

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.

# 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律<sup>\* 1</sup>

陈光宇 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, 南京 210044

**提 要:** 利用东北及邻近地区 1960—2006 年 123 个地面测站逐日积雪观测资料和同时期气象要素资料, 采用面积权重、EOF、小波分析和功率谱方法分析了东北全年及各季节累积积雪深度的时空变化特征, 结果表明: 近 50 年来东北及邻近地区累积积雪呈缓慢增加趋势, 具体到各个季节上, 秋季积雪趋势基本稳定, 冬季积雪显著增加, 春季积雪显著减少, 年累积积雪的增加主要由冬季积雪的上升所造成。通过 EOF 分析, 发现累积积雪深度有 3 个主要的分布型: 第一型为全区一致偏多(偏少)型; 第二型为南部多(少)北部少(多)的南北相反分布型; 第三型为中部多(少)、南北少(多)型。小波分析和功率谱方法得出积雪深度变化存在 7a 的主周期和 4a 的副周期, 且近年来周期有变短的趋势, 说明积雪对全球气候变暖存在较好的响应。

**关键词:** 东北及邻近地区, 积雪日数, 累积积雪深度, 线性趋势系数

## Temporal-Spatial Characteristics of Cumulative Snow Depth in Northeast China and Its Vicinity

CHEN Guangyu LI Dongliang

Department of Atmosphere Sciences, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Based on the snow cover data and meteorological element data at 123 meteorological stations in Northeast China during the period of 1960—2006, the spatial and temporal characteristics of snow cover are analyzed by the area weighted method, empirical orthogonal function, Morlet wavelet analysis and power spectral method. The results show that the cumulative snow depth in Northeast China is increasing slowly in the recent 40 years. The cumulative snow depth is no obvious changes in autumn, increasing in winter, and decreasing in spring, in which the increasing cumulative snow depth in winter is the key factor to the increasing annual cumulative snow depth. We hold the opinion that there are three main spatial patterns of cumulative snow depth in Northeast China by using EOF method, of which, the first pattern is consistently more (less) than normal, the second pattern is a seesaw between southern (northern) region and northern (southern) region, and the third pattern is a seesaw between central region (other region) and other region (central region). There is a quasi-period of 7 years revealed by Morlet wavelet analysis and power spectral method, its period displays a decreasing trend and has a good response to the global warming.

**Key words:** Northeast China and its vicinity, snow cover days, cumulative snow depth, linear trend coefficient

## 引 言

冰冻圈是对大气圈和水圈具有直接而敏感响应

的一个圈层。冰冻圈, 作为水圈的固体形式, 以其巨大的冰储量和热容量, 调节着地球上的水分和能量平衡, 是仅次于海洋的第二大气候系统<sup>[1]</sup>。积雪是覆盖在地球表面上的雪层, 是冰冻圈重要的组成部分。积

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB411506), 2008 年度冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLC08-06)项目资助  
2010 年 9 月 9 日收稿; 2010 年 12 月 7 日收修定稿  
第一作者: 陈光宇, 主要从事气候变化及预测方法的研究。Email: cgy159357@sina.com  
通讯作者: 李栋梁。Email: lidl@nuist.edu.cn

雪具有很大的反照率,它能使地表接受的太阳辐射大大减少,同时积雪也是热的不良导体,它能减弱地表和大气之间的能量交换,并且积雪具有很高的相变潜热,它的融化会吸收周围大量的热量,给周围环境以制冷效应。基于以上一系列的热力学性质,所以积雪的存在,会对气候系统变化产生重要影响。

我国稳定积雪区面积达 420 多万  $\text{km}^2$ , 是受冰冻圈灾害影响较为严重的国家之一,随着全球变暖,积雪和冻土的变化,已引起了与之相关的洪水、泥石流、雪崩以及冻土热融等各类冰冻圈灾害发生频率、强度、范围增加,威胁到人民生命财产的安全以及交通、建筑、信息等的畅通<sup>[2]</sup>。基于积雪在冬半年对国民经济运行的较大影响,前人分不同地域、不同时段对积雪的监测方法、时空特征以及对天气系统的影响方面进行了大量研究工作,并得到了富有意义的成果<sup>[3-9]</sup>。李培基<sup>[10]</sup>通过对气象观测台站积雪日数资料的统计分析,指出我国积雪分布很不均匀,南部无积雪,北部年积雪日数在 170 d 以上,积雪受温度和降水的影响是二者共同作用的结果。柯长青等<sup>[11]</sup>对青藏高原 1978—1987 年 SMMR 微波积雪深度资料和地面基本气象台站 1963—1992 年逐日积雪深度记录进行了 EOF 分析,结果表明:青藏高原积雪空间分布极不均匀,高原东部是高原积雪年际变化最显著的地区,并与西部多雪区年际波动呈反位相关关系。从 20 世纪 60 年代到 80 年代积雪年际波动幅度有明显增加的趋势。李栋梁等<sup>[12]</sup>利用黑龙江省近 50 年的积雪资料研究了黑龙江积雪的初、终日期,发现黑龙江省积雪初日北早南晚,终日南早北晚,近 50 年以来积雪初日推后  $1.9 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,终日提早  $1.6 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,且积雪初(终)日期的推后(提早)主要在较低纬度的平原地区。崔彩霞等<sup>[13]</sup>指出:伴随着 20 世纪 80 年代以来明显的增温增湿变化,新疆积雪呈轻度增长趋势,积雪日数和厚度与冬季降水量呈正相关,但与冬季平均温度没有明显相关关系。惠英等<sup>[14]</sup>通过对河套及其邻近地区 240 个地面气象观测站 1951—2006 年积雪日数资料的分析,得出河套及其邻近地区近 50 年来积雪日数呈减少趋势,高纬度、高海拔减少更明显,且积雪日数存在准 18 a 的周期变化。孙凯军等<sup>[15]</sup>利用卫星遥感和常规观测的积雪资料得出结论:吉林省积雪的开始日期东部山区较中西部平原地区早,而积雪的终止日期东部山区较中西部平原地区晚,东部山区稳定积雪期长,中西部地区和山区的近

