

中国冬季极端低温事件的多尺度特征*

黄菲¹, 胡蓓蓓^{1,2}, 周晓¹, 房永生¹

(1. 中国海洋大学物理海洋实验室、山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 南海舰队海洋水文气象中心, 广东 湛江 524001)

摘要: 利用 1961—2010 年中国 487 站逐日气温资料, 以 35°N 为界分北方区域和南方区域研究中国冬季极端低温事件的多尺度变化特征。研究表明: 南、北方区域极端低温站点发生率呈现出准双周的气候季节内振荡, 南、北方区域冬季极端低温频数和强度的长期变化一致, 均呈减小趋势, 频数和强度的趋势变化分别为 $-0.247 \text{ d}/10 \text{ a}$ (北方)、 $-0.352 \text{ d}/10 \text{ a}$ (南方) 和 $-0.332 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (北方)、 $-0.467 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (南方), 南方区域减小更迅速。北方区域极端低温频数和强度的年际和年代际变化信号强度相当, 南方区域则以年际变化为主。进一步研究表明, 当极端低温频数的线性趋势由正值变为负值, 相应的大气环流由北极涛动负位相变为正位相。对年际变化分量 ($< 8 \text{ a}$), 北方区域极端低温事件偏多时, 海平面气压场表现为 2 波的定常波结构, 西伯利亚高压和阿留申低压增强, 对流层中层贝加尔湖槽加强; 南方区域极端低温事件偏多时, 海平面气压表现为偶极子型的 1 波结构, 欧亚大陆和大西洋为正距平, 北美大陆和太平洋为负距平, 对流层中层东亚大槽加强南伸。对年代际变化分量 ($\geq 8 \text{ a}$), 大气环流形势都表现为北极涛动负位相, 南方区域不显著。

关键词: 极端低温频数; 多尺度变化特征; 线性趋势; 西伯利亚高压; 东亚大槽

中图分类号: P466

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2014)10-042-09

进入 21 世纪以来, 气候变化已经成为人们最关注的话题之一。IPCC 报告^[1-3]持续指出, 全球平均地表温度在不断升高, 且温度升高趋势在增加。丁一汇等^[4]也指出, 近百年来中国年平均地表气温明显增加, 且比同期全球升温幅度平均值略高。秦大河^[5]则指出, 未来 100 年全球和我国气候将继续变暖。极端温度事件作为极端天气气候事件的组成部分, 与全球变暖有着非常密切的关系。受全球变暖这种气候变化最直接的影响, 极端温度事件的频率和强度出现了明显的变化。大量研究一致表明^[6-12], 相对于极端高温事件的加剧发生, 极端低温事件在逐渐减少, 这种变化要比极端高温的变化更剧烈, 对全球平均温度变化的敏感性要高于极端高温。中国极端最低温度的变率以春、秋 2 季为最大, 且在北方变化比较明显^[13]。1990 年代后期以来冬季极端低温频数变化逐渐趋于平缓^[14], 冬季极端最低气温距平近年略有回落^[15]。但在全球回暖的大背景下, 不能忽略仍会出现长时间的持续极端低温事件^[16]。

Wang 等^[17]对东亚冬季气温主要变化模态的分析表明, 东亚冬季气温主要表现为偏北变化型和偏南变化型 2 种模态; 我国极端低温也有明显的区域性特征^[13], 中国区域性极端低温事件最低温度和几何中心纬度的频次分布均为双峰特征, 30°N 和 42°N 发生频次较高^[14]。基于此, 本文将分北方区域和南方区域来研

究中国冬季极端低温事件在不同时间尺度上的变化特征, 并进一步分析与之相联系的大气环流形势。

1 资料和方法

1.1 资料选取

本文所用的逐日气温资料取自国家气象信息中心整编的中国大陆 730 站的逐日资料数据集。这套资料经过了严格的质量控制, 剔除了原始数据中有较大的非气象误差(如站点迁徙、资料缺测大于 10 次等)的站点, 剩余台站中的缺测值, 由该台站缺测日前后两日温度的平均值代替, 对极个别的台站的明显错误数据进行修正, 筛选出 487 个的台站(见图 1(a))。大气资料主要来自于美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的月平均全球再分析资料, 包括分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的海平面气压场和 500 hPa 位势高度场; 高斯网格的地面 2 m 处的气温场, 其纬向分辨率为 1.875° , 经向为不均匀分布。本文资料时间时段取在 1961 年 1 月~2010 年 12 月, 文中冬季指前一年 12 月~当年 2 月, 得到 1962—2010 共 49 个冬季。

1.2 各指数的定义

参考有关极端低温阈值的定义^[18], 将 1962—2010 年冬季中国 487 站逐日最低气温资料按照升序排列, 取第 1 个百分点的值定义为该测站冬季的极端低温阈值。如果该测站某日最低气温低于该阈值, 则认为该

* 基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951403; 2012CB955604)资助

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2013-12-01

作者简介: 黄菲(1971-), 女, 教授, 博导。E-mail: huangf@ouc.edu.cn

测站该日发生了极端低温事件。

把每站每年冬季发生极端低温事件的日数称为该站该年冬季极端低温频数,把某日发生极端低温事件的站点数占总站点数的百分比定义为该日极端低温站点发生率,把某站某日发生极端低温事件时站点上最低温度与该站极端低温阈值之差的绝对值定义为该站该日极端低温温度差,把每站每年冬季极端低温温度差之和定义为极端低温的强度。为了得到长期时间序列,首先将单站资料距平化,然后再对距平资料做站点等权重平均生成。

