

# 中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系

陈海山<sup>①②\*</sup>, 罗江珊<sup>①②</sup>, 韩方红<sup>③</sup>

① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044;

③ 中国东方航空股份有限公司运行控制中心, 上海 201100

\* 联系人, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

2018-12-12 收稿, 2018-12-26 接受

国家重点研发计划重点专项资助项目(2016YFA0600702)

**摘要** 采用相关、回归等统计方法,对中国北方暴雪的年代际变化特征及其与大气环流和北极海冰的联系进行探讨。结果表明:中国北方冬季暴雪发生频次较高区域主要位于东北,在空间分布上呈现由西北向东南增加的态势,且存在明显的年代际变化特征:1965—1980年为东北暴雪少发期;2002—2011年为东北暴雪多发期。分析表明:暴雪少发期,输送至东北的水汽较少;暴雪多发期,更多的水汽输送来自于西北太平洋,同时偏北气流引导的极地冷空气与偏南风引导的太平洋暖湿空气在东北地区汇合,提供暴雪频发的动力条件,造成东北暴雪出现年代际增多。此外,研究发现:前期秋季北极海冰的年代际减少与东北暴雪的年代际增加存在很好的相关性;秋季北极海冰异常偏少导致的大气环流异常主要表现为纬向西风减弱和NAO负位相,由此导致大气经向活动增强,利于极地冷空气向南入侵,且冷空气与暖湿空气在东北地区汇合,这是东北暴雪年代际增加的重要原因之一。

## 关键词

中国北方暴雪;  
年代际变化;  
大气环流;  
北极海冰

暴雪是指24 h降雪量超过10 mm的降雪(董啸等,2010;刘玉莲等,2010),是中国北方常见灾害性天气(宫德吉和李彰俊,2001;孙欣等,2011;蒋大凯等,2014;陈潇潇等,2015)。暴雪的发生和发展必须具备水汽、不稳定能量和抬升机制等3个基本条件,且往往是在一定的环流背景下发生的(刘宁微等,2009;Sun et al.,2010)。暴雪给交通、电力、人民生活和工农业生产带来极大影响和危害(宫德吉和李彰俊,2001;赵琳娜等,2008)。深入研究其演变特征及其成因具有重要的意义。

国内外学者主要从气候统计、诊断分析及数值模拟等方面对暴雪及其变化开展相关研究(王文辉和徐祥德,1979;Sanders and Bosart,1985;Marwitz and Toth,1993;王文和程麟生,2000,2002;Wang et al.,2011)。研究发现,中国北方暴雪多出现在初冬

和早春,而隆冬暴雪相对较少,其中,东北东部长白山、新疆西北部及天山地区易出现大到暴雪天气(孙秀忠等,2010)。章诞武等(2016)研究发现除长江中下游外,中国主要降雪区域年降雪量呈显著增加趋势,且表现出较为明显的年代际变化。Zhou et al.(2018)研究表明,20世纪60年代以来中国西北、东北和青藏高原东部降雪量增加,且降雪增加主要是由于大雪事件增加所致。已有研究发现,降雪的变化与诸多气象要素的年代际变化有关。例如:王会军和贺圣平(2013)研究指出,20世纪80年代中期后东北冬季降雪开始增多,而降雪的年代际增多和20世纪80年代中期后东亚冬季风的减弱密切相关。Zhou et al.(2017)等认为20世纪80年代中期后东北冬季降雪的增多还与Hadley环流的增强关系密切。另外的一些研究则发现全球海温的年代际

引用格式:陈海山,罗江珊,韩方红,2019.中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系[J].大气科学学报,42(1):68-77.

Chen H S, Luo J S, Han F H, 2019. Interdecadal variation of heavy snowfall in northern China and its linkages with atmospheric circulation and Arctic sea ice[J]. Trans Atmos Sci, 42(1): 68-77. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181212001. (in Chinese).

变化对降雪年代际变化也有十分重要的影响(李多等,2012;陈凯奇等,2016;Feng and Chen,2016)。

近几十年来,北极海冰面积呈现明显的下降趋势(Liu et al., 2004; Meier et al., 2007; 武炳义, 2018)。北极海冰作为影响北半球冬季天气、气候的关键因子,得到了国内外学者的广泛关注。随着北极海冰的减少,北极对全球增暖的放大效应可以影响中纬度大气环流,有利于极端天气事件的发生(Tang et al., 2013; Wu, 2017)。Nakamura et al. (2015)研究表明,北极海冰减少导致中纬度大陆冬季温度偏低,这与AO/NAO的负相位有关。数值试验结果表明,冬季巴伦支海-喀拉海海冰减少导致欧亚大陆冬季温度偏低,并且高纬度大气环流对该海域海冰减少强迫的响应是非线性的(Petoukhov and Semenov, 2010)。Luo et al. (2016a, 2016b)研究发现,巴伦支海-喀拉海地区的海冰减少,高纬度经向温度梯度会减弱,欧亚大陆西风减弱,导致乌拉尔阻塞事件周期较长,进而影响欧亚大陆中纬度地区的天气。

本文在分析中国北方暴雪天气发生频次的基础上,探讨了与暴雪年代际尺度变化相对应的大气环流场特征。在此基础上,通过分析前期秋季(9—10月)北极海冰的变化特征及其对冬半年(11月—次年3月)东北暴雪的影响,以期揭示北极海冰异常影响东北暴雪年代际变化的可能原因。

## 1 资料与方法

研究所用资料包括:1)中国地面气候资料日值数据集(V3.0)降水、气温资料,资料时段为:1951—2014年;2)美国国家环境预报中心与国家大气研究中心NECP/NCAR(National Center for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research)月平均资料,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ;欧

洲中期预报中心ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)再分析资料ERA-40与ERA interim月平均资料,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ;采用的气象要素包括风场、位势高度、海平面气压等;3)哈德莱中心的海冰覆盖率Hadisst1(Hadley Centre Sea-ice and Sea-surface Temperature Data Set Version 1)的海冰逐月格点资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。考虑到资料统一性,研究时间统一为1961/1962—2011/2012年。

