

Decadal Regime Shift of Arctic Sea Ice and Corresponding Changes of Extreme Low Temperature

Fei Huang^{1,2*}, Hui Di^{1,2}, Beibei Hu^{1,2,3}, Xiao Zhou^{1,2}

¹Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao

²Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao

³Marine Meteorological Center of the South China Sea Fleet, Zhanjiang

Email: huangf@ouc.edu.cn, directionfly@163.com

Received: Dec. 12th, 2013; revised: Jan. 20th, 2014; accepted: Feb. 12th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on anomaly change of monthly Arctic sea ice extent (SIE) from 1979 to 2012, it is found that the decreasing trend of Arctic SIE showed a remarkably decadal regime shift. The melting rate during 1979 to 1996 was slow, which was -79.6 km^2 per month. While it was -213.0 km^2 per month from 1997 to 2012 that was 2.7 times of the previous. Subsequently, from the decadal change of Arctic sea ice aspect, variation characters of extreme low temperature (ELT) over mid-high latitudes of the Northern Hemisphere, and related atmospheric circulation characters were discussed. Analyses of ELT frequency trend indicate that, there appears a spatial pattern of out-of-phase oscillation between most of the eastern and western hemispheres during 1979 to 1996. The ELT frequency over Eurasia shows a decreasing trend, and an increasing trend in the western hemisphere, especially over Greenland and middle latitude of Eurasia, which is linked closely to the North Atlantic oscillation. Conversely, there appears an out-of-phase seesaw pattern between the Arctic and northern mid latitude during the accelerated thawing of Arctic sea ice during 1997-2012. The typical character in large-scale surface level pressure anomaly is intensified Siberian high, which suggests more cold air invading into Eurasia continent.

Keywords

Mid-High Latitudes, Extreme Low Temperature, The North Atlantic Oscillation, Siberian High, Out-of-Phase Oscillation

*通讯作者。

北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征

黄菲^{1,2*}, 狄慧^{1,2}, 胡蓓蓓^{1,2,3}, 周晓^{1,2}

¹中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛

²中国海洋大学, 山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 青岛

³南海舰队海洋水文气象中心, 湛江

Email: huangf@ouc.edu.cn, directionfly@163.com

收稿日期: 2013年12月12日; 修回日期: 2014年1月20日; 录用日期: 2014年2月12日

摘要

利用1979~2012年北极海冰范围逐月的距平变化资料,发现北极海冰的减少趋势存在显著的年代际转型,1979~1996年期间北极海冰范围减小速率较慢,为 $-79.6 \text{ km}^2/\text{month}$,而1997~2012年则加速融化,海冰面积减小速率($-213.0 \text{ km}^2/\text{month}$)是1979~1996年的2.7倍。随后探讨了北极海冰年代际转型前后北半球冬季中高纬度极端低温的变化特征及其相应的大气环流特征。研究发现前一时段的1979~1996年期间北半球中高纬度和东西半球极端低温频数均呈现跷跷板式的反位相分布特征,即欧亚大陆高纬度地区极端低温频数存在减少的趋势,西半球特别是格陵兰岛一带以及欧亚中纬度区域极端低温频数具有增加的趋势。这种变化与冬季北大西洋涛动有很大的相关。1997~2012年北极海冰加速融化时期,中高纬度极端低温主要表现为中纬度和极区之间的南北反相振荡特征,即中纬度欧亚大陆极端低温频数增加,北冰洋区与极端低温频数减少。这种变化主要与冬季西伯利亚高压通过影响中高纬欧亚大陆温度的变化进一步影响极端低温的变化有关。