北极涛动指数来自于美国海洋大气局气候预测中心(CPC);用 500 hPa 上(60°E~100°E,55°N~70°N)区域平均的位势高度距平来表示欧亚地区阻塞强度指数;把西伯利亚高压范围内 3 点(60°N, 100°E; 60°N, 90°E; 50°N, 100°E)的海平面气压距平和作为西伯利亚高压强度指数;用 500 hPa 上(110°E~130°E,20°N~40°N)区域平均的位势高度距平来表示东亚大槽指数。这些指数均做标准化处理。

1.3 分析方法

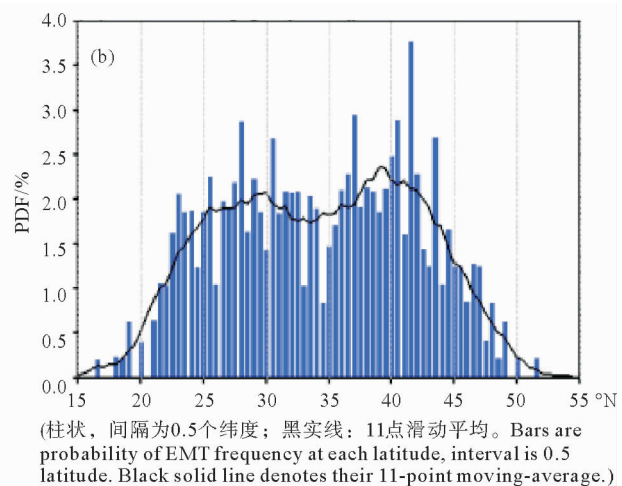
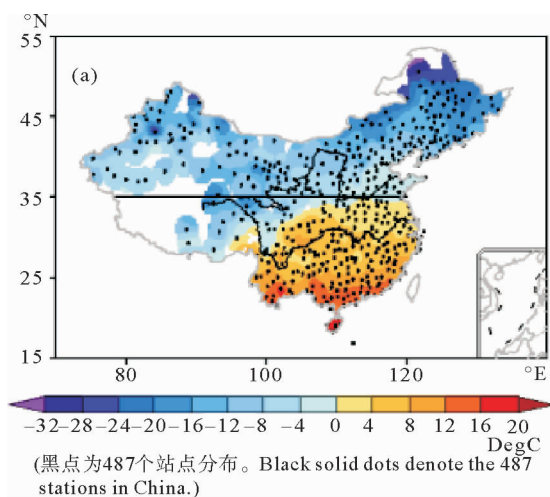


图 1 (a)1962—2010 年 1 月平均气温的分布(b)极端低温频数随纬度的概率密度分布

Fig. 1 (a) The averaged surface air temperature of January in China during 1962—2010

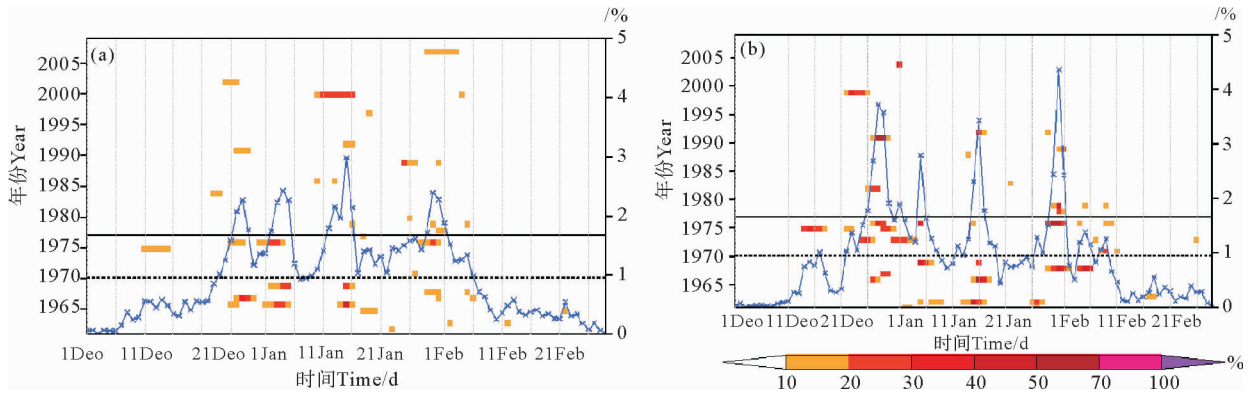
图 2 给出了冬季南、北方区域极端低温站点发生率随时间的变化。对于北方区域(见图 2(a)),冬季极端低温站点发生率有 4 个高峰时段(超过 1 个标准差的时段),主要为 12 月 27~29 日、1 月 2~5 日、1 月 12~16 日和 1 月 29 日~2 月 1 日;南方区域(见图 2(b))的高峰时段与北方区域类似,但南方区域滞后北方区域 1 天时二者相关最高($r=0.845$),南方区域较北方区域的特征为发生率高、持续时间短。北方区域极端低温站点发生率最高是 1 月 15 日,主要是因为发生率超过 10% 的年数多,1990 年代末发生率更是超过了 20%,而其他高峰时段超过 10% 的年份少,主要集中在 1980

