氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系

韩永秋 周连童 黄荣辉

Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon

HAN Yongqiu ZHOU Liantong HUANG Ronghui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及ENSO的作用

The Relationship between the East Asian Winter Monsoon Anomaly and the Subsequent Summer Monsoon Onset over the South China Sea and the Impact of ENSO

气候与环境研究. 2018, 23(4): 401 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17026

1961~2014年中国冬季极端低温变化特征分析

Changes in Extreme Low Temperature in China in the Winters from 1961 to 2014

气候与环境研究. 2018, 23(4): 429 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034

2018/2019年冬季浙江罕见持续阴雨天气的环流异常与海温强迫

Circulation Anomaly and Sea Surface Temperature Forcing in Rare Continuous Rainy Weather in Zhejiang during the Winter of 2018/2019

气候与环境研究. 2020, 25(5): 510 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060

2018年和2008年1～2月影响我国的持续低温事件及其对比分析

Comparison of Persistent Cold Events in China during JanuaryFebruary of 2018 and 2008

气候与环境研究. 2020, 25(6): 601 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19154

夏、秋季北极海冰异常与秋、冬季青藏高原极端低温日数的关系及影响机理

Relationship of Arctic Sea Ice Coverage Anomalies in Summer-Autumn and Extreme Cold Days over the Tibetan Plateau in Autumn-Winter and the Mechanism

气候与环境研究. 2017, 22(4): 435 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15170

清江流域水热关系与东亚夏季风的联系

Correlation of Surface Air Temperature and Precipitation in the Qingjiang River basin and Its Connection with the East Asian Summer Monsoon

气候与环境研究. 2020, 25(6): 677 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20035

关注微信公众号，获得更多资讯信息

韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 2021. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系 [J]. 气候与环境研究, 26(1): 1−17. HAN Yongqiu, ZHOU Liantong, HUANG Ronghui. 2021. Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 1−17. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018

中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系

韩永秋[1,2] 周连童[1] 黄荣辉[1]

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心，北京 100190
2 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 利用 1961～2012 年全国 553 站逐日最低气温资料，根据百分位值法，定义了不同台站的极端低温阈值，并统计分析了逐年逐站发生极端低温事件的频数，并且使用经验正交函数分解（EOF）的方法对其时空变化特征进行了研究。研究结果表明：近 51 年来，我国冬半年极端低温事件总体呈明显的减少趋势，但仍存在明显的时空差异。EOF 分析结果显示我国极端低温事件发生频率主要存在 3 种空间模态，即空间一致型和南北振荡型以及东西振荡型。并且对 PC1（第一主分量）时间序列作突变检验的结果表明，我国冬半年极端低温事件频数在 1986 年前后存在明显突变现象，这与 1986 年前后东亚冬季风发生年代际突变时间点一致。进一步相关回归分析结果表明，我国冬半年极端低温事件频数与东亚冬季风指数存在很好的相关性，这可能与西伯利亚高压的变化有显著的联系，即冬半年西伯利亚高压强时，极端低温事件发生较多，反之亦然。分析的结果表明，1986 年前后，中国冬半年极端低温事件发生频次的突变可能与西伯利亚高压的南移并且减弱有关。

关键词 极端低温 东亚冬季风 时空特征 冬半年
文章编号 1006-9585(2021)01-0001-17 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018

Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon

HAN Yongqiu[1,2], ZHOU Liantong[1], and HUANG Ronghui[1]

1 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190
2 *College of Earth Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract Based on the daily minimum temperature dataset from 553 stations in China from 1961 to 2012, extreme low temperature (ELT) thresholds are determined for different stations, and occurrence frequency of ELT events during boreal winter for each station is estimated and analyzed using empirical orthogonal function (EOF). The relationship between ELT events and East Asian winter monsoon (EAWM) circulation is studied. The results suggest that the ELT events in China during the boreal winter have remarkably decreased in the past 51 years, with some spatial and temporal

收稿日期 2019-02-14；**网络预出版日期** 2020-12-07
作者简介 韩永秋，男，1990 年出生，博士研究生，主要从事冬季风的研究。E-mail: yqhan@mail.iap.ac.cn
通讯作者 周连童，E-mail: zlt@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41475053，中国科学院前沿科学重点研究项目 DYZDY-SSW-DQC024
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41475053), Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (Grant DYZDY-SSW-DQC024)

differences. The results of EOF analysis show that there are three main spatial modes in the ELT events in China, namely, the spatial uniformity mode, the North–South Oscillation mode, and the East–West Oscillation mode. In addition, the results of mutation test of the PC1 (the first pricipal component) series show that the abrupt change phenomenon of the occurrence frequency of ELT events during boreal winter is ubiquitous and occurred around 1986. Furthermore, the results of correlation analysis show that a good relationship was found between the frequency of ELT events and EAWM index, which may be due to the changes of the Siberian High. Besides, the results of composite analysis suggest that the abrupt change around 1986 may have something to do with the obviously southwardly movement and a weakening trend of the Siberian High.

Keywords Extreme low temperature, East Asian winter monsoon, Spatial and temporal characteristics, Boreal winter

1 引言

近些年来，全球气候变暖，极端天气事件频繁发生，已经对社会经济和人类活动造成了严重危害。IPCC-AR5 报告（IPCC, 2013）指出，较 AR4 报告相比，气候变暖要比原来认识到的更加严重（IPCC, 2007）。报告还指出，气候变暖是非常明确的，且从 1950 年以来的气候变化是千年以来所未见的；1983～2012 年这 30 年可能是北半球自 1400 年以来最热的 30 年。IPCC-AR4 报告显示，到 2100 年大气中 CO_2 体积分数将大幅度增加，全球变暖趋势会更加明显，极端事件的发生会更加地频繁。据统计，在 1980～2005 年，全世界发生的 7500 次自然灾害，夺去了超过 200 万人的生命，造成了约 1.2 万亿美元的经济损失；大约 90% 的自然灾害、72.5% 的伤亡人数、75% 的经济损失都是与干旱、洪水、热带气旋、高温热浪、低温冷害等极端天气气候有关的灾害引起，或者与气象条件直接相关的流行病和病虫害引起（陈磊, 2011）。在我国，暴雨、高温、低温灾害、雪灾、寒潮、热带气旋、沙尘暴等气象灾害每年频发，已成为世界上遭受气象灾害最严重的国家之一。气象灾害不仅造成严重损失，而且会引发或衍生其他灾害，对经济建设、社会安定和人民生命财产安全构成了极大的威胁。因此，深入开展极端天气气候事件变化的研究有着十分重要的意义。

极端温度事件作为极端天气气候事件的组成部分，它和全球变暖有着非常密切的关系，可以说，它受到气候变化最直接的影响。相对于极端高温事件的加剧发生，极端低温对人类的生产生活产生的影响也是不容忽视的研究（Su et al., 2006; Yang et al., 2008; Pal and Al-Tabbaa, 2010）。极端低温的变化要比极端高温的变化更加剧烈，同时，极端低温事件发生的频率和强度在一定程度上影响着部分农作物的生长，因此，对极端低温事件的研究对生态学也有着重要的意义；此外，极端低温事件的发生往往伴随着冰冻雨雪灾害的发生，可能造成严重的经济损失，因此，对极端低温事件的研究有助于掌握灾害性天气发生的变化规律，对极端天气气候灾害的监测预报有着一定的指导意义。

随着人们对全球变暖问题关注度的提高，国内外专家学者对极端温度事件的发生变化展开了一系列的研究和分析。Griffiths et al.（2005）对亚太地区 1961～2003 年极端温度的研究结果显示，大部分站点的最高和最低温度都在升高，冷日和冷夜频数都在减少，暖夜频数在增加，但冷日和冷夜频数的减少趋势并不明显；其中，中国、韩国、澳大利亚以及日本的部分地区最高和最低温度在降低，斐济和所罗门之间的地区最高温度有明显增大趋势。Alexander et al.（2006）通过对全球极端温度变化的研究，解释了在全球变暖的背景下，极端温度有了明显的改变，但极端低温的变化更为剧烈，并且在全球陆地 70% 的地区冷夜频数都有明显减少，同时，暖夜频数显著增加。Brabson and Palutikof（2002）对英国中部地区的研究表明，在 1772～2000 年，英国中部地区冬季极端低温事件和夏季极端高温事件的发生频次分别在持续减少和增加，而极端低温事件的变化更加明显。

国内的一些学者在极端温度方面也做了许多研究工作。付冬雪等（2011）对中国 1955～2006 年冬半年极端低温的时空特征和变化趋势进行了分析，结果表明，在全国范围内，冬半年极端低温频数变化一致，均呈减小趋势，1983 年前后发生了明显的突变，中国冬半年年极端低温事件频数的空间差异明显，各区域极端低温频数突变的年份均不一致，且突变前后的极端低温频数存在较大差异。刘雅星

等（2010）对 1961～2006 年我国 599 个实测台站冬季逐日平均温度资料的分析显示，近 46 年来冬季最低最高温度均呈上升趋势，且 2 月份所占的权重最大，气温季较差在北方明显大于南方；冬季低温频数在东北无明显变化，华东地区变化最大，严寒日数在东南大部分地区无明显变化，北方变化显著。马柱国等（2003）通过对我国北方极端事件的研究，发现我国北方地区年最低温度存在升高趋势，冷日数显著减少，暖日数呈显著增多趋势，冬季零温度天数在普遍减少，北方东部地区无霜期明显减少。杨金虎等（2006）对西北地区年极端高、低温变化的研究结果表明，近 45 年来中国西北年极端低温事件发生频次的减少趋势比年极端高温事件发生频次的增加趋势更加明显；极端低温事件发生和结束的时间分别在推迟和提前，极端高温事件正好相反。王晓娟等（2012）采用区域性极端低温事件客观识别技术对 1960～2009 年的区域性极端低温事件进行检测和分析，区域性极端低温事件指标中最低温度和几何中心纬度的频次分布为双峰特征，发生频次较高的纬度主要位于 30°N 和 42°N 附近，且 1980 年代中期以前南北两个带并存，之后则以 30°N 附近为主；1960～2009 年极端低温事件的发生频次、强度等呈总体减弱趋势，在 1980 年代后期存在显著的转折，1990 年代后期变化逐渐趋于平缓。