关键词

中高纬度, 极端低温, 北大西洋涛动, 西伯利亚高压, 反相振荡

1. 引言

作为气候系统的敏感因子,海冰同时受到大气和海洋的影响。海冰可以通过改变表层反照率,改变大气和海洋之间的热通量、湿度和动量来影响气候[1]。观测资料表明近年来北极海冰呈现明显减少的趋势[2]-[4]。北极海冰范围和面积加速下降的趋势非常明显,从1979~1996年每十年下降-2.2%到-3.0%转变为1997~2007年的每十年下降-10.1%到-10.7%[5]。

北极海冰的加速融化及其气候影响引起了越来越多的关注,研究指出,近来冬季海冰异常影响大尺度的大气环流[6][7]。而冬季大气环流的变化必然会影响大范围的气候变化,特别是冬季极端天气、气候事件的异常变化。不同区域不同时段极端天气气候事件的变化趋势和特征有所不同[8]-[10],但对于近些年来,特别是21世纪以来,北极海冰加速融化,而全球变暖的步伐却有所停滞[11],在这样的背景下,北半球冬季极端低温会如何变化,相应的大气环流会有何异常,将是本文要重点解决的关键问题。

2. 资料和分析方法

本文所用的大气资料是NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)的再分析资料,选取时间从1979年1月1日到2012年12月31日,共34年。分

析的变量有大气表面温度资料(SAT), 海平面气压场(SLP)和 500 hPa 位势高度场。所有变量均为日数据, SAT 的格点空间分辨率为 $94 \text{ (LAT)} \times 192 \text{ (LON)}$, SLP 和 500 hPa 位势高度场分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。文中使用的北极海冰密集度数据由美国国家冰雪中心(NSIDC)提供, 时间范围是 1979 年~2012 年。由于观测卫星和观测通道的更替, 数据由不同传感器观测而来, 主要包括: Nimbus-7 多通道微波传感器(SMMR)和国防气象卫星计划(DMSP)的-F8, -F11 和-F13 微波传感器(SSM/Is), 以及-F17 微波传感器(SSM/I/S)。日平均的北极海冰密集度数据空间分辨率是 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 。

参照翟盘茂等[12]定义极端低温阈值的方法, 将 1979~2012 年共 34 年各个格点冬季 SAT 按照升序排列, 选取第 5 个百分位的温度值, 作为该格点冬季极端低温阈值。如果该格点冬季某日 SAT 低于该阈值, 则认为该日发生一次极端低温事件。把每年发生极端低温事件的次数称为该年极端低温的频数。

本文所采用的分析方法主要包括经验正交函数分解和线性回归分析, 目的是为了更加清晰地理解中高纬极端低温频数的时、空分布及其相关联的环流变化。文中出现的冬季定义为 1~3 月的平均。

3. 北极海冰的年代际转型

近年来北极海冰的快速融化引起了广泛的关注[2]-[4], 由于北极海冰范围的快速减退出现在每年的 9 月份, 因此一般研究海冰的融化趋势都采用多年 9 月份海冰面积或范围的线性趋势来表征, 而月平均北极海冰范围的距平序列(图 1)则更加清楚地反映了北极海冰的变化趋势和年际振荡特征。从图 1 中可以发现, 北极海冰范围的变化存在明显的年代际转型特征, 即在 1997 年之前, 海冰有显著的减少趋势, 但融化速率较慢, 为 $-79.6 \text{ km}^2/\text{month}$; 而 1997~2012 年则加速融化, 海冰融化速率($-213.0 \text{ km}^2/\text{month}$)是前一时段的 2.7 倍。另外, 对比线性趋势和年际变化的方差贡献可以发现, 前一阶段北极海冰的年际振荡更强些, 而后一阶段特别是 1997~2006 这前 10 年里, 海冰的下降趋势显著增强, 而年际变化的振幅则小很多, 但 2007 年之后的最近几年里, 海冰的年周期振荡突然增强, 似乎与前一阶段有所不同, 但夏季海冰快速减少的趋势仍然与前面的 10 年保持一致的加速融化特征。