年代之前。南方区域极端低温站点发生率最高是 1 月 31 日,虽然这一时段发生率超过 10% 主要集中在 1980 年代之前,但有多年的发生率高达 30% 以上;另外,12 月 28 日的发生率次之,这一时段发生率高的年份较多,且在 1990 年代初发生率在 30% 以上。不论是南方还是北方地区,极端低温站点发生率都呈现出气候平均,冬季的 4 次平均周期为准双周的气候季节内振荡过程,这可能与冬季中纬度阻塞活动的准双周振荡以及相应的寒潮冷空气南下过程有关^[21],只是北方强冷空气活动多发生在隆冬时节(1 月中旬),而南方则在 12 月底和 1 月底多发。

2 中国极端低温事件的多尺度特征

2.1 气候平均的经向分布及季节内变化

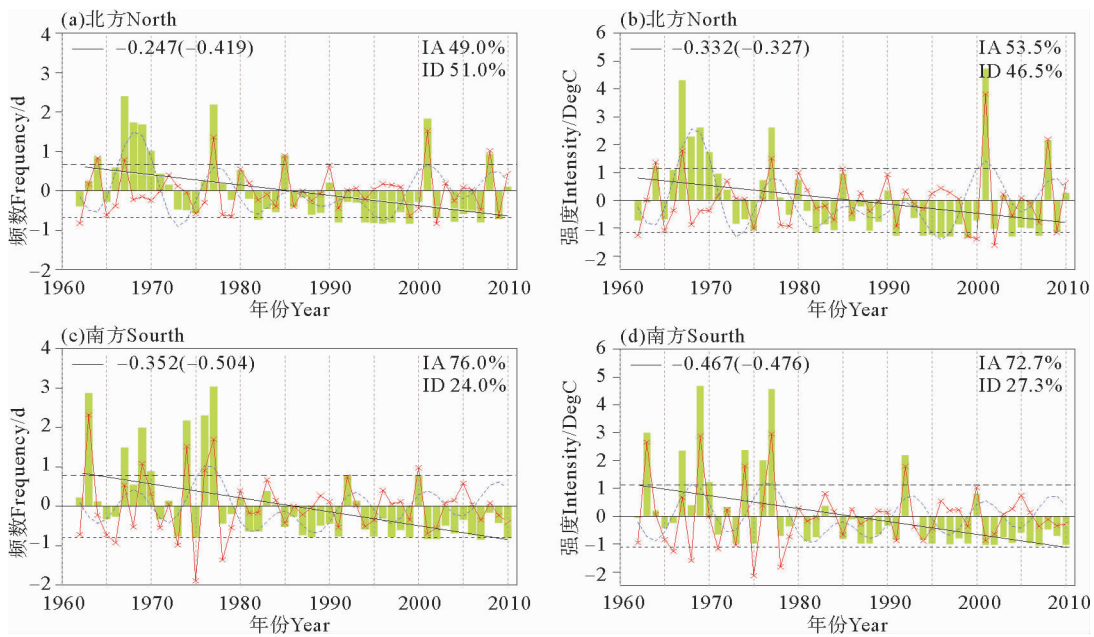
王晓娟等^[14]发现,中国区域性极端低温事件几何中心纬度的频次分布为双峰特征。考察气候态的 1962—2010 年 1 月平均气温的空间分布(见图 1(a))可以发现,1 月平均气温随纬度由南至北逐渐降低,0°C 等值线位于秦岭-淮河一线,将中国分为南北两部分。进一步考察极端低温频数随纬度的概率密度分布(见图 1(b))可以看出,极端低温频数也呈现双峰分布,即极端低温事件存在 2 个密集发生的纬度带,分别位于 30°N 和 40°N 附近。考虑到中国纬度跨度大的特征,本文以 35°N(见图 1(a)黑实线)为界将中国划分为北方区域(240 站)和南方区域(247 站)进行研究。



((a)北方区域;(b)南方区域;网格填色:极端低温站点发生率随年份、日期的变化(左坐标);蓝实线:49年平均的极端低温站点发生率随日期的变化(右坐标);黑短虚线和黑实线分别代表平均值和一个标准差的位置(右坐标)。(a) The north of China; (b) The south of China; Shaded for EMT station frequency(left y axis); Blue solid lines for multi-year mean of EMT station frequency in 1962—2010 (right y axis); Black short dash lines and black solid lines denote winter mean EMT station frequency and one standard deviation value(right y axis), respectively.)

图2 冬季极端低温站点发生率随时间的变化

Fig. 2 Day-year cross-sections of winter EMT station frequency



((a)、(b)分别为北方区域极端低温频数和强度;(c)、(d)同(a)、(b),但为南方区域;柱状图为距平时间序列;黑实线为趋势线;红实线、蓝虚线分别为距平时间序列去趋势后的年际变化分量和年代际变化分量;红字、蓝字分别为距平时间序列去趋势后的年际变化分量和年代际变化分量所占的方差贡献;横虚线为 0.8σ , σ 为标准差,括号外的黑色数字为趋势系数,括号内黑色数字为线性趋势与距平时间序列的相关系数。Time series of EMT (a) frequency and (b) intensity in the north of China. (c)、(d) as (a)、(b), but for the south of China. Bars are anomalous time series; Black solid lines denote linear trends; Red solid lines and blue short dashed lines are for inter-annual component and inter-decadal component of anomalous time series removed the trend, respectively. Red numbers and blue numbers are for variances of detended anomalous time series explained by IA component and ID component, respectively. Horizontal dashed lines are for 0.8σ , σ is standard deviation. The black numbers outside (inside) the parentheses denote trend coefficients (the correlation coefficients between linear trend and anomalous time series).)

