

基于低频振荡信号的中国南方冬半年 持续性低温指数延伸期预报试验^{*}

陈官军^{1,2} 魏凤英¹ 姚文清¹ 周璇³
CHEN Guanjun^{1,2} WEI Fengying¹ YAO Wenqing¹ ZHOU Xuan³

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081
2. 中国人民解放军 96631 部队,北京,102208
3. 北京市气象台,北京,100089

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
2. *Chinese People's Liberation Army 96631 Units, Beijing 102208, China*
3. *Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089, China*

2016-08-08 收稿,2016-12-26 改回.

陈官军,魏凤英,姚文清,周璇. 2017. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验. 气象学报, 75(3):400-414

Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing, Zhou Xuan. 2017. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(3):400-414

Abstract On the basis of daily NCEP/NCAR reanalysis product and observational data for 1961–2009, this study investigates the low frequency oscillation signals of regional persistent low temperature events (RPLTEs) to the south of 36°N in China and identifies indexes that can be used to characterize RPLTEs. These indexes are then used as predictands in extended range forecast experiments based on the DERF2.0 hindcasts. Results show that the RPLTEs can be classified into three types, i. e. North of Yangtze River, South of Yangtze River, and the entire region. The types of North of and South of Yangtze River have their own key common circulation features that are distinguished by latitudes of anomalous circulation centers and characterized by low-frequency wave trains propagating from northwest to southeast in Asia. 10–30 d low-frequency components of the daily minimum temperature series of North of Yangtze River (T_1) and South of Yangtze River (T_2) are defined as the persistent low temperature indexes (RPLTIs). The phase and amplitude of the RPLTIs have a close relationship with the RPLTEs and are used as the predictands in extended range forecast experiments. EOF1 of the 850 hPa temperature anomalies between 100°–120°E coincides with the low-frequency mode of T_1 while EOF2 coincides with that of T_2 . Projection of daily data onto the pair of leading EOFs of 850 hPa temperature anomalies yields time series of principal components that can serve as an effective filter for low-frequency oscillation without the need for bandpass filtering and makes the time series of the two principal components effective predictors for real-time application. DERF2.0 hindcasts and stepwise regression statistical method are employed to explore extended range forecast (ERF) of RPLTIs. The forecast skill of this statistical-dynamical prediction for 2-m temperature is better than that of DERF2.0 (direct model output) in real-time experiments.

Key words Low-frequency oscillation signals, Persistent low temperature indexes, DERF2.0, Extended range forecast

摘 要 利用 1961—2009 年 36°N 以南、108°E 以东中国大陆 191 个站点逐日最低气温和 NCEP/NCAR 再分析日平均格点

^{*} 资助课题:国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406022)。

作者简介:陈官军,主要从事延伸期预报方法研究。E-mail: aiolya_gj@163.com

通讯作者:魏凤英,主要研究方向:气候诊断与预测。E-mail: weify@camsma.cn

资料,研究与区域持续性低温事件有关的大气低频振荡信号,寻找可以在一定程度上表征不同类型区域持续性低温事件的指数,并尝试结合 DERF2.0 系统的预报产品进行持续性低温指数的延伸期预报试验。结果表明:(1)在研究范围内的区域持续性低温事件可以归纳为江北型、江南型和全区域型 3 类,其中江北型和江南型事件的环流背景差异体现在异常环流中心的纬度位置上,而全区域型事件属于增强型的江北型事件;(2)江北型和江南型区域平均最低气温时间序列的 10—30 d 低频分量的位相和强度变化与区域持续性低温事件的发生有显著关系,可以作为表征区域持续性低温事件指数和预报量;(3)100°—120°E 范围内 850 hPa 温度场距平的经验正交函数分解前两个主模态具有显著的 10—30 d 变化周期,并且其空间结构分别与江北型和江南型事件的典型环流特征一致,前两个主模态时间系数能够作为持续性低温指数的预报因子;(4)检验结果表明,DERF2.0 系统对上述预报因子有一定的预报能力。在延伸期预报时效内,利用统计学和动力学相结合的方法制作的持续性低温指数的预报效果好于模式直接预报的 2 m 气温,该预报方法有助于提升区域持续性低温事件的延伸预报能力。

关键词 低频振荡信号,持续性低温指数,DERF2.0,延伸期预报

中图法分类号 P466

1 引言

20 世纪 80 年代末以来全球气候变暖加剧,特别是中国冬半年最低气温发生了显著突变(魏凤英,2008)。但是,近年来在中国剧烈的降温过程仍时有发生,尤其是发生在南方人口稠密和经济发达地区的持续性低温过程给农业生产、交通运输及人民身体健康带来极大影响。例如,2008 年 1 月中旬至 2 月上旬发生在中国南方地区的大范围、持续性的“低温雨雪冰冻”天气过程,给国民经济造成了巨大的损失。因此,寻找发生低温事件的异常信号、研制低温过程的延伸期预报方法,对于防灾、减灾具有重要意义。

寒潮过程是造成中国冬季大范围降温的主要天气过程,通过大量关于寒潮源地、路径、天气系统成因(陶诗言,1959;Ding, et al,1987;丁一汇,1990,1991a;钱维宏等,2007;张培忠等,1999)及预报方法(Lim, et al,1981;Park, et al,2011)等方面的研究,形成了比较系统和成熟的寒潮理论(丁一汇,1991b;朱乾根等,1992)。区域持续性低温事件(RPLTEs)与寒潮过程有密切的关系,但是并不等同于寒潮过程。例如 2008 年 1 月只有一次强冷空气过程,导致 1 月 13—16 日出现中等强度的寒潮,而南方的极端低温冰冻雨雪天气却从 1 月中旬一直持续到 2 月上旬,说明持续的低温事件并不是由一次单纯的寒潮过程造成的。大部分的大范围持续性低温事件都伴随寒潮事件,但大部分的寒潮事件与大范围持续性低温事件无关,并且两者在环流形势上也有明显差别(Bueh, et al,2011)。因此,要开展持续性低温事件的预报方法研究,就必须先了解此类事件的环流特征及其发生、发展机理。这方面

的研究已经开展了一些,其中欧亚大陆中高纬度大型斜脊斜槽被认为是中国大范围持续性低温事件的关键环流特征(符仙月等,2013;王晓娟等,2013),而平流层中低层环流异常结构及其下传过程(兰晓青等,2013;施宁等,2015)和对流层低层的温度扰动(张宗婕等,2012)可以作为持续性低温事件的前兆信号。同时,与持续性环流异常有密切联系的大气低频振荡(李崇银,1991)也在持续性低温事件的研究中被凸显出来。冬季风期间的中国大陆地区地面气温存在明显的低频振荡特征(金祖辉等,1996),这可能与冷空气以一种低频模态向南传播有关(丁一汇,1991b),而持续性低温事件的发生往往伴有异常的季节内振荡特征(马晓青等,2008;马宁等,2011;朱毓颖等,2013)。

显然,大气的低频振荡信号是反映区域持续性低温事件发生、发展的重要因素之一,同时,大气低频变化又是引起 10—30 d 延伸期天气过程的主要因子之一(丁一汇,1991b),通过提取与预报量有显著关系的大气低频信号,能够有效提高数值模式的延伸期预报技巧(陈官军等,2012,2016)。因此,本文在分析区域持续性低温事件大气低频振荡信号的基础上,寻找一种能够有效监测区域持续性低温事件的持续性低温指数,并将其作为预报对象,结合中国国家气候中心 DERF2.0 系统回算数据进行延伸期预报试验,进而探索能够提升区域持续性低温事件监测和预报能力的方法。

2 资料和方法

2.1 数据来源

(1)站点气温资料来自国家气象信息中心提供的中国 1961—2009 年 730 站日最低气温数据集,筛

选出 36°N 以南、108°E 以东中国南方地区资料完整的 191 个基本站 1961/1962—2008/2009 年共 48 个冬半年(10 月至次年 3 月)逐日最低气温数据。

(2)大气变量采用的是 1961—2009 年 NCEP/NCAR 再分析 I 全球范围日平均格点资料(Kalnay, et al, 1996)。水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向 12 层(包括 100、150、200、250、300、400、500、600、700、850、925 和 1000 hPa), 所用的物理量包括位势高度场和温度场。

(3)模式预报资料是由中国国家气候中心提供的第二代月动力延伸预测模式业务系统(DERF2.0)1983—2009 年逐日历史回算数据, 预报提前时间 1—30 d, 水平分辨率 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, 变量包括 850 hPa 温度场和 2 m 气温场。模式的详细介绍可参考何慧根等(2014)。

2.2 区域持续性低温事件的选取

参考 Zhang 等(2011)对持续性低温事件的定义, 并综合考虑大气低频振荡和延伸预报的基本特征, 采用以下方法选取区域持续性低温事件:

取某日及其前后各 5 d 的最低气温相连, 得到 $11 \text{ d} \times 48 \text{ a} = 528 \text{ d}$ 的序列, 按升序排列, 将第 10 个

百分位上的值作为判断该站点是否发生极端低温事件的标准。对于单个站点来说, 当日最低气温连续 5 d 低于阈值, 且整个过程降温超过 5°C 时定义为一次持续性低温事件, 其中, 过程降温是指持续性事件开始前 5 天的平均日最低温度与事件期间的日最低温度的差值。当在同一时段内至少 5 d 有相邻 10 站同时发生单站持续低温事件, 并且该时段内至少有一天站数超过 20 站时, 定义为区域持续低温事件。