4. 冬季北半球中高纬极端低温频数的空间特征

在上述北极海冰年代际转型前后的背景态下, 北半球冬季的极端低温会有什么样的分布特征? 本文对 1979~1996 年和 1997~2012 年前后两个时段的极端低温的变化进行对比分析。图 2a 给出了冬季中高纬极端低温阈值分布。从阈值场可以清楚地看到, 阈值的变化基本上具有纬向分布特征, 从中纬度向高纬度明显递减。阈值在中纬度太平洋和大西洋相对较大, 北极范围内较小, 中高纬阈值相差较大。

图 2b 和图 2c 分别是 1979~1996 年和 1997~2012 年累积频数对应的空间分布。从图可以发现, 1979~1996 年中纬度欧亚大陆累积频数相对较小, 北冰洋范围内较多, 1997~2012 年累积频数分布与之相反, 欧亚大陆相对较多, 北冰洋范围内较少。为了更清晰地认识频数的变化趋势, 图 3 给出了极端低温频数的线性趋势空间分布。可以发现, 前一时段的 1979~1996 年期间北半球中高纬度和东西半球极端低温频数均呈现跷跷板式的反位相分布特征, 即欧亚大陆高纬度地区极端低温频数存在减少的趋势, 西半球特别是格陵兰岛一带以及欧亚中纬度区域极端低温频数具有增加的趋势。而后一时段的 1997~2012 年北极海冰加速融化时期, 中高纬度极端低温主要表现为中纬度和极区之间的南北反相振荡特征, 即中纬度欧亚大陆极端低温频数增加, 北冰洋区域极端低温频数减少。

为了更清楚地了解冬季极端低温频数的时空变化特征, 图 4 给出中高纬度冬季极端低温频数经验正交函数分解第一模态(以下简称 EOF1)的空间分布。与图 3a 所示的频数变化趋势分布一致, 1979~1996 年冬季极端低温频数 EOF1 表现为高纬度欧亚大陆和格陵兰岛范围内东西反相振荡的空间分布。当 60°N 以北的高纬欧亚大陆极端低温频数偏少时, 格陵兰岛范围内频数增多。低纬欧亚大陆和北美大陆之间也存

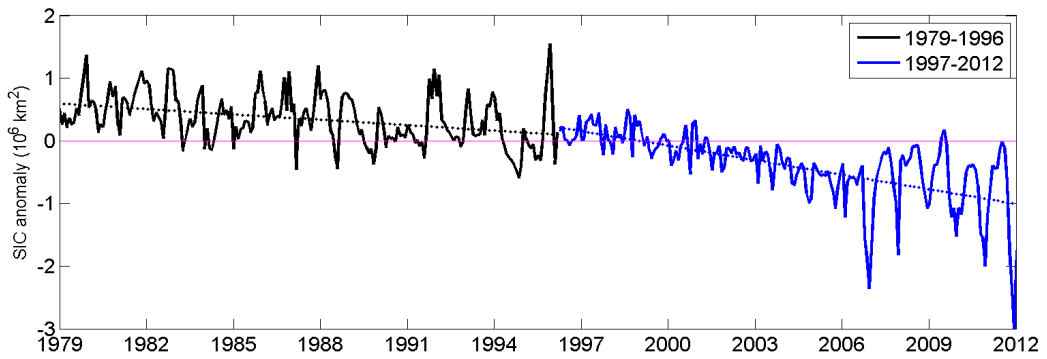


Figure 1. Monthly Arctic sea ice extent anomalies from 1979 to 2012 (solid lines), with the linear trend for 1979-1996 (black dashed line) and for 1997-2012 (blue dashed line)