相关研究通常将 $0^{\circ}\text{C}$ 作为雨雪天气的分界线(董啸等,2010;Sun et al., 2010),但由于不同区域雨雪对应的地面温度存在很大差异,不同月份的雨雪分界线的临界温度也存在显著差异。因此,如何应用常规的气象资料对雨雪天气进行划分是研究暴雪时空特征的关键。Heppner(1992)认为850~700 hPa高度场厚度比传统的1000~500 hPa高度场厚度划分雨雪天气更具有指示意义,并指出当850~700 hPa高度场厚度大于1550 m时,降雪很少发生。图1分别是采用温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 和850~700 hPa高度场厚度小于1550 m得出的降雪、暴雪时间序列。从图1可以看出,分别用温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 和850~700 hPa高度场厚度小于1550 m得出的北方降雪日数、暴雪日数时间序列具有很好的对应关系,且二者相关系数分别为0.71、0.82,通过了0.01信度的显著性水平检验,说明地面温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 和850~700 hPa高度场厚度小于1550 m定义的降雪、暴雪存在很好的一致性。为满足暴雪发生时的地面与高空条件,选取3个指标定义暴雪:1)气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ;2)降水量(20时—次日20时) $\geq 10\text{ mm}$ ;3) $H_{850-700} < 1550\text{ m}$ 。达到暴雪定义指标的降雪日记为一个暴雪日。

主要方法有相关分析、合成分析、回归分析、谐波分析等统计分析方法,统一选取1971—2000年平均值作为气候平均态。

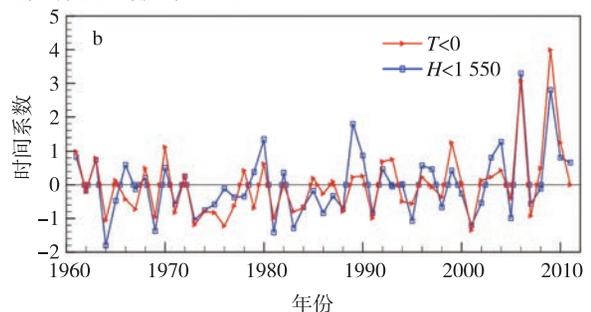
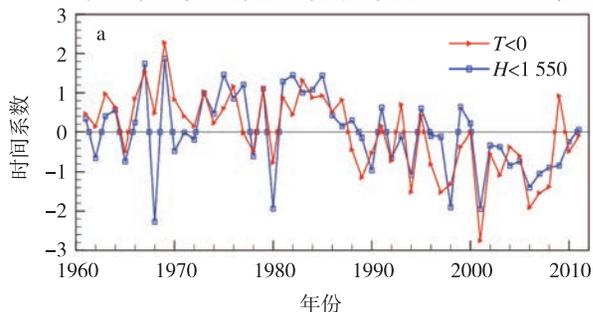


图1 中国北方冬半年(11月—次年3月)降雪日数(a)和暴雪日数(b)的标准化时间序列

Fig.1 Normalized time series of wintertime (November–next March) (a) snow days and (b) heavy snow days averaged in northern China

## 2 中国北方暴雪的变化特征

### 2.1 暴雪的空间变化特征

图2给出了中国北方冬半年降雪日数、暴雪日数、暴雪频率气候态与年际变率的空间分布。中国北方暴雪的分布具有很强的区域性,大范围暴雪天气出现次数较少,降雪日数(图2a)、暴雪日数(图2c)大值区主要位于东北和新疆北部。其中,东北地区暴雪空间分布与地形密切相关,表现为从西北向东南增加的态势,特别是在大小兴安岭、长白山地区暴雪天气出现最多。新疆地区暴雪分布表现为从南到北增加的态势。同时,东部沿海地区暴雪天气相对于新疆、东北等地出现频次较少。此外,暴雪频率(图2e)的大值区主要位于东部沿海,降雪中以暴雪居多。不同降雪指标在年际变率上也具有大致相似的空间分布特征(图2b、2d、2f),可见,中国北方暴雪频发区总体对应暴雪年际变率较大的区域。

### 2.2 区域暴雪的年代际变化

上述分析表明,中国北方暴雪空间分布具有很强的空间变化。针对东北(113.5°~135.5°E,38°~53.5°N)、新疆北部(80°~95°E,42°~53.5°N)暴雪频发区及东部沿海(110°~122.5°E,35°~38°N)暴雪频率大值区,开展了进一步的分析。如图3所示,

近50a来东北(图3a)和新疆北部(图3b)暴雪天气总体呈增加趋势,并表现出较为明显的年代际变化:20世纪80年代中期前,东北和新疆北部暴雪少发,80年代中期后暴雪天气有所增加,2002年以来暴雪天气呈现更为频发的态势。而东部沿海暴雪天气却呈现出微弱的减少趋势(图3c)。研究发现,冬季中、高纬环流场在1988/1989年前后出现转折(Walsh et al.,1996;Watanabe and Nitta,1999;Wu et al.,2013)。因此,对比分析不同年代际背景下暴雪的变化特征尤为重要。从图3可以看出,东北和新疆北部在1965—1980年暴雪偏少,2002—2011年暴雪偏多,后文主要针对这两个时阶暴雪在年代际尺度上的变化特征进行分析。

图4为1965—1980年和2002—2011年两个阶段中国北方冬半年暴雪日数距平的空间分布。可以发现,1965—1980年间,东北及新疆北部暴雪天气总体较少,暴雪天气主要发生在内蒙古与黑龙江交界处;东部沿海地区的暴雪天气主要出现在河北及山东等地区(图4a)。而2002—2011年间,东北和新疆暴雪天气明显增多,尤其是新疆北部、长白山附近地区增多最为明显(图4b)。