相邻站的计算方法如下: 首先计算同时发生持续性低温事件站点间的距离 D , 计算方法见式(1), 根据所使用的站点密度和影响范围, 确定 $D=5$ 作为相邻站的标准, 也就是当 $D < 5$ 时判定两个站为相邻站。

$$D = \sqrt{(\lambda_i - \lambda_j)^2 + (\varphi_i - \varphi_j)^2} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

λ_i, φ_i 分别表示经、纬度。

48 个冬半年统计得到 62 次区域持续性低温事件。将每次事件期间符合标准站点数最多的日期作为该事件的峰值日。表 1 给出了每次事件的起止日期、持续日数、峰值日期、峰值日站数和主要影响区域。

表 1 62 次区域持续性低温事件统计特征
Table 1 Statistical properties of 62 RPLTEs

序号	起止日期	持续日数(d)	峰值日期	峰值日站数	影响区域
1	1962 年 3 月 22—26 日	5	3 月 23 日	75	江南
2	1962 年 11 月 29 日—12 月 3 日	5	11 月 30 日	44	华南
3	1963 年 1 月 6—16 日	11	1 月 6 日	33	江南
4	1963 年 1 月 21—25 日	5	1 月 22 日	23	江淮
5	1963 年 10 月 18—22 日	5	10 月 18 日	48	江南
6	1964 年 2 月 16—24 日	9	2 月 20 日	110	全区域
7	1965 年 10 月 17—21 日	5	10 月 18 日	25	华南
8	1967 年 12 月 8—12 日	5	12 月 8 日	34	黄淮
9	1968 年 2 月 19—23 日	5	2 月 19 日	23	黄淮
10	1968 年 10 月 19—23 日	5	10 月 19 日	33	华南
11	1969 年 1 月 28 日—2 月 4 日	8	1 月 29 日	77	全区域
12	1970 年 1 月 4—8 日	5	1 月 4 日	46	江淮
13	1970 年 10 月 27 日—11 月 1 日	6	10 月 27 日	20	黄淮
14	1971 年 10 月 12—16 日	6	10 月 12 日	78	江南、华南
15	1971 年 11 月 15—20 日	6	11 月 16 日	63	华中
16	1972 年 2 月 4—10 日	7	2 月 2 日	82	江南、华南
17	1972 年 2 月 28 日—3 月 4 日	5	2 月 28 日	50	江南
18	1973 年 12 月 23 日—1974 年 1 月 3 日	12	12 月 31 日	28	华南
19	1974 年 2 月 7—11 日	5	2 月 8 日	62	江南、华南
20	1974 年 2 月 23—28 日	6	2 月 24 日	76	江南、华南
21	1975 年 11 月 23—27 日	5	11 月 24 日	34	华南
22	1975 年 12 月 9—21 日	13	12 月 14 日	128	全区域
23	1975 年 3 月 19—23 日	5	3 月 19 日	32	华南

续表 1

序号	起止日期	持续日数(d)	峰值日期	峰值日站数	影响区域
24	1976年11月11—18日	8	11月14日	126	全区域
25	1976年12月26—30日	5	12月26日	55	江淮、黄淮
26	1976年11月28日—12月3日	6	11月30日	67	江南、华南
27	1978年10月28日—11月1日	5	10月28日	48	江南、华南
28	1981年10月8—12日	5	10月8日	28	江淮
29	1981年10月21—27日	7	10月22日	73	江淮、黄淮
30	1981年11月5—12日	8	11月6日	67	华中
31	1983年1月21—27日	7	1月22日	35	江南、华南
32	1983年2月17—22日	6	2月18日	33	江淮、黄淮
33	1983年11月27日—12月4日	8	11月27日	30	华南
34	1984年1月18—24日	7	1月21日	25	江淮
35	1984年12月17—28日	10	12月22日	64	江淮、黄淮
36	1985年2月17—23日	7	2月17日	34	江淮、黄淮
37	1985年3月10—15日	6	3月11日	25	华南
38	1985年12月6—16日	11	12月8日	114	全区域
39	1986年2月26日—3月5日	8	3月1日	90	江南、华南
40	1986年11月24日—11月29日	6	11月25日	21	黄淮
41	1987年11月27日—12月11日	15	11月28日	176	全区域
42	1988年2月16—20日	5	2月17日	20	华南
43	1988年2月27日—3月8日	11	3月2日	88	全区域
44	1989年10月16—20日	5	10月17日	39	江淮
45	1991年11月9—13日	5	11月11日	18	华南
46	1991年12月25—31日	7	12月27日	57	江淮、黄淮
47	1992年10月2—19日	18	10月17日	58	江南、华南
48	1992年11月8—12日	5	11月9日	71	江南、华南
49	1993年1月13—22日	10	1月15日	98	全区域
50	1993年11月17—24日	8	11月21日	138	全区域
51	1994年10月16—25日	10	10月21日	136	江南、华南
52	1996年2月16—23日	8	2月18日	154	江南、华南
53	1997年10月25—29日	5	10月26日	21	黄淮
54	1999年12月20—26日	7	12月22日	96	江南、华南
55	2001年11月14—21日	8	11月17日	35	华南
56	2002年10月6—10日	5	10月7日	40	华南
57	2002年12月25日—2003年1月8日	15	1月4日	37	江淮、黄淮
58	2003年11月7—11日	5	11月8日	45	江淮
59	2004年10月2—9日	8	10月2日	37	华南
60	2005年12月12—17日	6	12月13日	39	江淮
61	2008年1月14日—2月7日	25	1月30日	34	江南、华南
62	2009年1月10日—14日	5	1月10日	28	华南

3 低频振荡信号及预报量的选取

3.1 区域持续性低温事件的分类及其环流特征

大气低频振荡通常与大尺度系统相联系,因此,在确定延伸期预报试验的预报对象时,根据表1中相对分散的影响区域归纳出具有相似大尺度环流背景的事件类型,并提取出能够在一定程度上表征区域持续性低温事件发生与否的预报对象。按照表1中所给出的主要影响区域计算各站点在对应区域内发生持续性低温事件峰值日持续性低温台站的出现

频率 f

$$f = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{k} \times 100\% \quad (2)$$

当该台站符合单站持续性低温事件标准时, m 记为 1, 否则记为 0; k 为以影响区域区分某一类事件的个数。将 f 标绘在图中就能反映某一类事件的集中区域,同时分析峰值日环流特征,发现可以将上述事件按照影响区域和环流特征划分为 3 类事件,即发生在长江以北(以下称“江北型”)、发生在长

江以南(以下称“江南型”)和发生在整个研究区域内(以下简称“全区域型”)的事件,其中江北型 19 次,江南型 34 次,全区域型 9 次。

图 1 分别显示了以上 3 类事件中各站点发生持续性低温事件的概率和峰值日环流形势合成分析结果。江北型(图 1a、b)峰值日环流特征主要反映在以 50°N 为分界线的经向反位相环流异常上,其中 $55^{\circ}\text{—}70^{\circ}\text{N}$ 范围内的西伯利亚地区为高层位势高度场正异常和低层暖异常中心, $35^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$ 范围内的中国中北部地区为高层位势高度场负异常和低层冷异常中心,显著的北风分量从高纬度反气旋性环流前部向南延伸;江南型(图 1c、d)的主要影响区域包括华南和江南南部,其峰值日环流特征表现为以 40°N 为分界线的经向反位相环流异常配置,且正、负异常中心的纬度位置均较江北型偏南约 10 个纬距,其中高层位势高度场正异常和低层暖异常中心位于贝加尔湖附近,低层冷异常中心分别位于江淮—黄淮和江南地区,但高层位势高度场负异常的位置与江北型差别不大,显著的北风分量从位势高度场正异常中心向南延伸,并逐渐加强,在长江以南地区达到最强,直达中国南海;全区域型(图 1e、f)事件的峰值日的环流特征与江北型类似,其正、负异常中心的纬度位置与江北型一致,但强度明显高于江北型的合成结果,但是显著性水平的程度没有江北型高,同时全区域型也具有江南型的一些特征,表现为显著的北风分量越过长江后并未减弱。进一步分析以上 3 类事件持续期间的大尺度环流特征后发现,上述峰值日环流形势的出现和维持是造成极端低温事件持续的主要原因,这与长波系统移动或阻塞系统崩溃造成的 2—3 d 的典型寒潮过程不同,可能与大气的低频变化有关。

前面的分析表明,将区域持续性低温事件划分为江北型和江南型后,型内各事件具有类似的站点空间分布和同期环流特征,而各型之间又有显著的差异,全区域型则是在江北型的基础上表现出更强的冷空气经向输送以及下游系统的阻挡效应。

3.2 区域持续性低温事件与低频振荡的关系

为了考察区域持续性低温事件与大气低频变化的关系,选取研究区域内 30°N 以北的站点平均最低气温距平值作为表征江北型气温变化的指数(T_1),选取研究区域内 30°N 以南的站点平均最低气温距平值作为表征江南气温变化的指数(T_2)。

