

1996年冬季一次南方低温事件的低频特征分析及诊断

余汶樯¹ 高庆九^{2,3}

1 特变电工新疆新能源股份有限公司 风电工程事业部, 西安 710117

2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 南京信息工程大学大气科学学院 气候动力学研究中心, 南京 210044

摘要 加强大气季节内振荡研究是发展延伸期预报能力的关键之一。研究表明低温形成与冬季风和冷空气的季节内振荡有密切联系。因此, 本文利用192站日最低温度观测资料和ERA-Interim再分析环流资料, 讨论了偏东路径南下冷空气造成的南方低温事件中准双周振荡特征及低频环流特征, 并进行热力学诊断, 希望提高对中高纬度地区持续性低温事件中低频信号的认识。结果显示: 我国南方地区最低温度存在显著的10-20d振荡周期, 低温事件伴随低频振荡的加强而发生。1996年2月17-24日低温过程前后的低频环流场分析表明, 西伯利亚及东亚上空的异常高/低压是影响我国大部分地区冬季温度的关键区, 系统沿西北东南向低频波列向下游移动, 东移特征在中纬度带最明显, 异常偏北风引导高纬冷空气向南推进是低温事件爆发的根本原因。垂直结构上, 内陆以正压性为主, 东亚沿岸表现出斜压性。热力学诊断发现温度局地变化主要受平流项和非绝热项作用, 冷平流是维持低温过程的关键。

关键词 低温事件 准双周振荡 带通滤波 热力学诊断

文章编号

中图分类号 P434

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1900.16000

The analysis of low-frequency characteristics and thermodynamic diagnosis in a Southern low-temperature event in 1996 winter

YU Wenqiang¹, GAO Qingjiu^{2,3}

1 TBEA Xinjiang Sunoasia Co., Ltd Wind Power Engineering Division, Xi'an 710117

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education(KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change(ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing 210044

3 Climate Dynamics Research Center(CDRC) of the College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Extreme low-temperature events have attracted wide attention due to their persistence and disastrous

收稿日期 2018-07-07; **网络出版日期**

作者简介 余汶樯, 男, 1993 年出生, 风资源工程师, 主要从事风电场风能资源评估和极端温度事件研究。E-mail: babynick@126.com

通讯作者 高庆九, E-mail: gaoqj51@126.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1505804, 国家自然科学基金项目 41475045

Funded by National Key Research and Development Program Funding of China(Grant 2018YFC1505804), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475045)

nature. Many scholars have analyzed the past few decades' low-temperature events in China from the perspective of interannual and interdecadal variations. Intraseasonal oscillation has been regarded as one of the basic characteristics of atmospheric activity. Strengthening the study of intraseasonal oscillation is one of the keys to the development of extended-range forecasting ability. The study shows that the formation of low temperature is closely related to the intraseasonal Oscillation of winter monsoon and cold air. Therefore, we want to explore the characteristics of quasi-biweekly oscillation in low temperature events to improve the understanding of the low frequency signals of the persistent extreme low temperature events in the middle and high latitudes. Based on in-situ observed daily minimum temperature from 192 stations in China and ERA-Interim reanalysis data, the characteristics of intraseasonal oscillation and low frequency circulation of the southern low temperature events caused by the southward cold air along the eastern path are discussed with band-pass filtering and SVD decomposition and other methods, the thermodynamic diagnosis is carried out as well. Results show that there is a significant 10-20d oscillation period at the minimum temperature in Southern China and 22 sustained low-temperature events in 34 winters during 1979-2013, which occurred with the enhancement of low frequency oscillation are listed. The analysis of the low frequency circulation pattern during the low-temperature event in February 1996 show that the system over Europe is moving downstream along the low-frequency wave train, the eastward shift is most obvious in middle latitude zone, and the abnormal high/low pressure over Siberia and East Asia is the key area which is closely related to winter temperature in most parts of China. The anomalous northerly wind guides the cold air from high latitude to the south is the fundamental cause of the southern low-temperature cold event. On the vertical structure, systems in the troposphere in East Asian coast shows the baroclinicity while the interior are mainly barotropic. Thermodynamic diagnosis shows the local temperature variation is mainly affected by advection term and diabatic heating term because the effect of adiabatic term is too small to be ignored, and cold advection is the key to maintain a low-temperature process. Therefore, the 10-20 day low frequency oscillation activity has an important contribution to the low-temperature event.

Keywords Low-temperature events, quasi-biweekly oscillation, band-pass filter, thermodynamic diagnosis

1 引言

极端低温事件由于其持续性和灾害性引起广泛关注。许多学者从年际、年代际的角度对我国过去几十年的单站低温事件进行了分析(周雅清和任国玉,2010;董丹宏和黄刚,2015),指出我国冷指数下降,暖指数上升,增温趋势明显;总体而言北方增温幅度大于南方,冬季大于其他季节。区域性极端温度事件有多种定义方法(Peng, 2011; 任福民等, 2014),有学者对低温事件的机理进行了研究:Cholaw et al. (2011)认为欧亚大陆上空的斜槽斜脊、阻高低涡是大范围持续性低温事件的关键环流系统。司东等(2016)发现当北极涛动由正位相转为负位相时,极区冷空气南下,我国气温由暖转冷。Chen et al. (2013)认为强西风急流为瞬变波提供了传播通道,导致我国低温事件频次增加,且瞬变波强度与我国冬季低温事件频次年际变化相一致。

Madden and Julian (1972)利用坎顿岛的纬向风资料首先发现热带大气中存在40d左右的振荡现象,称为MJO(Madden-Julian Oscillation)。随后很多学者进行了相关研究:李崇银等(1991)指出赤道附近30-60d大气振荡以纬向1波扰动为主,北半球中纬度和高纬度地区分别以3~4波和1~3波为主。垂直结构上,中高纬地区以正压性为主,热带地区以斜压性为主。时间尺度为10-20d的准双周振荡是大气季节内振荡的另一种重要分量(李崇银和