综上,近50a来中国北方暴雪天气总体呈现增

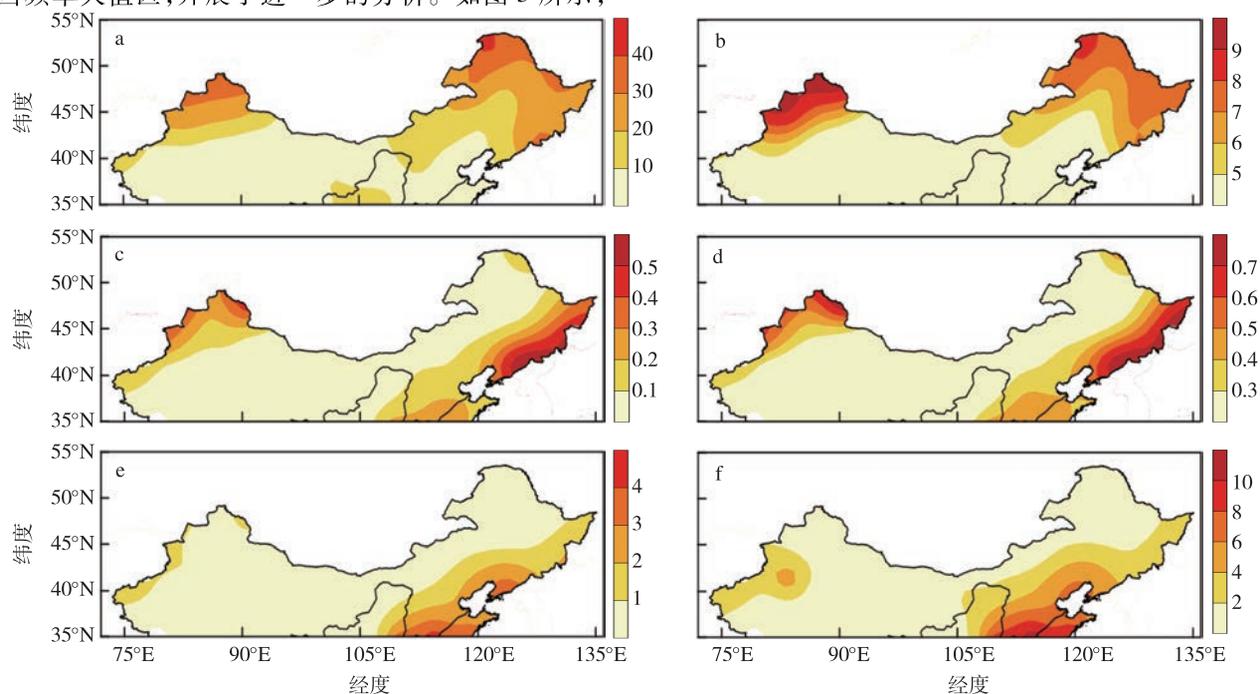


图2 中国北方冬半年降雪日数(a,b;单位:d)、暴雪日数(c,d;单位:d)和暴雪频率(e,f;单位:%)的气候态(a,c,e)和年际变率(b,d,f)的空间分布

Fig.2 Spatial patterns of (a,c,e) climatology and (b,d,f) interannual variability of wintertime (a,b) snow days(units:d), (c,d) heavy snow days(units:d), and (e,f) heavy snow frequency(units:%) in northern China

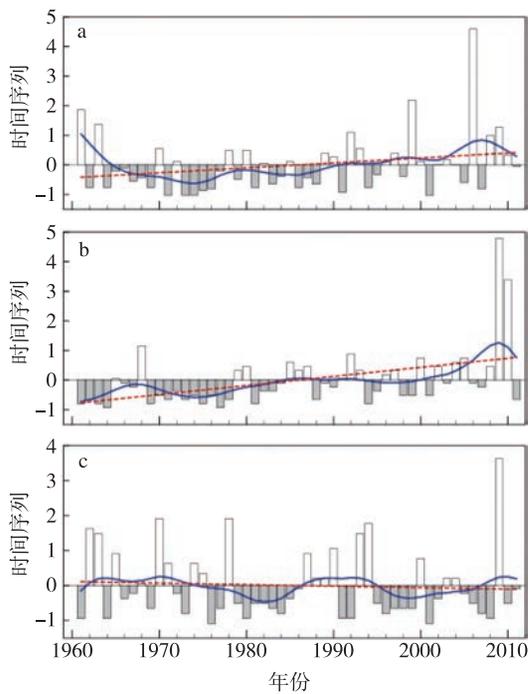


图3 区域平均暴雪日数的标准化时间序列(直方图;红色虚线为线性趋势,蓝色实线为多项式拟合结果):(a)东北;(b)新疆北部;(c)东部沿海

Fig.3 Normalized time series of regional averaged heavy snow days (bars) together with their linear trends (red dashed line) and polynomial fitting results (blue solid line): (a) Northeast China; (b) northern Xinjiang; (c) coastal region of eastern China

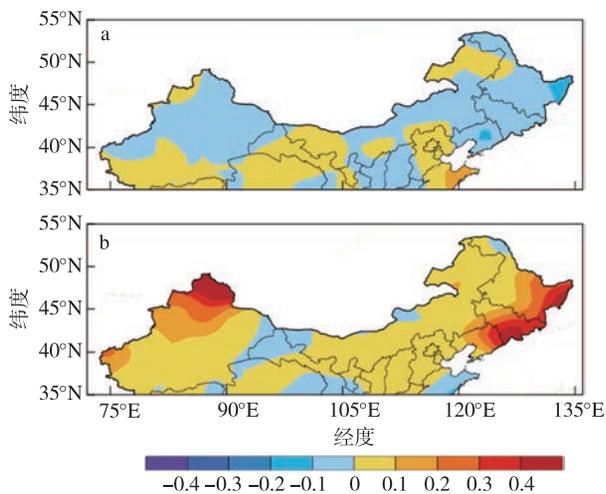


图4 暴雪日数距平的空间分布(单位:d):(a)1965—1980年;(b)2002—2011年

Fig.4 Spatial distributions of heavy snow days anomalies (units;d): (a)1965—1980;(b)2002—2011

加趋势且表现出明显的年代际变化特征。20世纪80年代中期前暴雪少发,80年代中期后暴雪开始增

多,2002—2011年期间暴雪频发。其中,东北地区年代际变化尤为明显,1965—1980年为暴雪少发期,2002—2011年为暴雪多发期。

### 3 与东北暴雪年代际变化相关的异常环流特征

图5给出了东北暴雪少发期(1965—1980年)与多发期(2002—2011年)海平面气压距平合成场。不难发现,暴雪少发期和多发期海平面气压场分布特征相似但存在明显不同,两阶段在北大西洋地区表现出类似于NAO(North Atlantic Oscillation,北大西洋涛动)遥相关负位相模态,但暴雪多发期活动中心明显东移,这也表明NAO遥相关的活动可能与东北暴雪的年代际变化存在一定联系。已有研究指出,NAO异常对极端天气气候变化的影响与北极海冰及热带海温异常等外强迫有关。例如,Liu et al.(2012)指出秋季北极海冰异常偏少,导致冬季北半球海平面气压场表现出类似但又区别于AO模态的负相位,在该环流型及海冰减少提供更多水汽的共同作用下,北美、欧洲及东亚大部分地区出现异常降雪。秋季海冰异常偏少对类似2007/2008年冬季中国南方雨雪冰冻天气有重要触发作用(Wu et al., 2011)。北极海冰异常偏少通过局地非绝热加热激发罗斯贝波,而罗斯贝波的传播进一步调制欧亚大陆气候(Honda et al., 2009; Francis and Vavrus, 2012; Peings and Magnusdottir, 2014)。