对 48 个冬半年的 T_1 和 T_2 逐日时间序列做 Morlet 小波分析(Torrence, et al, 1998)(图 2),图 2a、c 为对应周期和时间的小波功率谱,通过 0.05 显著性水平的谱值由粗实线包围,表示所对应周期显著;而图 2b、d 中实线代表总体小波功率谱值,虚线代表对应周期上 0.05 显著性水平的临界值,在虚线右侧的谱值通过 0.05 显著性水平。发现 T_1 和 T_2 都具有显著的 20 d 左右和 40 d 左右的低频变化周期。

为了确定 T_1 和 T_2 的低频变化是否与区域持续性低温事件的发生有直接的关系,进而确定适用于区域持续性低温事件的延伸期预报试验的预报量,首先对 T_1 和 T_2 进行 10—30 d 和 30—50 d 带通滤波,计算两个低频分量对原始序列的方差贡献。其次,分析两个低频分量振荡位相与区域持续性低温事件的关系,当区域持续性低温事件出现在某一分量的振幅大于 1 个标准差的负位相区间时,认为相应低频分量涵盖了该事件。第三,对涵盖区域持续性低温事件的低频分量振荡周期进行位相划分,并按照事件类型和低频分量类型对各位相的环流场进行合成分析。表 2 给出了两个低频分量对各自原始序列的方差贡献及其振荡位相与 3 类区域持续性低温事件的关系。从表 2 可以看出:(1)10—30 d 低频分量的方差贡献明显大于 30—50 d 低频分量,且出现在 10—30 d 低频分量的显著负位相区间的持续性低温事件比例明显高于 30—50 d 低频分量。(2)有 15 次江北型事件发生在 T_1 的 10—30 d 低频分量振幅大于 1 个标准差的负位相区间,占总数的 78.9%,剩余的 4 次有 3 次出现在正位相向下一个振幅大于 1 个标准差的负位相过渡的区间,有 1 次出现在负位相向正位相过渡的区间;有 28 次江南型事件发生在 T_2 的 10—30 d 低频分量振幅大于 1 个标准差的负位相区间,占总数的 82.4%,剩余的 6 次中有 4 次出现在正位相向下一个振幅大于 1 个标准差的负位相过渡的区间,而另外 2 次则出现在负位相向正位相过渡的区间。(3) T_1 的 10—30 d 低频分量能够涵盖 70% 以上的所有类型事件,而 T_2 的 10—30 d 低频分量仅涵盖了不到三分之一的江北型事件,这与冷空气总是由北向南传播有关。(4)9 次全区域型事件中的 8 次均出现在 T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量的振幅大于 1 个标准差的负位相区间重合时。

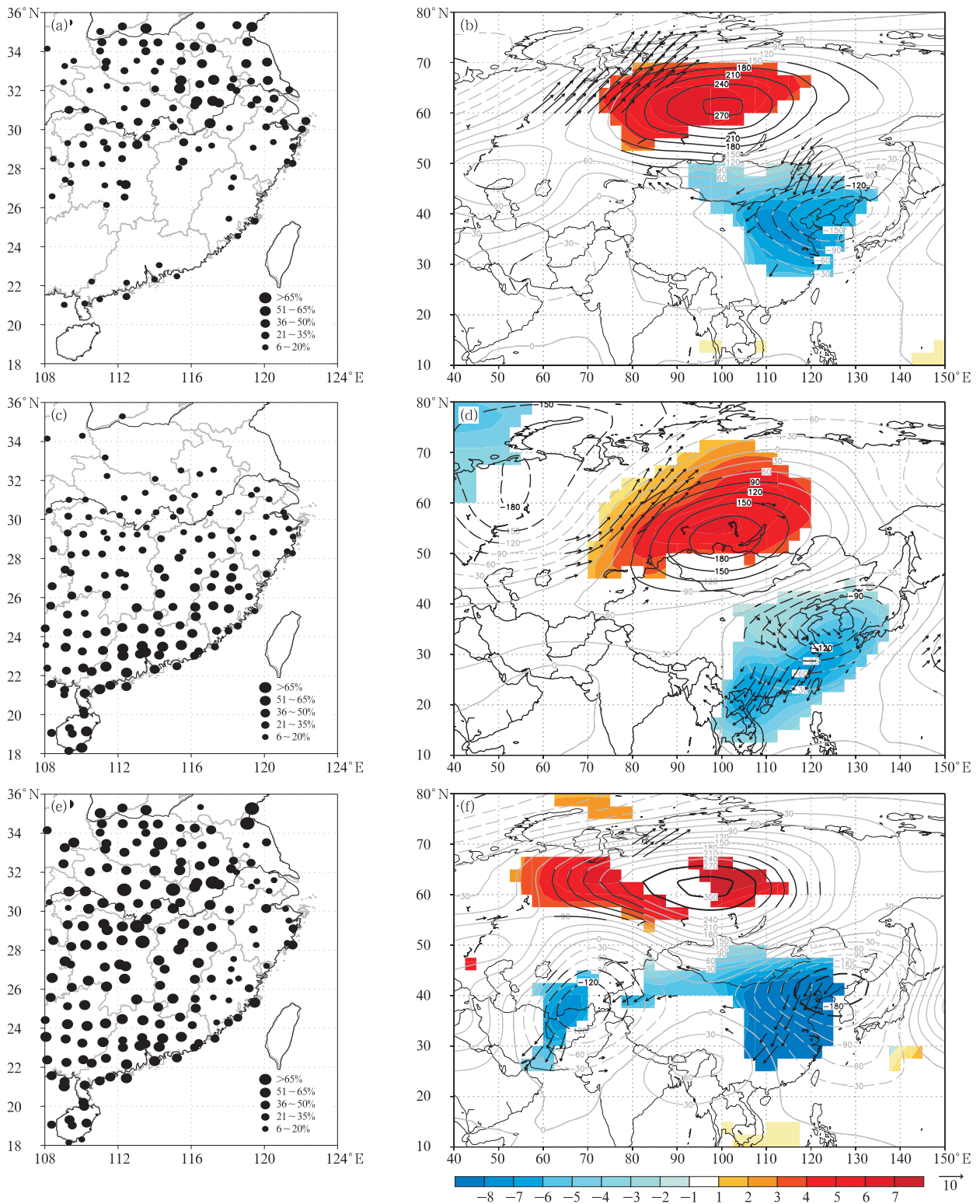


图1 3种类型事件峰值日持续性低温事件站点的出现频率(a,c,e,单位:%)以及300 hPa位势高度场异常(等值线,单位:gpm;黑色线条表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平)、850 hPa温度场异常(色阶,单位:K;通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平)和850 hPa风场异常(矢量,单位:m/s;通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平)的合成结果(b,d,f)(a,b. 江北型,c,d. 江南型,e,f. 全区域)
 Fig.1 Frequency distributions (a,c,e, unit:%) and composites (b,d,f) of geopotential height anomalies in 300 hPa (contours,unit: gpm), temperature anomalies (colors,unit: K) and wind anomalies (vectors,unit: m/s) in 850 hPa corresponding to the three regional types of RPLTEs (62 cases)
 (a,b. North of Yangtze River, c,d. South of Yangtze River, e,f. the mainland China to the south of 40°N)

