during 1958/1959—2007/2008

接影响因素。除青藏高原外，中国积雪日数和最大积雪深度整体上从南向北递增，新疆北部，东北和青藏高原东部是中国积雪日数和最大积雪深度的三个大值区。

(2) 近 50 a 中国积雪日数和最大积雪深度在冬季呈现出增加的趋势，春、秋季表现为减少的趋势。特别是中国积雪大值区，东北北部、新疆北部和青藏高原中东部的变化更为明显。冬季气温的升高有利用南北空气交换，给北方寒冷的冬季带来水汽，从而增加降雪。春、秋季的升温则一方面不利于降雪的产生；另一方面又加速了积雪的消融。

(3) IPCC 第四次评估报告指出，未来全球气候将继续增暖，到 21 世纪末全球平均气温将升高 1.1~6.4°C。石英等^[36]的研究指出，在全球变暖的背景下，中国大部分地区积雪日数和雪量将减少；积雪开始时间推后，结束时间提前。如果这是事实，则说明春、秋季的积雪变化将会主导全年积雪的变化而不是冬季积雪变化。积雪是冰冻圈中地理分布最广泛、季节与年际变化最显著的成员，大范围的积雪异常会引起同期以及后期的大气环流异

常^[37]。

(4) 冰雪覆盖会减少下垫面接受的太阳短波辐射、同时阻碍下垫面与大气之间的热量交换并且冰雪融水引起的水文效应也会改变下垫面的状况。冰雪的这些作用会引起气温下降，冰雪多时气候偏冷；冰雪少时气候偏暖^[38]。Blanford^[39]最早提出喜马拉雅山地区的积雪变化可能会影响印度的天气气候状况，许多研究也证明了这一结论^[40-41]。近年来，越来越多的研究指出，欧亚和青藏高原积雪的变化可以影响东亚夏季风的进程，进而影响中国的天气气候^[42-46]。所以积雪变化对气候的影响是值得进一步研究的。

(5) 积雪问题的研究对积雪资料的依赖性很大，然而我国中西部，尤其是山区气象台站稀少，这对研究的准确性带来一定的影响。随着卫星遥感技术的发展，遥感反演资料的精确度不断提高。何丽焯等^[31]认为地面台站和卫星遥感两种资料在反映中国西部积雪特征上基本一致、各有优势。在以后的研究中应该注意将台站和遥感资料结合使用，提高研究结果的准确性。

参考文献 (References):