周亚萍, 1995), 其动能更大, 而活动和结构特征又有所不同。同时不少研究指出(李崇银等, 2013; 辛欣等, 2017), 大气季节内振荡遍布全球, 甚至在高纬地区存在更强的季节内信号, 并对中高纬地区的温度、降水等天气气候有重要调制作用。研究表明(杨双艳等, 2013, 2014), 热带大气 10-20d 振荡表现为 2~4 波的纬向结构, 并以正压性和西移特征为主。中高纬地区夏季大气准双周振荡存在明显向西向南传播, 而冬季为东南向传播。

朱毓敏和江静(2013)通过功率谱分析发现我国冬季温度变化在 10-20d 和 50d 左右有明显的峰值, 低频西伯利亚高压和东亚横槽加强有利于冷空气堆积南下。马宁等(2011)也发现 2008 年初南方低温雨雪天气是在强 10-20d 和 30-60d 振荡背景下发生的, 两种尺度低频振荡负位相叠加造成了第一、三次降温更加明显。刘樱等(2016)的研究表明, 华北地区发生持续性低温事件时, 上下对流层的低频环流形势一致, 西伯利亚低频反气旋和日本海低频气旋是导致温度持续异常的重要因子。苗青等(2016)指出当我国东北低温区处于低频高压/低压之间时, 受异常偏北风影响温度下降, 且沿着乌山至我国东北的西北-东南向低频波列是影响我国东北温度的环流移动路径。

研究表明热带和中高纬地区大气低频振荡是两个独立传播的波列(苗青等, 2016), 目前对中高纬地区大气季节内振荡的形成机理还没有确切结论。我们尝试从季节内振荡这一尺度出发, 对中国极端低温事件低频分量做定量诊断, 以探讨中高纬地区大气季节内振荡和低温事件的形成机理, 为加强延伸期预报提供一定参考。

2 资料与方法

资料包括: 中国气象数据网提供的中国地面国际交换站气候资料日值数据集, 该资料经过了严格的质量控制, 使用中対出现断点数据的台站进行了剔除, 保留 192 个站点观测数据, 个别缺测由前一天和后一天的平均值填补。根据几种主流再分析资料与观测资料在我国适用性的研究结论(赵天保和符淙斌, 2009; 高庆九等, 2018), 选取了 ERA-Interim 高度场、风场、温度场、垂直速度场, 近地面 2m 平均温度场和海平面气压场再分析资料, 垂直方向共 23 层, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。上述资料均为 1979-2013 年逐日数据。

将 1979-2013 年各站点的逐年日最低气温按升序排列, 得到该站该年第 5% 位的最低温度, 取其 35 年平均作为该站的极端低温阈值。若某站某日最低气温低于该站阈值, 则认为该站出现了一次单站极端低温事件, 统计出现低温事件的天数即低温日数。南方 ($20^{\circ}\text{N} \sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$) 持续性低温事件定义为(Peng, 2011): a) 站点出现低温日; b) 达到要求 a 的站点数超过南方站点总数的 1/3, 且温度最低时超过站点总数的 2/3; c) 达到要求 b 的时间不低于 8 天。

本文用到 SVD 分解, Butterworth 带通滤波, T 检验, 波活动通量等方法来分析低温事件的低频特征和相应低频环流的演变。

3 季节内振荡周期和低温事件统计

大气季节内振荡已被看作是全球大气运动的基本特征, 加强大气季节内振荡研究是发展

延伸期预报能力的关键之一。本文拟对我国冬季最低温度 10-20d 准双周振荡特征展开研究。如图 1a，冬季逐日最低温度 10-20d 低频分量方差贡献率具有明显的地域差异，从东南向西北减少，大值区位于两广地区，方差贡献率约 19%，这表明与北方和西部相比，我国南方地区更适用于研究低温事件中 10-20d 低频振荡特征。对去掉季节变化的南方冬季最低温度进行功率谱分析（图 1b），结果显示其逐日变化存在显著的 10-20d 准双周和 5-9d 单周振荡周期。观测事实中，南方地区冬季逐日平均低温日数（图略）也表现出明显的季节内变化特征，可见本文立足于研究我国南方地区低温事件的准双周振荡特征是可行的。因此本文第三、四节内容所涉及资料均经过 10-20d 带通滤波处理。

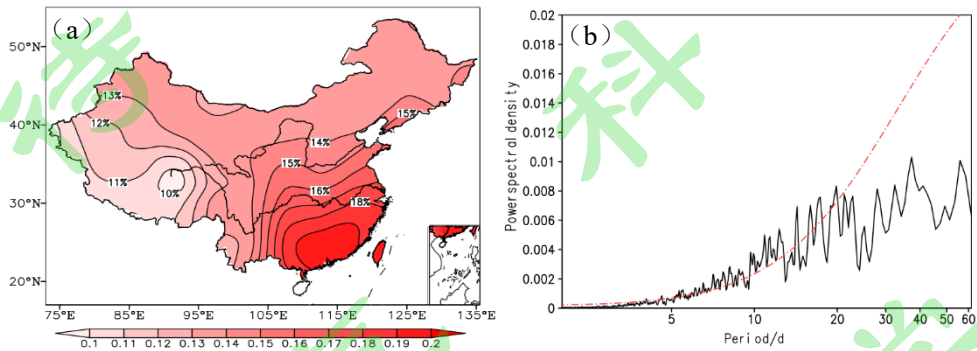


图 1 1979-2013 年冬季 (a) 最低温度 10-20d 低频方差贡献的空间分布和 (b) 南方低温的功率谱分析

Fig.1 (a) The spatial distribution of 10-20d low frequency variance contribution of the lowest temperature and (b) the power spectrum analysis of the southern China lowest temperature in 1979-2013 winter

研究表明（高庆九等，2018），EOF 分解第一模态下，我国全境内低温变化具有同步性。鉴别出 1979-2013 年南方冬季共发生 22 次持续性低温事件，参考寒潮路径和区域性持续低温事件的识别方法（Peng，2011）对其进行分类（表 1）。选取次数最多的东路类低温事件作为研究对象，统计每一次低温过程中 10-20d 温度低频分量，在强准双周振荡背景下发生的低温过程有：1983 年 1 月 20 至 27 日、1996 年 2 月 17 至 24 日、1999 年 12 月 20 至 27 日。因 1999 年个例研究结论与 1996 年个例十分相似，后文重点分析 1996 年低温事件，同时分析在 1983 年低温过程中的差异，以研究此类事件中的 10-20d 低频特征和环流形势。

