

李多,肖子牛,李泽椿. 中国东部北方地区冬季降雪的时空特征及其与全球异常海温的联系[J]. 气象,2012,38(4):411-418.

中国东部北方地区冬季降雪的时空特征 及其与全球异常海温的联系^{*1}

李 多¹ 肖子牛² 李泽椿³

1 南京信息工程大学,南京 210044

2 中国气象局干部培训学院,北京 100081

3 国家气象中心,北京 100081

提 要: 基于中国东部北方地区 279 个气象台站 1961—2008 年的观测资料,以及 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的全球海表温度资料,运用主成分分析、小波分析、相关分析等方法探讨中国东部北方地区冬季降雪的时空特征及同期全球海温与其的相关性。研究发现:中国东部北方区域(以下简称研究区)冬季降雪量存在 2~3 a、7~8 a 的高频振荡周期,及一个准 16 a 的年代际尺度的低频振荡周期。在 1961—2008 年间,研究区域冬季降雪量总体呈现上升趋势,特别是 45°N 以北的研究区北部区域冬季降雪量在 48 年间增加显著,而 45°N 以南的研究区南部区域冬季降雪量变化并不明显。分析发现,位于北大西洋上 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{W}$ 海区的海温与研究区域降雪的第一、二特征向量均为显著的正相关,研究区北部冬季降雪量与海温关系密切,南部区域冬季降雪量与全球海温的相关性不明显,海温变暖可能是导致研究区北部降雪显著增加的重要因素。

关键词: 冬季降雪, 时空特征, 异常海温

The Spatial and Temporal Characteristics of Winter Snowfall in Northeast China and Its Relation with Global Sea Surface Temperature Anomaly

LI Duo¹ XIAO Ziniu² LI Zechun³

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the observational data in the period 1961—2008 from China weather stations and the $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ global sea surface temperature (SST) data, the spatial and temporal characteristics of winter snowfall in Northeast China and the correlation with global SST are explored by using principal component analysis, wavelet analysis and correlation analysis. The study found that: the high frequency oscillation periods (2—3 a and 7—8 a) and a quasi-decadal scale (16 a) of the low-frequency oscillation were always existing during the past 48 years. Winter snowfall revealed an increasing trend in the past 48 years as a whole in Northeast region. However, the winter snowfall in the area north of 45°N increased significantly, while it did not change significantly in the area south of 45°N . Analysis has shown that a significantly positive correlation exists between SST in the North Atlantic $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{W}$ and the 1st/2nd time coefficient, and also between the winter snowfall in the northern part of the study area and SST, but the correlation

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906017)资助
2011 年 4 月 6 日收稿; 2011 年 6 月 3 日收修定稿
第一作者: 李多,主要从事气候预测与灾害性天气研究工作. Email: liduo@cma.gov.cn

between winter snowfall in the south region and the global SST is not obvious. The warming of SST may lead to a significant increase in snowfall in the northern part of the study area.

Key words: winter snowfall, spatial and temporal characteristics, sea surface temperature (SST) anomaly

引 言

我国的东部北方地处中高纬度地区,冬季气候寒冷而漫长,大雪是冬季重要的灾害性天气之一,经常造成严重损失。例如,1977 年 10 月 26—29 日,内蒙古曾出现一次大暴雪天气过程,大部地区的降雪量为 10~30 mm,其中锡林浩特过程总降雪量达 56.9 mm,形成严重的特大白灾,全区死亡牲畜 300 多万头(只),部分旗县牲畜死亡达 70% 以上^[1];2007 年 2 月 14 日和 3 月 6 日中国东北先后出现暴雪过程,降雪过程范围之广、强度之大都超出了有历史记录以来的极限,致使交通瘫痪、学校停课,给国民经济和人民生活造成极大的损失^[2]。2009 年冬半年也是典型例子,从 2009 年 11 月至 2010 年 3 月华北至东北地区出现大雪 10 多场,是 50 年来所罕见。