图 1. 1979 年~2012 年北极海冰范围月平均距平曲线(实线)及 1979~1996(黑色虚线)和 1997~2012 年(蓝色虚线)两个时间段的斜率

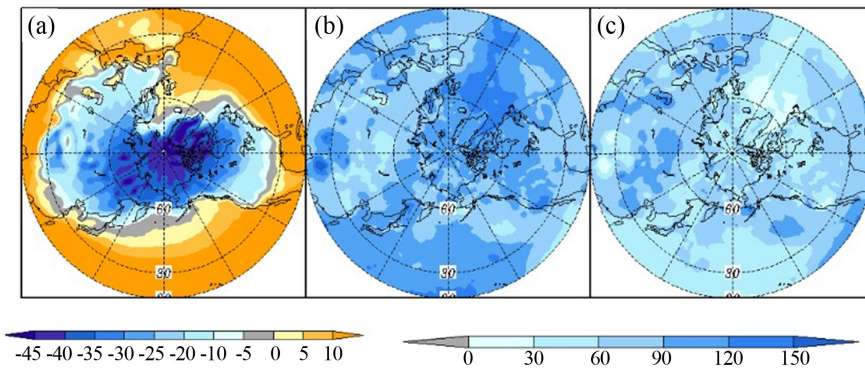


Figure 2. (a) Threshold value of extreme low temperature in mid-high latitudes of the Northern Hemisphere (unit: °C); (b) and (c) The spatial distribution of extreme low temperature cumulative frequency for 1979-1996 (b) and 1997-2012 (c)

图 2. (a) 1979~2012 年中高纬度极端低温阈值的空间分布(单位: °C); (b) 1979~1996 年极端低温累积频数的空间分布; (c) 1997~2012 年极端低温累积频数的空间分布(单位: 次)

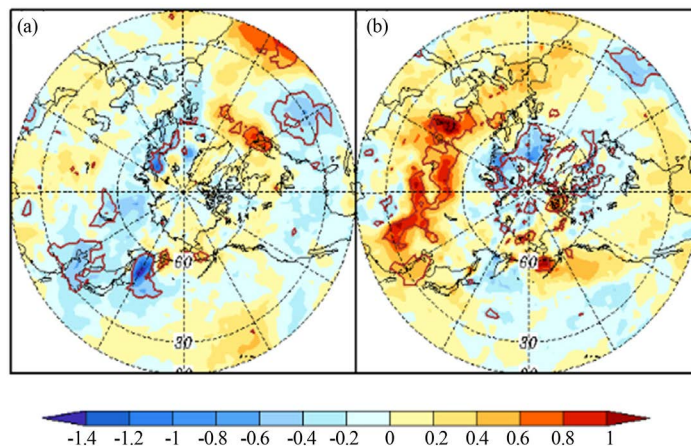


Figure 3. Linear trends in the frequency of extreme low temperature during winter (day/10a). 1979-1996 (a) and 1997-2012 (b). Red contour represents those linear trend exceed 95% confidence level according to statistical test

图 3. 冬季极端低温频数线性趋势的空间分布(天/10 年)。(a) 1979~1996 年; (b) 1997~2012 年。红色实线代表通过 95%的置信度检验水平