表 1 1979-2013 年冬季南方持续性低温事件

Table 1 Southern persistent cold events in 1979-2013 winter

序号	开始时间	持续时间 (day)	峰值日	最低温度距平 (°C)	冷空气路径
1	1980-01-30	14	1980-02-05	-5.07	中路
2	1981-01-11	8	1981-01-12	-2.22	西路
3	1983-01-20	8	1983-01-23	-3.53	东路
4	1983-12-28	15	1984-01-05	-3.9	不明显
5	1984-01-18	24	1984-02-07	-3.65	东路
6	1984-12-18	14	1984-12-25	-4.22	东路+西路
7	1986-01-04	8	1986-01-06	-3.33	东路
8	1993-01-14	20	1993-01-16	-3.82	东路+西路
9	1994-01-18	8	1994-01-23	-3.25	中路

10	1996-02-17	8	1996-02-21	-6.24	东路
11	1998-01-18	9	1998-01-19	-3.16	中路
12	1999-12-20	8	1999-12-23	-5.02	东路
13	2000-01-25	10	2000-02-01	-3.5	东路
14	2001-12-22	9	2001-12-23	-3.1	东路
15	2002-12-25	8	2002-12-27	-3.06	东路+西路
16	2003-01-03	11	2003-01-07	-2.94	东路
17	2004-01-19	10	2004-01-22	-2.83	中路
18	2008-01-13	35	2008-02-03	-3.47	东路
19	2009-01-09	8	2009-01-11	-3.49	东路+西路
20	2010-12-31	14	2011-01-07	-3.29	不明显
21	2011-01-16	10	2011-01-21	-2.16	东路
22	2012-12-30	13	2013-01-04	-3.17	中路

4 南方持续性低温事件的低频特征分析及诊断

4.1 1996 年 2 月低温过程特征

1996 年 2 月 17 日-24 日，我国南方及西北地区经历了一次剧烈降温的低温雨雪天气，是 1995/96 年入冬以来最强，持续时间最长的一次低温过程。较常年同期而言（图 2a），全国绝大多数地区温度明显偏低，负值中心在两广和内蒙古西部，偏低 7~8℃。最低气温及 10-20d 滤波结果表明：实际温度变化与低频温度升降存在良好的对应关系，降温发生在低频振荡由正到负位相的转变阶段，可见低温事件伴随低频振荡的加强而发生。计算得到 10-20d 低频分量的方差贡献约占实际温度的 50%，说明最低气温的 10-20d 振荡对实际温度变化有重要影响。

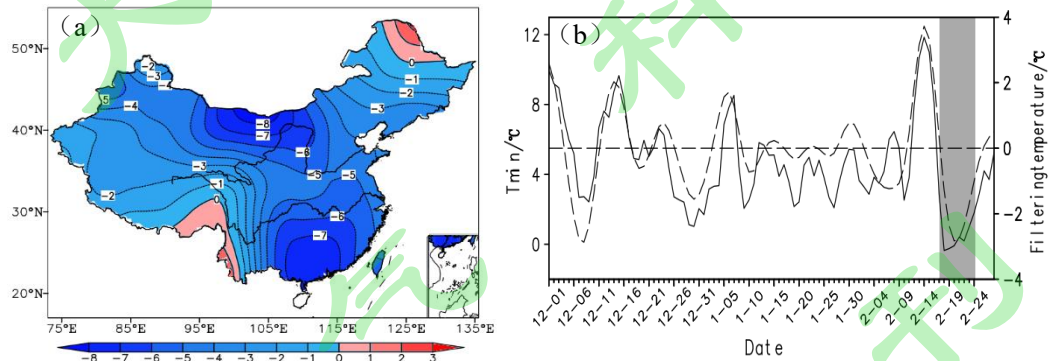


图 2 (a) 1996 年 2 月 17-24 日全国最低温度距平分布和 (b) 该年冬季南方最低温度（实线）与 10-20d 滤波（虚线）序列（单位：℃）

Fig.2 (a)The distribution of lowest temperature anomaly on 17-24 February 1996 and (b)the southern lowest temperature (solid line) with the 10-20d filtered (dotted line) sequence in this winter (units: °C)

4.2 近地面 2m 低频气温的传播

为确切讨论低频气温正负位相对低温过程的影响，由近地面 2m 低频气温沿 115°E 经向传播可知（图略），正负温度异常在高纬地区十分活跃，相间从高纬向中低纬传播。2 月 11 日起，65°N 附近的温度由正异常转为负异常并向南传播，17 日冷空气主体到达淮河一带，

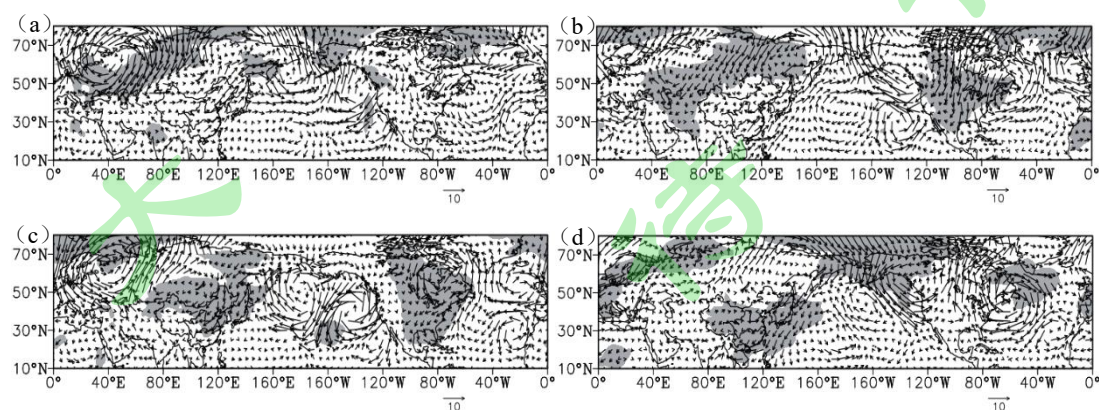
引起移动路径上降温并继续增强南压，最终影响到 20°N 以南地区，造成南方大范围持续性低温天气。可见，近地面低频气温的负位相在此次过程中显著增强，当存在能延伸到南方的引导气流时，北方冷空气才会南下引起南方发生低温事件。这与 Ding (1990) 认为冷空气向南传播主要表现为 10-20d 低频振荡模态的结论相符。