从对流层低层850 hPa风场距平合成结果可以看出,东北暴雪少发期,中国北方至日本岛一带850 hPa西风分量明显增强(图6a);而东北暴雪多发期,中国北方至日本岛一带850 hPa西风分量减弱,且存在异常偏东气流(图6b)。东北暴雪少发期、多发期在贝加尔湖附近均存在偏北气流,引导极地冷空气向南入侵进入中国北方,造成北方地区冷空气活动较强,但此冷空气偏干冷,暴雪的发生还需要充沛的暖湿水汽。由图6b可知,东北暴雪多发期,中国东北部存在异常偏南风,有利于太平洋暖湿水汽输送到中国北方地区,从而为东北暴雪天气提供了充沛的水汽条件。

水汽是产生降雪的重要因素之一,1965—1980年间,向东北输送的水汽较少(图7a);而在2002—2011年间,西北太平洋向东北输送的水汽则明显增多,水汽在东北地区辐合明显(图7b)。同时,850

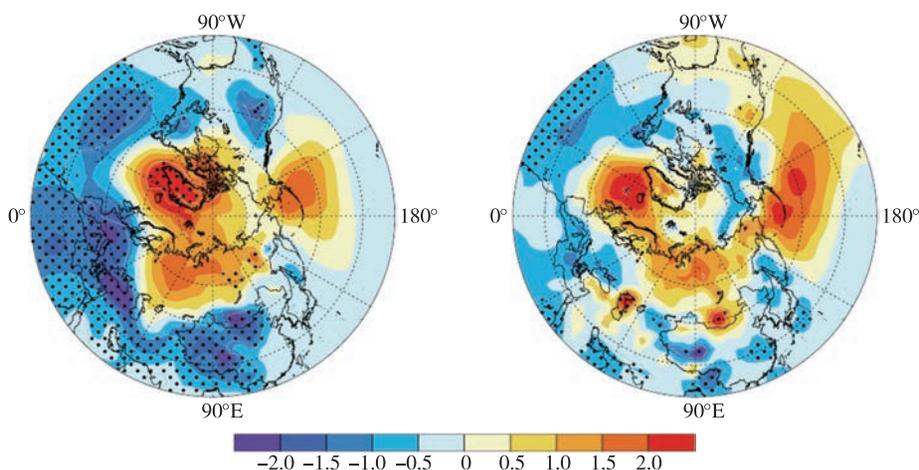


图5 海平面气压距平的空间分布(单位:hPa;打点区域表示通过0.05信度的显著性水平检验): (a)1965—1980年;(b)2002—2011年

Fig.5 Spatial distributions of sea level pressure anomalies(units:hPa.Dotted areas show that the anomalies are significant at 95% confidence level): (a)1965—1980;(b)2002—2011

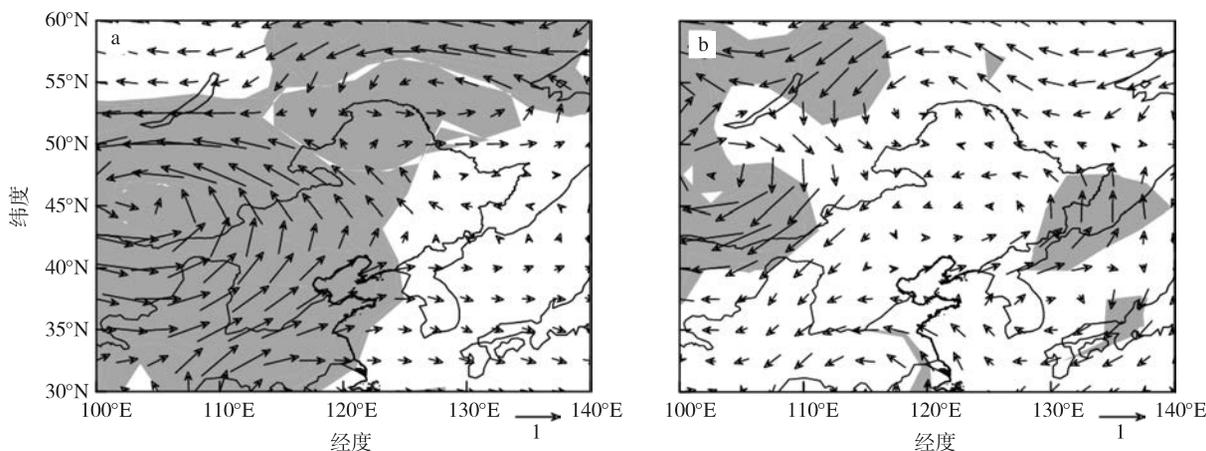


图6 850 hPa风场距平的空间分布(单位: $m \cdot s^{-1}$ ;阴影区表示通过0.05信度的显著性水平检验):(a)1965—1980年;(b)2002—2011年

Fig.6 Spatial distributions of 850 hPa wind anomalies(units: $m \cdot s^{-1}$ .Shaded areas show that the anomalies are significant at 95% confidence level): (a)1965—1980;(b)2002—2011

hPa干冷空气起到冷垫的作用,暖湿空气沿着冷垫爬升,容易激发出中尺度低压,冷空气与暖湿气流在东北地区汇合,提供东北暴雪日数增多的动力条件,造成2002—2011年阶段东北暴雪频发。这也说明偏南风异常导致的水汽通量输送的变化是导致中国北方暴雪频发区位于东北及2002—2011年间东北暴雪频发的重要原因。

#### 4 东北暴雪年代际变化与北极海冰在年代际尺度上的联系

由于秋季北极海冰在空间上表现出较为一致的变化,因此,我们选取整个北极地区( $0^\circ \sim 360^\circ E$ ,  $66.5^\circ \sim 90^\circ N$ )的海冰作为研究对象,重点探讨前期

