李尚锋,姜大膀,廉毅,等. 2018. 冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析 [J]. 大气科学, 42 (5): 963-976. Li Shangfeng, Jiang Dabang, Lian Yi, et al. 2018. Circulation characteristics of extreme cold events in Northeast China during wintertime [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 963-976, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17119.

冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析

李尚锋^{1,2,4} 姜大膀^{1,4} 廉毅² 尹路婷³

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

2 吉林省气象科学研究所长白山气象与气候变化吉林省重点实验室/中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室,长春 130062

3 吉林省气象服务中心,长春 130062

4 中国科学院大学,北京 100049

摘 要利用1961~2014年 CN05.2 逐日温度数据,对冬季东北极端低温事件进行了定义,并按其发生时冷空气 对中国东部(105°E 以东)的影响范围,将其分为第一类和第二类极端低温事件,其中前者局限在东北,而后者 则扩展至中国东部大部分地区。分析表明,在年代际时间尺度上,第一类极端低温事件强度减弱,而第二类的则 增加;对持续天数而言,第二类极端低温事件的在减少,而第一类在1990年代以前也持续减少,但是1990年代 之后急剧增加;2月份总的极端低温事件发生天数最多,其在1990年代以前要远大于12月和1月份,且在1990 年代以前总体在减少,以后则增加;850 hPa 风场分析显示,第二类极端低温事件中来自贝加尔湖的西北路径冷 空气比第一类的要强,而来自鄂霍次克海的东北路径冷空气则相反;在300 hPa 的 E-P 通量散度场上,这两类极 端低温事件中东北都处于波动能量辐散中心,第二类极端低温事件发生时罗斯贝波波动能量传播比第一类时的要 弱,第一类发生时则纬向传播比较明显,而且波动中心值都比较大;在位势高度距平场的谐波分析中,长波槽同 位相扰动叠加在超长波槽上更易导致极端低温事件的发生。

关键词 极端低温事件 中国东北 冬季 罗斯贝波 谐波分析
 文章编号 1006-9895(2012)05-0963-14 中图分类号 P467 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17119

Circulation Characteristics of Extreme Cold Events in Northeast China during Wintertime

LI Shangfeng^{1, 2, 4}, JIANG Dabang^{1, 4}, LIAN Yi², and Yin Luting³

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change/Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation Systems and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

3 Jilin Meteorological Service Center, Changchun 130062

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Using the CN05.2 dataset of daily mean temperature for the period from 1961 to 2014, total extreme cold events (TECEs) are determined in the present study. These TECEs are classified into two categories according to the domain they affected in eastern China (East of 105°E in China), i.e., the first category of extreme cold events (FCECEs)

收稿日期 2017-02-06; 网络预出版日期 2017-10-17

作者简介 李尚锋,男,1981年出生,博士,主要从事极端天气和气候变化方面的研究。E-mail: ice-lsf@163.com

通讯作者 姜大膀, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41421004、41630424

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41421004, 41630424)

that only affected Northeast China and the second category of extreme cold events (SCECEs) includes those that affected most of eastern China. Results show that the trend of intensity of FCECEs is significantly negative, but the opposite is true for that of SCECEs on the interdecadal timescale. As for the occurrence frequency, the trend for SCECEs is obviously negative, and that for FCECEs is also negative during the pre-1990s epoch but becomes positive after the 1990s. The occurrence frequency of TECEs is the highest in February among the winter months, and it tends to decrease during the pre-1990s epoch but increases after the 1990s. Northwesterly winds (cold air surges from Lake Baikal) at 850 hPa during SCECEs is stronger than that during FCECEs, and the opposite is true for northeasterly winds (cold air surges from the Okhotsk Sea). Analysis of the E-P flux and divergence field at 300 hPa indicates that significant wave-like anomalies appear across Northeast China during both SCECEs and FCECEs, and the overlap of longwave trough and ultra-longwave geopotential height anomaly in the same phase can more easily lead to extreme cold event.