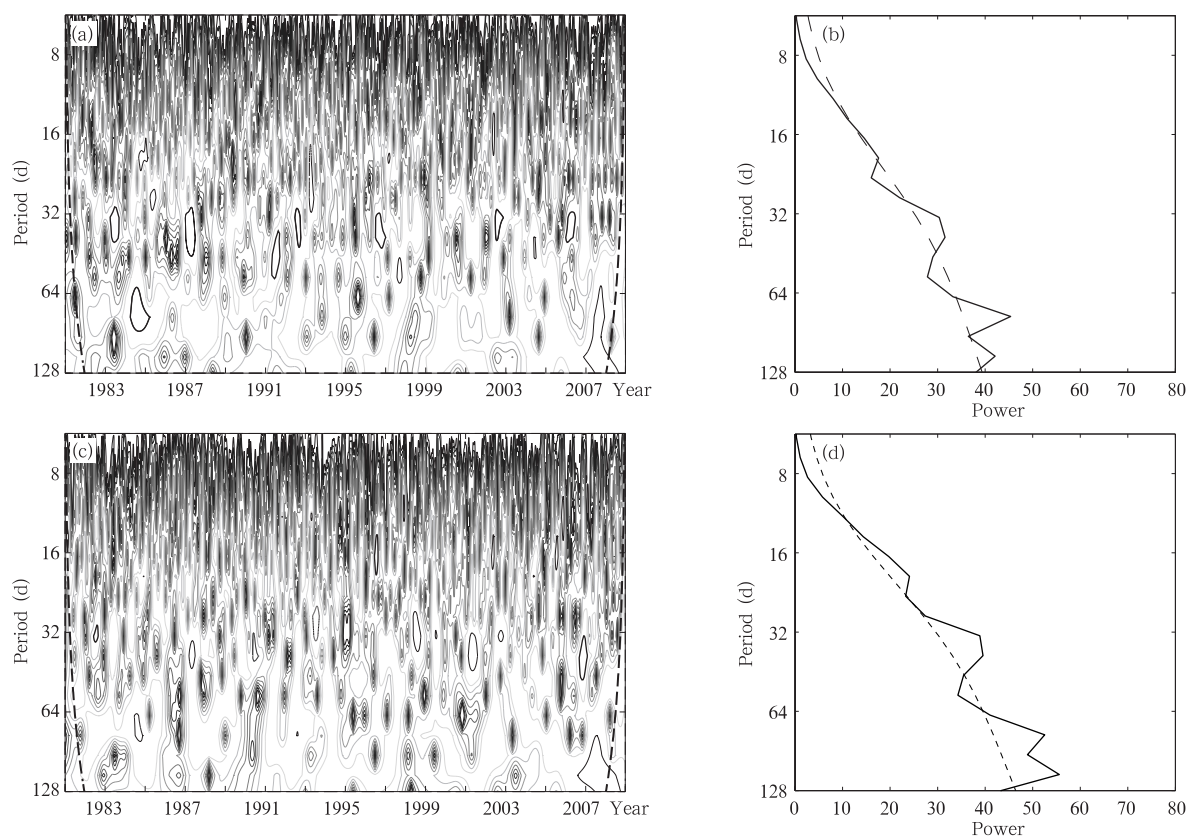


图2 T_1 (a,b)和 T_2 (c,d)的Morlet小波分析结果

(图a、c中等值线为对应时间和周期的小波功率谱,黑色粗实线所包围的区域超过了0.05的红噪音显著性水平,虚弧线外侧区域表示边界效应影响显著的区域;图b、d中的粗实线为总体小波功率谱,虚弧线代表0.05的显著性水平)

Fig. 2 Morlet wavelet analysis of T_1 (a,b) and T_2 (c,d)

(The contours in (a, c) denote the wavelet spectral coefficients. The thick contours enclose the regions with significance levels greater than 0.05 for red or white noise. The dashed curves indicate the cone of influence outside of which the edge effects become important. In (b, d), the solid lines show the global wavelet spectrum; the dashed curves show the 0.05 significance level for the global wavelet spectrum)

表2 T_1 和 T_2 的低频分量对原始值的方差贡献及其振幅大于一个标准差负位相中所涵盖的区域持续性低温事件数占相应类型总事件数的比例

Table 2 Variance contributions of the low frequency components of T_1 and T_2 , and percentages of the RPLTEs that occur when the period of the low frequency component is greater than one standard deviation

	方差贡献(%)	涵盖的江北型事件的比例(%)	涵盖的江南型事件的比例(%)	涵盖的全区域型事件的比例(%)
T_1 的10—30 d低频分量	26.87	78.9	73.5	100
T_1 的30—50 d低频分量	11.53	52.6	14.7	88.9
T_2 的10—30 d低频分量	33.46	27.6	82.4	88.9
T_2 的30—50 d低频分量	12.14	6.8	35.3	66.7

从涵盖区域持续性低温事件的 T_1 和 T_2 的10—30 d低频分量划分位相后的环流场合成分析结果(图3)可以看出,以 T_1 和 T_2 的10—30 d低频分量划分位相后的多要素场合成分析结果能够合理的解释上述统计关系:(1)区域持续性低温事件发生时的负异常谷值位相(图3c、g)的环流形势与图1中相应类型事件峰值日的合成结果一致,江北型和江南型的主要差异表现在正(暖)异常中心和负(冷)

异常中心的纬度位置上,以及北风分量向南爆发的强度上;(2)前两个位相(图3a、b、e、f)环流的演变则表明,造成区域持续性低温事件的低频环流表现为由西北向东南传播的波列形态,并且波列向东南方向传播的距离和强度决定了低层温度场和高层位势高度场经向反位相中心分布的纬度,也决定了区域持续性低温事件的类型;(3)在 T_2 低频振荡位相和转换过程中,冷异常中心和强的北风分量要经由江

北型影响区域南下,这就解释了表2中 T_1 的10—30 d 低频分量为什么能够涵盖70%的江南型事件;(4)由负异常谷值向正异常峰值转换的过渡位相(图

3d、h)的特征并不显著,说明这种环流特征是与区域持续性低温事件紧密联系的,并不是每次位相转换过程都会出现。

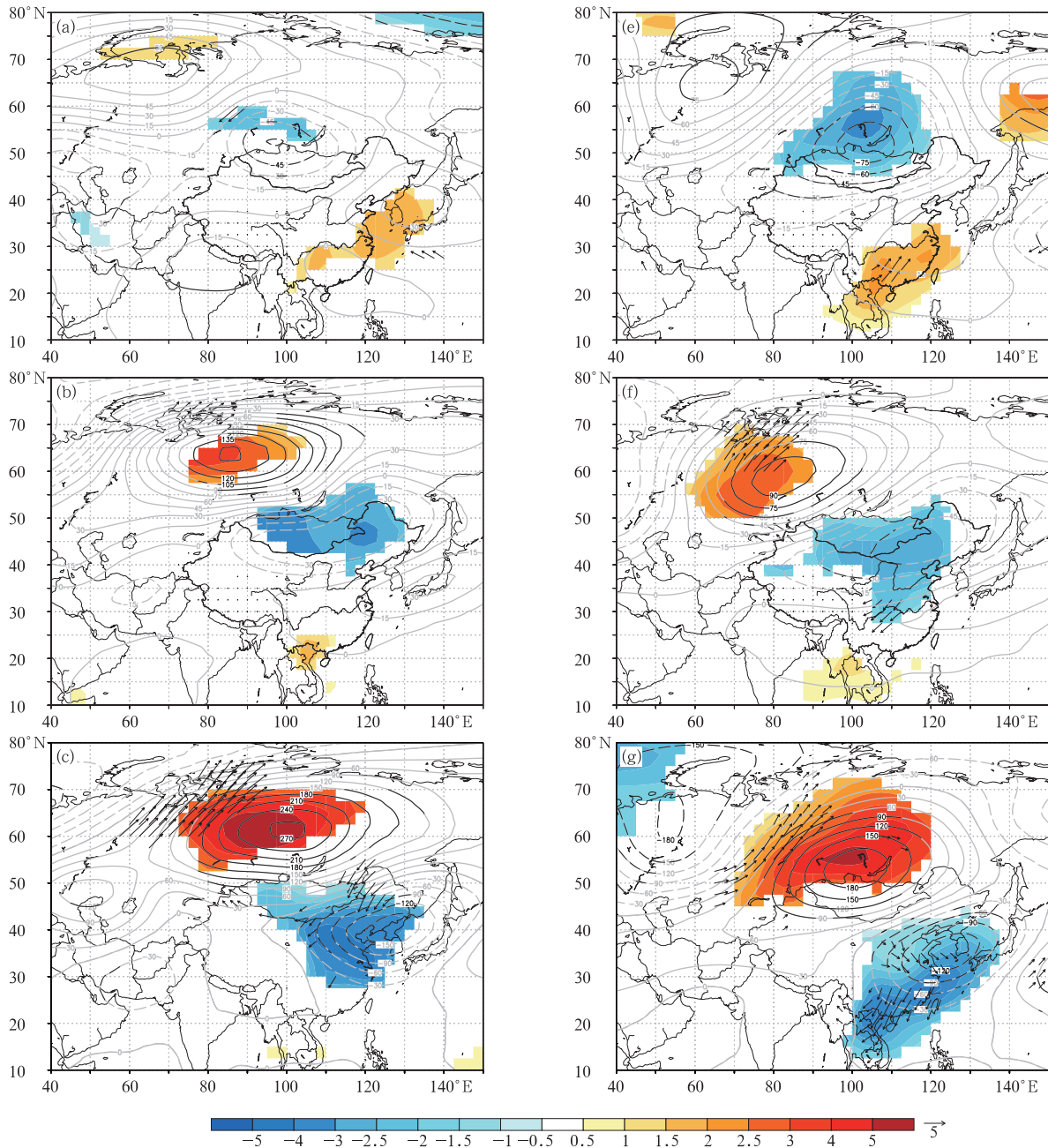
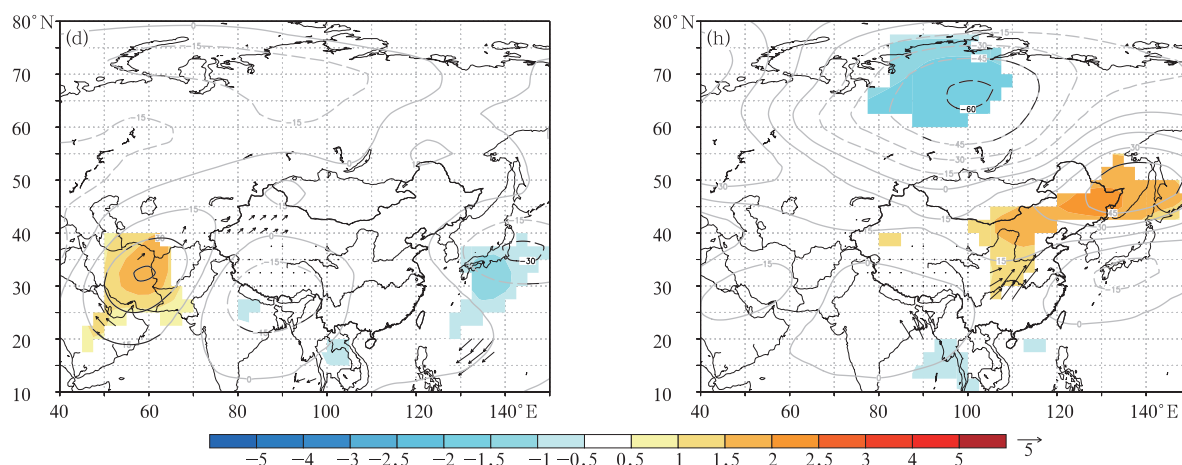