4.3 不同高度层低频环流场的演变

进一步研究低频流场对低温事件的影响。定义低温事件开始日为 day 0，峰值日为 day L，结束日为 day E，day -n 表示超前事件发生 n 天。

低频海平面气压场显示（图略），前期东西伯利亚至贝加尔湖各存在一个负异常中心，表示西伯利亚高压减弱；东欧地区存在一个强正值中心，随后正负异常扰动向东南方向移动强度减小，此时我国南方还处于暖期。到 day 0 日，原西伯利亚负异常向南减弱、消失，而从欧洲东传的正异常到达贝加尔湖附近后加强维持，表明西伯利亚高压增强，冷空气堆积。峰值日时，冷高已经南下，冷空气主体覆盖整个南方地区，影响范围最大，温度降至最低。过程结束时，西伯利亚高压再次减弱，冷空气已退出我国南方。可见强西伯利亚高压的维持和南移是冷空气堆积和爆发的有利背景条件。

低温事件发生前 6 天（图 3a），850hPa 低频风场显示欧洲东部上空存在一较强的低频反气旋，风速较大，环流前部的低频北风引导来自极地的冷空气在东欧平原堆积，低频低温区相应出现在这一区域。贝加尔湖上空有一较弱的低频气旋，此时我国东部主要受低频西南风的影响，温度处于上升状态。随后两个环流系统东移南压，低频低温区伴随引导气流也向东南移动（图 3b）。控制我国东北的低频偏南风开始减弱逐渐转为气旋底部的偏西风，南方地区依然为西南风。低温事件发生时（图 3c），低频反气旋中心已移动到贝加尔湖上空，我国东北明显受反气旋前部北风的影响，至长江流域均转为东北风，南方地区的偏东风阻止冷空气南下，双方在 30°N 附近辐合导致冷空气堆积。之后受白令海峡处异常偏北风的补充，我国东部北风增强向南推进，冷空气在引导气流的带动下迅速南下爆发（图 3d）。事件结束时（图 3e），风场减弱，低频低温区逐渐消失。可见低频反气旋前部和气旋后部北风分别引导来自新地岛和极地的冷空气沿东亚沿岸南下影响我国，day 0 时我国东部风场发生明显加强和转向。此外还注意到从欧洲东移的低频低温区到达西伯利亚后迅速南下，除了青藏高原地形阻挡的作用外，可能还与北美低频反气旋西移至西伯利亚后，东亚经向风加大有关。



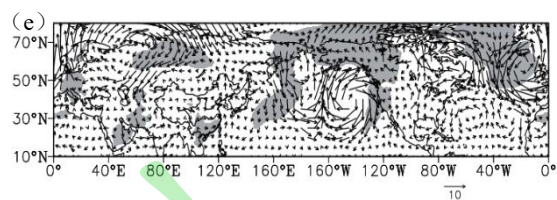


图 3 850hPa 低频风场（矢量，单位：m/s）和近地面 2m 低频温度场随时间（a）day -6，（b）day -3，（c）day 0，（d）day L，（e）day E 的演变（阴影表示低频温度 $<-1^{\circ}\text{C}$ 的区域）

Fig.3 The evolution of 10-20d filtered wind field at 850hPa (vector, units: m/s) and 10-20d filtered temperature field at 2m (shadow indicates the temperature $<-1^{\circ}\text{C}$) with time. (a)day -6, (b)day -3, (c)day 0, (d)day L, (e)day E

对流层中层中高纬度地区，东亚到乌拉尔山上空的斜槽斜脊和阻塞高压与我国冬季低温天气有密切联系（Cholaw et al., 2011）。图 4a 显示在低温事件发生前期，西伯利亚受低频低压控制，向西南方向倾斜至里海附近，其东边洋面上还有一个负异常中心南伸至琉球群岛，乌拉尔山西侧有一较强低频高压，此时我国受两低压延伸带间的弱高压影响，温度场处于暖异常。到 day -3 时（图 4b），两低频低压系统合并减弱，中心南移后位于鄂霍次克海西面上空，系统尾部继续向里海西南侧延伸，带状结构更明显。乌拉尔山地区的正异常中心强度也减弱并持续东移，结构相应变得狭长而倾斜。低温事件开始时（图 4c），东移的低频高压分裂出两个环流中心，一个移至中西伯利亚，一个仍位于乌拉尔山东侧。而低频低压系统则在南移过程中不断减弱，在日本海到巴尔喀什湖间形成一低槽区，斜槽斜脊的维持使得槽后脊前的冷空气不断入侵我国，东北地区受此系统影响，风向转为偏北风。到 day L 时（图 4d），乌拉尔山附近的阻高稳定维持有利于冷空气堆积，西伯利亚上的低频高压增强，反气旋前部的北风分量也加强，引导冷空气快速南下。阻高崩溃后（图 4e），横槽迅速转竖，冷空气向东向南传播影响我国南方地区。之后欧亚大陆上空环流系统完成一次重建，低温过程结束。