Keywords Extreme cold events, Northeast China, Winter, Rossby wave, Harmonic analysis

1 引言

冬季,中国北方受冷空气影响频繁,常常出现 区域性大风、低温雨雪天气,有时还伴有雨凇或 霜冻过程,可形成灾害性天气(张宗婕和钱维 宏, 2012), 给国民经济和人民生产生活造成损 失。东亚冬季风强烈地向南爆发会产生寒潮,通常 情况下侵袭中国的寒潮绝大多数溯源于北极地区 (陶诗言, 1959)。总体上,影响中国的寒潮冷空气 主要有三条路径:一是新地岛以西的北冰洋洋 面,冷空气经巴伦支海、前苏联的欧洲地区进入我 国; 二是新地岛以东的北冰洋洋面, 冷空气经过喀 拉海、太梅尔半岛、前苏联地区进入我国; 三是冰 岛以南的大西洋洋面,冷空气经前苏联的欧洲南部 地区或地中海、黑海、里海进入我国 (Ding, 1990; 张培忠和陈光明, 1999)。通常情况下, 冷空气 沿这三条路径进入西伯利亚中部(43°~65°N,70°~ 90°E)的寒潮关键区(陶诗言, 1959),滞留、聚 集和加强,在适当的天气形势下南下爆发侵入中 玉。

北半球冬季极端天气事件以强冷空气活动和 寒潮爆发最为常见(易明建等,2013),其中,中 高纬度环流异常可使侵入东亚的冷空气活动异 常,是导致中国冬季气温异常的直接原因(郭其 蕴,1994;武炳义和黄荣辉,1999;陈海山和孙照 渤,2001)。近十年来,北半球范围内冬季区域性 极端低温及其伴随的冰冻、暴风雪事件频繁发 生,且影响范围大,持续时间长,如:2005年冬季, 山东威海遭受了百年一遇的罕见持续性暴风雪(隋 素丽等,2007);2006年冬季,美国和加拿大频繁 遭受暴风雪和低温严寒(李威和朱艳峰,2007); 2008 年初,中国南方出现大范围低温雨雪冰冻天气 (布和朝鲁等,2008;丁一汇等,2008;Bueh et al., 2011a);2009 年冬季,美国和欧洲多国经历多次大 雪和寒流,波兰气温降到-20°C,而巴伐利亚的气 温降到了欧洲有记录以来最低的-33.6°C(李威等, 2010);2010 年冬季,美国南部和东北部遭受暴风 雪袭击,俄罗斯、日本、韩国、中国乃至印度和孟 加拉国等亚洲国家也受到了低温寒流的席卷(司东 等,2012);2012/2013 年冬季,中国东北冬季平均 气温突破过去 34 个冬季历史极值,有25 个台站出 现极端低温(苗青等,2016)。

有关极端低温事件的定义、时空特征、环流背 景和成因机理方面的研究,我国学者近年来做了大 量工作,取得了一系列成果。对于极端低温事件的 定义,从采用早期气象业务系统中参照寒潮定义方 法以某一具体温度值为阈值的判断标准,到采用温 度阈值百分位方法(Jones et al., 1999),使得判据 更加适用与合理。基于上述方法, Zhang and Qian (2011) 对单站持续性极端低温事件进行了重新定 义: 日最低气温低于常年值(常年值=当日及前后 5d,共11d的气候平均值),且日最低温度大小排 序小于第10个百分位值,连续日数超过5d。由于 不同地区冷空气活动的频率和影响范围存在较大 不同,在对区域持续性极端低温事件的定义上相关 学者也做了适当调整(Peng and Bueh, 2011; 王晓 娟等, 2013; 李尚锋等, 2014a)。同时, 还有学者 根据区域性极端低温事件的定义,建立了识别极端 低温事件的指标体系,并应用于业务预报中,该体 系包括以下几个部分:极端低温阈值的确定、空间 区域的识别、空间区域的连续性过程提取(龚志强 等,2012)。除了对极端低温事件的时空特征进行

分析外,许多学者对引起这类事件的环流因子也进行了探讨。Li et al. (2016)揭示,春季来自贝加尔湖的西北路径冷空气对东北强极端低温事件起主要作用,而东北弱极端低温事件的主要气流则来自东北路径的鄂霍次克海地区冷空气。Bueh et al. (2011b)对引起中国冬季区域性极端低温事件的环流做了系统剖析,指出中国冬季区域性低温事件的一个重要环流特征是在对流层中层存在一对欧亚大陆尺度的、沿东北至西南方向倾斜的槽脊。另外,高纬的平流层与冬季极端低温也有关联,平流层极涡异常偏强或者偏弱能相应地引起冬季地面温度变化(易明建等,2009;施宁和布和朝鲁,2015)。