以往对中国极端低温事件的研究主要集中在对其时空分布特征的分析，而与东亚冬季风（Chan and Li, 2004）的联系很少提及。东亚地区作为典型的季风区，天气气候变化与季风活动有着密切的关系。因此，本文研究分析了极端低温事件与东亚冬季风的关系。东亚冬季风是北半球冬季最活跃的环流系统之一。东亚冬季风的主要特征就就是沿着西伯利亚高压和东亚沿岸有很强的东北风。在日本上空 500 hPa 存在着大槽，并且在 200 hPa 高空有显著的西风急流，最大出现在日本东南上空的位置。（Lau and Chang, 1987; Boyle and Chen, 1987; Ding, 1994; Wu and Chan, 1995; Compo et al., 1999; Chen et al., 2000; 王林等, 2009）。东亚冬季风强度在源地主要与西伯利亚高压的变化关系密切，在对流层中高层主要表现为 500 hPa 东亚大槽的强弱变化，与东亚冬季风的变化相对应，北半球大型环流场的配置同样有相应的变化，因而，先后通过描述环流场特征的变化来定义东亚冬季风指数（武炳义和黄荣辉, 1999; 曾琮等, 2005）。冷高压离开西伯利亚地区向南爆发产生的偏北风即是冬季风，东亚冬季风以低空风系为主要特征，大气对流层低层和地面经向风的变化在一定程度上可以反映冬季冷涌的强弱，一般情况下，冬季北风异常表示冷空气活动频繁，反之，则表示冷空气活动弱，因此，一些学者从风场特征或中纬度西风急流的变化出发，研究了东亚冬季风指数的定义方法（Ji and Sun, 1997; Chen et al., 2000）。

裴顺强和李崇银（2007）利用 Hadley 中心近百年的北半球海平面气压场资料分析研究了东亚冬季风的年际和年代际变化及其异常特征，结果表明，东亚冬季风不仅存在着明显的年际变化，主要有准两年的振荡周期和 5～7 年左右的周期，还存在周期为 25～30 年左右以及周期为十几年的年代际变化，此外，还系统研究了东亚冬季风异常时的大气环流特征。将东亚冬季风和冷涌的演变特征，与南亚作对比，王启祎和丁一汇（1997）发现在东亚地区，冬季风演变主要表现为 10 月中旬经向环流的突变及 9 月初、11 月中旬和 1 月末对流层低层温度的 3 次突变，而在南亚地区，经向环流的变化不如东亚地区明显，而且高层要先于低层变化，对流层低层温度存在 2 次突变，在整个冬季，东亚地区冷涌的演变过程，主要表现为：南海地区冷涌在 12 月份出现最高频率，而西太平洋冷涌在 1 月份出现最高频率；南亚地区冷涌在 12 月份出现最高频率，但远小于东亚地区且衰减速度很快，另一个不同点是东亚地区的冷涌强度是往上衰减的，而南亚地区的冷涌强度则是往上增强的。

东亚冬季风的异常变化不仅会给东亚地区带来灾害性天气，特别是东亚冬季风对亚洲大陆中高纬地区、中国、包括江淮流域、广东等地的气温和降水的影响显著（赵汉光和张先恭, 1996; 施能, 1996; 龚道溢等, 2002; Zhou and Wu, 2010; Zhou, 2011）。而且对全球范围内的大气环流有着重要的影响（Ramage, 1975; Chang et al., 1979, 2006; Lau and Chang, 1987; Yang et al., 2002）。

通过以上对极端低温事件和东亚冬季风的研究回顾，可以发现以下几个问题：

（1）以往的研究一般同时对极端高温和极端低温事件进行研究，针对极端低温事件的独立性以及其时空变化特征的研究还不多；

（2）在以往的研究中，对我国极端低温事件产生年际、年代际变化的原因的解释还不是很清楚，

特别是与冬季风的联系。

因此，本研究将利用更详细的观测台站资料开展我国冬半年极端低温事件的发生时空变化特征及其与东亚冬季风等大气环流的联系的研究。

2 数据与方法

2.1 资料选取与处理

本文所用台站资料来自国家气候中心整编的全国 758 个基本（基准）站逐日最低气温资料。考虑到各台站数据长度不一和缺测情况不同，根据研究需要，从 758 站资料中筛选得出 553 个台站的 1961～2012 年的逐日最低温度资料序列。所选台站分布情况如图 1 所示，明显可以看出，在中国华南、华东地区站点分布较密，而在西部、西北地区站点分布较少。

本文所用格点资料是 1961～2012 年的美国国家环境预测中心及国家大气研究中心发布的全球逐月再分析资料（National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR Reanalysis Ⅰ）（Kalnay et al., 1996）（NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at https://psl.noaa.gov/[2018-11-21]），要素包括位势高度场、海平面气压场、风场、10 m 风场的月平均值，其水平分辨率为 2.5°×2.5°经纬度网格。本文所讨论的时间段为冬半年，即 11 月至次年 3 月，因此，下文中 1961/1962 年的写法即表示 1961 年 11、12 月份及 1962 年 1、2、3 月份 5 个月定义的冬半年，简单记为 1961 年冬半年。

2.2 极端低温事件的定义

本文参考了一些关于极端温度的定义方法（潘晓华等, 2002; 张宁等, 2008; 付冬雪等, 2011），采取如下规则：针对每个站，将 1961～2012 年冬半年逐年日最低温度资料按照升序排列，取第五个百分位的值定义为该测站的冬半年极端低温阈值，如此，得到 553 站每个站的冬半年极端低温阈值，如果该测站冬半年某日最低温度低于或等于该测站极端低温阈值，则认为该日发生了极端低温事件，把每年发生的极端低温事件的次数累加得到该年极端低温事件频数。

图 2 给出的是中国冬半年极端低温阈值的分布情况，可以看出，全国大部分地区，极端低温阈值在 0℃ 以下，黑龙江漠河站极端低温阈值低至 −42.4℃；华南以及西南部分地区、四川盆地等地区极端低温阈值在 0℃ 以上，部分地区达到 10℃

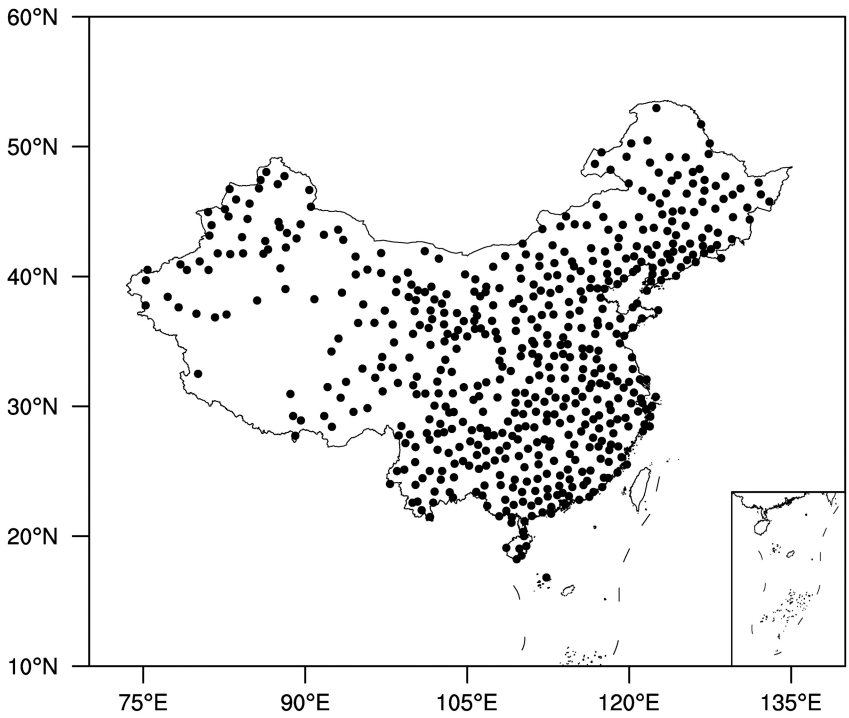

图 1 所用 553 站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 553 stations

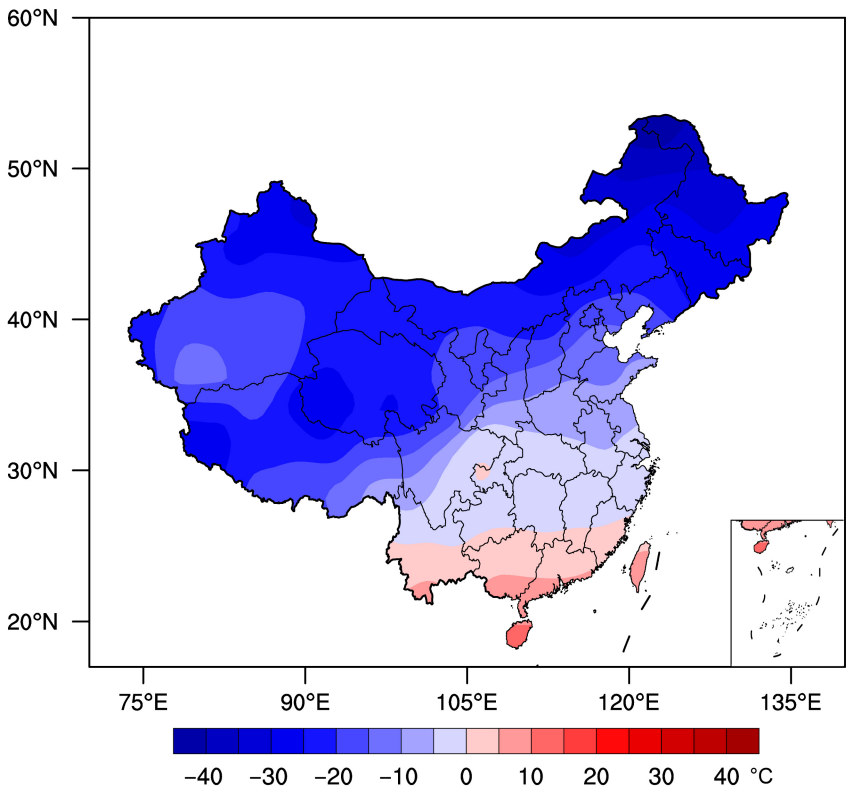

图 2　中国冬半年极端低温阈值分布

Fig. 2　Distribution of the thresholds of the extreme low temperature in China during boreal winter