近年来,全球由强降雪引发的灾害事件日益增多,引起了国内外专家对冬季降雪研究的广泛关注。Changnon 等^[3]对美国及其邻近地区 122 个站点 1901—2000 年间的雪灾进行气候分析,发现雪灾的空间分布呈现纬向型,发生频率从美国东部至加拿大边境处递增。而雪灾的时间分布呈现大幅度的波动,且整体呈现上升趋势。Stewart 等^[4]研究加拿大冬季降雪,总结了造成加拿大雪灾的冬季风暴类型。Latarnser 等^[5]的研究指出,1931—1999 年期间,瑞士阿尔卑斯山的平均积雪深度、雪盖持续时间和降雪日数出现显著一致的相关趋势,表明连续多雪年、少雪年的降雪日数与积雪深度成正比。Cho 等^[6]对俄罗斯冬季降雪量的变化和空间特征研究指出,1936—1983 年间,俄罗斯整体呈现降雪量上升趋势,俄罗斯北部地区降雪量增加幅度大于南部地区,增幅最明显的地区是乌拉尔山北部和西伯利亚北部地区。国内也有很多学者针对一些比较典型的大雪个例,对大雪出现前的环流形势、锋区和流场扰动的配置、系统的演变、急流轴的变化及卫星云图的特征等进行了天气分析、诊断分析和数值模拟^[7-11],

这多数是从热力、动力、对称不稳定等天气学角度进行分析和诊断的。另外一些学者着重分析某一地区个别极端降雪典型年份,如陈乾金等^[12]利用青藏高原冬季异常积雪资料对比分析了 1985 年冬季异常少雪和 1986 年冬季异常多雪时期大气环流及热带海洋特征,发现高原冬季多雪与少雪时中高纬度大气环流显著不同,同时低纬热带环流及海洋特征也有明显的差异。相对于对我国夏季降水的研究而言,目前我国对北方地区降雪的气候背景及气候特征的分析工作还不多,对降雪的气候研究中的许多工作又多是针对较小地理范围的区域来开展的,针对中国东部北方大范围区域降雪的气候特征研究较少。近年来,北方大范围、强降雪事件频频发生,对这一地区冬季降雪的时空分布气候特征进行系统的分析,认识极端降雪事件发生发展的规律和特征,更好地为预报预测提供气候背景,从而促进预报准确率的提高,是一项十分紧迫的任务。针对这一问题,本文拟分析研究我国北方地区冬季降雪量的时空分布特征和演变规律,并探索其与海温异常的关系。由于我国幅员辽阔,东西跨度很大,东部和西部降雪特征和影响天气系统不尽相同,本文仅以东部北方地区做为研究区域开展分析讨论。

1 资料和方法

本文采用位于 40°N 以北,100°E 以东的常规观测站(共计 279 个站)的 1961—2008 年冬季(12 月至次年 2 月)降雪量实况资料(文中降雪量均指纯粹的降雪或以雪为主的雨夹雪的降雪量),以及 1°×1°的全球海温格点资料,时间序列长度为 1961—2008 年。

通过经验正交函数分解(EOF 分析),文中分析了 1961—2008 年冬季我国东部北方地区降雪的时空分布特征,最后进行冬季降雪量与海温的相关性研究,以寻找影响中国东部北方地区冬季降雪的关键海区。

此外,由于小波分析(Wavelet Analysis)是用一组频率不同的振荡函数作为窗口函数 $\varphi(t)$ 对信号

$f(t)$ 进行扫描和平移,将气象资料时间(或空间)序列曲线分解成交织在一起的多尺度成分,并可以对不同的尺度采用不同的取样步长,从而能不断地聚焦到曲线的任意细节,因此本文还选用墨西哥帽型小波函数,分析了我国东部北方地区 48 年冬季平均降雪量的多时间尺度特征。

2 中国东部北方地区冬季降雪的时空分布特征

本文采用经验正交函数分析(EOF)。EOF 分析能够把随时间变化的气象要素场分解为空间函数部分和时间函数(主分量)部分。空间函数部分涵盖场的空间特征,而时间函数部分则由空间点(变量)的线性组合所构成,称为主分量。这些主分量的前几个占了原空间点的总方差的很大部分。研究主分量随时间变化的规律,就可以代替对场随时间变化的研究。