图3 1962—2010 中国极端低温频数和强度的距平时间序列

Fig. 3 Time series of EMT frequency and intensity anomalies in China during 1962—2010

2.2 南、北方极端低温的频数和强度的多尺度变化

2.2.1 线性趋势 图3(a)、3(c)显示,南、北方区域极端低温频数的距平时间序列均呈显著的下降趋势,且南方区域下降得更迅速,趋势系数分别为 $-0.247\text{ d}/10\text{a}$ (北方)和 $-0.352\text{ d}/10\text{a}$ (南方)。极端低温强度的变化与频数的变化一致,依然是南方地区比北方地区

极端低温强度的下降趋势更明显,分别为 $-0.332\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (北方)和 $-0.467\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (南方)。二者的时间序列相关系数均在0.95以上,故下文重点分析极端低温频数的变化特征。

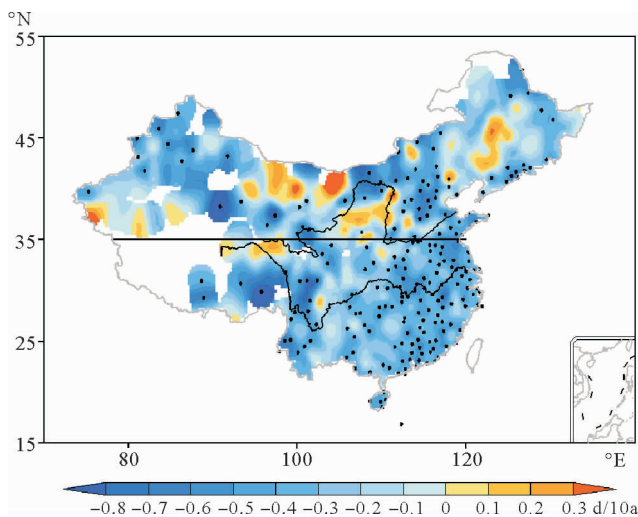
2.2.2 年际、年代际变化 对区域平均的极端低温频数和强度距平时间序列去趋势后采用谐波滤波,将周

期小于 8a 的变化作为年际变化分量(见图 3 中的红色实线),而周期大于 8a 的作为年代际变化分量(见图 3 中的蓝色实线)。分析发现北方区域极端低温频数和强度的年际和年代际变化信号强度相当,方差贡献各占约 50%,其中极端低温频数的年代际信号略强(见图 3(a)、(b)),方差贡献约 51.0%,而极端低温强度的年际变化信号略强,方差贡献占 53.5%。南方区域则明显以年际变化为主(见图 3(c)、(d)),极端低温的频数和强度的方差贡献分别达到 76.0%和 73%,其年代际变化分量只占年际变化方差贡献的约三分之一。

2.3 极端低温频数多尺度变化的空间特征

2.3.1 线性趋势的空间分布

1962—2010 年中国冬季极端低温频数趋势系数的空间分布(见图 4)表明,南方区域的趋势系数均为负值,表现为极端低温频数一致减少的变化,其中长江中下游、华南沿海,四川、云南部分地区为显著减少区域,趋势系数可达 $-0.8 \text{ d}/10\text{a}$;北方区域大部分趋势系数为负值,其中华北地区的趋势系数减少得最显著;另外,新疆南部、甘肃西北部、内蒙古西部,河套地区、辽宁北部及吉林西北部的部分区域的趋势系数为正值,但未过 95% 的置信度检验。从极端低温频数趋势系数的空间分布也可以看出南方区域的趋势比北方区域减少得更迅速。



(黑实点为过 95% 显著性检验的站点。Black solid dots indicate that the trends are statistically significant over 95% confidence level.)

图 4 1962—2010 年中国冬季极端低温频数趋势系数

Fig. 4 Trend coefficients of winter EMT frequency during 1962—2010

2.3.2 年际、年代际变化主模态时空特征

图 5 给出了去趋势后的极端低温频数在年际变化尺度和年代际变化尺度上的第一主模态及其时间序列,分别解释了各自总方差的 16.7% 和 33.7%。从空间分布来看,在年际变化尺度上,极端低温频数主要表现为 35°N 以南的南方地区的一致变化(见图 5(a)),特别是长江中下游地区以及江西、广西等地,以及新疆北部的同位相变

化;在年代际变化尺度上,极端低温频数变化主要集中在 35°N 以北的北方地区(见图 5(b)),主要分布在内蒙古和新疆南部地区。年际变化尺度上时间序列在 1980 年代以后趋于平缓,与南方区域平均的极端低温频数年际变化分量的相关系数为 0.91;年代际变化尺度上时间序列表现为准 10 a 的周期振荡,1980 年代之前振幅较大,1980~1990 年代为负位相,近 10a 则转为正位相,与北方区域平均的极端低温频数年代际变化分量的相关系数达 0.95。无论是年际振荡还是年代际变化分量,所对应的中国南、北方极端低温事件的频数都存在 1980 年代以后振幅明显减小的年代际转型特征。