众所周知,东北位于中国东部的最北面,易受 极地冷空气侵袭,加之那里既是国家主要的重工业 基地,亦是战略粮食储备地,对该地区极端低温事 件进行研究尤为必要。过去对东北低温的分析主要 是集中在季节和月时间尺度上开展(东北低温科研 协作组,1979; 廉毅和安刚,1998; 沈柏竹等,2011; 李尚锋等,2014b),对天气尺度的极端低温事件研 究较少,且早期对极端低温事件的研究主要侧重于 单站低温的强度和持续时间等方面。本文针对东北 进行冷空气影响区域和持续时间相结合的研究,相 比单站分析而言,区域性研究可以探讨影响东北极 端低温过程的冷空气路径,分析何种路径冷空气影 响频次高,研究何种路径冷空气引起的降温更为剧 烈以及各类路径冷空气对东北以外地区(尤其是中 国东南部地区)是否有影响。另外,东北的冬季极 端低温同全国其他区域极端低温有无联系,是东北 的独有区域性事件,还是全国极端低温的前哨?另 外,通过对东北区域性极端低温事件环流异常的研 究,有助于揭示其成因机理,对于东北极端低温的 预测有一定的实际意义。

2 资料与方法

2.1 数据资料

所采用的数据包括:(1)吴佳和高学杰(2013) 根据 2416 个中国地面气象台站的逐日观测记录, 通过插值程序建立起来的一套 1961~2014 年中国 区域水平分辨率为 0.5°×0.5°的格点数据集 CN05.2,这里使用的是日平均温度资料;(2) NCEP/NCAR(Kalnay et al., 1996)再分析数据, 包括位势高度场和水平风场,选取长度为 1961~ 2014 年,水平分辨率为 2.5°×2.5°,垂直方向为 1000~70 hPa 共 13 层。东北定义为(38°~55°N, 116°~137°E),冬季为当年 12 月、次年 1 月和 2 月。

2.2 冬季东北极端低温事件的定义

冬季东北一次极端低温事件需要同时满足下 述两个条件:一是任一格点上日平均温度距平 $\overline{T_{d}} \leq \beta$ 、持续日数≥3日,其中β为该格点冬季日 平均温度距平的第10个百分位的值(按由小到大 的排列顺序);二是东北达到条件一的格点总数大 于该区域格点总数的50%,并且定义第一天达到上 述标准的日期为极端低温事件的开始日期,峰值日 期定义为该次降温过程中东北达到阈值要求的格 点 $\overline{T_{d}}$ 区域平均值最小的日期,峰值强度定义为该次 极端低温过程中峰值日达到阈值要求的格点 $\overline{T_{d}}$ 的 区域平均值。

将达到上述条件的极端低温事件统称为总的 极端低温事件(简称: TECEs),为了研究东北极端 低温事件与中国东部其他地区极端低温的关系,以 中国 105°E 以东的地区作为研究对象,若在一次东 北极端低温事件发生过程中,该区域内达到标准 (≤该格点T_d的第 10 个百分位值)的格点数超过 该区域格点总数的 50%,并且发生天数≥1 天,则 将该类极端低温事件定义为第二类极端低温事件 (简称: 第二类),否则称为第一类极端低温事件 (简称: 第一类)。简而言之,第一类表示的是仅 在东北发生的极端低温事件,第二类表示的是东北 发生极端低温事件的同时,中国东部其他地区也发 生了大范围的极端低温事件。关于极端低温事件的 开始日期、持续时间、峰值日期、峰值强度和类型 等情况,详见表 1。