表 1 列出了我国东部北方地区(以下统称研究区)279 个站点 1961—2008 年冬季降雪量进行标准化后得到的通过检验的 EOF 分析的前 2 个特征向量场的方差贡献率和累积方差贡献率。由表 1 可见,东部北方冬季降雪量正交函数分解的第一主成分方差贡献最大,为 48.54%,反映了这一地区冬季降雪量变化的最主要特征。从第二主成分的方差开始,方差贡献率迅速降低,前两个特征量的累计方差贡献超过 55.6%,并且通过检验,说明前 2 个典型场已能较好地表征出北方冬季降雪量的时空分布特征。图 1 给出前 2 个主成分所对应的特征场,它反映出研究区冬季降雪量异常的两种最主要的大范围空间分布特征。

表 1 1961—2008 年东部北方地区冬季降雪量 EOF 前两个分量对总方差的贡献率
Table 1 Variance contribution of the first two principal components of winter snowfall in Northeast China during 1961—2008

序号	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	48.54	48.54
2	7.08	55.62

图 1a 是冬季降雪量的第一特征场,研究区全区特征向量一致为正,说明我国研究区冬季降雪量变

化主要为总体一致性变化。图 1b 是冬季降雪量的第二特征向量场,为南北反相位特征,由图中分界线可见(黑色虚线),45°N 以北地区基本一致,为正位相分布;而 45°N 以南地区出现大范围的负位相区域。这说明冬季降水的异常第二位的特征性是北部偏多(少)而南部地区降雪偏少(多)的反相位变化特征。

图 2 为 1961—2008 年研究区冬季降雪量 EOF 展开的第一及第二特征向量场的时间系数随时间的变化,图中的折线代表第一/第二时间系数随时间变化的演变,抛物线代表第一/第二时间系数随时间变化的趋势。从第一模态时间系数演变曲线(图 2a)可以看出,近 48 年北方地区冬季降雪量的变化趋势表现为反抛物线状变化,20 世纪 70 年代末、80 年代初之前这种变化趋势表现为减弱,而 20 世纪 80 年代以后开始这种趋势在加强,特别是在 20 世纪 90 年代以后。而第二时间系数随时间的变化同样表现为反抛物线状变化的特征(图 2b),说明在 20 世纪 80 年代中叶后,研究区的南北两部分冬季降雪量的差异性在增长,即在全区降雪变化一致性加强的背景下,南北两块区域的降雪量差异也在增加。值得注意的是,其时间系数的变化在 20 世纪 80 年代中期以后振幅明显加大,显示出显著的年代际变化特征。

从表 1 可以看出,北方地区东及降雪量场 EOF 第一模态的方差拟合总体方差的贡献较大,表明该模态基本可以反映出北方地区冬季降雪量的变化异常特征。因此下面通过第一模态时间系数来分析北方地区冬季降雪量变化特征的年代际变化(图略)。从第一模态时间系数经低通滤波后(滤掉 7 年以下振荡)的时间变化曲线中可以看出,我国北方地区冬季降雪量的异常变化在 1961—2008 年期间可分为两个阶段:20 世纪 60 年代至 80 年代北方地区冬季降雪量最主要的变化趋势在减小(特别是在 70 年代中后期至 80 年代初期);80 年代末至研究时段结束时冬季降雪量的整体变化趋势在加强,特别是自 80 年代后期以来,这种变化趋势是相当明显的。

进一步用小波方法分析其周期变化特征。图 3 为研究区冬季降雪量墨西哥帽型小波变换的结果。由图 3a 可知,研究区降雪存在 2~3 a、7~8 a 的高频振荡周期,同时也存在一个准 16 a 的年代际尺度

的低频振荡周期。其中 2~3 a 的振荡周期和 7~8 a 的振荡周期都主要出现在 20 世纪 60 至 90 年代之间。在 20 世纪 90 年代以前,冬季降雪量都较好地表现出周期性,变化均比较剧烈;而 90 年代以后这种周期性的表现在减弱,变化相对稳定。计算冬季平均降雪量的小波方差,得到图 3b。可知前 2 个小波方差峰值对应 2~3 a 以及 7~8 a 的时间尺度,说明在 1961—2008 年整个时间域中,我国研究区的冬季降雪量以 2~3 a 及 7~8 a 的周期振荡最强,是第一和第二主周期。