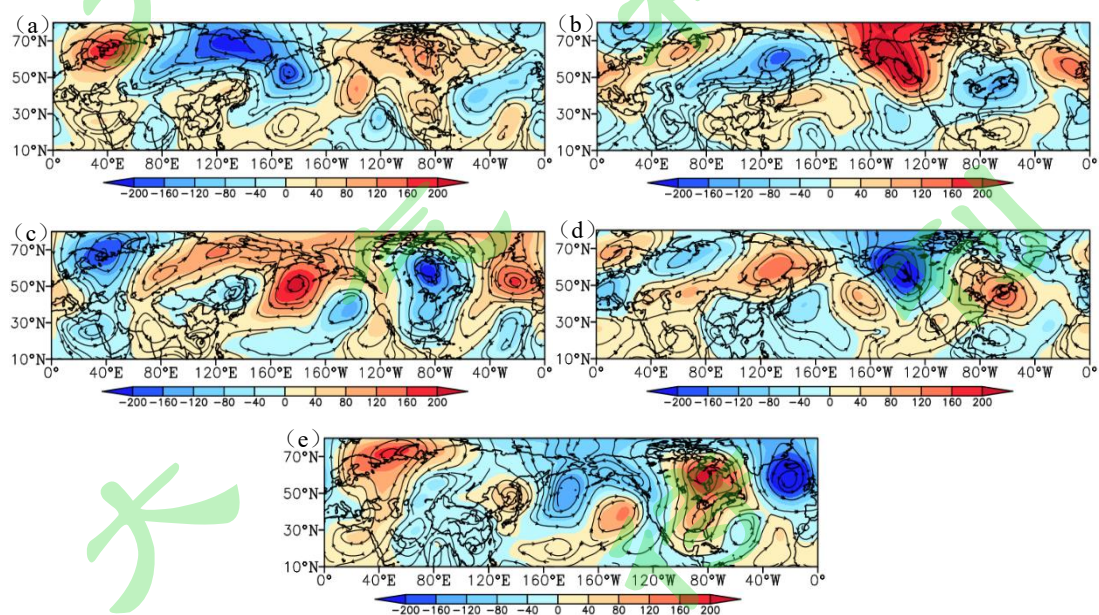


图 4 500hPa 低频风场和高度场随时间（a）day -6，（b）day -3，（c）day 0，（d）day L，（e）day E 的演变（单位：gpm）

Fig.4 The evolution of 10-20d filtered wind and height field at 500hPa (units: gpm) with time. (a)day -6, (b)day -3, (c)day 0, (d)day L, (e)day E

(c)day 0, (d)day L, (e)day E

将 1995/96 年冬季北半球 500hPa 低频高度场与我国南方低频温度序列做超前滞后相关,发现当高度场(1995 年 11 月 28 日至 1996 年 2 月 25 日)超前温度序列 3 天时相关最显著。进一步用低频高度场作为左场,台站低频温度场作为右场,通过 SVD 分解研究二者的耦合模态。前两模态的协方差贡献分别为 58.74%和 22.27%,时间相关系数分别为 0.85 和 0.88,均通过 0.01 显著性检验。

第一模态左场的异性相关(图 5a)表明:在高纬地区,通过 0.01 信度检验的关键区从欧洲(+)—西伯利亚(-)—中国华北东北(+)—西太平洋(-)呈一条西北东南向的低频波列,关键区分布形态与欧亚遥相关型活动中心基本一致(杨双艳等, 2014),当欧洲上空低频系统沿着关键区大值中心先向东后向南,主体从西北向东南移动时,将会对下游地区后期天气产生影响。较低纬度地区也有一条沿阿拉伯半岛(+)—印度半岛(-)—四川盆地至东北(+)—西北太平洋(-)的波列,二者在东亚地区汇合。与之相应的低频温度场(图 5b)显示除新疆大部分地区 and 云南外,全国一致为正值,强相关区位于华北和东北。因此第一模态异质相关反映左右场的耦合模态为:当乌拉尔山至贝加尔湖上空的阻塞高压增强,东亚大槽加深时,低频北风引导高纬度冷空气南下,我国大部分地区表现为温度负异常。同时时间系数(图 5c)表现出本次过程中阻高和东亚大槽由弱到强,南方温度由暖到冷的转变。

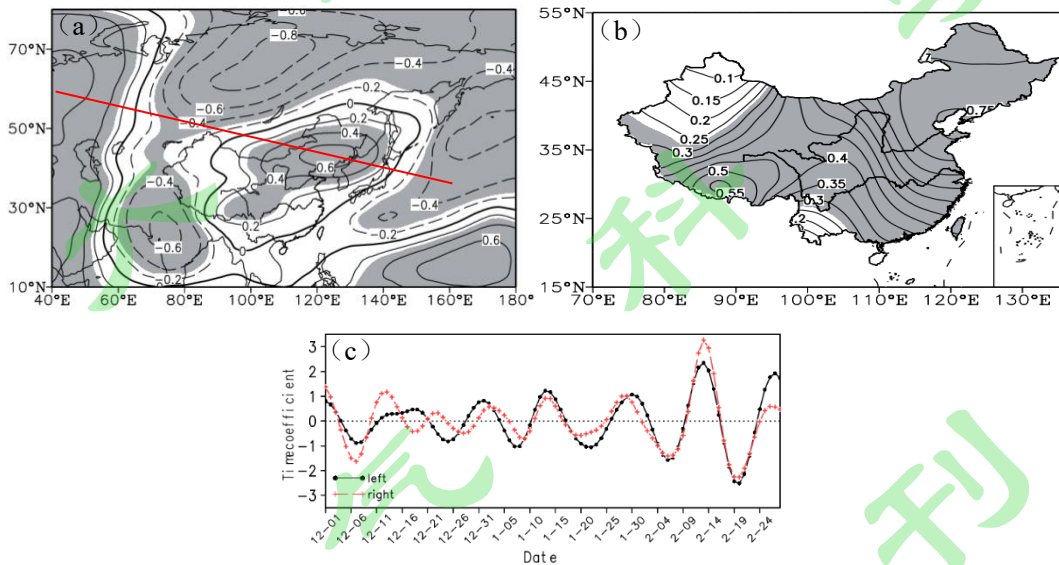


图 5 1995/96 年冬季我国低频温度场(b, 右场)与超前其 3 天的 500hPa 低频高度场(a, 左场)SVD 分解第一模态异性相关及 (c) 时间系数 (阴影表示通过 0.01 显著性检验)

Fig.5 The distribution of the heterogeneous correlation and (c) time coefficient of the first mode in SVD between 10-20d filtered temperature field in China (b, right field) and 10-20d filtered height field at 500hPa (a, left field) in 1995/96 winter (shadow indicates through 0.01 significance test)

第二模态(图略)显示从东欧至华南也存在西北东南向低频波列,通过 0.01 显著性检验的正负关键区分别位于巴尔喀什湖至贝加尔湖、东欧平原和我国东南部;温度场上我国华北东北、新疆北端和青藏高原南端与其他地区的响应反相分布,通过检验的正负响应区分别