图3 以涵盖区域持续性低温事件的 T_1 和 T_2 的10—30 d 低频分量划分位相后的环流场合成分析结果

(a—d. 江北型事件的 T_1 结果, e—h. 江南型事件的 T_2 结果; a, e. 事件发生前的正异常峰值位相, b, f. 正异常向负异常的过渡位相, c, g. 事件发生时的负异常谷值位相, d, f. 负异常向正异常的过渡位相; 要素包括300 hPa 位势高度场异常(等值线, 单位:gpm; 黑色线条表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平), 850 hPa 温度场异常(色阶, 单位:K; 通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平)和850 hPa 风场异常(矢量, 单位:m/s; 通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平))

Fig. 3 Composites of geopotential height anomalies in 300 hPa (contours, unit: gpm), temperature anomalies (colors, unit: K) and wind anomalies (vectors, unit: m/s) in 850 hPa corresponding to the phases of the low frequency components of T_1 (a—d) and T_2 (e—h)



续图 3

Fig. 3 Continued

从上述分析可以看出, 大部分的区域持续性低温事件出现在 T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量大于 1 个标准差的负位相区间, T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量位相转换过程中的大气环流演变能够从天气学意义上解释区域持续性低温事件的发生、发展。这一方面表明低频变化的时间尺度与低温事件的持续性相对应, 另一方面表明低频振荡的强度与温度能否达到低温事件标准相对应, 因此 T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频变化与区域持续性低温事件的发生有密切关系, 将 T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量(以下分别记为 T_1^* 和 T_2^*)作为表征区域持续性的低温事件的指数是可行的, 进而可以通过预报 T_1^* 和 T_2^* 的未来演变趋势, 并结合其与 3 类事件的关系, 来判断可能发生区域持续性低温事件的时段和主要影响区域。

4 预报因子的选取

多要素的合成分析表明, 低层温度场和高层位势高度场的经向反位相分布特征及其相对纬度位置, 是造成持续性低温指数低频变化和表征区域持续性低温事件是否发生的关键环流系统, 并且这种环流系统具有显著的低频变化特征。从前面的分析可以看出, 与持续性低温指数低频变化相配合的高低层环流呈现同步变化趋势, 既高层位势高度场正异常与低层暖异常相适应, 高层位势高度场负异常与低层冷异常相适应, 低层温度场距平合成结果的显著性始终高于高度场。因此, 在没有找到其他显著的低频信号的情况下, 为了简化预报模型, 文中从与持续性低温事件关系最为直接的低层温度场异常出发, 尝试提取与 T_1^* 和 T_2^* 有显著关系的预报因

子。从图 3 可以看出, 在 $100^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$ 范围内 850 hPa 温度场异常的北暖南冷的配置是区域持续性低温事件的同期典型信号, 而暖异常中心和冷异常中心的相对纬度位置是区别事件类型的关键特征。对 48 个冬半年逐日 $100^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 温度场距平进行经验正交函数(EOF)分解, 前两个主模态分别解释了 38.7% 和 28.2% 的方差, 从其空间结构(图 4)可以看出, EOF1 恰好对应江北型持续性低

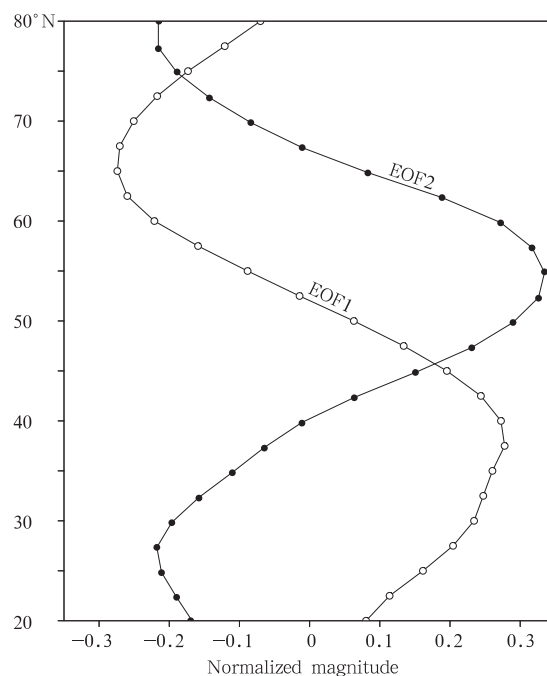


图 4 对 $100^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 温度距平场在 $20^{\circ}-80^{\circ}\text{N}$ 进行经验正交函数分解后得到的前两个主模态空间结构

Fig. 4 Spatial structures of the leading EOF pair of 850 hPa temperature anomalies (averaged from $105^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$)

温事件期间 850 hPa 温度场异常的南北冷暖区的配置,而 EOF2 对应江南型持续性低温事件期间 850 hPa 温度场异常的经向配置。

进一步对前两个主模态的时间系数 PC_1 和

PC_2 做 Morlet 小波分析(图 5),发现 PC_1 和 PC_2 都具有显著的 10—30 d 和 30—60 d 低频变化周期,这也与 T_1 和 T_2 的显著振荡周期相对应。

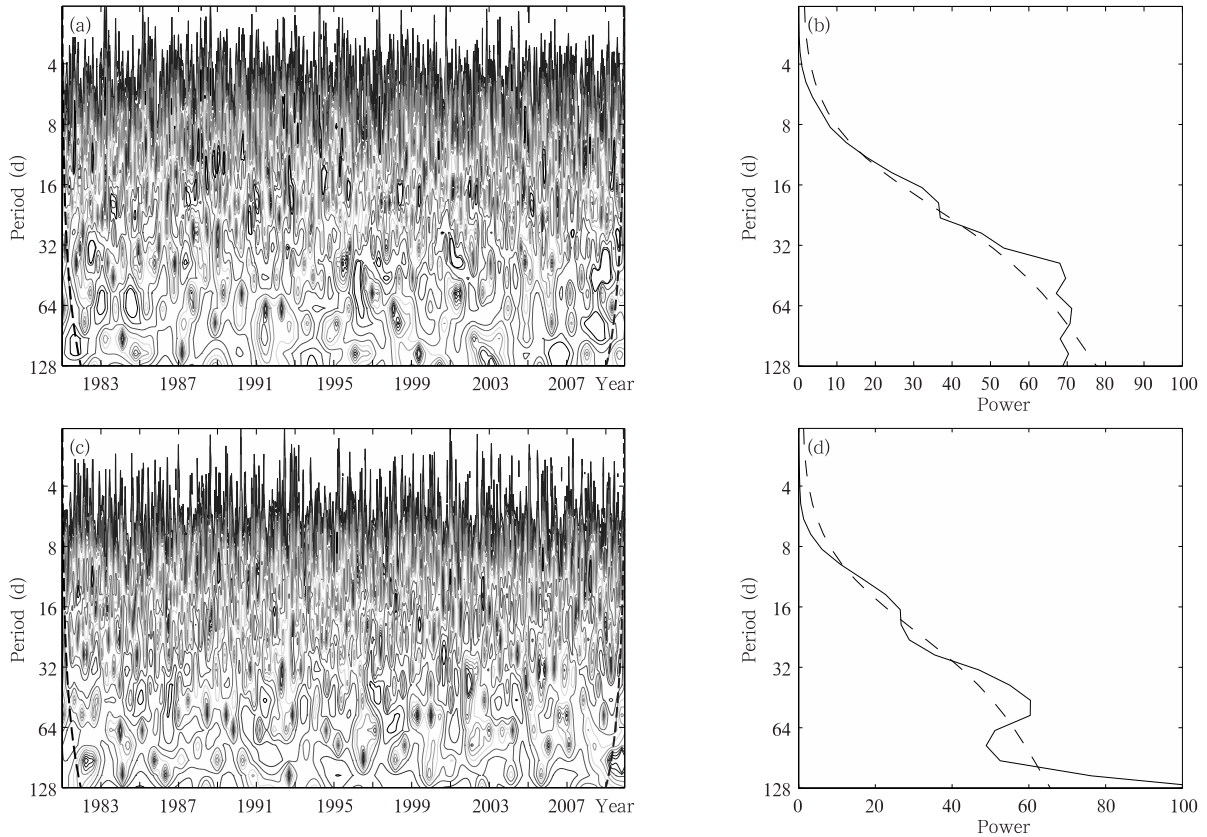


图 5 对 100° — 120° E 平均的 850 hPa 温度距平场在 20° — 80° N 进行 EOF 分解后得到的前两个主成分的 Morlet 小波分析结果

(a, b. EOF1, c, d. EOF2; a, c. 等值线为对应时间和周期的小波功率谱,黑色粗实线所包围的区域超过了 0.05 的红噪音显著性水平,表示所对应的周期显著,虚弧线外侧区域表示边界效应影响显著的区域;b, d. 实线为总体小波功率谱,虚线代表对应周期上 0.05 显著性水平的临界值,在虚线右侧的谱值通过 0.05 显著性水平)