以上，海南西沙站更是达到 20℃。

2.3　冬季风指数

本文采用的东亚冬季风指数（Wu and Wang, 2002）是根据西伯利亚高压和阿留申低压强度之差来定义的。Wang and Chen（2010）的研究，该指数不仅计算简单，而且是一个与我国冬季气温相关很好的指数。该指数定义如下：

$$I_{\mathrm{EAWM}} = \frac{(M_{\mathrm{t}} - \overline{M})}{\sigma_M}, \qquad (1)$$

其中，

$$M_{\mathrm{t}} = \sum_{i=1}(P_{\mathrm{S},110°\mathrm{E}} - P_{\mathrm{S},160°\mathrm{E}}), \qquad (2)$$

上式中，$P_{S,110°E}$和$P_{\mathrm{S},160°\mathrm{E}}$分别为 110°E 和 160°E 冬半年平均海平面气压，M_{t}表示 1961～2012 年某一年冬半年的 110°E 和 160°E 海平面气压差沿 20°N～70°N 记 50 个纬距之和，$\overline{M}$表示 1961～2012 年冬半年M_{t}的数学期望，而σ_M为M_{t}的方差，i表示从 20°N 到 70°N 记 50 个纬距，间隔为 2.5°，共 20 个纬度点。若I_{EAWM}的正值越大，则表明西伯利亚高压与阿留申低压之差越大，即东亚冬季风越强。

另外，本文还比较了用 10 m 经向风场定义的东亚冬季风指数（Chen et al., 2000）。该指数是将东海（25°N～40°N，120°E～140°E）和南海（10°N～25°N，110°E～130°E）两个区域的 10 m 纬向风进行区域平均计算得到。

3　中国冬半年极端低温事件的时空变化特征

为了分析中国冬半年极端低温事件的时空分布特征，本文利用 1961～2012 年我国 553 测站冬半年极端低温事件频数进行经验正交函数分解（EOF）分析（黄嘉佑, 2004）。从 EOF 分析可得到我国冬半年极端低温频数存在以下 3 种主要模态：

3.1　全国一致变化型模态

图 3a 和 3b 分别是中国 1961～2012 年冬半年极端低温事件频数 EOF 分析第一模态（EOF1）的空间分布和相对应的时间系数序列。从图 3a 可以看出，中国冬半年极端低温事件频数 EOF1 的空间分布呈现全国一致型变化分布（除青藏高原部分地区），EOF1 的方差贡献为 43.2%。这表明我国冬

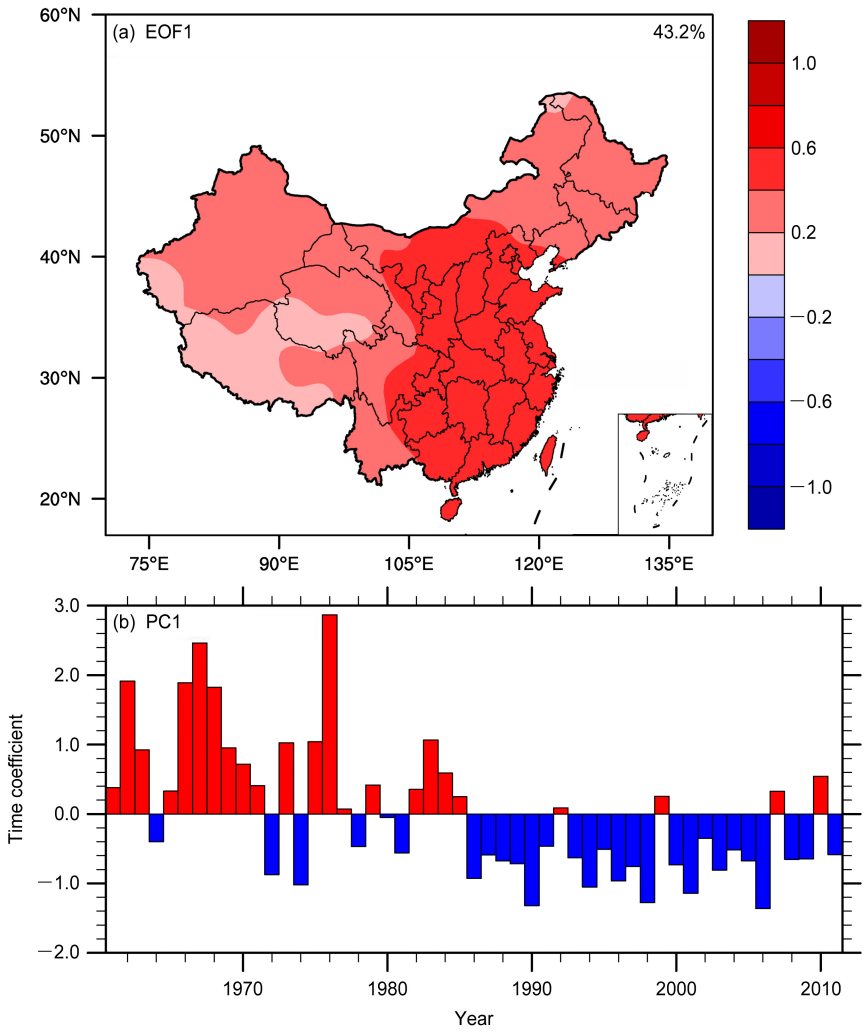

图 3 中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析（a）第一模态（EOF1）的空间分布和（b）相对应的时间系数序列。EOF1 说明总方差的 43.2%

Fig. 3 (a) Spatial distribution of EOF1 (the first mode of empirical orthogonal function), and (b) the corresponding time coefficient sequence of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012. EOF1 accounts for 43.2% of the total variance

半年极端低温事件总体上呈现相同的变化趋势，并且，从图 3b 时间系数序列可以看出，我国冬半年极端低温事件存在明显的年代际振荡特征。在 1961～1985 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF1 时间系数大多数年份为正值，结合图 3a，这表明此期间冬半年极端低温事件发生频数普遍偏多，出现正异常；而 1986～2012 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF1 时间系数普遍为负值，结合图 3a 空间模态，这表明此期间冬半年极端低温事件发生频数普遍偏低，出现负异常，全国气温偏暖。

3.2 南北振荡变化型模态

图 4a 和 4b 分别是中国 1961～2012 年冬半年极端低温事件频数 EOF 分析第二模态（EOF2）的空间分布和相对应的时间系数序列，EOF2 的方差贡献为 11.2%。从图 4a 可以看出，中国冬半年极端低温事件频数 EOF2 的空间分布呈现南北振荡型变化特征，即我国西北、东北和华北与我国南方和西南地区冬半年极端低温事件发生频数变化呈现相反的变化特征，当我国南方和西南地区出现极端低温事件偏少时，则我国西北、华北、东北地区发生极端低温事件偏多，并且，从图 4b 时间系数序列可以看出，南北振荡型存在明显的年际振荡特征。但也同时存在年代际震荡特征，1964～1981 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF2 的时间系数普遍为正，结合图 4a 空间模态，我国东北、华

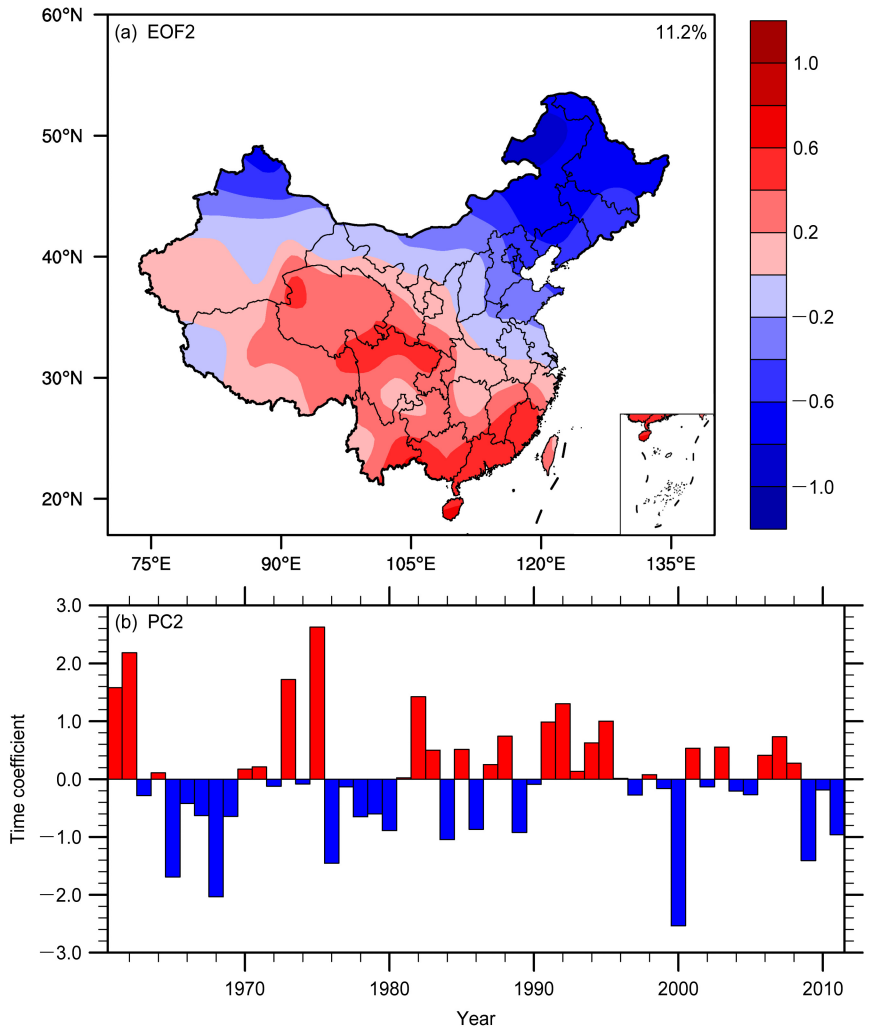

图 4　中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析（a）第二模态（EOF2）的空间分布和（b）相对应的时间系数序列。EOF2 说明总方差的 11.2%