位于东北和祁连山至华南一带。

高层的环流形势不再赘述。分别沿中纬 40°N 和高纬 60°N 做了 250hPa 低频高度场的剖面图（图略）分析系统的移动路径，可知中低纬地区系统几乎为一致东传，高纬地区亚欧大陆上空系统保持东移特征，但移速放缓，而中东太平洋及北美上空系统表现出西移特征，不同传播特征的系统在 120°E-140°E 附近汇合。波活动通量的传播主要在高层（史恒斌，2015），如图 6 所示，此次低温过程中高纬地区有波能量从上游东欧附近经中西伯利亚向下游我国东部沿岸频散，低纬地区也有较弱的波能量从北阿拉伯半岛沿 30°N 向我国南方频散，方向正好与之前分析的低频波列相应。波列的下游地区主要为辐合区，因此波能量的传播将会造成和维持下游低频环流异常，从而影响我国天气。

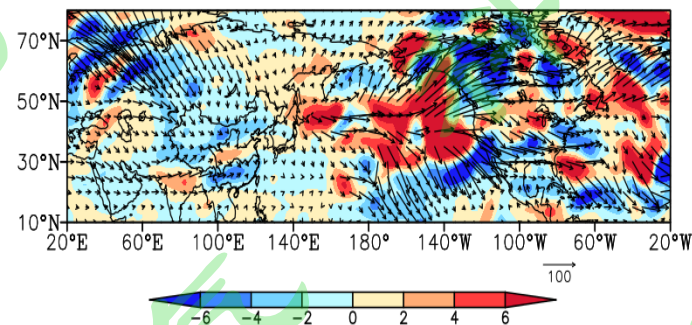
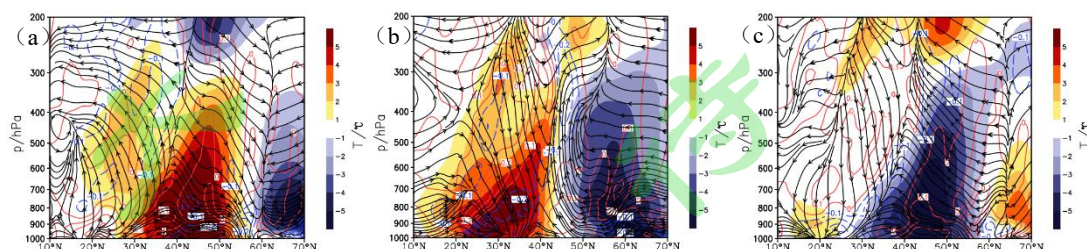


图 6 低温过程中 250hPa 低频波活动通量（矢量，单位： m^2/s^2 ）及其散度（阴影，单位： $10^{-6}\text{m}/\text{s}^2$ ）的空间分布

Fig.6 The spatial distribution of 10-20d filtered wave active flux at 250hPa (vector, units: m^2/s^2) and its divergence (shadow, units: $10^{-6}\text{m}/\text{s}^2$) during the event

波列上的垂直结构（图略）表明，北半球内陆中高纬低频环流系统（2~3 波）有上下层较一致的分布形态，在亚洲东岸中低纬地区（4~5 波），对流层中高层与低层具有反相结构，且受冷空气影响斜压性增强。这与李崇银等（1991）对北半球大气 30-60d 振荡的研究结论相似，Lau and Lau（1984）认为这样的分布形态与青藏高原的地形和海陆热力差异有关。

进一步分析经向垂直环流对我国南方低温的影响。前期（图 7a, b）南方地区处于垂直对流的下沉区，异常暖中心位于 700hPa 以下的对流层中下层，并向上延伸至对流层顶，此时不断加强扩大的异常冷堆从高纬度地区逐渐南移。事件开始时（图 7c），低纬地区的温度正异常减弱趋于消失，冷异常伴随较强的上升运动越过 30°N 已影响到长江中下游地区。随后深厚冷堆控制整个南方，对流层上下均为强烈上升气流与之相应（图 7d）。事件结束时（图 7e），影响南方的冷空气消失，北方有新的暖异常移来，温度将会回升。



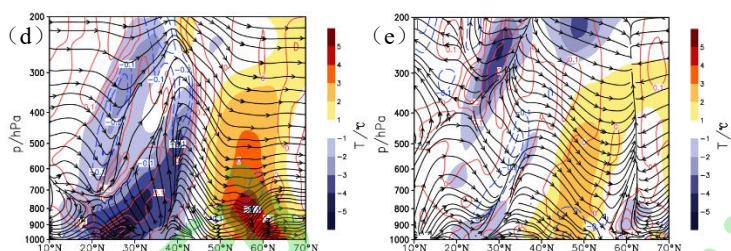


图 7 沿 105°E-122.5°E 平均低频垂直环流 ($\omega-v$ 合成) (流线)、温度 (阴影, 单位: °C) 和散度 (等值线, 单位: 10^{-6}m/s^2) 随时间 (a) day-6, (b) day-3, (c) day0, (d) dayL, (e) dayE 的演变

Fig.7 The evolution of the averaged 10-20d filtered vertical circulation ($\omega-v$ synthetic) (streamline), temperature (shadow, units: °C) and divergence (equivalent line, units: 10^{-6}m/s^2) along 105°E-122.5°E with time.