Fig. 5 Morlet wavelet analysis of the PCs of the two leading EOFs

(a, b. EOF1, c, d. EOF2; a, c. the contours denote the wavelet spectral coefficients, the thick contours enclose the regions with significance level greater than 0.05 for red or white noise, the dashed curves indicate the cone of influence outside of which the edge effects become important; b, d. the solid lines show the global wavelet spectrum, the dashed curves show the 0.05 significance level for the global wavelet spectrum)

分别计算冬半年 PC_1 、 PC_2 与 T_1^* 、 T_2^* 的相关系数。表 3 为各相关系数的 48 个冬半年平均值,由于各年样本量长度为 182 d,当相关系数大于 0.2 时就超过 0.01 的显著性水平。可以看出, PC_1 与 T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量的相关性都超过显著性水平,且 PC_1 与江北型指数(T_1^*)的相关性显著大于与江南型指数(T_2^*)的相关性,而 PC_2 恰好相反,

其与 T_2^* 的相关性最高,表明 PC_1 是调制江北型低温过程的主要因素,而 PC_2 与江南型低温过程关系密切。统计各类型区域持续性低温事件发生时间与 PC_1 和 PC_2 的关系,发现 78.8% 的江北型低温事件出现在 PC_1 大于 1 个标准差的负位相,而 85.2% 的江南型低温事件出现在 PC_2 大于 1 个标准差的正位相。

以上分析表明:(1)100°—120°E 平均的850 hPa 温度场距平经验正交函数分解的前两个主模态空间结构与出现区域持续性低温事件时 850 hPa 温度场异常的经向配置相吻合,其中 EOF1 反映了与江北型持续性低温事件相匹配的 850 hPa 温度场结构, EOF2 反映了与江南型持续性低温事件相匹配的 850 hPa 温度场结构;(2) EOF1 和 EOF2 都具有显著的 10—30 d 低频变化周期, PC_1 与 T_1^* 存在显著相关关系, PC_2 与 T_1^* 、 T_2^* 都存在显著相关关系;(3)可以利用 PC_1 、 PC_2 作为预报因子,来预测 T_1^* 和 T_2^* ,并进一步判断区域持续性低温事件的发生。

表 3 48 个冬半年平均的 PC_1 、 PC_2
与 T_1^* 、 T_2^* 的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of PC_1 and PC_2
with the low frequency components of T_1^* 、 T_2^*
averaged over 48 winters

	PC_1	PC_2
T_1^*	0.31	-0.21
T_2^*	0.10	-0.33

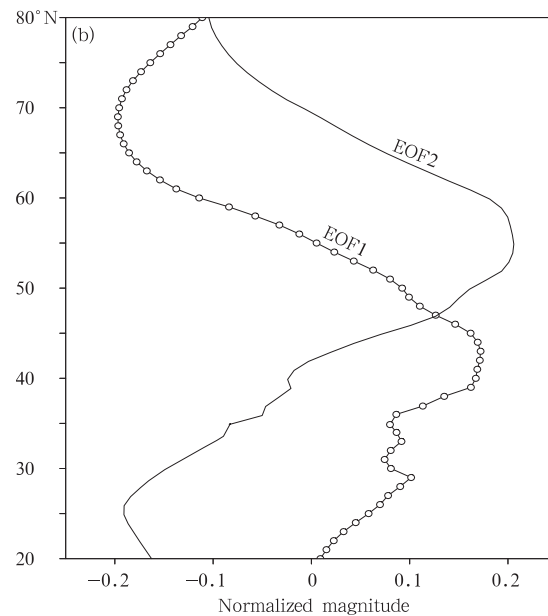
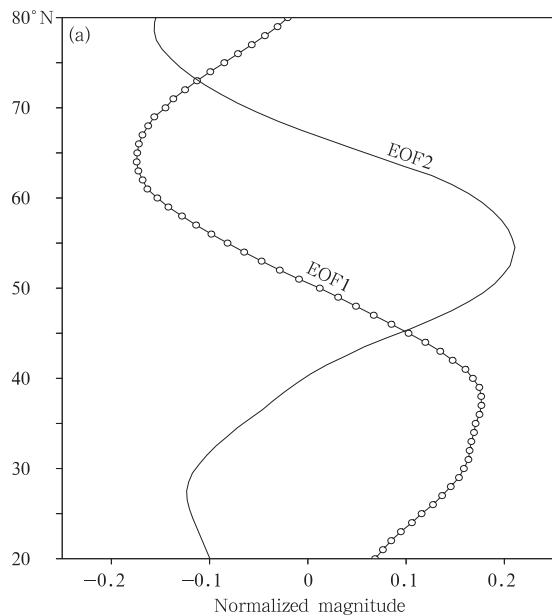


图 6 100°—120°E 平均 DERF2.0 850 hPa 温度距平预报场经验正交函数分解前两个主模态
(a. 预报提前时间为 1 d, b. 预报提前时间为 15 d)

Fig. 6 Same as in Fig. 4 but for DERF2.0 output (a. leadtime = 1 d, b. leadtime = 15 d)

下面进一步检验其时间系数是否存在与实际情况相符的低频变化特征。分别对预报时间 1 和 15 d 的前两个主模态时间系数做 Morlet 小波分析。1 d 预报的分析结果与再分析资料的结果基本一致(图

5 基于 DERF2.0 系统预报产品的延伸期预报试验

5.1 模式产品检验

在进行预报试验前,先利用 DERF2.0 系统回报的 1983/1984—2008/2009 年共 26 个冬半年的逐日 850 hPa 温度场对模式模拟 850 hPa 温度场经向低频变化的能力进行检验。利用历史资料对预报时间为 1—30 d 的预报产品进行系统误差订正后,取 850 hPa 温度场距平在 100°—120°E 的经向平均值,并在 20°—80°N 范围作经验正交函数分解(图 6),图 6a、b 分别为预报时间 1 和 15 d 的前两个主模态的空间分布型,可以看出与再分析资料计算的结果基本一致,其中预报时效 1 d 的 EOF1 和 EOF2 的方差贡献分别为 38.6% 和 32.2%,15 d 预报时效的前两个主模态的方差贡献分别为 37.6% 和 29.6%,说明 DERF2.0 模式预报产品能够反映关注区域内 850 hPa 温度场的典型特征。

略),对于 15 d 预报而言(图 7), PC_1 存在 10—30 d 的显著变化周期,但是 30—60 d 周期不显著, PC_2 同时存在显著的 10—30 和 50 d 左右的振荡周期。

计算各年冬半年不同预报时间下的 PC_1 和

PC_2 预报值与观测值的相关系数,发现 PC_1 通过 0.01 显著性水平的预报时间最长达 17 d, PC_2 为 15 d,表明 DERF2.0 模式对匹配区域持续性低温事

件的 850 hPa 温度场异常配置及其低频变化规律有一定的预报能力。

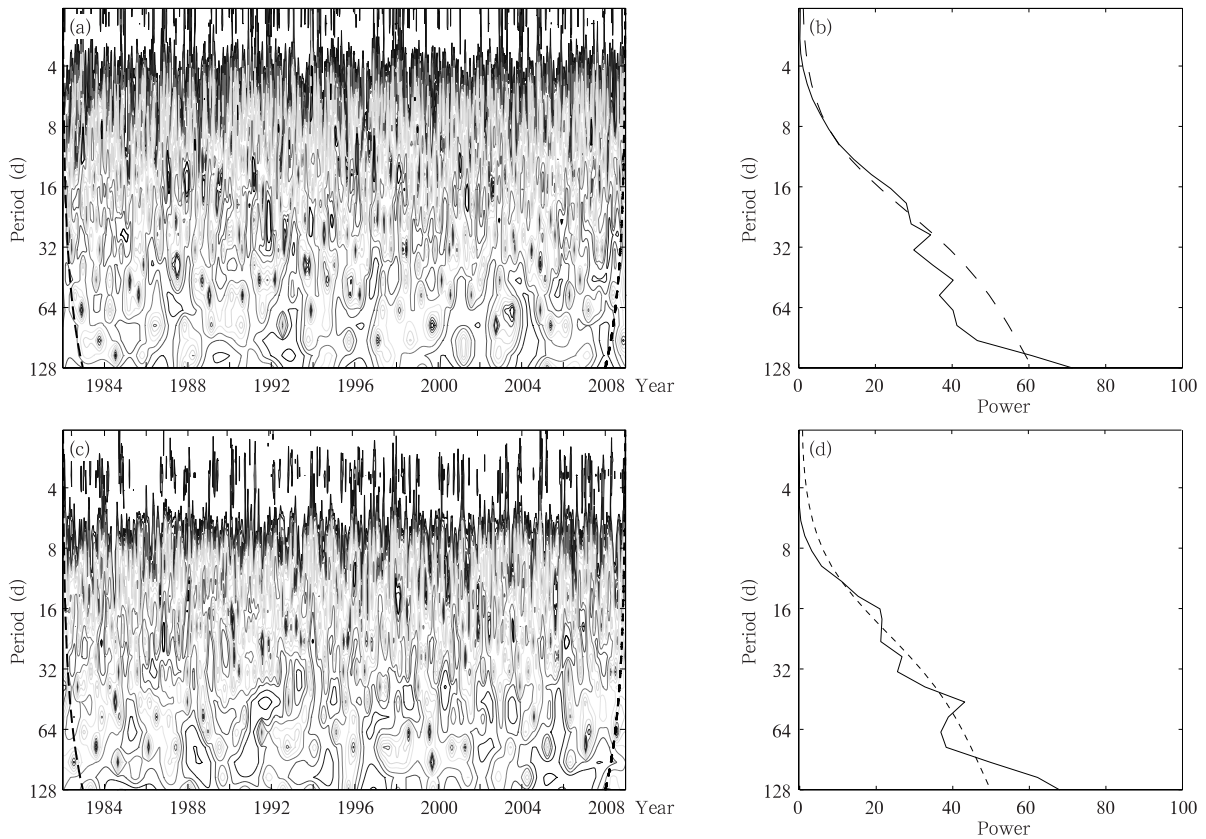


图7 同图5,但为 DERF2.0 预报时间 15 d 的预报结果

Fig. 7 Same as Fig. 5 but for DERF2.0 output (leadtime = 15 d)