同 Peng and Bueh (2011) 定义的冬季极端低温 事件日历相比,表1中第二类极端低温事件发生了 19次,这19次事件在 Peng and Bueh (2011)的日 历中能找到14次;同 Bueh et al. (2011b)定义的 冬季持续性低温事件日历相比,表1中19次第二 类极端低温事件在其日历中发生了17次。由于本 文使用的温度资料(水平分辨率为0.5°×0.5°的 CN05.2数据)与 Peng and Bueh (2011)和 Bueh et al. (2011b)使用的(中国756个气象测站温度资 料)不同,且判断标准亦有差别;加之本文定义的 第二类极端低温事件前提是东北局地发生极端低 温后,冷空气南移发生的,而 Peng and Bueh (2011) 和 Bueh et al. (2011b) 定义的低温事件则没有该项 限制, 故而低温日历有部分差异。

表 1 1961~2014 年 46 次冬季极端低温事件的开始日期、 持续时间、峰值日期、峰值强度和类型

Table 1Beginning dates, durations, peak dates, peakintensities, and types of 46 total extreme cold events(TECEs) in winter during 1961–2014

序号	开始日期	持续时间/d	峰值日期	峰值强度/℃	类型
1	1964-02-11	3	1964-02-11	-8.8	第二类
2	1964-02-19	5	1964-02-22	-8.1	第二类
3	1966-01-18	3	1966-01-18	-8.8	第一类
4	1966-12-21	6	1966-12-25	-8.9	第二类
5	1967-02-09	5	1967-02-11	-8.5	第二类
6	1967-12-06	3	1967-12-07	-9.5	第一类
7	1967-12-26	4	1967-12-28	-9.2	第二类
8	1968-01-29	3	1968-01-30	-8.2	第一类
9	1968-02-19	3	1968-02-19	-7.4	第二类
10	1969-01-27	5	1969-01-29	-8.5	第二类
11	1969-02-01	5	1969-02-05	-8.3	第一类
12	1969-02-13	3	1969-02-15	-10.0	第一类
13	1969-02-18	11	1969-02-21	-12.9	第二类
14	1970-01-01	4	1970-01-03	-10.5	第一类
15	1970-02-21	3	1970-02-22	-8.4	第一类
16	1971-02-26	3	1971-02-27	-11.4	第一类
17	1974-01-27	3	1974-01-28	-7.1	第一类
18	1974-02-24	3	1974-02-25	-8.1	第二类
19	1976-12-25	4	1976-12-26	-10.7	第二类
20	1976-12-30	5	1977-01-02	-9.7	第二类
21	1977-01-26	6	1977-01-30	-10.0	第二类
22	1977-02-12	5	1977-02-14	-10.0	第一类
23	1978-02-10	7	1978-02-13	-9.0	第二类
24	1979-01-30	3	1979-01-31	-10.1	第二类
25	1980-02-05	3	1980-02-06	-8.5	第二类
26	1980-12-27	3	1980-12-27	-6.6	第一类
27	1981-02-24	4	1981-02-25	-10.7	第二类
28	1983-02-10	5	1983-02-12	-9.8	第一类
29	1983-02-18	3	1983-02-19	-6.9	第一类
30	1984-02-02	5	1984-02-06	-8.3	第二类
31	1985-02-16	5	1985-02-17	-6.9	第二类
32	1985-12-06	6	1985-12-08	-10.9	第二 <u>突</u>
33	1987-01-09	5	1987-01-12	-8.0	第一奀
34	1990-01-21	2	1990-01-25	-10.0	第一奀
35	1991-02-21	3	1991-02-22	-9.0	<u>弗一</u> 尖
36	1998-12-01	3	1998-12-02	-8.7	<u>弗一</u> 尖
3/	2000-12-23	4	2000-12-25	-8.2	<u>弗一</u> 尖
38	2001-01-10		2001-01-11	-9.5	<u>弗一</u> 尖
39	2001-02-02	6	2001-02-06	-8.9	<u>弗一</u> 尖
40	2001-02-10	4	2001-02-11	-8.1	<u>弗</u> 一尖
41	2002-12-08	3	2002-12-09	-/./	弗一尖 笠 半
42	2004-12-21	3	2004-12-21	-/.1	弗一尖 笠 半
43	2010-12-13	3	2010-12-14	-6.5	<u></u> 弗一奀
44	2012-12-06	3	2012-12-07	-/.6	弗一尖 笠 半
45	2012-12-23	3	2012-12-23	-9.4	<u></u> 弗一奕
46	2013-01-07	4	2013-01-08	-7.8	弟一类