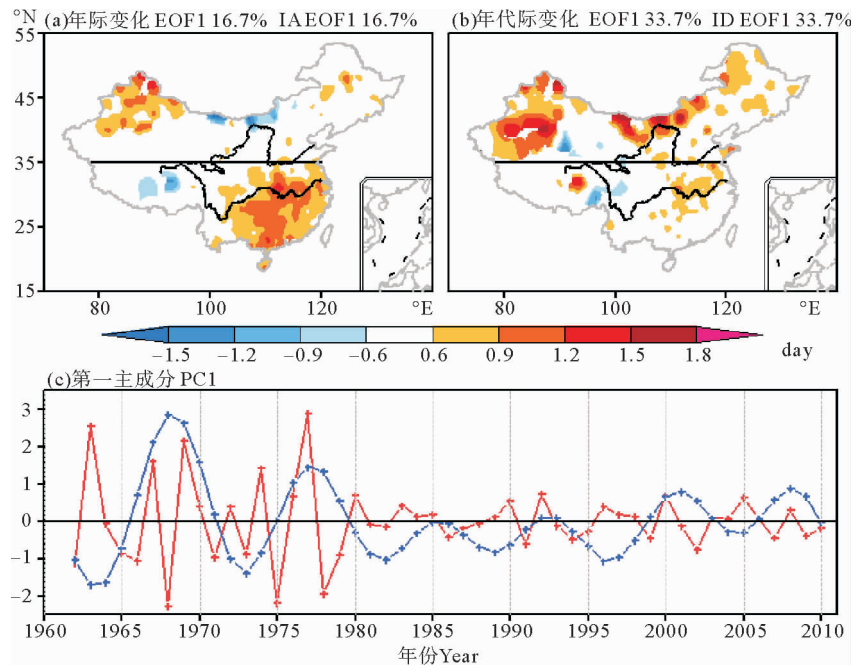
3 南、北方区域极端低温事件相关的大气环流特征

3.1 线性趋势

与南、北方区域极端低温频数线性趋势相联系的大气环流形势极为相似,极端低温事件偏多时,海平面气压场表现为环状模结构,在高纬地区为正异常,中低纬度为负异常,即类似于北极涛动的负位相分布^[22]。地面 2 m 最低气温在海洋上为显著的负异常,北冰洋为负异常中心,在欧亚大陆乌拉尔地区、贝加尔湖至中国东北地区、北美大陆北部为显著的负异常、北非地区为显著正异常(见图 6(a)、(d))。结合下降的线性趋势,上述空间分布表明,随着全球增暖,中国大部分极端低温频数减少,它对应着北半球大范围的气温增暖,特别是北极区域的显著增暖,对应的海平面气压场上表现为北极涛动从负相趋于向正位相转变。500 hPa 位势高度场上(见图 7(a)、(d)),中高纬度位势高度场呈现出 3 波的定常波结构,当南、北方区域线性趋势在 1980 年代中期由正位相转为负位相时(见图 3(a)、(c)),阿留申低压和冰岛低压加强,乌拉尔山阻塞高压减弱,而北美和欧亚中低纬度位势高度异常升高。

3.2 年际变化

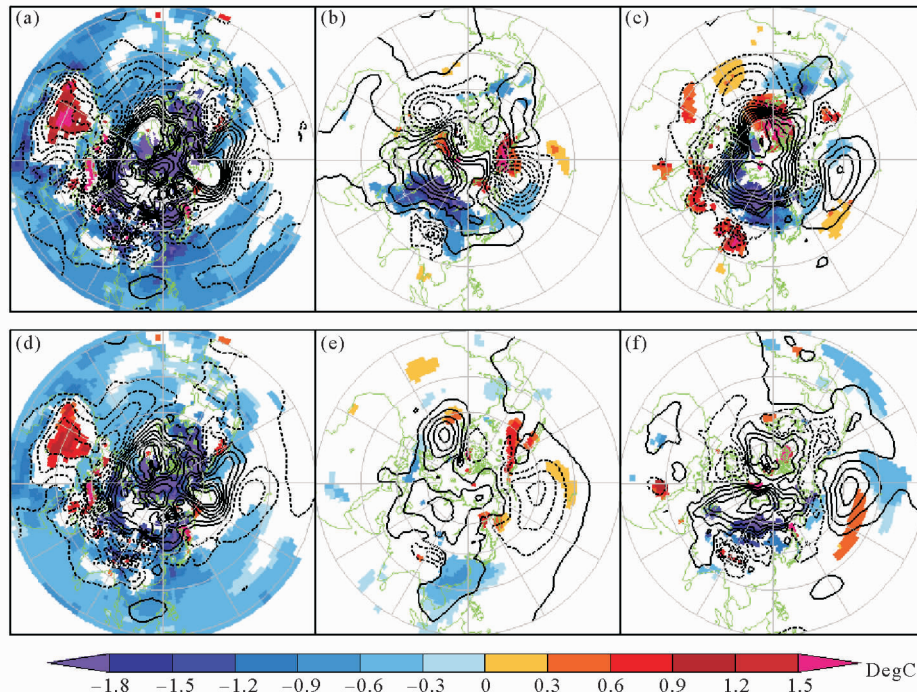
在年际变化尺度上,北方区域极端低温事件偏多时,北半球海平面气压场上呈现出 2 波的定常波结构(见图 6(b)),欧亚大陆和北美大陆为正距平,大西洋和太平洋为负距平。在东半球,海平面气压正异常中心位于新地岛南部,并向东西方向伸展,在贝加尔湖附近向东南扩展,控制东亚地区 30°N 以北的区域,负异常中心位于阿留申群岛附近,使得阿留申低压增强。地面 2 m 处最低气温在西北西伯利亚至贝加尔湖地区有显著的负异常,中国东北和河套地区的负异常也超过了 90% 的显著性检验。南方区域极端低温事件偏多时,北半球中高纬度地区的海平面气压场上表现为偶极子型的 1 波结构(见图 6(e)),大西洋和欧亚大陆为正异常中心,太平洋和北美地区则为负异常中心;在东亚地