3 中国东部北方地区降雪量的变化趋势分析

从上节的分析可以看到,研究区冬季的降雪量总体呈增多的趋势,同时异常变化呈现出更大的振幅,这意味着发生重大异常的可能性增加了。由于异常型从空间上主要有全研究区一致型和南北反相型,以下分别讨论研究这两种异常分布型相联系的降雪量变化趋势。

图 4 是东部北方地区冬季降雪量随时间的演变曲线。从研究区总体冬季降雪量时间序列中可看到(图 4a);研究区冬季降雪量总体呈现增长趋势,这与前人的一些研究结论相一致^[13-14]。图 4b 是以 45°N 为界将研究区分为南北两块区域各自冬季降雪量从 1961—2008 年的逐年变化(分界依据是图 1b)。由图可见,自 1961—2008 年,北部区域降雪量呈现明显的上升趋势,说明该区域降雪增加显著,而南部区域冬季降雪量的上升趋势相对较弱。另一方面,由于第一特征向量(全区变化一致型)代表了研究区冬季降雪的主要特征(图 1a),其时间的演变(图 2a)具有逐渐增强趋势,而第二特征向量场表示的降雪分布类型为 45°N 以北地区降雪增加显著而 45°N 以南降雪增加并不明显甚至可能减少。这一降雪分布变化的时间演变(图 2b)是在近年逐渐呈现幅度较小的增强趋势。这两个方面的特征均支持研究区北部降雪明显增加,而南部降雪量变化较小的结论。

以上分析显示了东部北方区域冬季平均降雪的时间变化特征,我们若对研究区的 48 年冬季降雪量做线性变化趋势也可以看到类似的结论。1961—

2008 年研究区冬季降雪的线性趋势变化也印证了这一特点(图略)。其中在内蒙古东北部以及黑龙江的东北部地区的降雪主要呈上升趋势,大部分地区通过 0.05 的显著性水平检验,上升趋势的大值中心主要位于海拉尔、漠河、爱辉等地区;而位于 45°N 以南的辽宁和吉林的大部分地区以及华北部分地区的线性趋势没有通过显著性检验,秦皇岛、锦州一带地区冬季降雪量出现了显著下降(通过了 0.05 的显著性水平检验)。即自北向南,研究区冬季降雪量呈现显著增长→变化不明显→显著减少的线性趋势。结合上述可以得到如下结论:1961—2008 年中国研究区冬季降雪量逐年变化的主要特点表现为整体降雪量是增加的,但是自北向南这种变化现象在减小。其中内蒙古北部至黑龙江一带降雪量增幅非常显著,而华北地区逐年冬季降雪趋势变化并不明显。

4 东部北方地区冬季降雪量变化与海温的关系

在分析了我国东部北方区域冬季降雪量的时空分布特征的基础上,下面将对影响该地区冬季降雪量多少的外强迫因子进行一些分析探讨。有专家指出,中国的降水会受到以太平洋—日本(PJ)波列形势出现的印度洋偶极海温异常影响^[15],北太平洋、印度洋和我国南海以及赤道中东太平洋的海温距平场是影响我国降水的关键区^[16],还有研究认为海温的变化是导致一些重大冰雪灾害的重要原因之一。因此了解中国研究区冬季降雪量变化与海温的关系是十分有意义的。

由 1961—2008 年研究区冬季降雪量 EOF 展开的第一时间系数及第二时间系数与全球海温相关性(图 5)可见,代表我国研究区降雪量在近 48 年全区一致增长这一气候特征的第一时间系数与大西洋、中东印度洋及西太平洋上大范围海区的冬季海温存在通过 0.05 显著性水平检验的正相关区,而与南极圈一带海域的海温反相关性显著(图 5a)。而代表北部(南部)区域冬季降雪量显著增加(变化不明显)趋势,即南北降雪量变化趋势反相的第二时间系数与全球冬季海温的相关性(图 5b)表明,第二时间系数与位于北大西洋上 30°~50°N、10°~40°W 的海区冬季海温显著正相关,而与南大西洋上位于 20°S、