- [1] Brown R D. Northern hemisphere snow cover variability and change, 1951—97[J]. *Journal of Climate*, 2000, **13**(13): 2339—2355.
- [2] Gutzler D S, Rosen R D. Interannual variability of wintertime snow cover across the Northern Hemisphere [J]. *Journal of Climate*, 1992, **5**(12): 1441—1447.
- [3] Dye D G. Variability and trends in the annual snow—cover cycle in Northern Hemisphere land areas, 1972—2000[J]. *Hydrological Processes*, 2002, **16**(15): 3065—3077.
- [4] Ma Lijuan, Lou Yong, Qin Dahe. Snow water equivalent over Eurasia in next 50 years projected by CMIP3 models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(4): 707—720. [马丽娟, 罗勇, 秦大河. CMIP3 模式对未来 50a 欧亚大陆雪水当量的预估[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(4): 707—720.]
- [5] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, **5**(4): 9—18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. *冰川冻土*, 1983, **5**(4): 9—18.]
- [6] Li Peiji. A preliminary study of snow mass variations over past 30 years in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, **48**(4): 433—437. [李培基. 近 30 年来我国雪量变化的初步探讨[J]. *气象学报*, 1990, **48**(4): 433—437.]
- [7] Wang Qingxiang, Zhang Chunliang, Liu Jing, *et al.* The changing tendency on the depth and days of snow cover in northern Xinjiang [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5**(1): 39—43. [王秋香, 张春良, 刘静, 等. 北疆积雪深度和积雪日数的变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(1): 39—43.]
- [8] Li Peiji. Response of Tibetan snow cover to global warming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(3): 260—265. [李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应[J]. *地理学报*, 1996, **51**(3): 260—265.]
- [9] Dahe Q, Shiyin L, Peiji L. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in Western China[J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(9): 1820—1833.
- [10] Li Dongliang, Liu Yuliang, Yu Hongmin, *et al.* Spatial-temporal variation of the snow cover in Heilongjiang Province in 1951—2006 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 1011—1018. [李栋梁, 刘玉莲, 于宏敏, 等. 1951—2006 年黑龙江省积雪初终日期变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6): 1011—1018.]
- [11] Zhao Chunyu, Yan Xiaoyu, Li Dongliang, *et al.* The variation of snow cover and its relationship to air temperature and precipitation in Liaoning Province during 1961—2007[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(3): 461—468. [赵春雨, 严晓瑜, 李栋梁, 等. 1961—2007 年辽宁省积雪变化特征及其与温度、降水的关系[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(3): 461—468.]
- [12] Wang Ying, Zhao Chunyu, Yan Xiaoyu, *et al.* Changing characteristics of snowfall and snowfall days in Liaoning Province during 1961—2007[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(4): 729—737. [王颖, 赵春雨, 严晓瑜, 等. 1961—2007 年辽宁省降雪量和降雪日数的气候变化特征[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(4): 729—737.]
- [13] Xi Ying, Li Dongliang, Wang Wen. Study of the temporal-spatial characteristics of snow covers days in Hetao and its vicinity [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(3): 446—456. [惠英, 李栋梁, 王文. 河套及其邻近不稳定积雪区积雪日数时空变化规律研究[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(3): 446—456.]
- [14] Wang Chenghai, Wang Lanzhi, Shen Yongping. A prediction of snow cover depth in the northern Xinjiang in the next 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **32**(6): 1059—1065. [王澄海, 王芝兰, 沈永平. 新疆北部地区积雪深度变化特征及未来 50a 的预估[J]. *冰川冻土*, 2011, **32**(6): 1059—1065.]
- [15] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993—2002[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(1): 64—67. [车涛, 李新. 1993—2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(1): 64—67.]
- [16] Wang Yetang, He Yong, Hou Shugui. Analysis of the temporal and spatial variations of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(6): 855—861. [王叶堂, 何勇, 侯书贵. 2000—2005 年青藏高原积雪时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6): 855—861.]
- [17] Robinson D A, Dewey K F. Recent secular variations in the extent of Northern Hemisphere snow cover [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(10): 1557—1560.
- [18] Li Peiji. Response of Xinjiang snow cover to climate change [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **59**(4): 491—501. [李培基. 新疆积雪对气候变暖的响应[J]. *气象学报*, 2001, **59**(4): 491—501.]
- [19] Jing Lihong, Jing Lijun, Gao Jing, *et al.* Variation characteristics of snow cover in Tacheng Region [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2009, **3**(1): 35—40. [井立红, 井立军, 高婧, 等. 塔城地区积雪变化特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2009, **3**(1): 35—40.]
- [20] An Di, Li Dongliang, Yuan Yun, *et al.* Contrast between snow cover data of different definitions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 1019—1027. [安迪, 李栋梁, 袁云, 等. 基于不同积雪日定义的积雪资料比较分析[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6): 1019—1027.]
- [21] Li Dongliang, Xie Jinnan, Wang Wen. A study of summer precipitation features and anomaly in Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, **21**(3): 331—340. [李栋梁, 谢金南, 王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究[J]. *大气科学*, 1997, **21**(3): 331—340.]
- [22] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial characteristics of changes in temperature and precipitation of the Qinghai Xizang Plateau [J]. *Science in China, Series D*, 1996, **26**(4): 354—358. [林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征[J]. *中国科学(D 辑, 地球科学)*, 1996, **26**(4): 354—358.]
- [23] Jin Dachao, Guan Zhaoyong, Cai Jiayi, *et al.* Anomalous summer rainfall patterns in East China and the related teleconnections over recent 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, **34**(5): 947—961. [金大超, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 近 50 年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关[J]. *大气科学*, 2010, **34**(5): 947—961.]
- [24] Cao Jianting, Qin Dahe, Kang Ersi, *et al.* Changes of runoff of main rivers in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(21): 2403—2408. [曹建廷, 秦大河, 康尔泗,