((a)年际变化分量的空间分布;(b)年代际变化分量的空间分布;(c)时间序列。红实线代表年际变化分量;蓝实线代表年代际变化分量。(a) Spatial pattern of interannual (IA) component; (b) Spatial pattern of interdecadal (ID) component; (c) The corresponding normalized time series. Red solid line for the IA component; Blue solid line for the ID component.)

图5 中国极端低温频数(去趋势)的 EOF 分析第一模态的时空分布

Fig. 5 The first EOF mode of the EMT frequency (trend removed)



((a),(b),(c)分别为北方区域端低温频数的线性趋势、年际变化和年代际变化分量回归场。(d),(e),(f)同(a),(b),(c),但为南方区域。(a) Linear trend; (b) The IA component; (c) The ID component in north China. (d),(e),(f) as (a),(b),(c), but for south China.)

图6 与中国极端低温频数相联系的海平面气压回归场(等值线,间隔为 0.5 hPa)和地面 2 m 大气温度(填色等值线:超过 90%的信度检验,单位:℃)

Fig. 6 Sea level pressure (contours interval is 0.5 hPa) and surface air temperature (color shadings indicate that the correlation coefficients are statistically significant over 90% significance level. Unit: °C) anomalies regressed by the EMT frequency

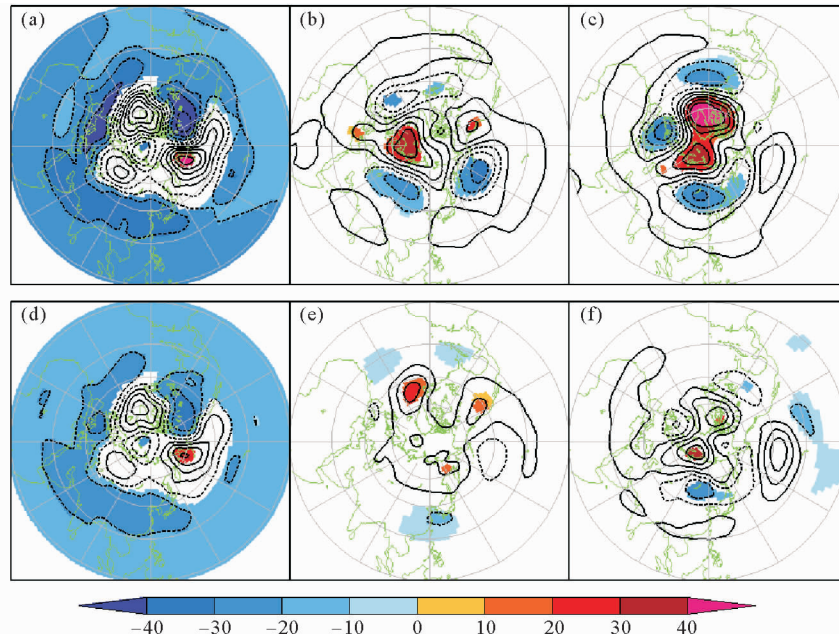
区,海平面气压正异常中心在西西伯利亚至中西伯利亚地区,较北方型的偏南,另外,高压脊沿青藏高原东

侧南下至南海一带。负异常中心位于副热带太平洋,在东亚大陆与副热带太平洋之间的纬向气压梯度加

大,使得在这一地区存在异常北风。地面 2 m 最低气温在长江中下游及以南地区为显著的负异常,中心位于华南沿海。

500 hPa 位势高度场,北方区域极端低温事件偏多时,北极地区位势高度为正异常,中心位于巴伦支海,在贝加尔湖以西、以南的地区、北太平洋有显著的负异

常中心,使得冷空气堆积并南下影响中国(见图 7(b))。南方区域极端低温事件偏多时,欧亚大陆高纬度地区为正异常,东北亚地区为正异常中心,中国东部及北太平洋副热带地区为负异常,中国东部 130°E 附近为显著的负异常中心,使得东亚大槽加强,槽后偏北风引导冷空气南下至华南地区(见图 7(e))。



((a)、(b)、(c)分别为北方区域极端低温频数的线性趋势、年际变化和年代际变化分量回归场,(d)、(e)、(f)同(a)、(b)、(c),但为南方区域。(a) Linear trend; (b) The IA component; (c) The ID component in north China, (d)、(e)、(f) as (a)、(b)、(c), but for south China.)