秋季(9—10月)北极海冰与冬半年(11月—次年3月)东北暴雪在年代际尺度上的联系。计算区域平均海冰时间序列时,对每个格点的海冰资料乘以权重因子 $\cos\theta$ ( $\theta$ 为纬度),以消除纬度对面积的影响。将北极全区海冰标准化距平序列作为秋季北极海冰指数(SICI)。这里采用谐波分析方法提取北极海冰变化的年代际分量,定义大于等于10a的部分为年代际信号。由于谐波分析所得到的年代际分量降低了时间序列的自由度,因此这里采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法对年代际尺度上的相关分析进行显著性检验。

如图8所示,秋季北极海冰指数总体呈减少趋势,且其时间序列存在显著的年代际变化特征:在

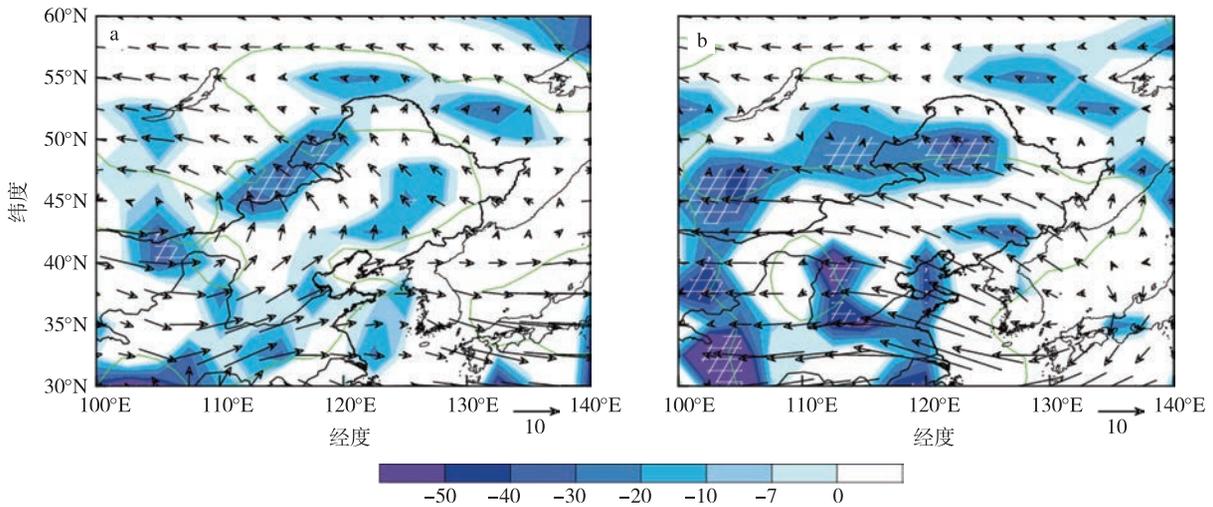


图7 合成的1 000~300 hPa水汽通量距平(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;绿线区域表示通过0.05信度的显著性水平检验)和水汽通量散度距平(单位: $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;阴影区表示水汽通量散度 $\leq 0$ ;网格标记区域表示通过0.05信度的显著性水平检验):(a)1965—1986年;(b)2002—2011年

Fig.7 Composite 1 000—300 hPa water vapor flux anomalies (units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .Regions marked by green contours indicate the anomalies are significant at 95% confidence level) and their divergences (units: $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .Shaded areas show the divergences less than or equal to 0.Cross-hatched regions indicate that the anomalies are significant at 95% confidence level):(a)1965—1986;(b)2002—2011

1991年前以正指数为主,1991后基本为负指数。秋季海冰在2002年左右发生了明显的年代际转变,近十年来呈现出急剧减少的态势。此外,海冰在年代际尺度减少的转变点与东北暴雪在年代际尺度增加的转变点较一致,均发生在2002年前后。其中,1965—1980年为海冰偏多期;2002—2011年则为海冰偏少期。我们还注意到,东北暴雪少发期与北极多冰期(1965—1980年)具有很好的对应关系,而东北暴雪多发期则对应北极少冰期(2002—2011年)。进一步分析表明,海冰与东北暴雪日数的年代际分量的相关系数高达-0.86,通过了0.05信度显著性水平的蒙特卡洛(Monte Carlo)随机检验,表明北极海冰的年代际减少与东北暴雪的年代际增加具有十分密切的联系。

图9是秋季北极海冰年代际指数与中国北方暴雪日数年代际分量相关的空间分布。可以发现,在年代际尺度上,二者相关系数在东北、内蒙古西部、及新疆北部和中部等大部分地区表现为显著负相关,而在新疆南部与西藏交界处及山东沿海等部分地区表现为较小范围的显著正相关。其中,海冰与东北暴雪的显著相关区域与东北暴雪频发(图2)及年代际增加显著的总体一致(图4),这进一步说前期秋季北极海冰的减少是造成北方暴雪尤其是东北暴雪年代际增加的可能原因。

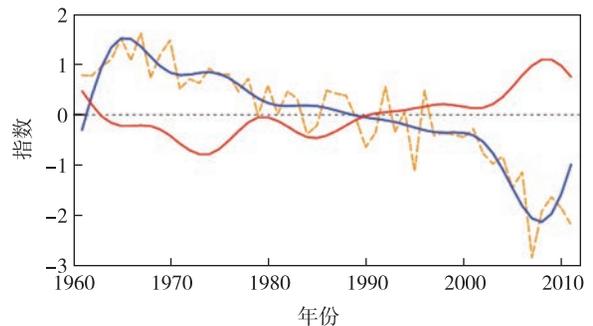


图8 秋季北极海冰指数(黄虚线)、秋季北极海冰年代际指数(蓝实线)、东北暴雪日数年代际指数(红实线)的时间序列

Fig.8 Time series of (a) autumn Arctic sea ice index (yellow dashed line), (b) interdecadal components of autumn Arctic sea ice (blue solid line), and (c) interdecadal components of heavy snow days in Northeast China (red solid line)

图10是秋季北极海冰指数(乘以-1.0)回归得到的冬半年500 hPa位势高度异常、850 hPa异常风场和1 000~300 hPa异常水汽通量场、水汽通量散度的空间分布。如图10a所示,500 hPa位势高度异常在北大西洋表现出NAO负位相模态:欧亚大陆上空存在显著的异常低压,而极地则为显著的异常高压。上述异常环流分布形势表明,极地位势高度偏高,欧亚大陆上空位势高度偏低,中高层极地和