为了探讨两类极端低温事件发生频次的异同, 对其空间分布特征做了分析。由图1可见,在整个 时段内,第一类极端低温事件发生频次最高的地区 主要位于黑龙江省东南部、吉林省和辽宁省。此外, 其冷空气影响次频繁地区为河北省和山东半岛一 带。第二类极端低温事件发生期间,其冷空气作用 频次较高的地区为105°E 以东的中国地区,其发生 频次最高的地区为黑龙江省东南部、吉林、辽宁、 河北、山东、安徽和江苏等地。

本文采用准地转二维 E-P 通量(Edmon et al., 1980),来诊断罗斯贝波的活动,计算公式如下:

$$\begin{cases} F_{\varnothing} = -a\cos \varnothing \overline{u'v'} \\ F_p = fa\cos \varnothing \frac{\overline{v'\theta'}}{\theta_p} \end{cases}$$
(1)

其中, *F_o*、*F_p*分别表示由于波动效应,单位质量 空气南北方向的涡动角动量输送和涡动热量输送, *u*、*v*表示纬向风和经向风,*a*为地球半径,θ为位 温,f为科氏参数,Ø为纬度。

为了研究极端低温事件发生期间超长波和长 波活动特点,采用了谐波分析,用波数 1~3 波之 和代表超长波活动(王绍武,1964;吴晓红和王绍 武,1996),波数 4~6 波之和代表长波活动(廉毅 等,2010)。

3 东北极端低温事件的年代际变化

为了探讨冬季东北极端低温事件是否有年代 际变化,对总的、第一类和第二类极端低温事件 的峰值强度和发生频次的年代际特征分别做了分 析。由图2可见,在整个时段内,总的和第一类极 端低温事件的峰值强度均随时间减弱,第二类极端 低温事件从1960年代到1970年代为增加、1970年 代到1980年代减弱、1980年代后则不再发生;第 二类极端低温事件峰值强度要比第一类的强,这说 明能够影响到中国东部更南方的这种大范围冷空 气活动,其在东北造成的低温过程要比仅发生在东 北局地的低温过程更加强烈。

就冬季东北极端低温事件发生天数的年代际 变化而言(图3),总的极端低温事件在1990年代 以前减少明显,但1990年代以后发生天数开始增 加。第一类极端低温事件的发生天数在1960年代 至1980年代期间少变,1990年代以后则明显增加。 第二类极端低温事件的发生天数在1960年代至 1990年代急剧减少,1990年代后则不再发生。上



Fig. 1 Spatial distribution characteristics of occurrence frequency of extreme cold events during 1961–2014: (a) The first category of extreme cold events (FCECEs); (b) the second category of extreme cold events (SCECEs)

述特征表明,1990年代以后,随着全球变暖的影响, 冬季中国东部这种大范围的极端低温事件出现甚 少(Peng and Bueh, 2011),但是区域尺度的极端 低温事件的发生频次则在增加。

根据东北极端低温事件冬季各月份发生天数的 年代际变化可知(图4),2月份总的极端低温事件发 生天数最多,它在1990年代以前发生天数要远大于 12月和1月,且在1990年代以前总体减少,1990 年代以后开始增加,这与1月份的情形比较一致。在 整个时间段上,12月份总的极端低温事件发生天数 减少比较明显,发生天数最低的时段是1980年代, 之后开始增加,说明12月份总的极端低温事件发生 天数一直比较稳定,这与12月份东北冬季温度变率 (图5a)相对于1月(图5b)和2月份(图5c)较 为稳定有关;而2月份是冬、春季节间的过渡性月份, 期间低、中、高纬度系统间相互作用频繁,导致温度 变化比较剧烈,使得该月份是基于温度距平场上定义 的极端低温事件发生频率最高的月份(图5c)。