海低海拔地区稳定积雪期短。安迪等<sup>[16]</sup>利用天气现象定义与积雪深度定义两种方法对全国 884 个台站的积雪日资料进行分析比较认为,我国东部大部分地区及新疆地区两种数据差别不大,但是在东北及青藏高原两套数据的积雪日数差别在 10 d 以上,积雪深度的差别在 0.4 cm 以上。孙林海等<sup>[17]</sup>和吴滨<sup>[18]</sup>根据青藏高原积雪资料与我国夏季降水量及登陆东南沿海热带气旋频数的相关分析得出,冬季高原积雪异常偏多时,长江流域夏季易发生洪涝,登陆的热带气旋偏少。

从以上文献来看,目前的积雪研究主要集中在青藏高原、新疆和河套地区,东北地区即使有积雪的研究,主要侧重在一个省或一个点的变化特征分析,对于整个东北地区长时间尺度积雪变化的时空特征研究的不多。作为全国主要积雪区之一,东北地区的稳定积雪区面积为 140 万  $\text{km}^2$ ,占全国总积雪面积的三分之一。东北积雪的多少直接关系到我国冰冻圈的分布状况,且对当地工农业生产、交通、旅游和人们生产生活等各方面都具有重要的意义。

## 1 资料与方法介绍

针对以上问题,利用文献<sup>[16]</sup>整理的  $38^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 、 $105^\circ \sim 135^\circ \text{E}$  范围内,观测时间较长、连续性较好的 123 个地面气象观测站 1951—2006 年逐日积雪深度资料作为研究对象,站点位于我国东北三省、内蒙古东部、北京、天津以及河北和山西的部分地区,位置分布如图 1 所示。定义的积雪年从 7 月 1 日到次年 6 月 30 日。积雪日数定义为积雪深度大于 1 cm 的日数,累积积雪深度定义为各积雪日积雪深度的累加。在资料处理过程中,对积雪日数资料中个别站点少量年份中出现的缺测现象,选用与该测站积雪日数序列相关系数最高的最近测站建立一元回归模型进行插补,从而对缺测站的缺测资料进行时间序列上的插补。

由于东北地区观测站地理分布不均匀,辽宁及环渤海地区测站较为密集,积雪较少,大小兴安岭地区测站较为稀疏,但这些地区又是积雪较多的区域,所以在计算东北地区整体的平均积雪日和积雪深度时,如果采用简单的算术平均方法必然使测站较少的区域积雪的比重下降,测站较多的区域积雪比重加大,从而造成整体积雪值被低估。所以参考赵庆云等<sup>[19]</sup>研究西北地区东部近 40 年地面气温变化特

征时采用的面积加权平均方法,可以消除因站点分布不均匀对平均后的整体积雪值造成的影响,从而比较准确地反映整个区域的积雪变化特征。本文采用面积加权平均的方法,通过对资料的统计分析得到东北地区积雪的气候特征,然后利用 EOF 方法对东北 123 个测站年累积积雪深度序列进行时空分解,分析该地区积雪的时空异常变化,最后通过小波分析方法分析东北累积积雪深度时间序列的周期。

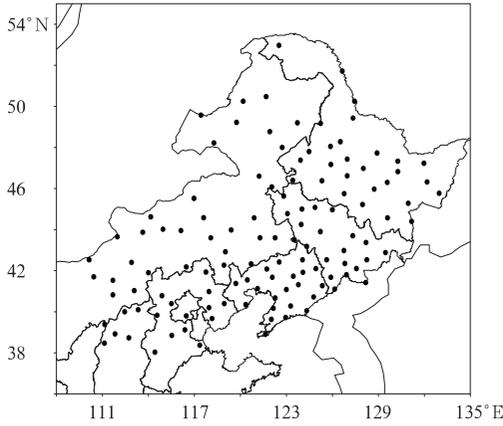


图 1 研究区域 123 个站点分布

Fig.1 The distribution of 123 analyzed stations in the research region

## 2 东北积雪的气候特征

图 2 给出了东北全区多年平均积雪日数和累积

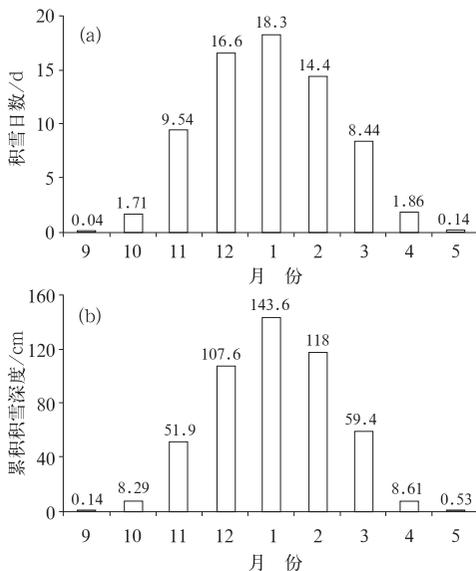


图 2 积雪日数(a)和累积积雪深度(b)的年变化

Fig.2 Annual variations of snow cover days (a) and the cumulative snow depth (b)