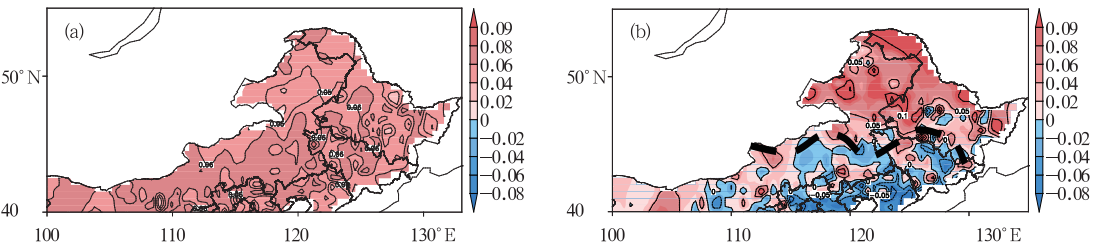


图 1 1961—2008 年我国东部北方地区冬季降雪量的 EOF 第一(a)和第二(b)特征向量场
Fig. 1 The first (a) and second (b) eigenvectors for the EOF analysis of winter snowfall in Northeast China during 1961—2008

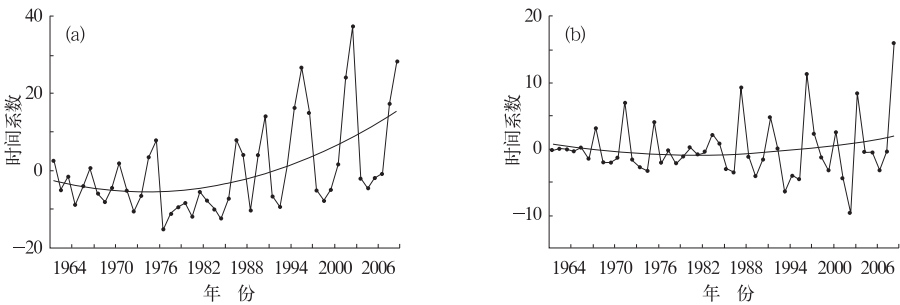


图 2 1961—2008 年东部北方地区冬季降雪量 EOF 展开的第一模态(a)和第二模态(b)时间系数演变图
Fig. 2 Variations of the first (a) and second (b) time coefficients for the EOF analysis of winter snowfall in Northeast China

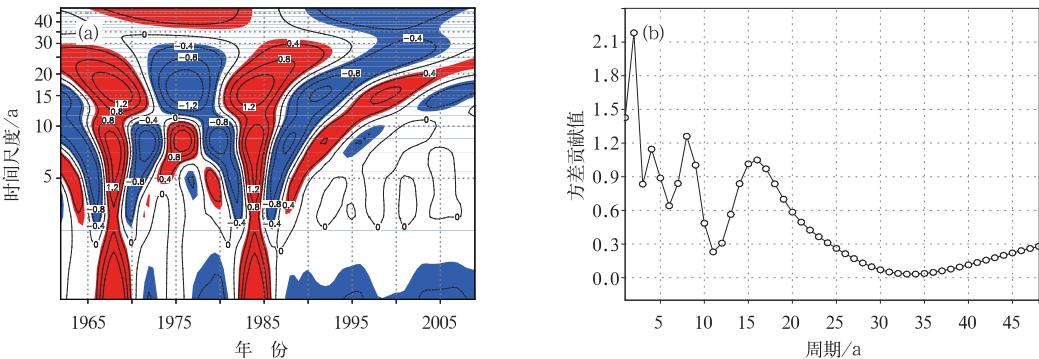


图 3 (a)1961—2008 年东部北方地区冬季平均降雪逐年变化小波实部分析(阴影区为通过 0.05 显著性水平检验的区域), (b)东部北方地区冬季降雪量的小波方差
Fig. 3 (a) Real part of wavelet transform of annual variation in averaged winter snowfall in Northeast China (Shadings denote regions passing test of 0.05 significance levels), (b) wavelet variance of winter snowfall in Northeast China during 1961—2008