(a)day -6, (b)day -3, (c)day 0, (d)day L, (e)day E

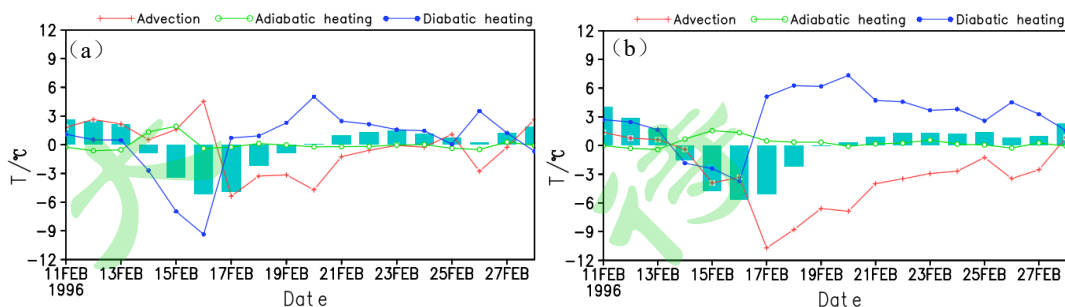
5 温度局地变化的诊断分析

逐日变温场 (图略) 显示, 2 月 12 日之前全国大部分地区处于升温状态。北方先于南方降温, 15 日降温区域已向南移动并覆盖长江流域, 接下来三天南方地区温度骤降, 20 日左右南方温度降至谷底, 23 日开始气温缓慢回升。根据下方公式:

$$\partial T / \partial t = -(u \partial T / \partial x + v \partial T / \partial y) + \omega(\gamma_d - \gamma) + 1/c_p \dot{Q}$$

利用 ERA-Interim 逐 6h 再分析资料计算热力学方程中各项因式的逐日值 (图 8) 可知, 开始降温时, 1000 和 925hPa 受非绝热冷却和冷平流共同作用, 且高度越低平流作用越明显。此时南方地区 850hPa 上空仍然为暖平流, 降温效果由较强的非绝热冷却造成。强的非绝热冷却会在对流层中造成下沉运动 (苗芮等, 2017) (图 7b), 导致低层辐散, 高层辐合, 从而有利于西伯利亚高压发展。降温最盛时, 850hPa 上空也变为冷平流, 且三层平流强度都加大, 此时非绝热项转为正值, 后期温度回暖主要是非绝热加热效应。分析 850hPa 低频分量的贡献, 如图 8d 所示, 低频温度场的变化占实际变温场较大比重, 再次说明本次低温过程是在强 10-20d 低频振荡背景下发生的。前期降温主要是低频非绝热冷却造成的, 随后伴随低频北风的冷平流控制南方地区。

通过对本次低温事件的诊断可知, 前期降温受冷平流和非绝热冷却共同影响, 后期升温主要是非绝热加热的增温效应, 冷平流对低温过程的维持起主要作用, 而在对流层低层, 绝热项作用很小可忽略。



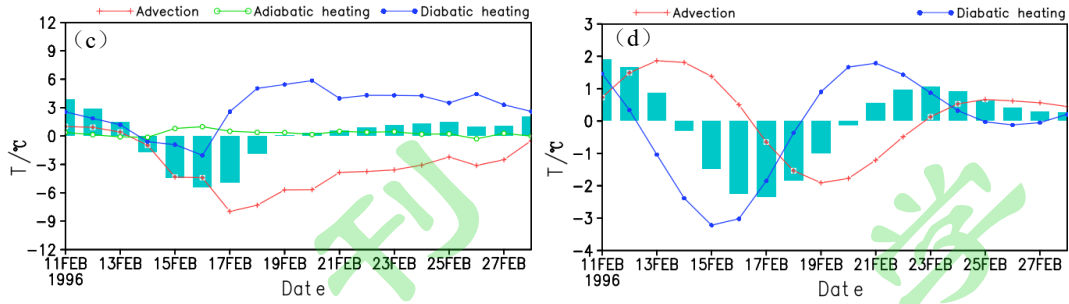


图 8 1996 年 2 月 11-28 日 (a) 850、(b) 925、(c) 1000hPa 局地温度变化、平流项、绝热项、非绝热项和 (d) 850hPa 低频分量的演变 (单位: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

Fig.8 The evolution of local temperature, advection term, adiabatic heating term and diabatic heating term at (a)850hPa, (b)925hPa, (c)1000hPa and low-frequency component at (d)850hPa on 11-28 February 1996 (units: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

用同样方法分析发生在 1983 年 1 月 20-27 日的低温过程, 受篇幅所限, 其结果及与文中个例的异同将在总结中进行讨论。

6 总结和讨论

本文在发现我国南方地区最低温度存在 10-20d 振荡周期后, 选取了 1996 年冬季的一次低温事件进行低温过程特征、低频特征、低频环流场演变特征分析和热力学诊断, 期望就季节内振荡在中高纬地区的应用做一些研究, 同时为极端低温天气的延伸期预报和防范提供一定思路。所得结论如下:

(1) 低温过程中南方温度远低于常年同期, 且伴随低频振荡的加强而发生。温度变化受向南推进的北方冷空气影响。1996 年个例中, 西北的温度也远低于多年平均, 而对 1983 年个例的分析也发现, 整个北方尤其西北温度偏高, 且北方低频冷空气活动中心范围更广, 位置更靠北强度更大。

(2) 低温事件开始前, 冷空气伴随西伯利亚高压东移南下, 从低频风场可清楚看到在低温过程中, 我国东部上空有偏南风—偏北风—偏南风的转变。1983 年和本文中 1996 年的个例中都可以观察到北美西岸上空有低频系统西移现象。

(3) SVD 分解表明, 两次个例中西伯利亚上空系统都是影响我国大部分地区温度变化的关键区, 但温度强响应区分别在华北和长江中下游区域。总体来讲, 欧洲上空低频系统都是沿西北东南向移动进而影响下游地区的天气, 这种东移特征在中纬度带表现得最明显。但在 1983 年个例中, 低频系统存在高纬向东后向南和中纬平直向东两条移动路径。

(4) 内陆中高纬度地区上下层低频系统以正压性为主, 亚洲东岸地区表现出斜压性。低频垂直环流显示深厚冷堆伴随强上升运动从北向南移动影响我国南方。

(5) 热力学诊断表明温度的局地变化主要由平流项和非绝热项引起。1996 年个例的降温主要是受冷平流和非绝热冷却作用, 后期温度回暖是非绝热加热效应。而 1983 年个例中降温是受冷平流影响, 非绝热项始终起升温作用, 可见冷平流是维持低温过程的关键因子。

参考文献 (References)