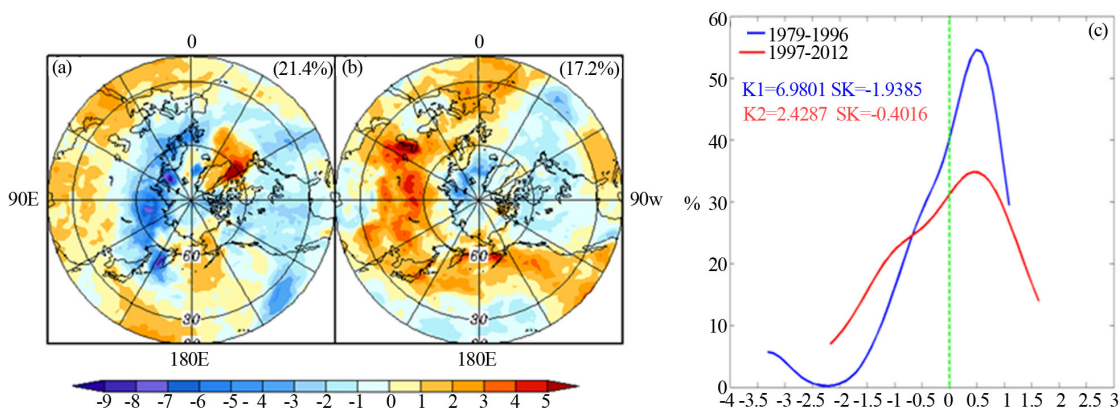


Figure 4. Spatial pattern of EOF leading mode for extreme low temperature frequency (a) 1979-1996 and (b) 1997-2012. (c) The probability density function distribution of principal component of the leading mode of EOF (1979-1996: blue line, 1997-2012: red line). K1 (K2) expresses skewness coefficient and SK1 (SK2) means kurtosis coefficient of blue (red) line, respectively

图 4. 极端低温频数经验正交函数分解第一模态对应的空间分布(a) 1979~1996; (b) 1997~2012 及第一模态的时间序列概率密度函数曲线(c); 其中 1979~1996 年: 蓝色实线; 1997~2012: 红色实线)。K1, SK1 代表蓝色实线的峰度系数和偏度系数, K2, SK2 代表红色实线的峰度系数和偏度系数

在类似较弱的反相振荡特征。相反地, 与图 4a 所示的空间分布特征不同, 1997~2012 年 EOF1 呈现出北冰洋与中高纬反相振荡的空间分布型。当北极海冰加速消融, 极区极端低温频数减少, 中纬度欧亚大陆频数增加。结合空间模态对应的时间系数(以下简称 PC1)的概率密度函数曲线(图 4c), 可以发现, 前后两个时段 PC1 的偏度系数均为负值, 表明 PC1 偏于正值的概率更大些, 说明两段时段内冬季中高纬极端低温频数的主模态与极端低温频数的变化趋势(图 3)有很好的—致性。

需要指出的是 EOF 第一模态在前后两个时段分别占总方差的 21.4% 和 17.2%, 第二模态分别为 13.3% 和 13.1%, 根据 North[13] 准则, 第一模态与其他模态显著地分离, 是唯一的独立模态, 因此本文对 EOF 的其他模态未做分析。

5. 相关的大气环流异常

研究表明大尺度的大气环流异常会影响极端温度的变化[14]。为了清晰地分析与极端低温事件相关的大气环流特征, 分别对 1979~1996 年和 1997~2012 年环流场进行回归分析。

描述大气环流异常场的变量很多, 我们选择 500 hPa 位势高度场, SAT 和 SLP 进行回归分析。图 5 给出了 PC1 与冬季平均大气环流各量的线性回归场。1979~1996 年 500 hPa 位势高度回归场上表现为减弱的东亚大槽和欧洲浅槽(图 5a), 这意味着冬季中纬度欧亚大陆盛行纬向环流, 欧亚大陆会异常增温, SAT 的回归场(图 5c)则证实了这一点, 温度正距平出现在新地岛至贝加尔湖范围内, 负距平分布在格陵兰岛以及低纬欧亚大陆范围内。SLP 回归场中最大负距平出现在极区和周围区域内, 最大正异常出现在北大西洋中纬度地区及欧洲沿岸, 表现为南北偶极子型的北大西洋涛动(NAO)正位相分布特征。进一步计算 PC1 与 NAO 指数之间的相关关系, 相关系数达到 0.75, 超过 99% 的置信度水平。冬季正位相 NAO 给欧洲带来强西风, 导致冬季出现暖冬, 同时北美范围内则出现降温, 这与以前的研究结果吻合[14]。