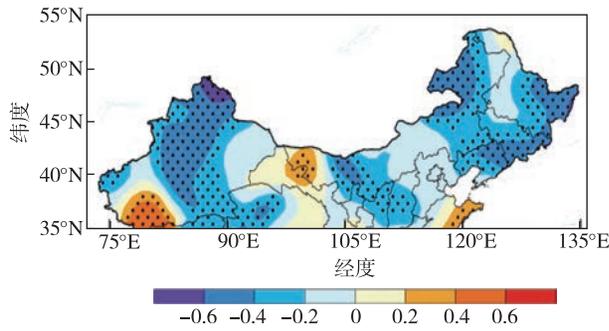


图9 秋季北极海冰年代际指数与暴雪日数年代际分量的相关系数分布(打点区域表示通过0.05显著性水平的蒙特卡洛随机检验)

Fig.9 Spatial distribution of correlation coefficients between interdecadal components of autumn Arctic sea ice index and interdecadal components of wintertime heavy snow days (Dotted areas show that the coefficients are significant at 95% confidence level based on Monte Carlo random test)

陆的气压梯度减小,纬向西风气流减弱,大气环流的经向活动增强,有利于极地冷空气向南入侵,造成欧亚大陆气温偏低(图10b)。同时,秋季海冰消融使得大气中水汽含量增加,使得更多的暖湿气流在东北地区汇合(图10c)。秋季北极海冰减少同时会引起NAO/AO位相的变化,NAO/AO位相的变化可以调控局地环流,从而对我国北方暴雪尤其是东北暴雪的年代际增加产生影响(Honda et al., 2009; Peings and Magnusdottir, 2014)。通过计算秋季北极海冰指数、秋季北极海冰年代际指数与11月一次年3月NAOI的相关系数发现,二者相关系数分别为0.29、0.33,通过了0.05信度的显著性水平检验。

综上所述,秋季北极海冰异常偏少导致的大气环流异常主要表现为纬向西风的减弱和北大西洋涛动负位相,导致大气环流的经向度增强,有利于极地冷空气向南入侵,冷空气与偏南风引导的太平洋暖湿水汽在东北地区汇合。同时,北极海冰的减少可在北半球激发出与NAO/AO负位相模态相似的响应,使得从北大西洋吹向欧亚大陆的西风减弱,北风加强;秋季北极海冰消融使得大气中水汽含量增加,在这种环流型及海冰减少提供更多水汽的共同作用下,更多暖湿水汽在东北地区汇合。冷暖空气的交汇,使得2002年以后东北暴雪呈现出年代际增多,即前期秋季北极海冰的减少是造成中国北方冬半年暴雪尤其是东北暴雪年代际增加的重要原因。

## 5 结论和讨论

利用中国地面气候资料日值数据集降水、气温

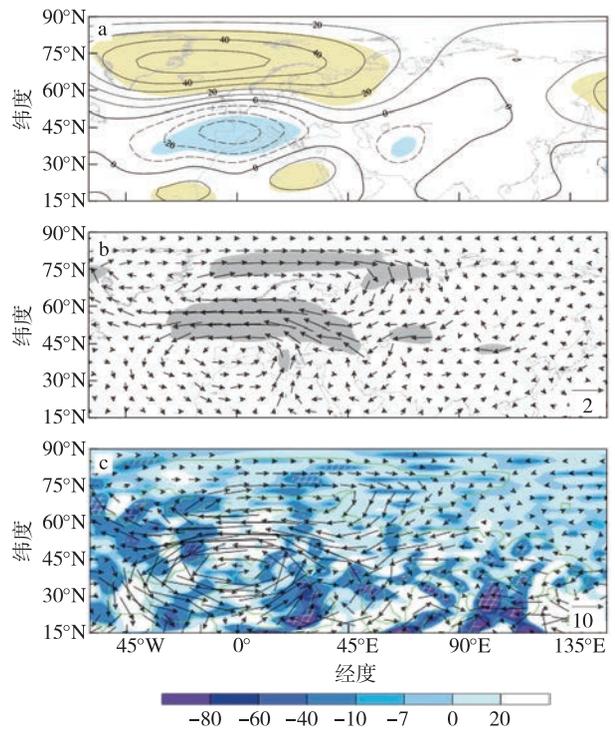


图10 秋季北极海冰指数(乘以-1.0)回归得到的冬半年500 hPa位势高度异常场(a;单位:gpm)、850 hPa异常风场(b;单位: $m \cdot s^{-1}$ ;阴影区表示通过0.05信度的显著性检验),以及1000~300 hPa水汽通量异常场(单位: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ;绿线区域表示通过0.05信度的显著性水平检验)和水汽通量散度异常场(单位: $10^{-7} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;阴影区表示水汽通量散度 $\leq 0$ ;网格标记区域表示通过0.05信度的显著性水平检验)(c)

Fig.10 Regressed wintertime (a) 500 hPa geopotential height anomalies (units: gpm), (b) 850 hPa wind anomalies (units:  $m \cdot s^{-1}$ . Shaded areas indicate that the anomalies are significant at 95% confidence level), and (c) 1000—300 hPa water vapor flux anomalies (units:  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ . Regions marked by green contours indicate that the anomalies are significant at 95% confidence level) and their divergences (units:  $10^{-7} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ . Shaded areas show the divergences less than or equal to 0. Cross-hatched regions indicate that the anomalies are significant at 95% confidence level) onto Arctic sea ice index (multiplied by -1.0) in autumn

及再分析资料,分析和讨论了1961—2011年中国北方(35°N以北)暴雪在年代际尺度的变化特征及其环流场背景,并从前期秋季(9—10月)北极海冰的角度分析和讨论了其对冬半年(11月一次年3月)

东北暴雪年代际变化的影响及可能原因。主要结论如下:

20世纪90年代初期前北方暴雪少发,90年代初期后暴雪开始增多,2002—2011年期间暴雪频发。此外,北方暴雪的空间分布存在很强的局地性,大范围暴雪出现次数较少,东北暴雪发生频次较高,其空间分布表现为从西北到东南增加的态势,其时间序列存在明显的年代际变化,1965—1980年阶段东北暴雪处于少发期,2002—2011年阶段东北暴雪处于多发期。