- Chen H S, Lei L, Zhu Y J. 2013. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *SCI. CHINA EARTH SCI.*, 56 (7): 1266-1280, doi:10.1007/s11430-012-442-z.
- Peng J B, Cholaw B. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 04 (5): 281-286, doi:10.1080/16742834.2011.11446943.
- Cholaw B, Fu X Y, Xie Z W, 2011. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 04 (4): 235-241, doi:10.1080/16742834.2011.11446935.
- Ding Y H. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44 (1-4): 281-292, doi:10.1007/bf01026822.
- 董丹宏, 黄刚. 2015. 中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析 [J]. *大气科学*, 39 (5): 1011-1024. Dong Danhong, Huang Gang. 2015. Relationship between altitude and variation characteristics of the maximum temperature, minimum temperature, and diurnal temperature in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 39 (5): 1011-1024, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14291.
- 高庆九, 余汶樯, 周小艳. 2018. 基于再分析资料与观测资料的中国低温阈值变化特征研究 [J]. *大气科学学报*, 41 (3): 308-317. Gao Qingjiu, Yu Wenqiang, Zhou Xiaoyan. 2018. Research on variation characteristics of low temperature threshold in China based on reanalysis data and observation data [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 41 (3): 308-317, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170903001.
- Lau N C, Lau K M, 1984. The structure and energetics of midlatitude disturbances accompanying cold-air outbreaks over East Asia [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112 (7): 1309-1327, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<1309:tsaeom>2.0.co;2.
- 李崇银. 1991. 30—60 天大气振荡的全球特征 [J]. *大气科学*, 15 (3): 66-76. Li Chongyin. 1991. Global characteristics of 30-60 day atmospheric oscillation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 15 (3): 66-76, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.03.10.
- 李崇银, 周亚萍. 1995. 热带大气中的准双周(10—20 天)振荡 [J]. *大气科学*, 19 (4): 435-444. Li Chongyin, Zhou Yaping. 1995. On Quasi-Two-Week(10-20 day) oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 19 (4): 435-444, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.04.06.
- 李崇银, 潘静, 宋洁. 2013. MJO 研究新进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 229-252. Li Chongyin, Pan Jing, Song Jie. 2013. Progress on the MJO research in recent years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37 (2): 229-252, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12318.
- 刘樱, 郭品文, 冯涛. 2016. 华北地区冬季持续性异常低温事件与大气低频振荡活动的关系 [J]. *大气科学学报*, 39 (3): 370-380. Liu Ying, Guo Pinwen, Feng Tao. 2016. The relationship between winter persistent abnormal low temperature in North China and atmospheric low-frequency oscillation activities [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 39 (3): 370-380, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150314053.

- 马宁, 李跃凤, 琚建华. 2011. 2008 年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡特征 [J]. 高原气象, 30 (2): 318-327. Ma Ning, Li Yuefei, Ju Jianhua. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in southern china in early 2008 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30 (2): 318-327, doi:10.7522/j.issn.1000-0543.2013.00196.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period [J]. J. Atmos. Sci., 29 (6): 1109-1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:dogscc>2.0.co;2.
- 苗青, 巩远发, 邓锐捷, 等. 2016. 北半球中高纬度低频振荡对 2012/2013 年冬季中国东北极端低温事件的影响 [J]. 大气科学, 40 (4): 817-830. Miao Qing, Gong Yuanfa, Deng Ruijie, et al. 2016. Impacts of the low-frequency oscillation over the extra-tropics of the Northern Hemisphere on the extreme low temperature event in Northeast China in the winter of 2012/2013 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 40 (4): 817-830, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15189.
- 苗芮, 温敏, 张人禾. 2017. 2010 年华南前汛期持续性降水异常与准双周振荡 [J]. 热带气象学报, 33 (2): 155-166. Miao Rui, Wen Min, Zhang Renhe. 2017. Persistent precipitation anomalies and quasi-biweekly oscillation during the annually first rainy season over south china in 2010 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 33 (2): 155-166, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.02.002.
- 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述 [J]. 气象, 40 (7): 860-874. Ren Fumin, Gao Hui, Liu Lvliu, et al. 2014. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40 (7): 860-874, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.010.
- 史恒斌. 2015. 淮河流域夏季降水与中高纬波列结构的关系 [J]. 高原气象, 34 (2): 436-443. Shi Hengbin. 2015. Relationship between the precipitation in Huai River Basin in summer and the wavelike structure in mid-high latitude [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 34 (2): 436-443, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00186.
- 司东, 马丽娟, 王朋岭, 等. 2016. 2015/2016 年冬季北极涛动异常活动及其对我国气温的影响 [J]. 气象, 42 (7): 892-897. Si Dong, Ma Lijuan, Wang Pengling, et al. 2016. Anomalous activity of Arctic Oscillation in winter 2015/2016 and its impact on temperature in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42 (7): 892-897, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.013.
- 辛欣, 曾胜兰, 姚素香. 2017. 北太平洋冬半年位势高度季节内振荡及其诊断分析 [J]. 大气科学学报, 40 (2): 280-287. Xin Xin, Zeng Shenglan, Yao Suxiang. 2017. The intraseasonal oscillations of the winter geopotential height over the North Pacific and its diagnosis [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 40 (2): 280-287, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150911001.
- 杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等. 2013. 夏季欧亚中高纬大气低频振荡的纬向传播特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (7): 1220-1230. Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al. 2013. The zonal propagating characteristics of low-frequency oscillation over the Eurasian mid-high latitude in boreal summer [J]. SCIENTIA SINICA Terrae (in Chinese), 43 (7): 1220-1230, doi:10.1360/zd-2013-43-7-1220.
- 杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等. 2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与欧亚遥相关型的关系 [J].

- 大气科学, 38 (1): 121-132. Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al. 2013. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 38 (1): 121-132, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12181.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 几种再分析地表气温资料在中国区域的适用性评估 [J]. 高原气象, 28 (3): 594-606. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation of surface air temperature from several reanalysis datasets in China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 28 (3): 594-606, doi:10.3969/j.issn.1001-7313. 2009.01.009.
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 405-417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956—2008 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 15 (4): 405-417, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.08.
- 朱毓颖, 江静. 2013. 中国冬季持续性低温事件的低频特征以及中低纬大气低频振荡对其的影响 [J]. 热带气象学报, 29 (4): 649-655. Zhu Yuying, Jiang Jing. 2013. The intraseasonal characteristics of wintertime persistent cold anomaly in china and the role of low frequency oscillation in the low latitude and midlatitude [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29 (4): 649-655, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.014.