- 等. 青藏高原外流区主要河流的径流变化[J]. 科学通报, 2005, **50**(21): 2403—2408.]
- [25] Chen Yaning, Xu Zongxue. Possible effects of global climate change on water resources in the Tarim River[J]. Science in China(Series D), 2004, **34**(11): 1047—1053. [陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, **34**(11): 1047—1053.]
- [26] Xu Zongxue, Zhao Fangfang. Variation of sunlight radiation duration in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2005, **27**(5): 153—159. [徐宗学, 赵芳芳. 黄河流域日照时数变化趋势分析[J]. 资源科学, 2005, **27**(5): 153—159.]
- [27] Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, *et al.* Climate change characteristics in the source regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years[J]. Resources Science, 2010, **32**(8): 1486—1492. [刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. 资源科学, 2010, **32**(8): 1486—1492.]
- [28] Zhang Xiangsong, Shi Yafeng. The snow and ice disasters and its tendency in future on China [J]. Journal of Natural Disasters, 1996, **5**(2): 80—81. [张祥松, 施雅风. 中国的冰雪灾害及其发展趋势[J]. 自然灾害学报, 1996, **5**(2): 80—81.]
- [29] Yan Yan, Liu Zhihui, Ye Zhaoxia. Establishment and validation of early-warning model for snowmelt flood in North Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2009, **32**(4): 552—557. [闫彦, 刘志辉, 叶朝霞. 新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证[J]. 干旱区地理, 2009, **32**(4): 552—557.]
- [30] Hu Ruji, Wei Wenshou. On the zoning of snow damage in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, **9**(Suppl.): 1—12. [胡汝骥, 魏文寿. 试论中国的雪害区划[J]. 冰川冻土, 1987, **9**(增刊): 1—12.]
- [31] He Liye, Li Dongliang. Classification of snow cover days and comparing with satellite remote sensing data in West China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(2): 237—245. [何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(2): 237—245.]
- [32] Chen Guangyu, Li Dongliang. Temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth in Northeast China and its vicinity [J]. Meteorological Monthly, 2011, **37**(5): 513—521. [陈光宇, 李栋梁. 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律[J]. 气象, 2011, **37**(5): 513—521.]
- [33] Xu Xingkui. Spatiotemporal variation and regional distribution characteristics of snowfall in China from 1970 to 2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 497—503. [徐兴奎. 1970—2000 年中国降雪量变化和区域性分布特征[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 497—503.]
- [34] Ma Lijuan, Qin Dahe, Bian Ling, *et al.* Analysis of air temperature sensitivity of snow cover days on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2010, **6**(1): 1—7. [马丽娟, 秦大河, 卞林根, 等. 青藏高原积雪日数的气温敏感度分析[J]. 气候变化研究进展, 2010, **6**(1): 1—7.]
- [35] Hantel M, Ehrendorfer M, Haslinger A. Climate sensitivity of snow cover duration in Austria [J]. International Journal of Climatology, 2000, **20**(6): 615—640.
- [36] Shi Ying, Gao Xuejie, Wu Jia, *et al.* Simulation of the Changes in Snow Cover over China under global warming by a high resolution RCM [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(2): 215—222. [石英, 高学杰, 吴佳, 等. 全球变暖对中国区域积雪变化影响的数值模拟[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(2): 215—222.]
- [37] Li Peiji. Cryosphere fluctuation in the past century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(2): 105—116. [李培基. 近百年来冷圈波动[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(2): 105—116.]
- [38] Liu Xiaodong. The effect of snow and ice changes on atmospheric circulation and climate [J]. Advance in Earth Sciences, 1989, **4**(6): 53—56. [刘晓东. 冰雪变化对大气环流和天气气候的影响[J]. 地球科学进展, 1989, **4**(6): 53—56.]
- [39] Blanford H H. On the connection of Himalayan snowfall and seasons of drought in India [J]. Proc. R. Soc. London, 1884, **37**: 3—22.
- [40] Walker G T. Correlation in seasonal variations of water—a further study of world weather [J]. Monthly Weather Review, 1925, **53**(6): 252—254.
- [41] Hahn D G, Shukla J. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian Monsoon rainfall [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1976, **33**(12): 2461—2462.
- [42] Fu Congbin. The relationship between the changes of the Northern Hemisphere snow ice area and the summer hypothermy at the Northeast China region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1980, **38**(2): 187—192. [符淙斌. 北半球冬春冰雪面积变化与我国东北地区夏季低温的关系[J]. 气象学报, 1980, **38**(2): 187—192.]
- [43] Chen Xingfang, Song Wenling. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, **24**(5): 585—592. [陈兴芳, 宋文玲. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析[J]. 大气科学, 2000, **24**(5): 585—592.]
- [44] Chen Qianjin, Gao Bo, Zhang Qiang. Studies on relation of snow cover over the Tibetan Plateau in winter to the winter-summer monsoon change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, **24**(4): 477—492. [陈乾金, 高波, 张强. 青藏高原冬季雪盖异常与冬夏季风变异及其相互联系的物理诊断研究[J]. 大气科学, 2000, **24**(4): 477—492.]
- [45] Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, *et al.* Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, **24**(6): 761—774. [郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响[J]. 大气科学, 2000, **24**(6): 761—774.]
- [46] Gao Rong, Zhong Hailing, Dong Wenjie, *et al.* Impact of snow cover and frozen soil in the Tibetan Plateau on summer precipitation in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(2): 254—260. [高荣, 钟海玲, 董文杰, 等. 青藏高原积雪、冻土对中国夏季降水影响研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(2): 254—260.]

Spatial-Temporal Variations of Snow Cover Days and the Maximum Depth of Snow Cover in China during Recent 50 Years

WANG Chun-xue, LI Dong-liang

*(College of Atmospheric Sciences / Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)*

Abstract: On the basis of the snow cover observation data from 557 weather stations in China during the period 1958/1959—2007/2008, the spatial-temporal variations of snow cover days and the maximum depth of snow cover are analyzed with the methods of REOF combining with Mann-Kendall nonparametric trend test. It is found that North-east China, north of Xinjiang Region and the mid-

dle-eastern Tibetan Plateau are the areas with high values of snow cover days and maximum depth of snow cover. In recent 50 years, it seems that a slowly decreasing trend of snow cover days and the maximum depth of snow cover take place in spring and autumn, but not in winter. Air temperature is an important factor controlling the duration and the maximum depth of snow cover.

Key words: snow-cover days; the maximum depth of snow cover; REOF, Mann-Kendall trend test