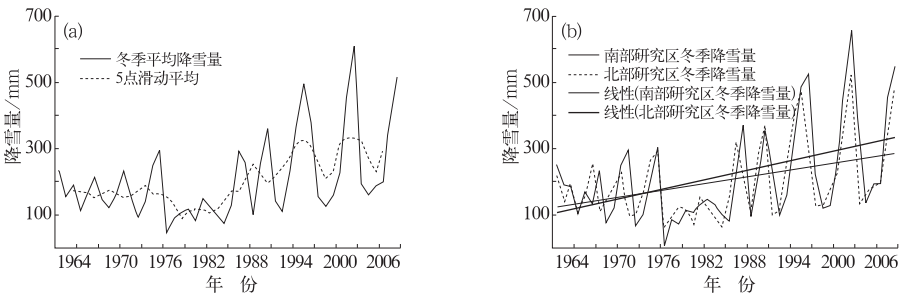


图 4 东部北方地区冬季平均降雪逐年变化曲线(a), 1961—2008 年东部北方地区南北两部分(以 45°N 为界)的冬季降雪量的变化(b)
Fig. 4 Annual variations of averaged winter snowfall in Northeast China (a), and of winter snowfall in the north and south areas (taking 45°N as division) (b), during 1961—2008

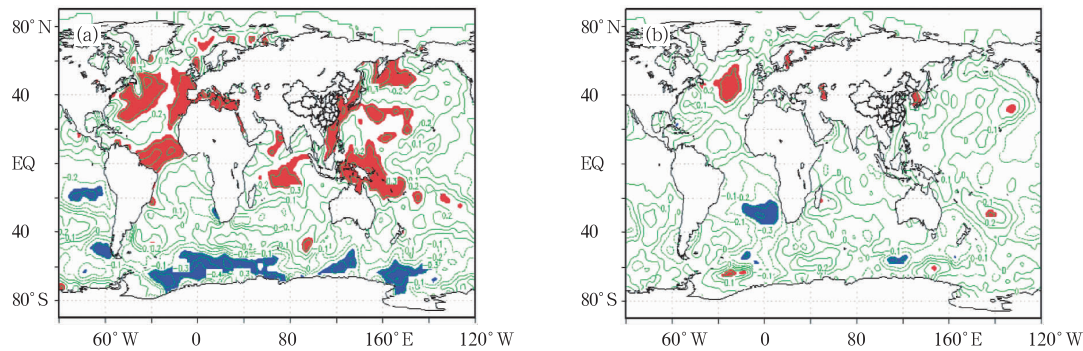


图 5 1961—2008 年东部北方地区冬季降雪量 EOF 展开的第一时间系数(a)及第二时间系数(b)与全球海温相关系数分布(阴影区通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 5 The first (a) and second (b) time coefficients in relation to the global SST (Shadings denote regions passing test of 0.05 significance levels)

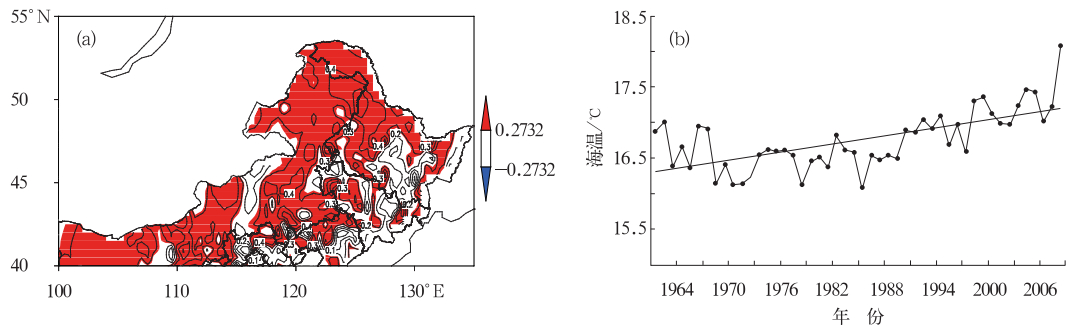


图 6 (a) 东部北方冬季降雪量与北大西洋北部海区海温相关系数分布(阴影区通过 0.05 显著性水平检验), (b) 北大西洋北部海区温度冬季海温变化

Fig. 6 The distribution of the correlation coefficient of the snowfall in Northeast China (a) and the variation of North Atlantic SST during 1961—2008 (b) (Shadings denote regions passing test of 0.05 significance levels)