积雪深度的年变化,从 9 月到 5 月,积雪日数呈单峰型分布,11 月和 12 月积雪快速增长,冬季(12—2 月)平均积雪日数达 50 d(即一半以上的日期有积雪),占全年积雪日数 71 d 的 70%。累积积雪深度达 369 cm,占全年累积积雪 498 cm 的 74%。3 月和 4 月积雪快速融化,春季(3—5 月)平均积雪日数仅为 10.4 d,累积雪深 68.5 cm,均只有冬季的 20%,夏季无积雪分布。与积雪日数年内分布不同的是,2 月累积积雪深度大于 12 月,这是由于在 2 月积雪深度较深所致。

东北年积雪日数的空间分布(图 3a),大致呈现两多一少。两多在大、小兴安岭,多雪区(湿舌)沿山区自北向南伸展,可分别伸展到燕山和长白山。而且位于东部的小兴安岭的积雪明显比西部的大兴安岭多;一少在东北平原腹地和环渤海,干舌沿东北平原自南向北伸展。大致是高纬多、低纬少,高山多、

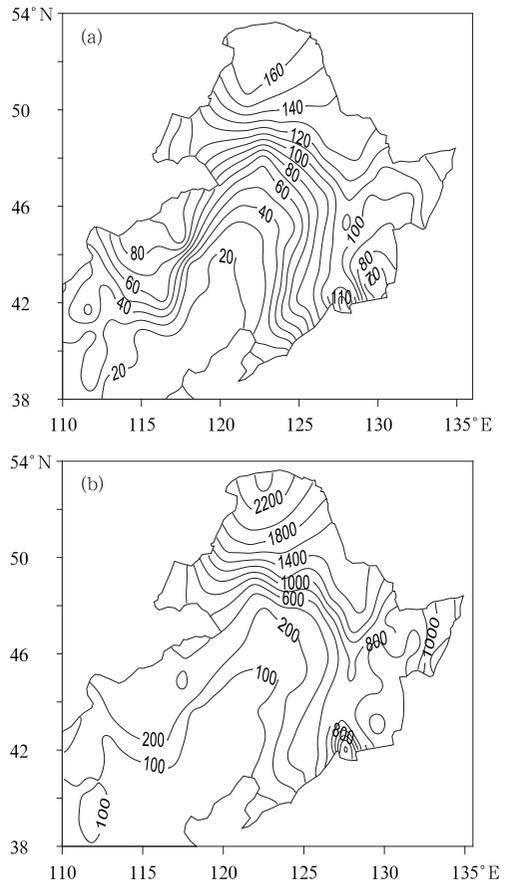


图 3 东北地区积雪日数(a,单位:d)和累积积雪深度(b,单位:cm)的分布

Fig.3 Distributions of snow cover days (a, unit:d) and the cumulative snow depth (b, unit:cm) in Northeast China

平原少的特点。黑龙江北部和内蒙古东北部地区在 160 d 以上, 漠河站 ( $52.97^{\circ}\text{N}$ 、 $122.5^{\circ}\text{E}$ , 433 m) 达 169 d, 东北平原腹地和环渤海不足 20 d。累积积雪深度的空间分布(图 3b)也大致呈现相同的特点。值得注意的是, 长白山山地无论年积雪日数还是累积积雪深度都存在显著的大值区。年积雪日数图中等值线走向与文献[10]的结果基本一致, 但数值偏小 10 d 左右, 这可能是由于统计时段不同所致。图 4a 给出全区 123 个站平均的累积积雪深度的时间序列, 反映了东北累积积雪深度 50 年来呈较显著增长的趋势, 趋势系数为  $41.2\text{ cm}/10\text{a}$ , 通过 0.05 显著性水平检验, 这与王澄海等[20]的结果基本一致。具体到年代际变化上: 20 世纪 60 年代、70 年代积雪变化趋势相对平稳, 从 80 年代前期开始积雪呈明显增加趋势, 在 1999 年出现累积积雪深度的极大值, 似乎自 90 年代之后随着全球气候变暖, 积雪的不稳定性有所增加。

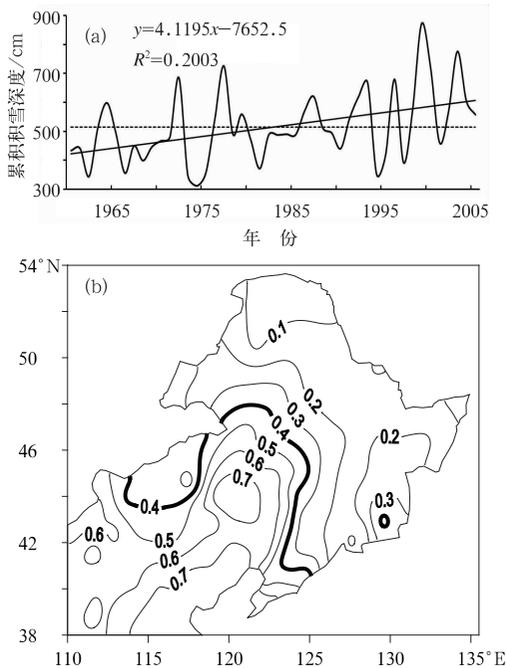


图 4 东北区域 123 站平均累积积雪深度的年际变化(a)和累积积雪深度的年际变率分布(b)  
虚线: 多年平均值; 直线: 线性趋势线

Fig. 4 The interannual change (a) and the interannual variability (b) of the cumulative snow depth in Northeast China