图 7 与中国极端低温频数相联系的 500 hPa 位势高度回归场(等值线:位势高度场,间隔为 10 gmp;填色等值线:超过 90%的信度检验)

Fig. 7 The 500 hPa geopotential height anomalies regressed by EMT frequency (contour interval is 10 gmp, color shadings indicate that the correlation coefficients are statistically significant over 90% significance level)

3.3 年代际变化

在年代际变化尺度上,北方区域极端低温事件偏多时,海平面气压场表现为显著的北极涛动负位相,海平面气压在北极地区为正异常,北太平洋和北大西洋分别有一个负异常中心;地面 2 m 最低气温在欧亚大陆为负异常,中心位于贝加尔湖以东至中国东北地区,在北美大陆则为显著正异常(见图 6(c))。500 hPa 位势高度场(见图 7(c)),乌拉尔山附近有显著的正异常中心,并向南伸展至 50°N,而欧洲西部和贝加尔湖地区为显著负异常中心,显示出类欧亚型正位相的遥相关波列结构^[23],欧亚型与北方区域极端低温频数为正相关关系(相关系数 $r=0.326$),即与北方区域温度为负相关关系,这与吴洪宝^[24]、刘毓贇和陈文^[25]的结论相似。南方区域极端低温事件偏多时,高、低空大气环流形势与北方区域类似,在纬度上稍有偏差,但均不过 90%的置信度检验,并不十分显著(见图 6(f)、7(f))。

从表 1 中可以看出,南、北方区域极端低温频数的线性趋势与北极涛动呈负相关。当极端低温频数减小

(从正值变为负值),北极涛动则从负位相变为正位相;与阻塞高压、西伯利亚高压、东亚大槽的强度则呈正相关,即极端低温频数减小,上述系统强度减弱。在年际尺度上,北方区域主要受西伯利亚高压和北极涛动的影响,南方区域受西伯利亚高压和东亚大槽影响。在年代际变化尺度上,北方区域主要受西伯利亚高压的影响,南方区域与北极涛动和东亚季风各系统间的相关不显著。

6 结论

本文利用 1961—2010 年 NCEP/NCAR 再分析资料和中国 487 站逐日最低气温资料,以 35°N 为界分北方区域和南方区域研究中国冬季极端低温事件在不同时间尺度上的变化特征,并进一步分析与之相联系的大气环流形势,研究表明:

(1)南、北方区域冬季极端低温站点发生率有 4 个高峰时段,呈现出准双周的气候季节内振荡过程,北方强冷空气活动多发生在隆冬时节(1月中旬),而南方则在 1

表1 中国南、北方区域极端低温频数线性趋势、年际和年代际分量与各指数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between linear trends, the inter-annual component and the inter-decadal component of winter EMT frequency in the north and south of China and atmospheric circulation indices

(Arctic Oscillation index(AOI), blocking high index(BHI), Siberia high index(SHI), and the East Asian Trough index(EATI))

		线性趋势(LT)		年际变化(IA)		年代际变化(ID)	
		北方型 ^①	南方型 ^②	北方型 ^①	南方型 ^②	北方型 ^①	南方型 ^②
线性趋势 (LT)	北极涛动指数(AOI)	-1.0**	-1.0**				
	阻塞高压指数(BHI)	0.999	1.0**				
	西伯利亚高压指数(SHI)	1.0**	1.0**				
	东亚大槽指数(EATI)	-1.0**	-0.999				
年际变化 (IA)	北极涛动指数(AOI)			-0.278*	-0.127		
	阻塞高压指数(BHI)			-0.008	0.130		
	西伯利亚高压指数(SHI)			0.355*	0.305*		
	东亚大槽指数(EATI)			-0.092	-0.427**		
年代际变化 (ID)	北极涛动指数(AOI)					-0.490	-0.148
	阻塞高压指数(BHI)					0.316	0.153
	西伯利亚高压指数(SHI)					0.576*	0.229
	东亚大槽指数(EATI)					-0.061	-0.192

*表示超过95%置信度检验,**表示超过99%置信度检验。*(***)denote the correlation coefficient exceeding 95%(99%)confidence level.

Note:①North;②South

月底和12月底多发。

(2)南、北方区域平均的极端低温频数和强度均呈下降趋势,且南方区域下降得更迅速。去趋势后北方区域平均的极端低温频数和强度的年际和年代际变化信号强度相当,其中极端低温频数的年代际信号略强,而极端低温强度的年际变化信号略强,南方区域极端低温频数和强度则以年际变化为主。

(3)南、北方区域平均的极端低温频数的线性趋势由正值转为负值时,与之相联系的大气环流形势表现为:海平面气压场由北极涛动负位相转为正位相,对流层中高层为3波的定常波减弱,海洋尤其北极地区的气温显著变暖。