通过环流场分析发现,在暴雪少发期,向东北输送的水汽较少;在暴雪多发期,更多的水汽输送来自于西北太平洋,同时偏北气流引导的极地冷空气与偏南风引导的太平洋暖湿水汽在东北地区汇合锋生,提供暴雪发生的动力条件,造成东北暴雪出现年代际增多。同时,东北暴雪的年代际变化与NAO存在紧密联系。研究发现,海冰减少的突变点与东北暴雪年代际增加的突变点较一致,均发生在2002年左右,且二者显著相关区域与东北暴雪频发及暴雪年代际增加较大区域较一致。秋季北极海冰异常偏少导致的大气环流异常主要表现为纬向西风的减

弱和NAO负位相,导致经向活动增强,有利于极地冷空气向南入侵,冷空气与暖湿水汽在东北地区汇合,造成东北暴雪的年代际变化。即前期秋季北极海冰的减少是造成北方暴雪尤其是东北暴雪年代际增加的重要原因。

目前,围绕北极海冰变化及其气候效应开展了大量的研究工作,包括观测事实的分析与解释、诊断分析及数值模拟等等。本文围绕前期秋季北极海冰的变化特征及其与中国北方暴雪的年代际变化进行了初步分析,所得结果仅限于统计分析。前期秋季北极海冰与北方暴雪年代际变化的过程、物理机制还需更多的定量诊断和数值模拟方法深入研究。但秋季北极海冰对冬季极端气候的影响尚存在很大的不确定性,前期秋季海冰与同期冬季海冰对欧亚冬季温度、降水的影响尚存在争议(Honda et al., 2009; Wu et al., 2011),海冰跨季节预测仍然充满挑战。此外,有研究指出太平洋、印度洋和大西洋的海温异常对东亚冬季风和冬季气温、降雪异常也有着十分重要的影响(李多等, 2012; 陈凯奇等, 2016; Feng and Chen, 2016),探讨这些因素无疑是下一阶段重点关注的内容。

## 参考文献(References)

- 陈凯奇,房一禾,张蕊,等,2016.华北冬季大雪频次变化特征及对海温的响应[J].中国农学通报,32(2):149-154. Chen K Q, Fang Y H, Zhang R, et al., 2016. Variation characteristics of heavy snow frequency in North China and its response to sea surface temperature[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 32(2): 149-154. (in Chinese).
- 陈潇潇,钱昊钟,周彬,等,2015.沿江苏南一次伴随“高架雷暴”的暴雪天气成因分析[J].大气科学学报,38(6):836-844. Chen X X, Qian H Z, Zhou B, et al., 2015. Cause analysis of a snowstorm case with elevated thunderstorm in southern Jiangsu Province[J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 836-844. (in Chinese).
- 董啸,周顺武,胡中明,等,2010.近50年来东北地区暴雪时空分布特征[J].气象,36(12):74-79. Dong X, Zhou S W, Hu Z M, et al., 2010. Characteristics of spatial and temporal variation of heavy snowfall in Northeast China in recent 50 years[J]. Meteor Mon, 36(12): 74-79. (in Chinese).
- Feng Y, Chen H P, 2016. Warming over the North Pacific can intensify snow events in Northeast China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9(2): 122-128.
- Francis J A, Vavrus S J, 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. Geophys Res Lett, 39(6): L06801.
- 官德吉,李影俊,2001.内蒙古暴雪灾害的成因与减灾对策[J].气候与环境研究,6(1):132-138. Gong D J, Li Z J, 2001. The cause of heavy snow disaster formation and countermeasure of decreasing disaster in the Inner Mongolia[J]. Clim Environ Res, 6(1): 132-138. (in Chinese).
- Heppner P O G, 1992. Snow versus rain: looking beyond the “magic” numbers[J]. Wea Forecasting, 7(4): 683-691.
- Honda M, Inoue J, Yamane S, 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. Geophys Res Lett, 36(8): L08707.
- 蒋大凯,闵锦忠,乔小湜,2014.一次东北南部特大暴雪的动力机制分析[J].大气科学学报,37(5):605-612. Jiang D K, Min J Z, Qiao X S, 2014. The dynamical mechanism analysis of an extraordinary snowstorm over the south of Northeast[J]. Trans Atmos Sci, 37(5): 605-612. (in Chinese).
- 李多,肖子牛,李泽椿,2012.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,38(4):411-418. Li D, Xiao Z N, Li Z C, 2012. The spatial and temporal characteristics of winter snowfall in Northeast China and its relation with global sea surface temperature anomaly[J]. Meteor Mon, 38(4): 411-418. (in Chinese).
- Liu J, Curry J A, Wang H, et al., 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(11): 4074-4079.