Dotted line: mean cumulative snow depth,  
straight line: linear trends

定义积雪的年际变率为标准差与平均值的商, 能从一个侧面反映积雪的波动程度。图 4b 表示东

北各站积雪近 50 年的年际变率。从图上可以看出, 中北部山区的积雪年际变率一般在 0.4 以下, 比较稳定, 大兴安岭北部的漠河年际变率在 0.1 以下, 十分稳定; 南部平原区年际变率在 0.4 以上, 稳定性较差, 尤其是环渤海地区的年际变率在 0.7 以上, 很不稳定。与图 3a 积雪日数分布对比之后不难发现, 年际变率为 0.4 左右的地区恰好也是年积雪日数为 60 d 左右的区域。参照文献[10]的规定, 以年积雪日数 60 d 或积雪年际变率 0.4 作为稳定积雪区与年周期性不稳定积雪区的界线, 我们可以把东北积雪区分成两个部分: 即东北中北部和山地为稳定积雪区, 东北南部和环渤海地区为年周期性不稳定积雪区。

### 3 东北各季节积雪的时空分布

比较不同季节的累积积雪深度空间分布不难发现, 三个季节积雪的分布特征与年累积积雪深度分布基本一致, 冬季累积积雪深度显著大于秋季和春季, 占全年的 75% 以上。具体到每个季节来看: 秋季(图 5a)累积积雪深度最大为漠河站 309 cm, 最小为辽宁省的庄河站 ( $39.72^{\circ}\text{N}$ 、 $122.95^{\circ}\text{E}$ , 34.8 m) 仅 2 cm; 冬季(图 5c)累积积雪深度最大为吉林省的东岗站 ( $42.1^{\circ}\text{N}$ 、 $127.57^{\circ}\text{E}$ , 774.2 m) 1633 cm, 最小的怀来站为 19 cm; 春季(图 5e)累积积雪深度最大为漠河站 612 cm, 最小为怀来站仅 4 cm。

在各季节累积积雪深度时间序列上, 冬季积雪深度(图 5d)增加较为显著, 通过 0.01 显著性水平检验, 秋季(图 5b)积雪变化趋势不明显, 春季(图 5f)的积雪深度呈下降趋势, 通过 0.05 显著性水平检验, 但由于冬季积雪占全年的比例大, 所以年积雪趋势是增加的, 其原因会在后文讨论。年累积积雪深度的线性趋势系数的地理分布(图 6a)除了小兴安岭和长白山区以外, 其余地方都呈增加趋势, 其中增加最显著的是内蒙古的海拉尔 ( $49.22^{\circ}\text{N}$ 、 $119.75^{\circ}\text{E}$ , 610.2 m), 达到  $27.35\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 减少最明显的是吉林省的集安 ( $41.10^{\circ}\text{N}$ 、 $126.15^{\circ}\text{E}$ , 177.1 m) 为  $-13.44\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ , 这与孙秀忠等[21]的研究成果相一致。秋季东北累积积雪深度东西呈反位相变化(图 6b), 但变化趋势都不明显。区域西部有弱的增加, 正值中心在内蒙古的图里河 ( $50.48^{\circ}\text{N}$ 、 $121.68^{\circ}\text{E}$ , 732.6 m)  $2.76\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 区域东部呈弱的减少趋势, 负值中心在黑龙江省的鸡西 ( $45.28^{\circ}\text{N}$ 、 $130.95^{\circ}\text{E}$ ,