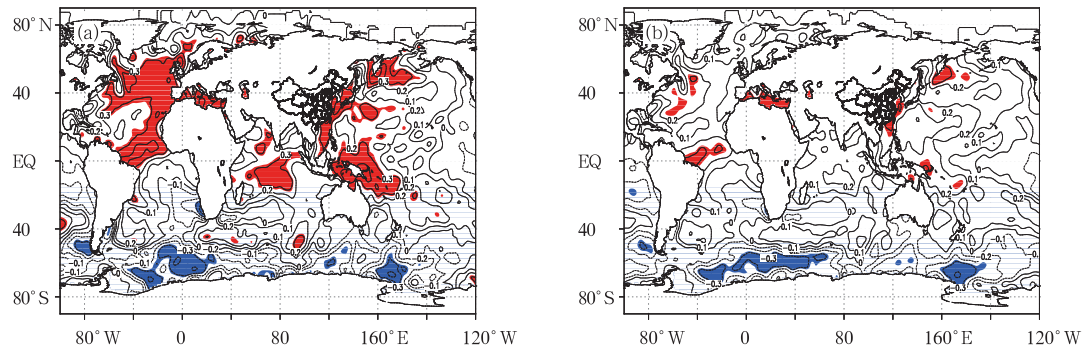


图 7 东部北方地区的北部区域(45°N 以北)冬季降雪量与全球海温相关性(a)及南部区域(45°N 以南)冬季降雪量与全球海温相关性(b) (阴影区通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 7 Correlativity of the snowfall in the north area (a) and sonth area (b) (taking 45°N as division) in relation to the global SST (shadows denote passing through the $\alpha=0.05$ significance level of test)

10°E 的安哥拉海盆附近洋面冬季海温呈显著的负相关。

综合海温与研究区冬季降雪量第一、二特征向量的关系,我们可以看到,大西洋北部海区与二者均

有密切关系。图 6a 给出了该海域异常海温与我国研究区冬季降雪量的相关系数的分布,可以看到:大西洋北部海区($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{W}$)与我国研究区近 48 年的正相关性显著,大部分地区都通过了 0.05 的显著性水平检验。由于大西洋北部海区的海温在 1961—2008 年期间随时间的变化是以增温为主要趋势(如图 6b 中所示),因此这一区域海温变暖可能是导致我国研究区冬季降雪量增多的重要原因。

上文的 EOF 分析得到的第二特征向量场已经指出:中国研究区冬季降雪量的变化趋势可以以 45°N 为界划分为南北两块区域。北部区域近 48 年的冬季降雪量呈现大幅增长趋势,南部区域近 48 年的冬季降雪量趋势变化相对较小。而上一节的相关分析也表明这一气候特征与($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{W}$)及(20°S 、 10°E)这两块海区相关性最为显著。为进一步探讨南北区域之间降雪量变化的差别是否与海温的影响作用有关,此处分别讨论这两块区域逐年冬季降雪量与全球同期冬季海温的相关情况。

上图分别是以 45°N 为界的北部区域(图 7a)和南部区域(图 7b)各自 48 年冬季降雪量与全球海温相关图。由图可见,北部区域冬季降雪量与全球海温相关性显著的区域较大,特别是与北大西洋、西北太平洋、北印度洋等海区的同期冬季海温正相关性十分显著,与南大西洋上安哥拉海盆附近及南极—东印度洋海盆附近区域冬季海温负相关显著。而南部区域降雪量与全球海表温度的相关性通过显著性检验的区域很小。由此可以推断,相比较而言,我国研究区 45°N 以北的区域冬季降雪量的变化受同期冬季海温变化的影响较大,而南部区域(45°N 以南)降雪量的变化受同期冬季海温的影响较小。因此,海温变暖可能是导致研究区北部降雪量明显增加的重要原因。

5 结论与讨论

通过 EOF 主成分分析、小波分析、相关分析等方法,本文重点讨论了我国研究区冬季降雪的时空分布特征及与同期冬季全球海温的相关性,得到以下的一些结论:

(1) 1961—2008 年我国研究区冬季降雪量空间变化上的主要特点是:EOF 分析的第一特征场表明全区冬季降雪量一致增长,而第二特征场表现出东部北方以 45°N 分界,北部区域降雪量显著增加而南部降雪量变化不明显的地区南北反向变化的特点。前两个特征向量场累计方差贡献超过 55%,可以代表研究区冬季降雪量最主要的空间变化趋势。

(2) 1961—2008 年研究区冬季降雪量的时间变化特点是:近 48 年冬季降雪量随时间的变化可以划分成 20 世纪 60 年代至 80 年代冬季降雪量偏少以及 80 年代以后冬季降雪量偏多的两个阶段;并且冬季降雪量存在 2~3 a、7~8 a 的高频振荡周期,和一个准 16a 的年代际尺度的低频振荡周期,其中以 2~3 a 的周期振荡最强,是第一主周期。

(3) 我国研究区北部区域(45°N 以北)冬季降雪量与北大西洋上 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{W}$ 的海区同期海温显著正相关。研究区北部冬季降雪量与海温关系密切,南部区域冬季降雪量与全球海温的相关性不明显,海温变暖可能是导致研究区北部降雪显著增加的重要因素。

需要指出的是,造成一个地区降雪(水)量变化的因素有很多,除了海温关键区的外强迫作用造成大气环流本身固有形态的位移或幅度异常的变化^[17-18]外,还包括人类活动的影响、下垫面其他要素、以及大气环流自身的动力、热力学过程变化等许多其他因素。因此本文的分析仅是对其中的一个因子的分析,并不全面,但它可能是一个重要的因子。而文中提到的关键区海温、大气环流和研究区冬季降雪量之间的相互作用关系也需要深入探讨,有待于今后的进一步研究。

参考文献

- [1] 宫德吉,李彰俊. 内蒙古大(暴)雪与白灾的气候学特征[J]. 气象,2000,26(12):25-28.
- [2] 白人海,张志秀,高煜中. 东北区域暴雪天气分析及数值模拟[J]. 气象,2008,34(4):23-29.
- [3] Changnon S A, Changnon D, Karl T R. Temporal and spatial characteristics of snowstorms in the contiguous United States[J]. J Appl Meteor, 2006, 45: 1141-1155.
- [4] Stewart R E, Bachand D, Dunkley R R, et al. Winter storms over Canada[J]. Atmospheric-Ocean, 1995, 33(2): 223-247.
- [5] Laternser M, Schneebeli M. Long-term snow climate trends of the Swiss Alps(1931—99)[J]. Int J Climatol, 2003, 23:

733-750.

[6] Cho H R, Gustafson P E. The changes in russian winter snow accumulation during 1936—83 and its spatial patterns[J]. J Clim, 1998, 11: 856-863.

[7] 胡中明, 周伟灿. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 680-684.

[8] 秦华锋, 金荣花. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究[J]. 气象, 2008, 34(4): 31-38.

[9] 杨成芳, 李泽椿, 李静, 等. 山东半岛一次持续性强冷流降雪过程的成因分析[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 442-451.

[10] 王继志. 1974 年 12 月 2 日华北大雪的初步分析[J]. 大气科学, 1978, 2(4): 308-313.

[11] 苗春生, 谢洁, 王坚红, 等. 一次山东半岛强冷流暴雪过程的数值模拟和诊断分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 258-265.

[12] 陈乾金, 王丽华, 高波, 等. 青藏高原 1985 年冬季异常少雪和 1986 年异常多雪的环流及气候特征对比研究[J]. 气象学报, 2000, 58(2): 203-213.

[13] 董啸, 周顺武, 胡中明, 等. 近 50 年来东北地区暴雪时空分布特征[J]. 气象, 2010, 36(12): 75-79.

[14] 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.

[15] 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系[J]. 热带气象学报, 2002, 18(4): 335-344.

[16] 赵永晶, 钱永甫. 全球海温异常对中国降水异常的影响[J]. 热带气象学报, 2009, 25(5): 562-570.

[17] Frankignoul C. Sea surface temperature anomalies, planetary waves and air sea feedbacks in the middle latitudes[J]. Rev Geophys, 1985, 23(4): 357-390.

[18] Junge M M, Haine T W N. Mechanisms of North Atlantic wintertime sea surface temperature anomalies[J]. J Climate, 2001, 14(24): 4560-4572.