5.2 区域持续性低温指数的延伸期预报试验

将 DERF2.0 系统预报的 100° — 120° 平均 850 hPa 温度距平值投影到由观测值计算的前两个主模态空间型 EOF1 和 EOF2 上,得到主成分时间系数的预报值 PC_1^f 和 PC_2^f ,分别将 30° N 以北和 30° N 以南区域内的 2 m 气温距平场平均值时间序列作为模式直接预报的江北型和江南型温度指数,记为 $2T_1^f$ 和 $2T_2^f$ 。

预报模型采用逐步回归方法(魏凤英,2007)建立,预报因子包括 PC_1^f 、 PC_2^f 、 $2T_1^f$ 和 $2T_2^f$,预报量为 T_1^* 和 T_2^* 。考虑文中所使用的站点资料和模式资料在时间范围上有差异,取 1983/1984—2008/2009 年共 26 个冬半年作为试验区间。其中,建模样本区间为除预报年份以外所有冬半年逐日时间序列,即 182×25 个样本,预报区间为预报年份冬半年逐日

时间序列,即 182 个样本。例如,若对 1997/1998 年冬半年的江南型低温指数 T_1^* 进行预报试验,则选取 PC_1^f 、 PC_2^f 、 $2T_1^f$ 作为预报因子, T_1^* 作为预报量,利用除 1997/1998 年冬半年外的所有冬半年建立预报模型,再将不同预报提前时间下 1997/1998 年冬半年 PC_1^f 、 PC_2^f 、 $2T_1^f$ 的预报值代入预报方程,计算出 1997/1998 冬半年不同预报提前时间下 T_1^* 的预报值 T_1^{*f} ,进而评估该方法的预报能力。分别计算不同预报提前时间预报试验输出的结果 T_i^{*f} 和模式直接预报结果 $2T_i^f$ 与观测值计算的持续性低温监测指数 T_i^* ($i = 1, 2$) 的平均相关系数(图 8),将 PC_1^f 、 PC_2^f 和 $2T_1^f$ 作为预报因子进行统计建模后的预报能力要明显强于模式直接预报能力,前者通过 0.01 显著性水平的预报提前时间为 14 d,而后者只有 11 和 9 d。

通过上述预报模型获得区域最低温度时间序列 10—30 d 低频分量 T_1^{*f} 、 T_2^{*f} 后, 结合 PC_1^f 、 PC_2^f 位相进一步判断可能发生区域持续性低温的时间和区域。以 1987/1988 年冬半年发生的区域持续性低温事件(表 1)为例:(1)1987 年 11 月 27 日—12 月 11 日出现全区域型持续性低温事件(e1), T_1^{*f} 和 T_2^{*f} 均处于显著的负位相谷值区间, 同时, PC_1^f 的负位相谷值区间和 PC_2^f 的正位相峰值区间叠加, 表明发生全区域型持续性低温事件的可能性较大, 与实际情

况相符, 同样的情况出现在 1988 年 2 月 27 日—3 月 8 日, 虽然 T_1^{*f} 和 T_2^{*f} 谷值位相出现的时间有所差异, 但是通过 PC_1^f 和 PC_2^f 正负位相叠加的区间, 能够大致判断全区域型持续性低温事件(e3)出现的时间。(2)1988 年 2 月 16—20 日发生江南型持续性低温事件(e2), T_2^{*f} 的谷值位相与之对应, PC_1^f 和 PC_2^f 处于明显的正位相峰值区间, 表明江北型事件的发生概率较小, 而江南型事件的发生概率较大。

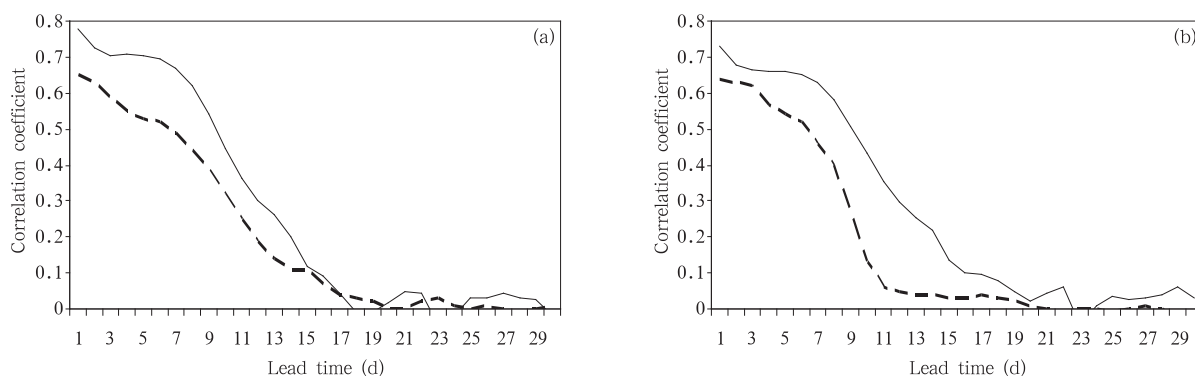


图 8 不同预报提前时间下江北型(a)和江南型(b) T_i^{*f} 与 T_i^* 的平均相关系数(实线)以及 $2T_i^f$ 与 T_i^* 的平均相关系数(虚线)

Fig. 8 Correlation coefficients between T_i^{*f} and T_i^* (solid line), $2T_i^f$ and T_i^* (dashed line) at various leadtime averaged over 26 winters
(a. T_1^{*f} and T_1^* , $2T_1^f$ and T_1^* ; b. T_2^{*f} and T_2^* , $2T_2^f$ and T_2^*)

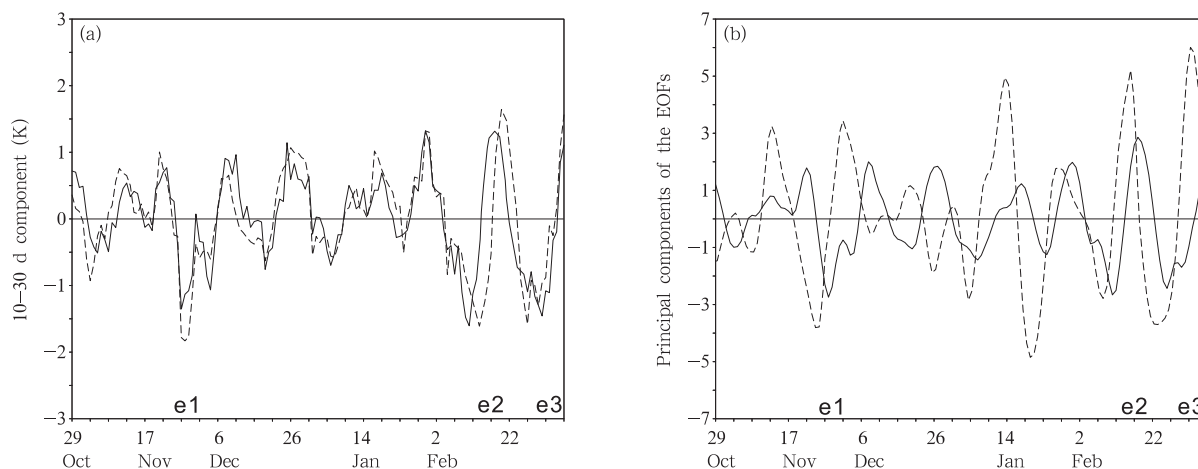


图 9 (a)预报模型输出的 1987/1988 年冬半年江北型低温指数 T_1^{*f} (实线)和江南型低温指数 T_2^{*f} (虚线)预报值, (b)850 hPa 温度场投影到 EOF1 和 EOF2 上获得的主成分时间系数预报值 PC_1^f (实线)和 PC_2^f (虚线)
(预报提前时间为 10 d; 横坐标上方的 e1、e2、e3 分别标注了 3 次区域持续性低温事件的大致发生时间)

Fig. 9 Forecast verifications of RPLTEs during the 1987/1988 winter
(a. T_1^{*f} (solid line), T_2^{*f} (dashed line), b. PC_1^f (solid line) and PC_2^f (dashed line);
leadtime = 10 d, e1, e2, e3 upon the horizontal axis indicate the duration of RPLTEs)