相反地, 1997~2012 年 500 hPa 位势高度回归场中(图 5b), 东亚大槽显著加强, 欧洲浅槽减弱, 乌拉尔山阻塞高压异常加强, 这种环流分布与 Wu 等[15]最新提出的受北极海冰影响的大气三极子型风场分布非常一致。当北极海冰加速消融, 中高纬欧亚大陆盛行径向环流, 有助于冷空气南下, 冬季容易出现冷冬。这在 SAT 场上有很清楚的反映(图 5d), 极区上空存在一个显著正温度异常中心, 中纬欧亚大陆有一个负异常中心, 这与图 4d 中极区极端低温频数减少, 欧亚大陆频数增加相一致。SLP 场上(图 5f)表现为

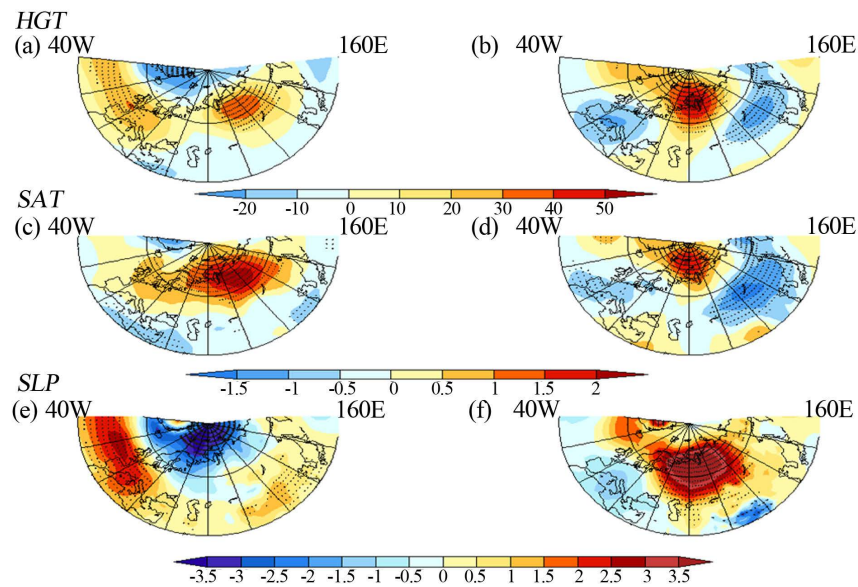


Figure 5. Regression maps for winter atmospheric circulation based on EOF-PC1. Dotted regions represent those whose correlations exceed 95% confident level. (a) for 500 hPa geopotential height (gpm), (c) for surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (e) for sea level pressure (500 hPa) during 1979-1996. (b), (d), (f) for 1997-2012

图 5. 冬季中高纬极端低温频数第一模态对应的时间序列与同期冬季环流场的线性回归分布。(a), (c), (e)分别对应 1979~1996 年的 500 hPa 位势高度场, 地表温度场和海平面气压场; (b), (d), (f)分别对应于 1997~2012 年的相应环流场。图中打点区域表示显著水平通过 95% 的信度检验

显著加强的西伯利亚高压, 欧亚大陆绝大部分地区的温度与西伯利亚高压的强度有负相关[16], 在加强的西伯利亚高压影响下, 反气旋环流系统通常带来强的北风和东北风南下至东亚, 甚至导致大量冷气团进入低纬, 造成欧亚大陆大范围内温度降低[17]。这表明中高纬欧亚大陆显著的冷异常, 很大程度上是受到强西伯利亚高压的影响, 这也部分解释了极区与中纬欧亚大陆出现中高纬温度反相振荡的原因。

6. 结论

本文利用 1979~2012 年北极海冰范围逐月的距平变化资料, 发现北极海冰的减少趋势存在显著的年代际转型, 1979~1996 年期间北极海冰融化速率较慢, 为 $-79.6 \text{ km}^2/\text{month}$, 而 1997~2012 年则加速融化, 海冰融化速率 ($-213.0 \text{ km}^2/\text{month}$) 是前一时段的 2.7 倍。在北极海冰年代际转型前后的背景态下, 探讨了北半球冬季中高纬度极端低温的变化特征及其相应的大气环流特征。