- Liu J P, Curry J A, Hu Y Y, 2004. Recent Arctic sea ice variability: connections to the Arctic Oscillation and the ENSO [J]. *Geophys Res Lett*, 31(9). doi:10.1029/2004gl019858.
- 刘宁微, 齐琳琳, 韩江文, 2009. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析 [J]. *大气科学*, 33(2): 275-284. Liu N W, Qi L L, Han J W, 2009. The analyses of an unusual snowstorm caused by the northbound vortex over Liaoning Province in China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(2): 275-284. (in Chinese).
- 刘玉莲, 于宏敏, 任国玉, 等, 2010. 1961—2006年黑龙江省暴雪气候时空变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 15(4): 470-478. Liu Y L, Yu H M, Ren G Y, et al., 2010. Temporal and spatial variation characteristics of the snow storms in Heilongjiang province during 1961—2016 [J]. *Clim Environ Res*, 15(4): 470-478. (in Chinese).
- Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al., 2016a. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: blocking-induced amplification [J]. *J Climate*, 29(11): 3925-3947.
- Luo D H, Xiao Y Q, Diao Y N, et al., 2016b. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part II: the link to the North Atlantic Oscillation [J]. *J Climate*, 29(11): 3949-3971.
- Marwitz J D, Toth J, 1993. A case study of heavy snowfall in Oklahoma [J]. *Mon Wea Rev*, 121(3): 648-660.
- Meier W N, Stroeve J, Fetterer F, 2007. Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record [J]. *Ann Glaciol*, 46: 428-434.
- Nakamura T, Yamazaki K, Iwamoto K, et al., 2015. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn [J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(8): 3209-3227.
- Peings Y, Magnusdottir G, 2014. Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected arctic sea ice decline: a numerical study with CAM5 [J]. *J Climate*, 27(1): 244-264.
- Petoukhov V, Semenov V A, 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J Geophys Res*, 115(D21): D21111.
- Sanders F, Bosart L F, 1985. Mesoscale structure in the megalopolitan snowstorm of 11—12 february 1983. part I: frontogenetical forcing and symmetric instability [J]. *J Atmos Sci*, 42(10): 1050-1061.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al., 2010. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change [J]. *J Geophys Res*, 115(D16): D16110.
- 孙欣, 蔡芎宁, 陈传雷, 等, 2011. “070304”东北特大暴雪的分析 [J]. *气象*, 37(7): 863-870. Sun X, Cai X N, Chen C L, et al., 2011. Analysis of the 4 March 2007 heavy snowstorm in Northeast China [J]. *Meteor Mon*, 37(7): 863-870. (in Chinese).
- 孙秀忠, 罗勇, 张霞, 等, 2010. 近46年来我国降雪变化特征分析 [J]. *高原气象*, 29(6): 1594-1601. Sun X Z, Luo Y, Zhang X, et al., 2010. Analysis on snowfall change characteristic of China in recent 46 years [J]. *Plateau Meteor*, 29(6): 1594-1601. (in Chinese).
- Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al., 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. *Environ Res Lett*, 8(1): 014036.
- Walsh J E, Chapman W L, Shy T L, 1996. Recent decrease of sea level pressure in the central arctic [J]. *J Climate*, 9(2): 480-486.
- 王会军, 贺圣平, 2013. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系 [J]. *科学通报*, 58(8): 629-633. Wang H J, He S P, 2013. The increase of snowfall in Northeast China after mid-1980s [J]. *Chin Sci Bull*, 58(8): 629-633. (in Chinese).
- Wang H J, Yu E T, Yang S, 2011. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model [J]. *Meteor Atmos Phys*, 113(1/2): 11-25.
- 王文, 程麟生, 2000. “95.1”大雪的对称不稳定数值诊断分析 [J]. *气象*, 26(7): 9-11. Wang W, Cheng L S, 2000. The diagnosis of conditional symmetric instability of the “95.1” snowstorm process [J]. *Meteor Mon*, 26(7): 9-11. (in Chinese).
- 王文, 程麟生, 2002. “96.1”高原暴雪过程三维条件性对称不稳定的数值研究 [J]. *高原气象*, 21(3): 225-232. Wang W, Cheng L S, 2002. Numerical study on three-dimensional conditionally symmetric instability of “96.1” snowstorm event [J]. *Plateau Meteor*, 21(3): 225-232. (in Chinese).
- 王文辉, 徐祥德, 1979. 锡盟大雪过程和“77.10”暴雪分析 [J]. *气象学报*, 37(3): 80-86. Wang W H, Xu X D, 1979. The heavy snow process in disaster Xilingele and the analysis of “77.10” snowstorm [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 37(3): 80-86. (in Chinese).
- Watanabe M, Nitta T, 1999. Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter [J]. *J Climate*, 12(2): 494-510.
- Wu B Y, 2017. Winter atmospheric circulation anomaly associated with recent arctic winter warm anomalies [J]. *J Climate*, 30(21): 8469-8479.
- 武炳义, 2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题 [J]. *大气科学*, 42(4): 786-805. Wu B Y, 2018. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes [J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 786-805. (in Chinese).
- Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, et al., 2013. Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss [J]. *Mon Wea Rev*, 141(11): 3786-3800.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al., 2011. Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: once-in-a-century snowstorms in

- 2007/2008 winter[J]. *Clim Dyn*, 37(7/8):1661-1669.
- 章诞武,丛振涛,倪广恒,2016. 1956—2010年中国降雪特征变化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 56(4):381-386,393. Zhang D W, Cong Z T, Ni G H, 2016. Snowfall changes in China during 1956—2010[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 56(4):381-386, 393. (in Chinese).
- 赵琳娜,马清云,杨贵名,等,2008. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J]. *气候与环境研究*, 13(4):556-566. Zhao L N, Ma Q Y, Yang G M, et al., 2008. Disaster and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Climatic Environ Res*, 13(4):556-566. (in Chinese).
- Zhou B T, Wang Z Y, Shi Y, 2017. Possible role of hadley circulation strengthening in interdecadal intensification of snowfalls over northeastern China under climate change[J]. *J Geophys Res Atmos*, 122(21):11638-11650.
- Zhou B T, Wang Z Y, Shi Y, et al., 2018. Historical and future changes of snowfall events in China under a warming background[J]. *J Climate*, 31(15):5873-5889.

## Interdecadal variation of heavy snowfall in northern China and its linkages with atmospheric circulation and Arctic sea ice

CHEN Haishan<sup>1,2</sup>, LUO Jiangshan<sup>1,2</sup>, HAN Fanghong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup> School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>3</sup> Airlines Operation Control, China Eastern Airlines Corporation Limited, Shanghai 201100, China

This study explored interdecadal variation of heavy snow in northern China and its relationship with atmospheric circulation and Arctic sea ice by using statistical methods such as correlation and regression. Results show that the high frequencies of heavy snow in northern China in winter are mainly located in Northeast China (NEC), and its spatial distribution shows an increasing trend from northwest to southeast, together with obvious interdecadal variations. Heavy snowfall in NEC is less during 1965—1980, but more during 2002—2011. Analysis shows that there is less water vapor transported to NEC during 1965—1980, but more water vapor transported from Northwest Pacific to NEC during 2002—2011. Meanwhile, the cold polar air guided by northerly airflow and Pacific warm moisture transport guided by southerly airflow benefit a convergence frontogenesis in NEC, providing favorable dynamic conditions for the frequent occurrence of heavy snow, and leading to the interdecadal increase of heavy snow in NEC. Furthermore, it is found that there is a close linkage between the interdecadal decrease of Arctic sea ice in early autumn and the interdecadal increase of snowstorm in NEC. Anomalous circulation pattern caused by the decreased Arctic sea ice in autumn shows that the zonal westerly decreases and NAO is in the negative phase, which can intensify atmospheric meridional activity and be conducive to the southward invasion of polar cold air, leading to the convergences of cold air and warm moist air in NEC. This is a possible important reason for the interdecadal increase of heavy snow in NEC.

**heavy snow in northern China; interdecadal variation; atmospheric circulation; Arctic sea ice**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181212001

(责任编辑:张福颖)