Fig. 4　(a) Spatial distribution of EOF2 (the second mode of empirical orthogonal function), and (b) the corresponding time coefficient sequence of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012. EOF2 accounts for 11.2% of the total variance

北和西北地区极端低温事件发生频数偏多，而华南、华东和西南地区发生频数明显偏少；而 1982～1996 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF2 的时间系数普遍为负，结合图 4a 空间模态，我国东北、华北和西北地区极端低温事件发生频数偏少，而华南、华东和西南地区发生频数明显增多；此外，1997～2012 年期间，EOF2 的时间系数主要呈现正负相间的特征，存在明显的年际变化特征。

3.3　东西振荡变化型模态

图 5a 和 5b 分别是中国 1961～2012 年冬半年极端低温事件频数 EOF 分析第三模态（EOF3）的空间分布和相对应的时间系数序列，EOF3 的方差贡献为 7.5%。从图 5a 可以看出，中国冬半年极端低温事件频数 EOF3 的空间分布呈现东西振荡型变化特征，即我国东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区和我国西北以及我国中部狭长地带冬半年极端低温事件发生频数呈现相反的变化特征。当我国东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区发生极端低温发生偏多时，而我国西北以及我国中部狭长地带冬半年极端低温事件发生偏少。并且，从图 5b 时间系数序列可以看出，东西振荡型也存在明显的年代际振荡特征。1961～1981 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF3 的时间系数普遍为正，结合图 5a 空间模态，我国东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区极端低温事件发生频数偏多，西北以及我国中部狭长地带冬半年极端

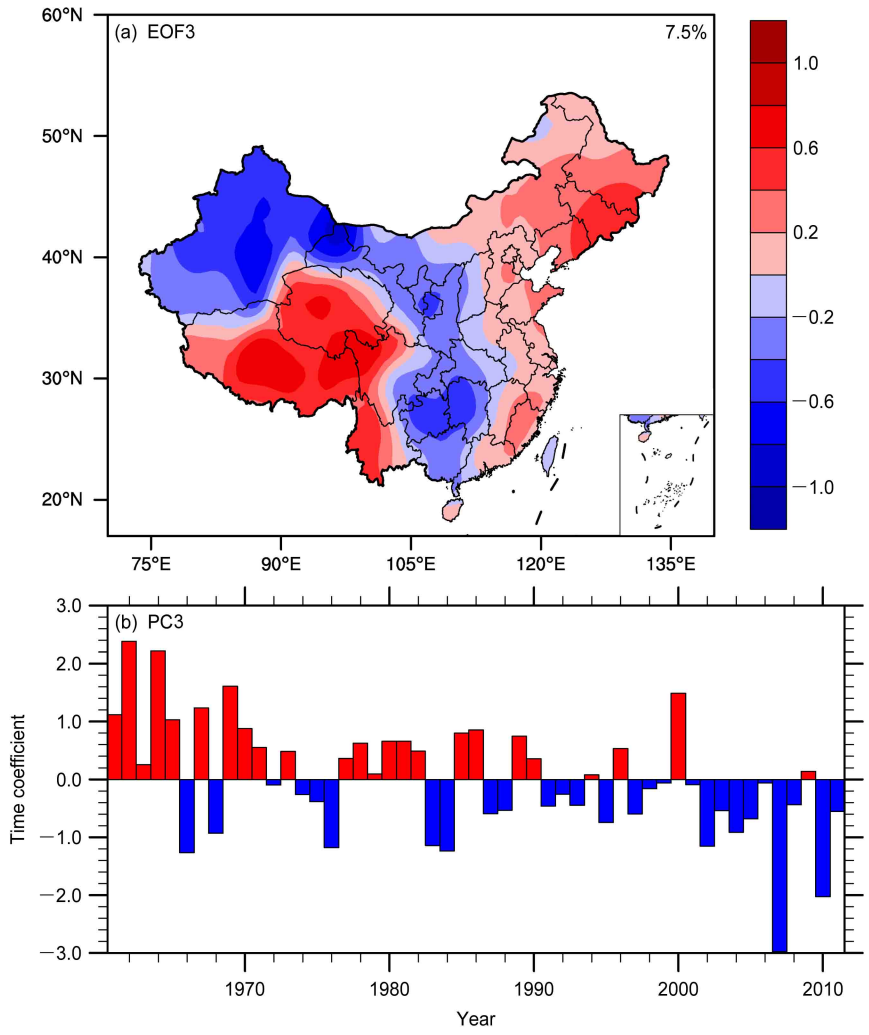

图 5 中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析（a）第三模态（EOF3）的空间分布和（b）相对应的时间系数序列。EOF3 说明总方差的 7.5%

Fig. 5 (a) Spatial distribution of EOF3 (the third mode of empirical orthogonal function), and (b) the corresponding time coefficient sequence of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012. EOF3 accounts for 7.5% of the total variance

低温事件发生偏少；而 1982～2012 年期间，我国冬半年极端低温事件频数 EOF3 的时间系数普遍为负，结合图 5a 空间模态，东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区发生极端低温发生偏少，而西北以及我国中部狭长地带冬半年极端低温事件发生增多。

4 中国冬半年极端低温事件与冬季大气环流的关系

东亚冬季风系统是北半球冬季最活跃的环流系统之一，主要成员为低层风场上亚洲东岸引导极地冷空气南下的强劲西北气流，海平面气压场上的高纬西伯利亚高压和北太平洋洋阿留申低压，500 hPa 位势高度场上中国大陆东岸至日本上空的东亚大槽，以及日本南部对流层高层的强盛东亚急流。这些系统成员相互联系、相互影响，在环流场上紧密配合，共同影响中国冬季气温。由于篇幅限制，下面将从仅前两个主分量（PC1 和 PC2）分析其年际和年代际与大尺度环流特征的联系。

图 6 是 PC1 与海平面气压、850 hPa 风场、500 hPa 位势高度场以及 200 hPa 纬向风场的回归相关分布图，由图 6a 可见，中国冬半年极端低温发生频数与中高纬度陆地上海平面气压呈明显的正相关关系，即与西伯利亚高压出现正相关，在北太平洋地区出现显著的负相关，即与阿留申低压出现负相关关系。这说明了我国冬半年极端低温发生地频数与西伯利亚高压的强度有着显著的关系。西伯

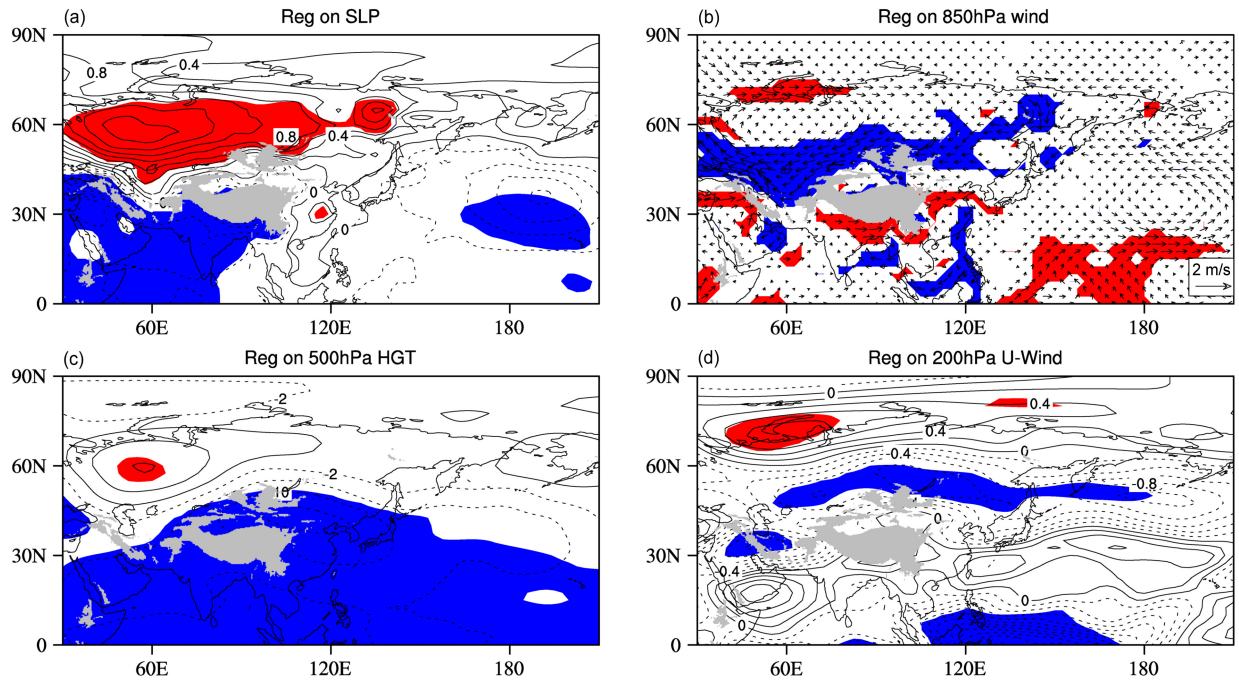

图 6　1961～2012 年中国冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1 与（a）海平面气压、（b）850 hPa 风场、（c）500 hPa 位势高度场以及（d）200 hPa 纬向风场的回归相关分布。填色区均通过 99% 信度检验，地形超过 1500 m 的区域灰色覆盖

Fig. 6　Regression of (a) the sea level pressure, (b) winds at 850 hPa, (c) geopotential height at 500 hPa, and (d) wind at 200 hPa with respect to PC1 (the first principal component) of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012. The shaded regions are for values significant at or above the 99% confidence level. The terrain of more than 1500 m is covered in gray