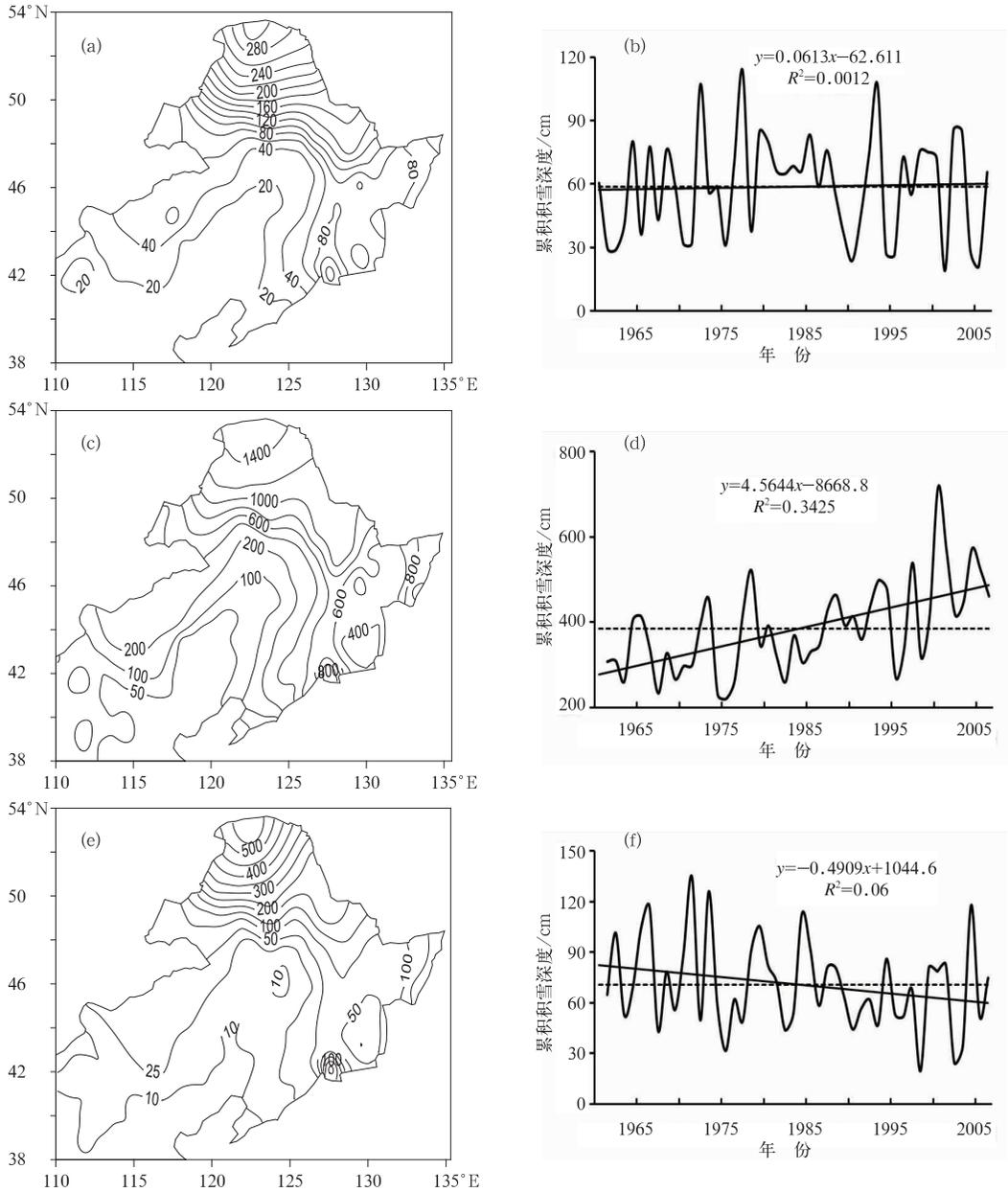


图 5 东北地区秋季(a,b),冬季(c,d)和春季(e,f)累积积雪深度分布 (单位:cm)及其年际变化(说明同图 4)

Fig. 5 Distributions and interannual variations of the cumulative snow depth in autumn (a,b), winter (c,d) and spring (e,f) in Northeast China (unit:cm) dotted line; mean cumulative snow depth, straight line; linear trends

238.3 m), 减小趋势为  $-3.31 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。冬季(图 6c)东北各地积雪深度都呈增加趋势,特别是大、小兴安岭增加尤为显著,最显著的海拉尔站达到  $27.55 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。南部边缘有非常微弱的减小趋势。春季与冬季和年的情形几乎完全相反(图 6d),东北北部、大小兴安岭、长白山区为减小趋势,减少最显著的是东岗  $-7.41 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。黑龙江西部、辽宁和内蒙古中部积雪呈非常微弱的增加趋势。

## 4 累积积雪深度异常的时空变化特征

### 4.1 累积积雪深度的空间异常分析

为了研究东北累积积雪深度的异常分布型,对 1960—2006 年研究区域的 123 个站点年累积积雪深度资料先经过标准化处理后进行 EOF 分解,前 10 个载荷向量的方差贡献值如表 1 所示。经过计算