6 结论和讨论

利用 1961/1962—2008/2009 年 48 个冬半年逐日最低温度数据和 NCEP/NCAR 再分析日平均资料,对发生在 36°N 以南、 108°E 以东中国南方地区的 62 次区域持续性低温事件的低频振荡信号进行了研究,结果表明,上述事件可以分为江北型、江南型和全区域型 3 个类型,在此基础上定义的江北型和江南型区域平均最低温度时间序列 T_1 和 T_2 具有显著的 10—30 d 低频振荡特征,与其对应的低频环流的演变表现为低频波列由西北向东南传播的过程, T_1 和 T_2 的 10—30 d 低频分量 T_1^* 和 T_2^* 与区域持续性低温事件的发生有显著的关系,既 T_1^* 和 T_2^* 的低频时间尺度体现了持续性低温事件的持续性特征,而低频振荡的位相和强度体现了持续性低温事件的发生标准,可以作为表征区域持续性低温事件的指数。

100° — 120°E 范围内 850 hPa 温度场距平经验正交函数分解的前两个主模态的空间结构分别与江北型和江南型事件的 850 hPa 温度场距平经向配置相一致,其时间系数都具有 10—30 d 显著变化周期,并分别与江北型和江南型持续性低温指数的 10—30 d 低频分量有显著的相关关系,可以作为持续性低温指数的预报因子。

DERF2.0 系统能够较好地反映上述预报因子的低频振荡特征。利用 1983—2009 年 DERF2.0 系统回算的产品,将 850 hPa 温度场预报值投影到 EOF1 和 EOF2 空间结构上,获得预报因子 PC_1^f 和 PC_2^f ,以 T_1^* 和 T_2^* 作为预报量,采用逐步回归方法建立预报模型进行预报试验,结果表明,基于 DERF2.0 系统预报产品的表征区域持续性低温事件的持续性低温指数的延伸期预报效果好于模式直接预报的 2 m 气温,结合分析 PC_1^f 和 PC_2^f 的位相配置情况有助于判断区域持续性低温事件的发生时段和影响区域,进而加强区域持续性低温事件的监测和延伸预报能力。

研究过程中发现,并不是每次 T_1^* 或 T_2^* 出现大于 1 个标准差负位相的情况下都会有区域持续性低温事件发生,因为造成区域持续性低温事件的因素并不仅限于低层温度场 10—30 d 低频分量,还受到其他层次环流系统和其他尺度系统的制约,尚需进一步的分析 and 研究。

参考文献

- 陈官军,魏凤英. 2012. 基于低频振荡特征的夏季江淮持续性降水延伸期预报方法. 大气科学, 36(3): 633-644. Chen G J, Wei F Y. 2012. An extended-range forecast method for the persistent heavy rainfall over the Yangtze-Huaihe River Valley in summer based on the low-frequency oscillation characteristics. Chinese J Atmos Sci, 36(3): 633-644 (in Chinese)
- 陈官军,魏凤英,姚文清等. 2016. 基于南海夏季风季节内振荡的降水延伸期预报试验. 应用气象学报, 27(3): 273-284. Chen G J, Wei F Y, Yao W Q, et al. 2016. Extended range forecast experiment for rainfall based on the real time intraseasonal oscillation. J Appl Meteor Sci, 27(3): 273-284 (in Chinese)
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究. 热带气象, 6(2): 119-128. Ding Y H. 1990. A statistical study of winter monsoon in East Asia. J Trop Meteor, 6(2): 119-128 (in Chinese)
- 丁一汇. 1991a. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 328-330. Ding Y H. 1991a. Advanced Synoptic Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 328-330 (in Chinese)
- 丁一汇. 1991b. 东亚寒潮冷气的传播和行星尺度作用. 应用气象学报, 2(2): 124-132. Ding Y H. 1991b. The propagation of the winter monsoon during cold air outbreaks in East Asia and the associated planetary-scale effect. Quart J Appl Meteor, 2(2): 124-132 (in Chinese)
- 符仙月,布和朝鲁. 2013. 中国大范围持续性低温事件与中国南方降水异常. 大气科学, 37(6): 1247-1260. Fu X Y, Bueh C. 2013. Wintertime extensive and persistent low-temperature events of China and anomalous precipitation over southern China. Chinese J Atmos Sci, 37(6): 1247-1260 (in Chinese)
- 何慧根,李巧萍,吴统文等. 2014. 月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估. 大气科学, 38(5): 950-964. He H G, Li Q P, Wu T W, et al. 2014. Temperature and precipitation evaluation of monthly Dynamic Extended Range Forecast operational system DERF2.0 in China. Chinese J Atmos Sci, 38(5): 950-964 (in Chinese)
- 金祖辉,孙淑清. 1996. 东亚大陆冬季风的低频振荡特征. 大气科学, 20(1): 101-111. Jin Z H, Sun S Q. 1996. The characteristics of low frequency oscillations in winter monsoon over Eastern Asia. Scientia Atmos Sinica, 20(1): 101-111 (in Chinese)
- 兰晓青,陈文. 2013. 2011—2012 年冬季欧亚大陆低温严寒事件与平流层北极涛动异常下传的影响. 大气科学, 37(4): 863-872. Lan X Q, Chen W. 2013. Strong cold weather event over Eurasia during the winter of 2011/2012 and a downward arctic oscillation signal from the stratosphere. Chinese J Atmos Sci, 37(4): 863-872 (in Chinese)
- 李崇银. 1991. 30—60 天大气振荡的全球特征. 大气科学, 15(3): 66-76. Li C Y. 1991. Global characteristics of 30—60 day atmospheric oscillation. Scientia Atmos Sinica, 15(3): 66-76 (in Chinese)

- 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. 高原气象, 30(2): 318-327. Ma N, Li Y F, Ju J H. 2011. Intraseasonal oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in Southern China in early 2008. Plateau Meteor, 30(2): 318-327 (in Chinese)
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明等. 2008. 2004/2005年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究. 大气科学, 32(2): 380-394. Ma X Q, Ding Y H, Xu H M, et al. 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 380-394 (in Chinese)
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 中国近46年来的寒潮时空变化与冬季增暖. 大气科学, 31(6): 1266-1278. Qian W H, Zhang W W. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1266-1278 (in Chinese)
- 施宁, 布和朝鲁. 2015. 中国大范围持续性极端低温事件的一类平流层前兆信号. 大气科学, 39(1): 210-220. Shi N, Bueh C. 2015. A specific stratospheric precursory signal for the extensive and persistent extreme cold events in China. Chinese J Atmos Sci, 39(1): 210-220 (in Chinese)
- 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究. 气象学报, 30(3): 226-230. Tao S Y. 1959. Study on East Asian cold waves in China during recent 10 years (1949-1959). Acta Meteor Sinica, 30(3): 226-230 (in Chinese)
- 王晓娟, 龚志强, 沈柏竹等. 2013. 近50年中国区域性极端低温事件频发期的气候特征对比分析研究. 气象学报, 71(6): 1061-1073. Wang X J, Gong Z Q, Shen B Z, et al. 2013. A comparative study of the climatic characteristics of the periods of frequent occurrence of the regional extreme low temperature events in China in the recent 50 years. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1061-1073 (in Chinese)
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 第2版. 北京: 气象出版社, 71-75. Wei F Y. 2007. Statistical Diagnosis and Prediction Technology of the Climate. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 71-75 (in Chinese)
- 魏凤英. 2008. 中国冬半年最低气温概率分布特征. 气候变化研究进展, 4(1): 8-11. Wei F Y. 2008. Probability distribution of minimum temperature in winter half years in China. Adv Climate Change Res, 4(1): 8-11 (in Chinese)
- 张培忠, 陈光明. 1999. 影响中国寒潮冷高压的统计研究. 气象学报, 57(4): 493-501. Zhang P Z, Chen G M. 1999. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China. Acta Meteor Sinica, 57(4): 493-501 (in Chinese)
- 张宗婕, 钱维宏. 2012. 中国冬半年区域持续性低温事件的前期信号. 大气科学, 36(6): 1269-1279. Zhang Z J, Qian W H. 2012. Precursors of regional prolonged low temperature events in China during winter half year. Chinese J Atmos Sci, 36(6): 1269-1279 (in Chinese)
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 1992. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 377-418. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 1992. Principle and Methods of Synoptic Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 377-418 (in Chinese)
- 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. 热带气象学报, 29(4): 649-655. Zhu Y Y, Jiang J. 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 Trop Meteor, 29(4): 649-655 (in Chinese)
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China. Atmos Oceanic Sci Lett, 4(4): 235-241
- Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian High and the winter monsoon. Mon Wea Rev, 115(10): 2428-2449
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471
- Lim H, Chang C P. 1981. A theory for midlatitude forcing of tropical motions during winter monsoon. J Atmos Sci, 38(11): 2377-2392
- Park T W, Ho C H, Yang S. 2011. Relationship between the Arctic Oscillation and Cold Surges over East Asia. J Climate, 24(1): 68-83
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. Bull Amer Meteor Soc, 79(1): 61-78
- Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China. Adv Atmos Sci, 28(2): 338-351