利亚高压作为东亚季风的主要成员之一，对全球大气环流特别是东亚冬季风有着重要的影响（伍荣生, 1999; 侯亚红等, 2007）。这也说明了冬季风偏强，使我国极端低温出现的频率越高。

从低层 850 hPa 风场可以看到（图 6b），在中国东北地区和东南沿海出现东北风异常。这表明北风异常偏强对应着我国极端冬季低温事件发生频率增多。在 500 hPa 高度场上（图 6c），东亚地区上空显著的负高度异常，并且显示出该负中心的位置偏南偏东，也就是暗示着东亚大槽的位置偏南偏东，有利于我国出现强冷空气或者寒潮的发生。从 200 hPa 纬向风场可以发现（图 6d），显著的西风异常出现在高纬度地区，在中纬度地区出现东风异常，这表明急流位置偏北，西风急流偏弱。这也暗示着西风急流与我国极端冬季低温事件发生频率密切相关。

从以上结果可以说明，我国冬半年全国一致型空间形态的极端低温事件发生的频率高低与西伯利亚高压、低层风场东亚大槽和西风急流都有着显著地关系。众所周知，这些要素场都与东亚冬季风的强弱密切相关。因此，东亚冬季风的强弱，直接影响了全国极端低温事件发生的频率。为了进一步证明极端低温事件与东亚冬季风的关系，我们用东亚冬季风指数来表征东亚冬季风的强度。自开始研究冬季风至今，已有二三十种季风指数的定义方法（Wang et al., 2010; 邵鹏程和李栋梁, 2012），但是各种指数的定义标准都有各自的特点，并不是所有的季风指数都能表征一个特定问题。本文主要研究冬半年极端低温事件，基于此，本文选用 Wu and Wang（2002）定义的东亚冬季风指数，该指数与我国冬季气温和环流有很好的相关性（Wang and Chen, 2010; 黄荣辉等, 2014）。冬季风指数与第一模态极端低温事件发生频率做了相关分析（表 1），两者出现显著的正相关关系，超过 99% 的信度检验。

图 7 是 PC2 与海平面气压，850 hPa 风场，500 hPa 位势高度场以及 200 hPa 纬向风场的回归相关分布图，由图 7a 可见，中国冬半年第二模态极端低温事件发生频率与中高纬度陆面海平面气压呈明显的负相关关系，即与西伯利亚高压出现负相关，在北太平洋地区出现显著的正相关，即与阿留申低压出现正相关关系。这表明我国极端低温事件发生出现南北振荡型时对应西伯利亚高压偏弱，即也对应着东亚冬季风偏弱时。

表 1　1961～2012 年各冬季指数与中国冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1、PC2 的相关系数

Table 1　Correlation coefficients between various winter indices and the PC1 and PC2 of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012, respectively

	相关系数				
	EAWM指数	AO指数	NAO指数	NINO3.4指数	PDO指数
PC1	0.36**	−0.35**	−0.42**	−0.19	−0.08
PC2	−0.01	0.43**	0.29*	−0.24	−0.21

*表示通过95%信度检验，**表示通过99%信度检验。

从低层 850 hPa 风场可以发现（图 7b），在中国东北地区以及东南沿海出现东北风异常，但在高纬度地区出现显著的西南风异常。这种低层风场形式有利于我国极端低温事件发生出现南北振荡型。在 500 hPa 高度场上（图 7c），东亚地区上空中高纬度出现显著的正高度异常，在中低纬地区出现显著的负异常。并且显示出该负中心的位置偏南偏东，也就是暗示着东亚大槽的位置偏南偏东，这不利于我国出现强冷空气或者寒潮的发生，有利于我国极端低温发生频率出现南北振荡型。从 200 hPa 纬向风场可以发现（图 7d），相比图 6d，更显著的西风异常出现在高纬度地区，在中纬度地区仍出现东风异常，这表明急流位置偏北，西风急流偏弱。这也暗示着西风急流偏弱与我国极端冬季低温事件发生频率的南北振荡型密切相关。

从以上结果说明，对比第一模态，我国冬半年极端低温事件发生频率的南北振荡型与西伯利亚高压和东亚大槽有着显著的相关关系。而低层风场和高层的西风急流并不会造成极端低温事件发生频率的空间变化。从表 1 可以发现，冬季风指数与我国极端低温事件发生频率的南北振荡型做了相关分析，两者出现不显著的负相关关系。也就是说我国极端低温事件发生频率出现南北振荡的空间形态和冬季风的关系并不显著。

5　中国冬半年极端低温事件的年代际变化

从图 3b 我们可以发现极端低温频数在 20 世纪 80 年代中期发了年代际转变（符淙斌, 1994）。为了客观的验证这次年代际转变，我们利用滑动

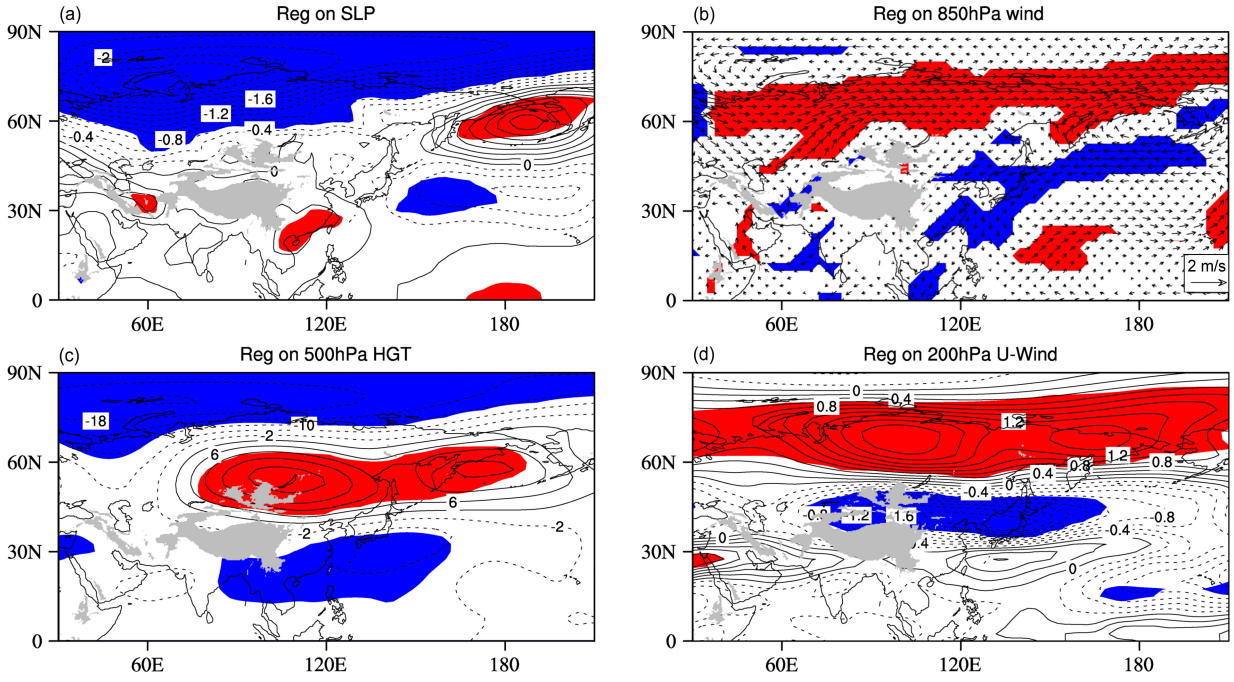

图 7　中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC2 与（a）海平面气压、（b）850 hPa 风场、（c）500 hPa 位势高度场以及（d）200 hPa 纬向风场的回归相关分布。填色区均通过 99% 信度检验，地形超过 1500 m 的区域灰色覆盖

Fig. 7　Regression of (a) the sea level pressure, (b) winds at 850 hPa, (c) geopotential height at 500 hPa, and (d) wind at 200 hPa with respect to PC2 (the second principal component) of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in Chinaa from 1961 to 2012. The shaded regions are for values significant at or above the 99% confidence level. The terrain of more than 1500 m is covered in gray

t 检验的方法对 EOF 分析的第一主分量时间序列 PC1 作突变检验，如图 8 所示，我们可以发现近 51 年来冬半年极端低温事件发生了明显突变，中国冬半年极端低温事件频数在 1986 年前后发生了明显的年代际跃变。

因此，本文将研究时段 1961～2011 年冬半年以 1986 年为突变年份，分为两个时段进行合成分析，即 1961～1986 年和 1987～2012 年。在研究中发现（丁一汇等, 2014），东亚冬季风从 1950 年到 1986/1987 年，明显偏强，从 1986/1987 年冬季开始，东亚冬季风减弱。

图 9 是 PC1 与 1961～1986 时段海平面气压、850 hPa 风场、500 hPa 位势高度场以及 200 hPa 纬向风场的回归相关图。我们可以发现，图 9a 与图 6a 类似，在 1961～1986 年时段，中国冬半年极端低温发生频数与中高纬度陆地上海平面气压呈明显的正相关关系，即与西伯利亚高压出现正相关，在北太平洋地区出现显著的负相关，即与阿留申低压出现负相关关系。也就是说在 1987 年之前，西伯利亚高压与阿留申低压与中国冬半年极端低温发生频数的关系没有变化。

从图 9b 我们可以发现，低层 850 hPa，在中国东北和东南沿海地区出现东北风异常，这也与图 5b 类似。在 500 hPa 高度场上（图 9c），东亚地区上空显著的高度场负异常，显著性区域增大了，但是该负中心的位置和图 6 类似。从 200 hPa 纬向风场可以发现（图 9d），急流位置偏北，东亚大陆上空显著的东风异常，这也与图 6d 类似。从以上结果可以说明，在 1961～1986 年期间，我国冬半年全国极端低温事件发生的频率空间一致型的高低与也西伯利亚高压、低层风场东亚大槽和西风急流都有着显著地关系。