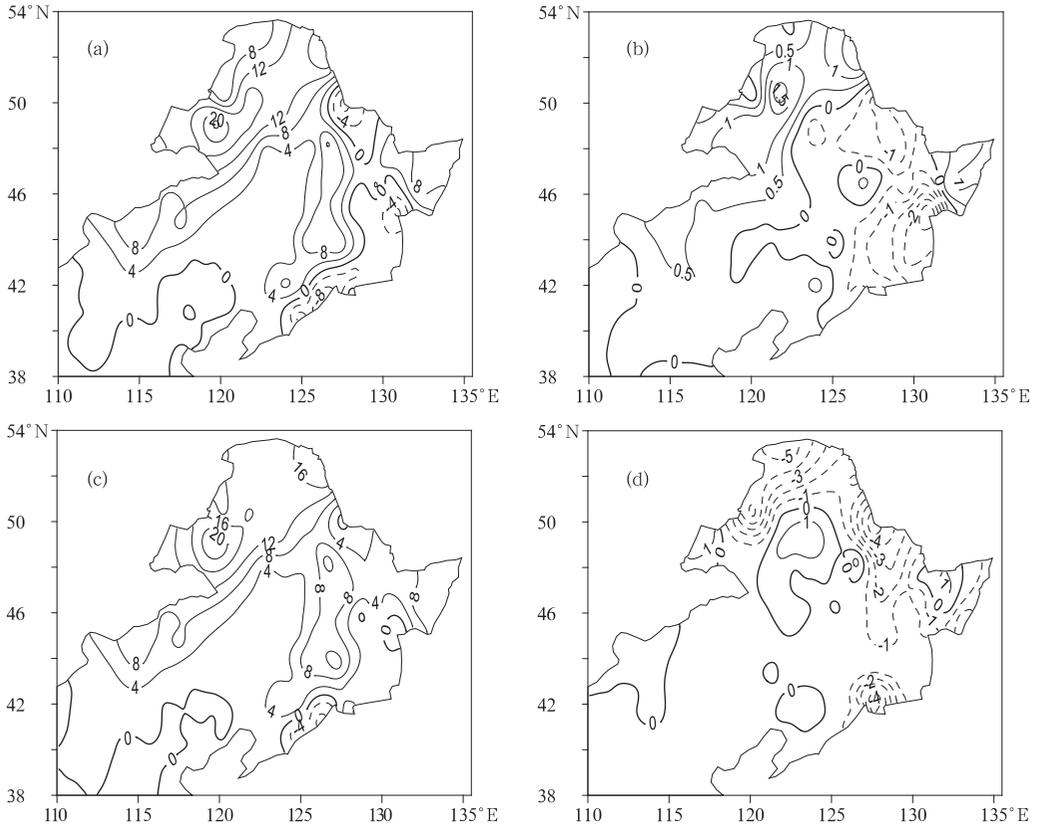


图 6 东北地区全年(a),秋季(b),冬季(c)和春季(d)累积积雪深度线性趋势系数(单位:  $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ )

Fig. 6 Variation of the linear trend coefficient of the cumulative snow depth throughout the year (a), autumn (b), winter (c), and spring (d) in Northeast China (unit:  $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ )

表 1 EOF 分解后前 10 个载荷向量(LV)的解释方差和累积方差

Table 1 The single variances and cumulative variances of the first 10 loading vectors of EOF

载荷向量	个别方差/%	累积方差/%
LV <sub>1</sub>	23.33	23.33
LV <sub>2</sub>	8.99	32.32
LV <sub>3</sub>	6.92	39.24
LV <sub>4</sub>	6.17	45.41
LV <sub>5</sub>	5.87	51.28
LV <sub>6</sub>	4.63	55.91
LV <sub>7</sub>	4.13	60.04
LV <sub>8</sub>	3.86	63.90
LV <sub>9</sub>	3.30	67.20
LV <sub>10</sub>	2.89	70.09

各向量特征值误差范围的显著性检验后,本文选取了前三个载荷向量分析积雪的时空变化特征。图 7 给出东北累积积雪深度前三个载荷向量的分布,第一载荷向量场(图 7a)占总解释方差的 23.33%,几乎表现为全区一致的正值,即反映了东北积雪的整体偏多(偏少),载荷向量最大值位于吉林中部的长

春(43.90°N、125.22°E, 236.8 m)和辽宁北部的开原(42.53°N、124.05°E, 98.2 m),表明这一带是积雪变化的最敏感区域,全区域积雪的一致偏多或偏少表明东北地区冬季积雪主要受大尺度天气系统和气候背景影响。图 7b 表示积雪 EOF 分析的第一载荷向量对应的时间演变,可以看出其时间序列曲线从 20 世纪 70 年代中期开始呈现上升的趋势,并且在 2000—2001 年形成峰值,而这两年也是近 50 年来东北积雪最多的时期。与此种分布形式一致的全区一致多雪年有:1964、1993、2000、2001 和 2005 年;全区一致少雪年有:1974、1975、1982 和 1995 年。以上两张图反映了东北地区积雪整体呈增加的趋势,这与前面分析的累积积雪深度时间序列(图 4a)所反映的结果相一致。经过相关计算表明,积雪第一模态时间系数与积雪变化时间序列的相关系数达 0.89,远远超过 0.001 显著性水平检验,说明第一模态的载荷向量和时间序列能够很好地反映积雪的时空特征变化。