(4)年际变化尺度上,北方区域极端低温偏事件多时,海平面气压场表现为2波的定常波结构,西伯利亚高压和阿留申低压增强,对流层中层贝加尔湖槽加强,沿西北路引导冷空气影响中国北方地区;南方区域极端低温事件偏多时,海平面气压表现为偶极子型的1波结构,欧亚大陆和大西洋为正距平,北美大陆和太平洋为负距平,对流层中层东亚大槽加强南伸,引导冷空气沿青藏高原东侧南下影响中国南方地区。年代际变化尺度上,南、北方区域的大气环流形势都表现为北极涛动负位相,但南方区域不显著。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Filho Meira L G, Callander B A, et al. IPCC, Climate change 1995: The Science of Climate Change [C]. Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 1995.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. IPCC, Climate change 2001: The scientific basis [C]. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2001.
- [3] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [C]. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(1)中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [5] 秦大河. 进入21世纪的气候变化科学-气候变化的事实、影响与对策 [J]. 科技导报, 2004, 7: 4-7.
- [6] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the south Pacific: 1961-1998 [J]. Int J Climatol, 2001, 21(3): 269-284.
- [7] Zhang X B, Aguilar E, Sensoy S, et al. Trends in Middle East cli-

- mate extreme indices from 1950 to 2003 [J]. *J Climate Res*, 2005, 110: D22104. doi: 10.1029/2005JD006181.
- [8] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region [J]. *Int J Climatol*, 2005, 25(10): 130-1330.
- [9] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: D05109. doi: 10.1029/2005JD006290.
- [10] New M, Hewitson B, Stephenson D B, et al. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(7): D14102.
- [11] Aguilar E, Barry Aziz A, Brunet M, et al. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006 [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114: D02115. doi: 10.1029/2008JD011010.
- [12] Caesar J, Alexander L V, Trewin B, et al. Changes in temperature and precipitation extremes over the Indo-Pacific region from 1971 to 2005 [J]. *Int J Climatol*, 2011, 31: 791-801.
- [13] 任福民, 翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变化分析 [J]. *大气科学*, 1998, 22(2): 217-226.
- [14] 王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 1960—2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 8-15.
- [15] 张宁, 孙照渤, 曾刚. 1955—2005 年中国极端气温的变化 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1): 123-128.
- [16] 罗忠红, 黄嘉佑, 江航东. 我国冬季持续极端低温分布特征 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 14945-14947.
- [17] Wang B, Wu Z, Chang C P, et al. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. *J Climate*, 2010, 23: 1495-1512.
- [18] 潘晓华, 翟盘茂. 气温极端值的选取与分析 [J]. *气象*, 2002, 28(10): 28-31.
- [19] 周永宏, 郑大伟. 相关系数检验表的新算法 [J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 1997, 18: 18-23.
- [20] 闰昊明, 钟敏, 朱耀仲. 时间序列数字滤波后自由度的确定—应用于日长变化与南方涛动指数的相关分析 [J]. *天文学报*, 2003, 44(3): 324-329.
- [21] 纪忠萍, 谷德军, 梁健, 等. 近 55 年影响广州的强冷空气及其准双周变化 [J]. *大气科学*, 2007, 31(5): 999-1010.
- [22] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [23] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter [J]. *Mont Wea Rev*, 1981, 109(4): 784-812.
- [24] 吴洪宝. 我国冬季气温异常与北半球 500 hPa 大气环流遥相关型的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 1993, 16(2): 115-119.
- [25] 刘毓赞, 陈文. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响 [J]. *大气科学*, 2012, 36(2): 423-432.

Multi-Scale Variations of Winter Extreme Minimum Temperature in China

HUANG Fei, HU Bie-Bei, ZHOU Xiao, FANG Yong-Sheng

(1. The Lab of Physical Oceanography, The Key Laboratory of Shandong Universities Ocean-Atmosphere Interaction and Climate, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Naval Oceanographic Hydrometeorological Center of South China Sea Fleet, Zhanjiang 524001, China)

Abstract: Based on the data set of daily minimum temperature in China during 1961—2010, multi-scale variations of winter extreme minimum temperature (EMT) over the north and south of China divided by 35°N latitude line, are analyzed. Results show that the EMT frequency in the north and south of China both have quasi-biweekly climatological intraseasonal oscillation. In the north of China, the EMT frequency and intensity anomalies are decreased by 0.247 d/10a and 0.332 °C/10a, respectively. While The EMT frequency and intensity anomalies are decreased rapidly by 0.352 d/10a and 0.467 °C/10a in the south of China, respectively. For the north of China, the variance contribution between inter-annual (IA) and inter-decadal (ID) components of EMT frequency and intensity are almost equal. While for the south of China, the IA component variance contribution accounts for about two-thirds of total variance, and the ID component explains only about one-third of total variance. Further study shows that the Arctic oscillation changes from negative to positive phase when the frequencies of EMT changes from positive to negative linearly in the north and south of China. At inter-annual timescales (periods less than 8 yr), as the frequency of EMT in the north of China is more, characterized by Lake Baikal trough strengthened and enhanced Siberian High and Aleutian Low, associated with stationary wavenumber 2 structures. As the frequency of EMT in the south of China is more, atmospheric circulation features a strengthened East Asian trough and positive anomalous sea level pressure over Eurasia and the Atlantic Ocean, while the North American continent and the Pacific showing negative anomaly, closely related to a wavenumber 1 pattern. At inter-decadal timescales (periods longer than 8 yr, the linear trend removed), the increased EMT frequency in the north of China is associated with the negative phase of Arctic oscillation, but it is not significant in the south of China.

Key words: extreme minimum temperature frequency; multi-scale variations; linear trend; Siberian High; East Asian trough

责任编辑 庞 旻