图 10 是 PC1 与 1987～2012 年时段海平面气压，850 hPa 风场，500 hPa 位势高度场以及 200 hPa 纬向风场的回归相关图。1987～2012 年时段，中国冬半年极端低温发生频数与中高纬度陆地上海平面气压呈明显的正相关关系，但与之前时间段相比，这个正相关位置明显偏东偏南，并且正相关范围缩小。这说明西伯利亚高压偏南偏东并且强度减弱。在北太平洋地区出现显著的负相关，即与阿留申低压出现负相关关系。这和前时间段相比变化不大。也就是说在 1987 年之后，西伯利亚高压的位置偏东并且他的减弱对中国冬半年极端低温发生频数有显著的影响。

从图 10b 我们可以发现，低层 850 hPa，在中国东北地区以及东南沿海出现东北风异常。在 500 hPa 高度场上（图 10c），东亚地区上空显著的高度场负异常，相比于 1961～1986 时段（图 9c），该负中心的位置基本相同。从 200 hPa 纬向风场可以发现（图 10d），西风急流的空间形态与 1987 年之前基本相似，但是中纬度上风异常显著性减弱了。这些结果说明了我国冬季极端低温事件发生频率出现年代际转变主要受到西伯利亚高压的影响。相关分析结果显示：东亚冬季风在 1987 前后都与我国极端事件有着显著的关系（表 2）。这说明东亚冬季风对于我国极端低温事件的年际和年代际变化有都有着密切关系。

先前的研究结果表明（侯亚红等, 2007），在年代际时间尺度上，西伯利亚高压随时间向南推进，这一结果可以解释位于蒙古、中国内蒙古北方的一个正值中心。其次，由图上可以看出，在上述定义的关键区域（50°N～70°N，60°E～120°E），普遍

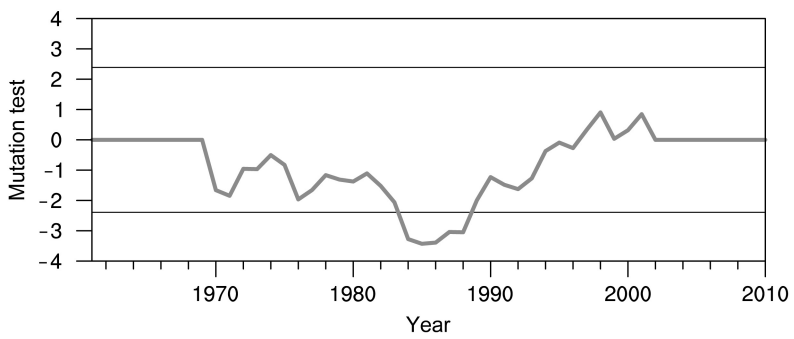

图 8　中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1 时间序列突变检验。黑色实线（±2.39）为 99% 信度检验

Fig. 8　Mutation test of PC1 series of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012. Black solid line (±2.39) is the 99% confidence test

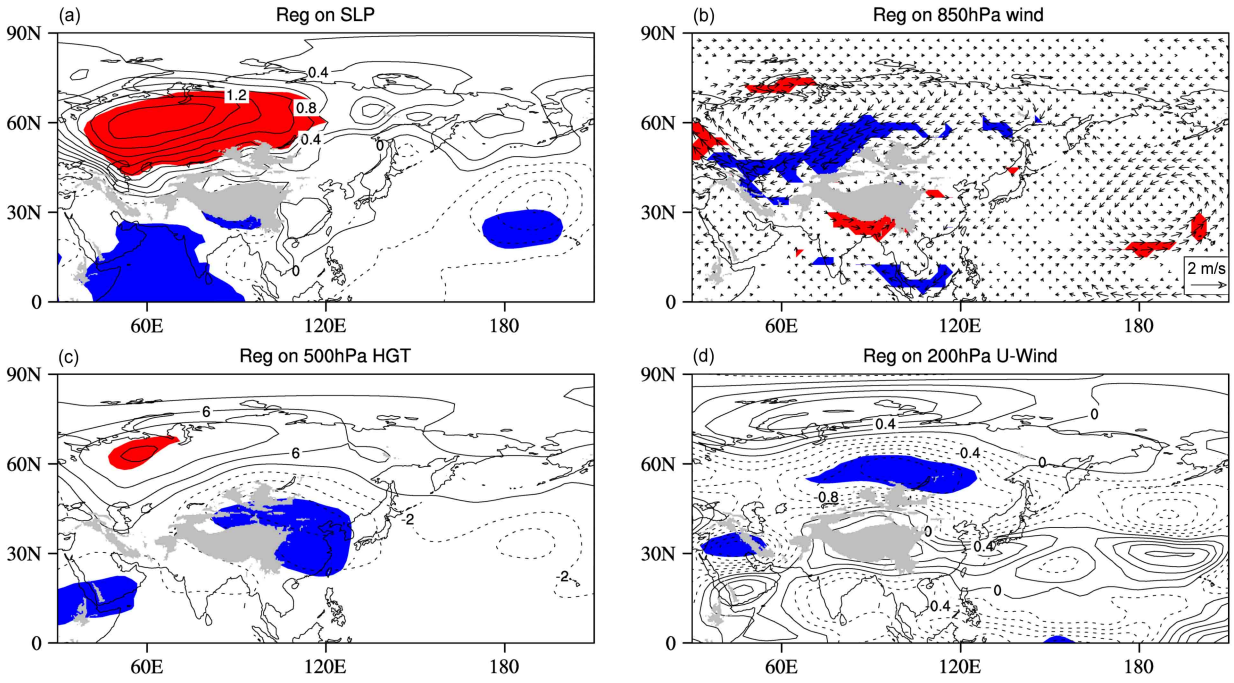

图 9 中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1 与 1961～1986 年时段（a）海平面气压、（b）850 hPa 风场、（c）500 hPa 位势高度场以及（d）200 hPa 纬向风场的回归相关。填色为超过 99% 信度的相关显著性检验,地形超过 1500 m 的区域灰色覆盖

Fig. 9 Regression of (a) the sea level pressure, (b) winds at 850 hPa, (c) geopotential height at 500 hPa, and (d) wind at 200 hPa with respect to PC1 of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 1986. The shaded regions are for values significant at or above the 99% confidence level. The terrain of more than 1500 m is covered in gray

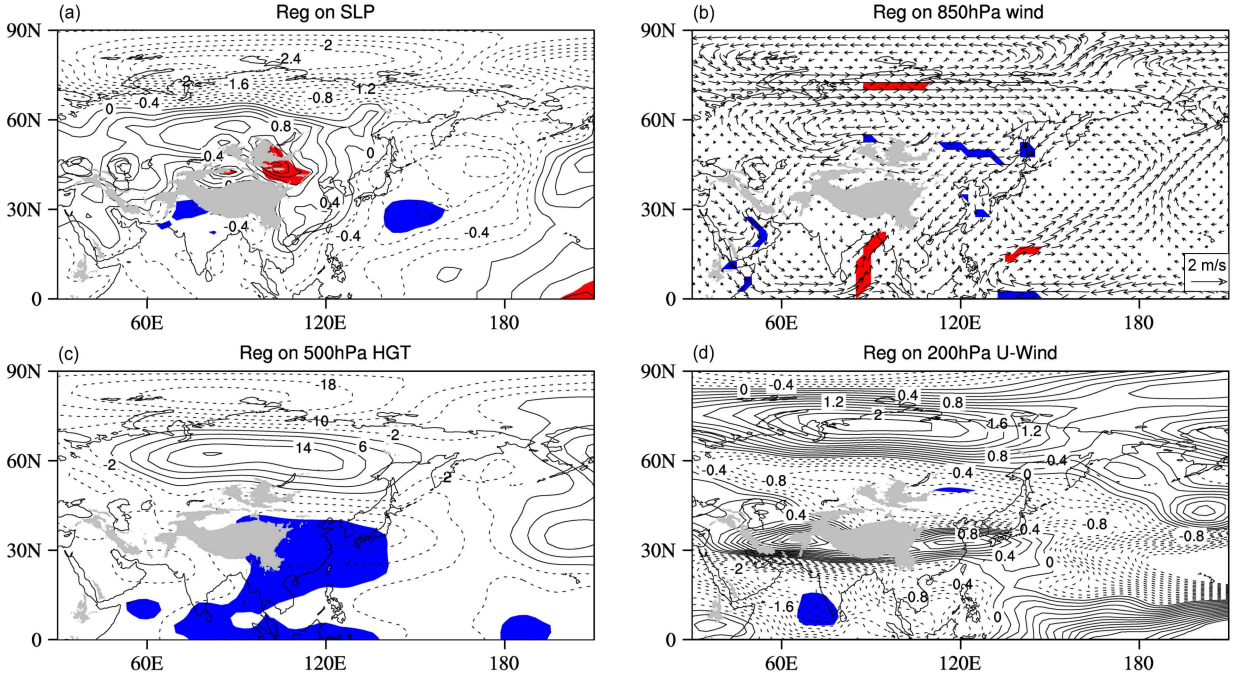

图 10 中国 1961～2012 年冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1 与 1987～2012 年时段（a）海平面气压、（b）850 hPa 风场、（c）500 hPa 位势高度场以及（d）200 hPa 纬向风场的回归相关。填色为超过 99% 信度的相关显著性检验,地形超过 1500 m 的区域灰色覆盖

Fig. 10 Regression of (a) the sea level pressure, (b) winds at 850 hPa, (c) the geopotential height at 500 hPa, and (d) wind at 200 hPa with respect to PC1 of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1987 to 2012. The shaded regions are for values significant at or above the 99% confidence level. The terrain of more than 1500 m is covered in gray