图 7c 为第二载荷向量的空间分布,从图上可以

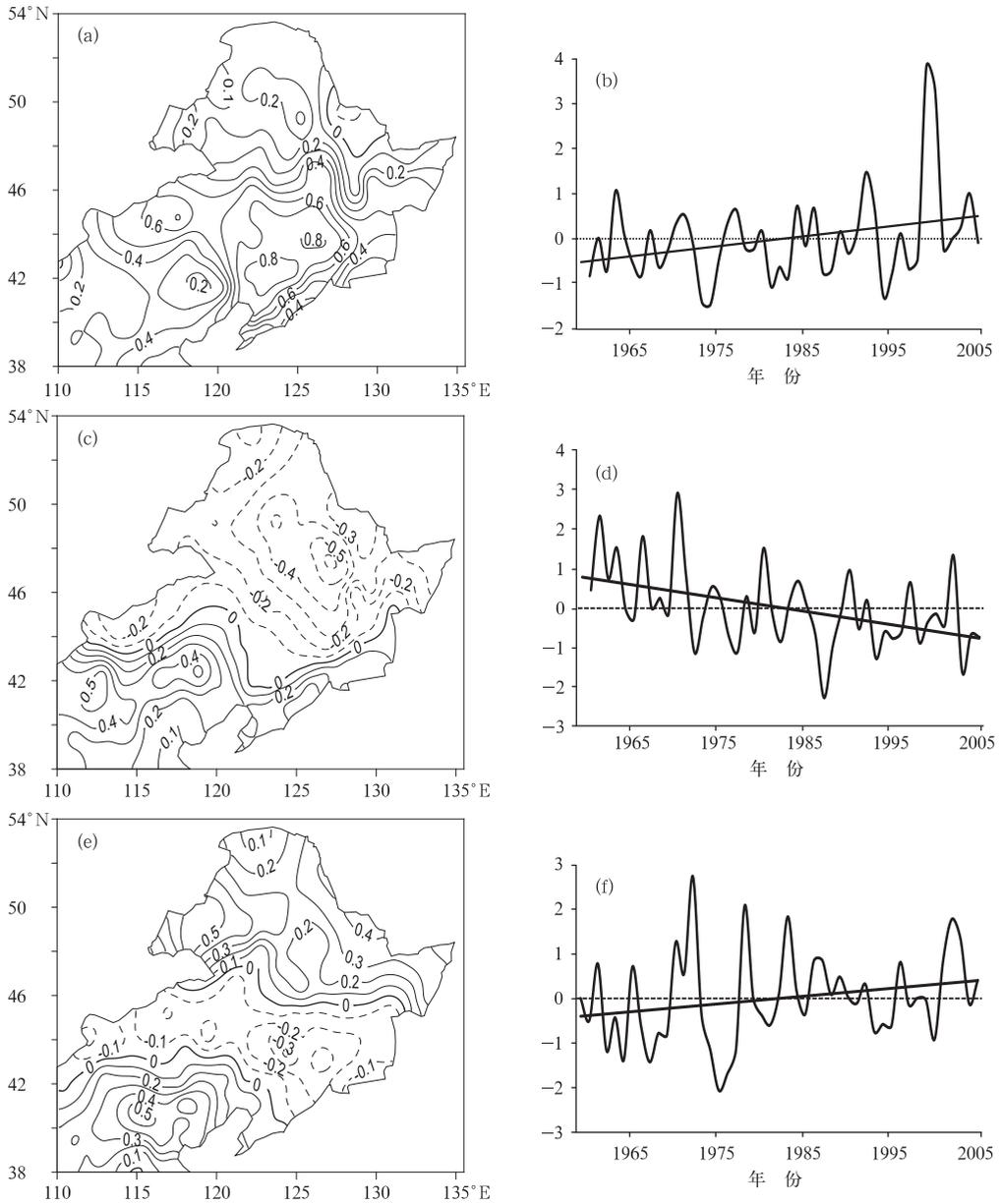


图 7 累积积雪深度的第一(a,b),第二(c,d)和第三(e,f)载荷向量及其所对应的时间系数

Fig. 7 The first (a,b), second (c,d) and third (e,f) loading eigenvectors and the corresponding temporal coefficients of cumulative snow depth

看出东北中北部与东北南部呈反位相分布,反映了东北积雪除了存在全区一致偏多或偏少以外,还有 9% 的年份存在北多(少)南少(多)的情况,中北部负值中心在黑龙江省的海伦站(47.43°N、126.97°E, 239.2 m)和铁力站(46.98°N、128.02°E, 210.5 m)附近,南部正值中心在内蒙古的朱日和站(42.40°N、112.90°E, 1150.8 m)和赤峰站(42.27°N、118.93°E, 568 m)附近。形成这种分布是由影响东北中北部和南部的不同天气系统所造成的。在东北的积雪期(特别是冬季),东北中北部基本上受西

伯利亚干冷气流所控制,而南部除了受干冷气流控制外,还受到源自南部的渤海、黄海和东部日本海的水汽输送,造成了积雪南北间的差异。文献[21]运用 REOF 方法把东北分成南北两个降雪区,本文研究结果与该结论一致。第二载荷向量对应的时间序列曲线(图 7d)显示从 20 世纪 60 年代到 80 年代末呈下降趋势,90 年代以后变化不明显,表明在 80 年代末之前东北南部和环渤海地区积雪呈减少的趋势,而在同时段东北中北部积雪增加。典型的南多北少年为:1962、1964、1967、1971 和 1981 年;典型

的南少北多年为:1988 和 2004 年。

在第三载荷向量场的空间分布上(图 7e),主要表现为中部是负值区,北部和南部是正值区,中部负值中心位于吉林省的四平站(43.18°N、124.33°E, 164.2 m),北部和南部的正值区中心分别在内蒙古的新巴尔虎左旗站(48.22°N、118.27°E, 642 m)和河北省的承德站(40.98°N、117.95°E, 385.9 m)一带。相应的时间系数序列中(图 7f),从 20 世纪 70 年代初期到 80 年代中期波动较显著,在 1973 年出现极大值,反映了该时期东北北部和南部积雪较多,中部积雪较少,在 1975 年出现极小值,反映了该时期东北中部积雪较多,北部和南部积雪较少。

## 4.2 累积积雪深度变化的周期特征

小波分析是在傅立叶(Fourier)变换的基础上,允许把一个时间序列分解为时间和频率的贡献,通过对基函数的伸缩、平移运算,达到对信号的多分辨率分析以及对信号序列进行多尺度细化分析。它对于获取一个复杂时间序列的规律,诊断出气候变

化的内在层次结构,分辨时间序列在不同尺度上的演变特征等是非常有效的。功率谱方法是通过把气象要素的时间变化分解成由多种不同频率振动的正弦或余弦波,然后根据不同频率波的方差贡献诊断出序列的主要周期,从而确定周期的主要频率<sup>[22]</sup>。本文通过 Morlet 小波变换和功率谱方法分析东北及邻近地区累积积雪深度的变化周期。图 8a 是东北累积积雪深度时间序列小波变换后的小波系数实部,可以看出累积积雪深度存在准 7a 的周期,此周期在 20 世纪 90 年代之前比较显著,从 90 年代之后有向更短周期倾斜的趋势,并在 90 年代后期形成 4a 的副周期。图 8b 给出累积积雪深度在不同周期上的功率谱密度,可以看出在 4a 和 7.5a 左右功率谱值较大,即积雪存在 4a 和 7.5a 的周期,前者通过 0.05 显著性水平检验,后者通过 0.025 显著性水平检验,用功率谱方法得到的结果与小波分析的一致。