研究发现前一时段的 1979~1996 年期间北半球中高纬度和东西半球极端低温频数均呈现跷跷板式的反位相分布特征, 即欧亚大陆高纬度地区极端低温频数存在减少的趋势, 西半球特别是格陵兰岛一带以及欧亚中纬度区域极端低温频数具有增加的趋势。这种变化与冬季 NAO 有很大的相关。冬季正位相 NAO 给欧洲带来强西风, 导致冬季出现暖冬, 同时北美范围内则出现降温, 这与以前的研究结果吻合。

相反地, 1997~2012 年北极海冰加速融化时期, 中高纬度极端低温主要表现为中纬度和极区之间的南北反相振荡特征, 即中纬度欧亚大陆极端低温频数增加, 北冰洋区域极端低温频数减少。这种变化主要与冬季西伯利亚高压通过影响中高纬欧亚大陆温度的变化进一步影响极端低温的变化有关。在加强的西伯利亚高压影响下, 大量冷气团进入低纬, 造成欧亚大陆大范围内温度降低, 这也部分解释了极区与中纬欧亚大陆出现中高纬温度反相振荡的原因。

本文揭示了北极海冰年代际转型前后的背景态下, 北半球冬季中高纬度极端低温的变化特征及其相

应的大气环流特征，但冬季极端低温事件的成因及其影响系统等很复杂，需要进一步深入研究。

项目基金

全球变化研究国家重大科学研究计划项目(课题编号：2010CB951403 和 2012CB955604)。

参考文献 (References)

- [1] Deser, C., Walsh, J.E. and Timlin, M.S. (2000) Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends. *Journal of Climate*, **13**, 617-633.
- [2] Comiso, J.C. (2006) Abrupt decline in the arctic winter sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, **33**, L18504.
- [3] Meier, W.N., Stroeve, J. and Fetterer, F. (2007) Whither arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record. *Annals of Glaciology*, **46**, 428-434.
- [4] Nghiem, S.V., Rigor, I.G., Perovich, D.K., *et al.* (2007) Rapid reduction of arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letters*, **34**, L19504.
- [5] Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Gersten, R., *et al.* (2008) Accelerated decline in the arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, **35**, L01703.
- [6] Honda, M., Yamazaki, K., Nakamura, H., *et al.* (1999) Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *Journal of Climate*, **12**, 3347-3358.
- [7] Yamamoto, K., Tachibana, Y., Honda, M., *et al.* (2006) Intra-seasonal relationship between the Northern Hemisphere sea ice variability and the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **33**, L14711.
- [8] 杨金虎, 江志红, 魏锋等 (2009) 近 45a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应. *干旱区地理*, **29**, 625-631.
- [9] Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., *et al.* (2002) Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, **19**, 193-212.
- [10] Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P.Y., *et al.* (2000) Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **81**, 417-426.
- [11] Kosaka, Y. and Xie, S.-P. (2013) Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403-407.
- [12] 翟盘茂, 潘晓华 (2003) 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, **58**, 1-10.
- [13] North, G.R., Bell, T.L., Cahalan, R.F., *et al.* (1982) Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, **110**, 699-706.
- [14] Kenyon, J. and Hegerl, G.C. (2008) Influence of modes of climate variability on global temperature extremes. *Journal of Climate*, **21**, 3872-3889.
- [15] Wu, B., Handorf, D., Dethloff, K., *et al.* (2013) Winter weather patterns over Northern Eurasia and Arctic sea ice loss. *Monthly Weather Review*, **141**, 3786-3800.
- [16] 龚道溢, 朱锦红, 王邵武 (2002) 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析. *高原气象*, **21**, 8-14.
- [17] Gong, D.Y. and Ho, C.H. (2002) The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, **72**, 1-9.