出现负值，表明 1987～2012 年，该时段平均西伯利亚高压强度比 1961～1986 年时段弱，这与之前研究结论相似（龚道溢和王绍武, 1999；王绍武，2013）。因此，1986 年以后，西伯利亚高压有了明显向南移动并且减弱的趋势；由于西伯利亚高压的南移并且减弱，不利于寒潮爆发以及强冷空气的南下，导致中国大部分地区的极端低温事件在 86 年前后发生突变，发生频数明显减少，这与地面气温的变化也是基本一致的（黄嘉佑和胡永云, 2006）。同时，根据冬半年极端低温事件频数与西伯利亚高压强度的正相关性也可以说明 1986 年以后冬半年极端低温事件突变减少的结论。另外，在青藏高原附近有一个正值中心，这个中心可能是由于地形引起的虚假中心，因此不做详细讨论。

6　结论与讨论

6.1　结论

本文利用 1961～2012 年全国 553 站逐日最低气温资料，定义了每个站点的极端低温阈值，并统计分析了每个站点发生极端低温事件的频数。对冬半年极端低温事件频数进行 EOF 分解，分析得出了我国冬半年极端低温事件的不同时空变化特征；此外，对极端低温事件的频数进行了特征统计和突变检验；最后，将我国极端低温事件同东亚冬季风环流联系起来，作了相关回归分析，得到如下结论：

根据我国所处的位置，我国冬季气温大致处于南暖北冷的状态，本文定义的极端低温阈值分布也表明了这一点：全国大部分地区，极端低温阈值在 0℃ 以下，华南以及西南部分地区、四川盆地等地区极端低温阈值在 0℃ 以上，部分地区达到 10℃ 以上。并且 EOF 分析结果显示我国冬半年极端低温事件发生频数主要有空间一致型和南北以及东西振荡型 3 种空间分布特征。即中国冬半年极端低温事件频数 EOF1 的空间分布呈现全国一致型变化分布，表示了我国冬半年极端低温事件总体上呈现相同的变化趋势。并且，我国冬半年极端低温事件在 1986 年前后存在着明显的年代际振荡特征。在 1961～1985 年期间，我国冬半年极端低温事件发生频数普遍偏多，气温偏冷；而 1986～2012 年期间，我国冬半年极端低温事件发生频数普遍偏低，全国气温偏暖。中国冬半年极端低温事件频数 EOF2 的空间分布呈现南北振荡型变化特征，即我国西北、东北和华北与我国南方和西南地区冬半年极端低温事件发生频数变化呈现相反的变化特征，当我国南方和西南地区出现极端低温事件偏少时，则我国西北、华北、东北地区发生极端低温事件偏多。反之亦然。中国冬半年极端低温事件频数 EOF3 的空间分布呈现东西振荡型变化特征，即我国东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区和我国西北以及我国中部狭长地带冬半年极端低温事件发生频数呈现相反的变化特征。当我国东北、华北和东南沿海地区以及青海西藏地区发生极端低温发生偏多时，而我国西北以及我国中部狭长地带冬半年极端低温事件发生偏少。

利用 PC1、PC2 两个时间序列分别与海平面气压、低层风场、500 hPa 高度场以及 200 hPa 纬向风场做相关回归分析得出：我国冬半年全国一致型（EOF1）空间形态的极端低温事件发生的频率高低与西伯利亚高压、低层风场东亚大槽和西风急流都有着显著地关系。冬半年极端低温事件频数与西伯利亚高压有很好的正相关性，即冬半年西伯利亚高压强时，冬半年极端低温事件发生偏多。并且这些要素场都与东亚冬季风的强弱密切相关。冬半年极端低温事件频数与东亚冬季风指数有很好的相关性，冬季风强的年份，我国极端低温事件发生频数偏多，冬季风弱的年份，我国极端低温事件发生频数偏少；

我国冬半年极端低温事件发生频率的南北振荡型（EOF2）与西伯利亚高压和东亚大槽有着显著的相关关系。而低层风场和高层的西风急流并不会造成极端低温事件发生频率的空间变化。冬季风指数与我国极端低温事件发生频率的南北振荡型出现不显著的负相关关系。也就是说我国极端低温事件发生频率出现南北振荡的空间形态和冬季风的关系并不显著。

此外，对 PC1 时间序列作突变检验得出，1986 年前后发生了明显的年代际突变，在 1961～1986 年期间，我国冬半年全国极端低温事件发生的频率空间一致型与也西伯利亚高压、低层风场东亚大槽和西风急流都有着显著地关系，这与之前分析年际变化关系一致。1987～2012 时段，中国冬半年极端低温发生频数与中高纬度陆地上海平面气压呈明显的正相关关系，但与之前时间段相比，这个正相关位置明显偏东偏南，并且正相关范围缩小。

这说明西伯利亚高压偏南偏东并且强度减弱。在北太平洋地区出现显著的负相关，即与阿留申低压出现负相关关系。这和前时间段相比变化不显著。也就是说在 1987 年之后，西伯利亚高压的位置偏东并且他的减弱对中国冬半年极端低温发生频数有显著的影响。但是低层风场，500 hPa 高度场和 200 hPa 纬向风场与 1987 年之前基本相似。这些结果说明了我国冬季极端低温事件发生频率出现年代际转变主要受到西伯利亚高压的影响。相关分析结果显示：东亚冬季风在 1987 前后都与我国极端事件有着显著的关系（表 2）。这说明东亚冬季风对于我国极端低温事件的年际和年代际变化有都有着密切关系。

6.2 讨论

除了东亚冬季风之外，AO（Arctic Oscillation）（Higgins, R. W., A. Leetmaa et al., 2002）、NAO（North Atlantic Oscillation）（Barnston and Livezey, 1987）、NINO3.4（Barnston at el., 1992）、PDO（Pacific Decadal Oscillation）（Mantua, 1999; Goh and Chan, 2010）等也是北半球冬季主要的大气环流现象和海温指数。我国低温极端事件是否也和他们有一定得联系哪？下面的分析将做进一步的讨论。为此，利用 EOF 分解得出的 PC 时间序列与各冬季指数作相关分析，见表 1。结果显示第一模态的全国一致型与 AO、NAO 有很显著的负相关性关系、而与太平洋相关联的 NINO3.4、PDO 的相关性不是很明显；这说明第一模态主要受到冬季 AO 和 NAO 的影响，负 AO 和负 NAO 有利于东亚冬季风的增强，有利于东亚地区寒潮生或者极端低温事件的发生。

而第二模态的南北振荡型与 AO、NAO 有很显著的正相关性、而与太平洋有关系的 NINO3.4、PDO 的相关性也并不显著。这说明第二模态主要受到冬季 AO 和 NAO 正位相的影响。众所周知，正 AO 和正 NAO 不利于东亚冬季风的增强，不利于东亚地区寒潮生或者极端低温事件的发生。这可能暗示了我国极端低温事件南北振荡型的发生频率和大尺度环流遥相关型（AO、NAO）关系密切。

对于极端低温发生频数的年代际变化特征，本研究仍将讨论它与 AO、NAO、NINO3.4、PDO 等大气环流现象和海温指数的关系。为此，利用 EOF 分解得出的 PC1 时间序列与各冬季指数作相关分析，见表 2。结果显示，在 1961～1986 年期间，极端低温发生频数与东亚冬季风、AO、NAO 都有很显著的相关性关系、而与太平洋相关联的 NINO3.4、PDO 的相关性不是很明显；这说明在 1986 年之前主要受到冬季风、AO 和 NAO 的影响。而在 1987～2012 年期间，极端低温发生频数仍然与东亚冬季风密切相关。同时和 NINO3.4 指数也出现显著的负相关。但是与 AO 和 NAO 没有出现显著的相关关系。这些结果可能暗示着我国极端低温事件发生频数的年代际变化也受到大尺度 AO 和 NAO 遥相关型的影响。以及受到赤道中东太平洋海温的影响。前人有研究显示东亚冬季风与 ENSO 的关系发生了年代际转变，大约 20 世纪 70 年代后期关系减弱（Wang et al., 2008; 王会军和贺圣平, 2012; 陈文等，2013）。这与本文 PC1 和 ENSO 在 1987 年之后相关系数增大好像存在矛盾。这其中的主要原因是本文中计算的相关系数，是冬半年极端低温事件频数 EOF 分解后 PC1 时间序列与各指数的相关，并不能完全解释（43.2%），PC1 不能等同于东亚冬季风，并且本文采用冬半年（11、12、1、2、3 月）月份，也会对相关结果造成差异。

这仅仅发现了我国极端低温事件和冬季大尺度环流的联系，他们之间的物理过程及其机理将在今后的研究工作中开展。

表 2 不同时段各冬季指数与中国冬半年极端低温频数 EOF 分析 PC1 的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the various winter indices and the PC1 of extreme low temperature occurence frequency during boreal winter in China from 1961 to 2012 during different periods of time, respectively

	与PC1相关系数				
时间段	EAWM指数	AO指数	NAO指数	NINO3.4指数	PDO指数
1961～1986年	0.34*	−0.34*	−0.38**	−0.18	−0.10
1987～2011年	0.41**	0.02	−0.06	−0.31*	−0.02

*表示通过95%信度检验，**表示通过99%信度检验。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Wea. Rev., 115(6): 1083−1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2

Barnston A G, Ropelewski C F. 1992. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis [J]. J. Climate, 5(11): 1316−1345. doi:10.1175/1520-0442(1992)005<1316:POEEUC>2.0.CO;2

Boyle J S, Chen T J. 1987. Synoptic aspects of the wintertime East Asian monsoon [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 125–160.

Brabson B B, Palutikof J P. 2002. The evolution of extreme temperatures in the central England temperature record [J]. Geophys. Res. Lett., 29(24): 2163. doi:10.1029/2002GL015964

Chan J C L, Li C Y. 2004. The East Asia winter monsoon [M]//Chang C P. East Asian Monsoon. Hackensack: World Scientific Publishing, 54–106. doi:10.1142/5482

Chang C P, Erickson J E, Lau K M. 1979. Northeasterly cold surges and near-equatorial disturbances over the winter MONEX area during December 1974. Part I: Synoptic aspects [J]. Mon. Wea. Rev., 107(7): 812−829. doi:10.1175/1520-0493(1979)107<0812:NCSANE>2.0.CO;2

Chang C P, Wang Z, Hendon H. 2006. The Asian winter monsoon [M]//Wang B. The Asian Monsoon. Berlin, Heidelberg: Spring Press, 89–127. doi:10.1007/3-540-37722-0_3

陈磊. 2011. 近 50 年我国极端低温事件的特征及其成因的初步研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文.　Chen Lei. 2011. The characteristics of extreme low temperature events in China in recent 50 Years and preliminary analysis on their formative causes [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.

Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 17(1): 48−60. doi:10.1007/s00376-000-0042-5

陈文, 兰晓青, 王林, 等. 2013. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响 [J]. 科学通报, 58(8): 634−641.　Chen Wen, Lan Xiaoqing, Wang Lin, et al. 2013. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 58(8): 634−641. doi:10.1007/s11434-012-5654-5

Compo G P, Kiladis G N, Webster P J. 1999. The horizontal and vertical structure of East Asian winter monsoon pressure surges [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125(553): 29−54. doi:10.1002/qj.49712555304

Ding Y H. 1994. Monsoon over China [M]. Kluwer: Academic Publishers, 432pp.

丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. 气象学报, 72(5): 835−852.　Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72(5): 835−852. doi:10.11676/qxxb2014.079

付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955～2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征 [J]. 气象科学, 31(3): 274−281.　Fu Dongxue, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2011. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955−2006 [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 31(3): 274−281. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005

符淙斌. 1994. 气候突变现象的研究 [J]. 大气科学, 18(3): 373−384.　Fu Congbin. 1994. Studies on the observed abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18(3): 373−384. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.03.14

Goh A Z C, Chan J C L. 2010. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity in the South China Sea [J]. Int. J. Climatol., 30(6): 827−843. doi:10.1002/joc.1943

龚道溢, 王绍武. 1999. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究 [J]. 地理学报, 54(2): 125−133.　Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Long-term variability of the Siberian High and the possible connection to global warming [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 54(2): 125−133. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.1999.02.004

龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析 [J]. 高原气象, 21(1): 8−14.　Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. The influence of Siberian High on large-scale climate over continental Asia [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 21(1): 8−14. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.002

Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. 2005. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia−Pacific region [J]. Int. J. Climatol., 25(10): 1301−1330. doi:10.1002/joc.1194

Higgins R W, Leetmaa A, Kousky V E. 2002. Relationships between climate variability and winter temperature extremes in the United States [J]. J. Climate, 15(13): 1555−1572. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1555:RBCVAW>2.0.CO;2

侯亚红, 杨修群, 李刚. 2007. 冬季西伯利亚高压变化特征及其与中国气温的关系 [J]. 气象科技, 35(5): 646−650.　Hou Yahong, Yang Xiuqun, Li Gang. 2007. Variation features of Siberian High and relation with winter temperature in China [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 35(5): 646−650. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.05.007

黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 8–10, 23–25, 130–134.　Huang Jiayou. 2004. Meteorological Statistics Analysis and Forecasting Methods (in Chinese) [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 8–10, 23–25, 130–134.

黄嘉佑, 胡永云. 2006. 中国冬季气温变化的趋向性研究 [J]. 气象学报, 64(5): 614−621.　Huang Jiayou, Hu Yongyun. 2006. Trends of winter temperatures in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(5): 614−621. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.008

黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 2014. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 大气科学, 38(4): 627−644.

Huang Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the Late 1990s [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 627−644. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13245

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

Ji L R, Sun S Q. 1997. Model Study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence [J]. Adv. Atmos. Sci., 14(1): 1−22. doi:10.1007/s00376-997-0039-4

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Lau K M, Chang C P. 1987. Planetary scale aspects of the winter monsoon and atmospheric teleconnections [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 125–160.

刘雅星, 范广洲, 朱叶玉, 等. 2010. 1961～2006 年中国冬季极端温度的时空变化分析 [C]//第 27 届中国气象学会年会应对气候变化分会场——人类发展的永恒主题论文集. 北京: 中国气象学会. Liu Yaxing, Fan Guangzhou, Zhu Yeyu, et al. 2010. Analysis of temporal and spatial changes of the wintertime extreme temperature during 1961 –2006 in China [C]//Collected Essays on Eternal Themes of Human Development (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.

马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 2003. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系 [J]. 地理学报, 58(S1): 11−20. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Ren Xiaobo, et al. 2003. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(S1): 11−20. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.002

Mantua N J. 1999. The pacific decadal oscillation and climate forecasting for North America [J]. Climate Risk Solutions, 1(1): 10−13.

Pal I, Al-Tabbaa A. 2010. Long-term changes and variability of monthly extreme temperatures in India [J]. Theor. Appl. Climatol., 100(1-2): 45−56. doi:10.1007/s00704-009-0167-0

裴顺强, 李崇银. 2007. 东亚冬季风及其影响的进一步研究Ⅰ. 东亚冬季风变化及异常的特征 [J]. 气候与环境研究, 12(2): 124−136. Pei Shunqiang, Li Chongyin. 2007. A further study on the East Asian winter monsoon and its influences Part I. Features of variation and anomaly [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 12(2): 124−136. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.02.002

潘晓华, 翟盘茂. 2002. 气温极端值的选取与分析 [J]. 气象, 28(10): 28−31. Pan Xiaohua, Zhai Panmao. 2002. Analysis of surface air temperature extremum [J]. Meteor Mon (in Chinese), 28(10): 28−31. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2002.10.006

Ramage C S. 1975. Monsoon Meteorology [M]. New York: Academic Press, 296pp.

邵鹏程, 李栋梁. 2012. 东亚冬季风指数的分类和比较 [J]. 气象科学, 32(2): 226−235. Shao Pengcheng, Li Dongliang. 2012. Classification and comparison of East Asian winter monsoon indices [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 32(2): 226−235. doi:10.3969/2012jms.0018

施能. 1996. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系 [J]. 应用气象学报, 7(2): 175−182. Shi Neng. 1996. Features of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 7(2): 175−182.

Su B D, Jiang T, Jin W B. 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 83(1-4): 139−151. doi:10.1007/s00704-005-0139-y

王会军, 贺圣平. 2012. ENSO 和东亚冬季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱 [J]. 科学通报, 57(27): 3535−3540. Wang Huijun, He Shengping. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 57(27): 3535−3540. doi:10.1007/s11434-012-5285-x

Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 35(20): L20702. doi:10.1029/2008GL035287

Wang L, Chen W. 2010. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(4): 855−870. doi:10.1007/s00376-009-9094-3

王林, 陈文, 黄荣辉. 2009. 500 hPa 东亚大槽轴向的年际变化及其与东亚冬季风路径的关系 [C]//第七次全国动力气象学术会议论文摘要. 北京: 中国气象学会. Wang Lin, Chen Wen, Huang Ronghui. 2009. The interannual variation of the 500 hPa East Asian trough axis and its relationship with the track of the East Asian winter monsoon [C]//Abstracts of Papers in the Seventh National Conference on Dynamic Meteorology (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.

王启祎, 丁一汇. 1997. 东亚冬季风的演变特征 [J]. 应用气象学报, 8(2): 186−196. Wang Qiyi, Ding Yihui. 1997. Climatological characteristics of evolution of East Asian winter monsoon [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 8(2): 186−196.

王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 2013. 东亚冬季风 [J]. 气候变化研究进展, 9(2): 154−156. Wang Shaowu, Wen Xinyu, Huang Jianbin. 2013. East Asian winter monsoon [J]. Climate Change Research (in Chinese), 9(2): 154−156. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.02.012

王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 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, 8(1): 8−15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fuming, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960−2009 [J]. Climate Change Research (in Chinese), 8(1): 8−15. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.01.002

武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. 大气科学, 23(6): 641−651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric

Sciences (in Chinese), 23(6): 641−651. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.01

Wu B Y, Wang J. 2002. Possible impact of winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asia winter monsoon and sea−ice extent [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19(2): 297−320. doi:10.1007/s00376-002-0024-x

Wu M C, Chan J C L. 1995. Surface features of winter monsoon surges over South China [J]. Mon. Wea. Rev., 123(3): 662−680. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<0662:SFOWMS>2.0.CO;2

伍荣生. 1999. 现代天气学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 212–213.
Wu Rongsheng. 1999. Principles of Modern Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 212–213.

杨金虎, 江志红, 魏锋, 等. 2006. 近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应 [J]. 干旱区地理, 29(5): 625−631.
Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wei Feng. 2006. Variability of Extreme high temperature and low temperature and their response to regional warming in Northwest China in recent 45 years [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 29(5): 625−631. doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2006.05.002

Yang J H, Ren C Y, Jiang Z H. 2008. Characteristics of extreme temperature event and its response to regional warming in Northwest China in Past 45 Years [J]. Chinese Geographical Science, 18(1): 70−76. doi:10.1007/s11769-008-0070-0

Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian−Pacific−American winter climate anomalies [J]. J. Climate, 15(3): 306−325. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0306:VOTEAJ>2.0.CO;2

曾琮, 胡斯团, 梁建茵, 等. 2005. 东亚冬季风异常与广东前汛期旱涝关系的初步分析 [J]. 应用气象学报, 16(5): 645−654.　Zeng Cong, Hu Situan, Liang Jianyin, et al. 2005. Preliminary researches on the relationship between anomalous winter monsoon circulation over East Asia and flood/drought from April to June in Guangdong [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 16(5): 645−654. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.05.011

张宁, 孙照渤, 曾刚. 2008. 1955—2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南京气象学院学报, 31(1): 123−128.　Zhang Ning, Sun Zhaobo, Zeng Gang. 2008. Change of extreme temperatures in China during 1955−2005 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31(1): 123−128. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.01.017

赵汉光, 张先恭. 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系 [J]. 气象, 22(4): 8−12.　Zhao Hanguang, Zhang Xiangong. 1996. The relationship between the summer rain belt in China and the East Asia monsoon [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 22(4): 8−12. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1996.4.002

Zhou L T. 2011. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process [J]. Int. J. Climatol, 31(5): 677−686. doi:10.1002/joc.2101

Zhou L T, Wu R G. 2010. Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China [J]. J. Geophys. Res., 115(D2): D02107. doi:10.1029/2009JD012502