冬季各月第一类和第二类极端低温事件发生 天数的年代际变化显示(图 6),在1960年代和1970 年代期间,冬季所有月份第二类极端低温事件发生 天数要远高于第一类。另外,2月第二类的发生天 数要大于12月和1月;1980年代期间12月只发生 了第二类极端低温事件,1月只发生了第一类极端 低温事件,2月第一和第二类极端低温事件均有发 生,但2月第二类极端低温事件的发生天数要多于 第一类;而1990年代和2000年代期间第二类极端 低温事件基本没有出现。同时,1990年代至2000 年代期间,在所有月份中第一类极端低温事件的发 生天数增加,表明全球变暖背景下,发生像 1960 年代和 1970 年代期间那种大范围的极端低温事件的 概率在降低,但是区域性极端低温事件的发生频次增 加的却很明显。这与先前研究中认为东北冬季气温在 1980 年代存在增暖突变相一致(刘实等, 2009)。

4 关键环流系统特征

为了研究第一类和第二类极端低温事件发生 过程中冷空气活动的异同,利用合成分析方法探讨 了它们发生、峰值和整个过程中的对流层低层 850 hPa 风场的变化特征。图 7 表明,引起这两类极端 低温事件的主要气流来源相同,均是由来自贝加尔 湖方向的西北气流(简称:西北路径冷空气)和来 自鄂霍次克海方向的东北气流(简称:东北路径冷 空气)在 55°N 附近区域汇合入侵东北。但是,影 响第一类极端低温事件的西北气流来自中心位于 叶尼塞河中游地区的阻塞高压(图 7a, c, e),而 第二类极端低温事件的西北气流则来自位于乌拉 尔山至贝加尔湖间的反气旋;鄂霍次克海上空维持 的异常气旋环流,引导东北风向南侵入中低纬度, 使得中国东部大部分出现低温(图 7b, d, f),是 这两类事件中东北气流的主要来源。

另外,在这两类事件的风场差值场(图7g)上 可以看到,鄂霍次克海上空出现一个异常的反气旋 环流,说明第二类极端低温事件中鄂海低压系统比 第一类要弱,同时也说明第二类极端低温事件中东 北路径冷空气比第一类要弱;乌拉尔山至叶尼塞河 中游地区亦出现了一个异常的反气旋环流,说明第 二类极端低温事件中西北冷空气比第一类的要强。



图 2 冬季东北极端低温事件峰值强度(单位: ℃)和发生天数(单位: d)十年际变化: (a)第一类; (b)第二类; (c)总的极端低温事件

Fig. 2 Decadal variations of peak intensity (units: °C) and occurrence days (units: d) for (a) FCECEs, (b) SCECEs, and (c) total extreme cold events (TECEs) in winter



图 3 冬季总的极端低温事件、第一类和第二类发生天数的十年际变化 (单位: d)

Fig. 3 Decadal variations of occurrence days (units: d) for TECEs, FCECEs, and SCECEs in winter



图 4 冬季各月总的极端低温事件发生天数的十年际变化(单位: d) Fig. 4 Decadal variations of occurrence days (units: d) for TECEs in December, January, and February



图 5 1961~2014 年根据 CN05.2 数据所得的冬季月平均温度标准差 (单位: °C): (a) 12 月; (b) 1 月; (c) 2 月

Fig. 5 Standard deviations of monthly mean temperature (units: °C) from CN05.2 data in (a) December, (b) January, and (c) February of 1961–2014



图 6 冬季各月第一和第二类极端低温事件发生天数的十年际变化(单 位: d): (a) 12 月; (b) 1 月; (c) 2 月

Fig. 6 Decadal variations of occurrence days for FCECEs and SCECEs in (a) December, (b) January, and (c) February (units: d)