## 5 结论和讨论

本文利用东北及邻近地区 123 个观测站 1960—2006 年逐日积雪观测资料,并运用 EOF 和小波分析等方法分析了东北地区累积积雪深度的时空变化特征,得到以下几点主要结论:

(1) 近 50 年来东北及邻近地区累积积雪总体呈缓慢增加趋势,积雪深度变化存在准 7a 的周期,且随着全球气候变化周期有变短的趋势。

(2) 冬季累积积雪深度显著大于秋季和春季,占全年的 75% 以上,且近 50 年来呈明显增加趋势,而秋季积雪变化趋势不明显,春季积雪呈下降趋势。

(3) 研究区域累积积雪深度可分为三个主要的空间模态:第一型为全区一致偏多(偏少)型;第二型为南部多(少)北部少(多)的南北相反分布型;第三型为中部多(少)、南北少(多)型。

(4) 由于篇幅所限,文章分析了东北地区积雪的时空分布和变化事实,但还有一些内在机理,如各季节积雪年际变化的原因,积雪与大气环流之间的互反馈等问题尚待进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 窦燕,陈曦,包安明,等. 2000—2006 年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 28-34.
- [2] 秦大河. 冰冻圈. 气候研究核心[N]. 文汇报, 2008-07-06.
- [3] 傅华,沙依然,黄镇,等. MODIS 积雪遥感监测系统的研制[J]. 气象, 2007, 33(3): 114-118.

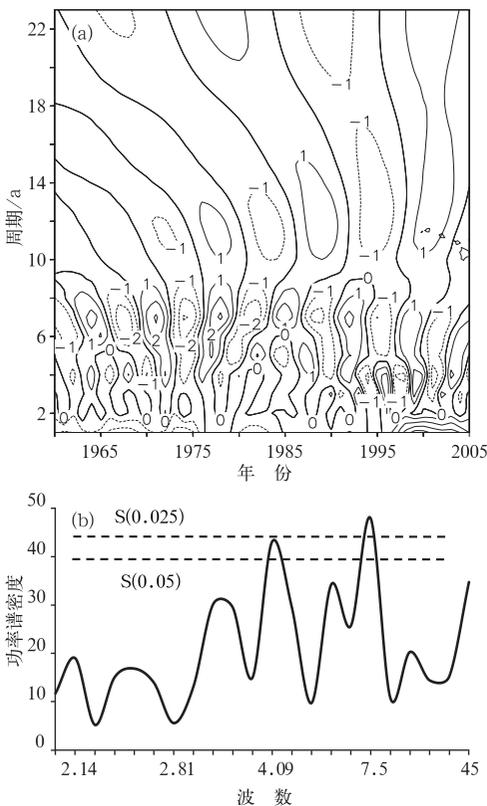


图 8 东北地区累积积雪深度时间序列的 Morlet 小波系数实部(a)和功率谱密度值(b)

Fig. 8 Morlet wavelet coefficient (a) and power spectral density (b) of the time series of cumulative snow depth in Northeast China

- [4] 柯长青,李培基,王采平. 青藏高原积雪变化趋势及其与气温和降水的关系[J]. 冰川冻土,1997,19(4):289-294.
- [5] 宋文玲,袁景凤,陈兴芳. 冬季高原积雪异常与1998年长江洪水关系的分析[J]. 气象,2000,26(2):11-14.
- [6] 侯依玲,李栋梁,施雅风,等. 我国东北及邻近地区年平均气温异常及其对北半球气候变暖和欧亚雪盖面积的响应[J]. 冰川冻土,2006,28(6):900-908.
- [7] 柯长青,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报,1998,53(3):209-215.
- [8] 吴杨,张佳华,徐海明,等. 卫星反演积雪信息的研究进展[J]. 气象,2007,33(6):3-10.
- [9] 董安祥,郭慧,王丽萍,等. 近40年北疆年积雪日数变化的CEOF分析[J]. 高原气象,2004,23(6):936-940.
- [10] 李培基. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土,1983,5(4):9-18.
- [11] 柯长青,李培基. 用EOF方法研究青藏高原积雪深度分布与变化[J]. 冰川冻土,1998,20(1):64-67.
- [12] 李栋梁,刘玉莲,于宏敏,等. 1951—2006年黑龙江省积雪初终日变化特征分析[J]. 冰川冻土,2009,31(6):1011-1018.
- [13] 崔彩霞,杨青,王胜利. 1960—2003年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. 冰川冻土,2005,27(4):486-490.
- [14] 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.
- [15] 孙凯军,胡中明. 利用卫星遥感和常规观测的积雪资料分析吉林省积雪特征[J]. 吉林气象,2008(6):2-4.
- [16] 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.
- [17] 孙林海,宋文玲. 冬季积雪对我国夏季降水预测的评估分析[J]. 气象,2001,27(8):24-35.
- [18] 吴滨. 青藏高原东部积雪与影响福建的热带气旋频数[J]. 气象,2000,26(12):20-23.
- [19] 赵庆云,李栋梁,吴洪宝,等. 西北区东部近40年地面气温变化的分析[J]. 高原气象,2006,25(4):643-650.
- [20] 王澄海,王芝兰,崔洋. 40余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J]. 冰川冻土,2009,31(2):301-310.
- [21] 孙秀忠,孙照渤,罗勇. 1960—2005年东北地区降雪变化特征研究[J]. 气象与环境学报,2010,26(1):1-5.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:66-67.