由对流层中层 500 hPa 上极端低温事件位势高 度距平合成图 8 上可见, 在亚洲中高纬度地区北正 南负波列的分布为第一类和第二类极端低温事件 中最明显的特点,即:乌拉尔山地区为很强的阻塞 高压, 而亚洲地区维持低压, 这种典型的北高南低 型表明大气的经向度大,有利于冷空气大规模南 下,进而导致受其影响的地区出现极端低温,该结 构特征与 2008 年中国南方大范围低温冰冻灾害的 500 hPa 位势高度距平场特点相似,但 2008 年阻塞 高压更强且持续时间长 (Bueh et al., 2011a)。第一 类和第二类极端低温事件的不同点也比较明显:第 一类极端低温事件的波列主要为贝加尔湖至鄂霍 茨克海为较强的正距平区,其中心位于贝加尔湖附 近,负距平中心始终位于中国东北上空(图 8a, b, c),而第二类极端低温事件的波列则主要为乌拉尔 山至贝加尔湖西北侧为较强的正距平区,中心位于 乌拉尔山,东北虽为负距平区控制,但是负距平中 心处在东北的西南侧(图 8d, e, f);第二类与第 一类极端低温事件的差值图(图 8g)更能突出显示 它们的差异,第二类极端低温事件中的乌拉尔山阻 塞高压较第一类要更稳定和强大,同时,东北上空 覆盖的负距平中心也比第一类要强,这种配置使得 大气南北经向梯度更大,冷空气较易入侵到中国更 南部的地区,而第一类极端低温事件中的鄂霍次克 海上空的槽则比第二类要更深,强的槽前西南气流 使得高纬度入侵的冷空气仅仅能影响到东北和朝 鲜半岛,这与图 7 所示的鄂霍次克海上空对流层低 层的大气环流型相匹配。

969

为进一步研究第一类和第二类极端低温事件 发生过程中能量的传播特征,采用合成分析探讨了 这两类事件所对应的对流层中高层(300 hPa)罗斯 贝波波动能量频散变化,试图找出各自的主要物理 过程。冬季第一和第二类极端低温事件发生、峰值 以及整个过程的 300 hPa 上 E-P 通量、散度及流函 数场的合成图表明(图9),第一和第二类极端低温 事件发生时东北上空均被负的流函数场所覆盖,其 位于塞班岛上空的南部中心为一个正的流函数场, 从北到南这种北负南正的波列在第一和第二类事 件中都很明显,说明在这两类极端低温事件发生 时,东北上空都是冷空气的堆积区。同时,在这两 类极端低温事件中,东北上空都处于弱的波作用通 量辐散中心,该中心处于上下游的辐合、辐散波列 传播路径之上;不同之处在于,在极端低温事件发 生、峰值以及整个过程中, 第一类极端低温事件时 在东亚 30°N 以北地区上空波作用通量辐散、辐合 中心都呈东西向交替分布,且明显比第二类强,表 明第一类极端低温事件 E-P 通量波列分布利于该区 域的纬向环流加速,这种传播形态使得能量更容易 向下游频散,不利于大范围和长时间的维持(图 9a, c, e); 第二类极端低温事件中向下游西北太平洋上 空传播的波动能量比第一类事件要弱的多(图 9b, d, f), 该特点在两者差值图上表现的很明显(图 9g)。

王绍武(1964)指出谐波分析可以定量客观地 计算出各种波的位置和振幅,对研究不同尺度波在 大气环流变化中的作用是一种较好的方法。本文利 用这一方法尝试找出这两类事件中超长波和长波 相互作用关系的异同,以便于更清晰地剖析第一类 和第二类极端低温事件的发生过程。从冬季 500 hPa 位势高度距平谐波展开合成场(图 10)上可见:第



图 7 1961~2014 年冬季极端低温事件的 850 hPa 风场(单位: m s⁻¹)合成图: (a, c, e)第一类初始日期、峰值日期、整个时段; (b, d, f)第二 类初始日期、峰值日期、整个时间段; (g)第二类与第一类整个时段之差。灰色阴影表示为通过 95%的置信水平的区域,图中方框区代表东北 Fig. 7 Composite distributions of winds (units: m s⁻¹) at 850 hPa for extreme cold events during 1961–2014: (a, c, e) The beginning day, the peak day, and the whole period for FCECEs; (b, d, f) the beginning day, the peak day, and the whole period for SCECEs; (g) difference between SCECEs and FCECEs (SCECEs minus FCECEs) during the whole period. Light shadings indicate significance at the 95% confidence level based on two-tailed Student's *t* test; the black rectangle indicates Northeast China (NEC)

一类和第二类极端低温事件中超长波有相同的结构特点(图 10a, b),北半球超长波为2波分布,为稳定型,超长波脊一个位于北太平洋的中东部至

北美洲的太平洋西海岸上空,另一个自北大西洋横 跨中亚地区上空;超长波槽较弱的一个位于北美洲 大陆的西北侧上空,另一个横跨东亚至阿留申群岛



图 8 1961~2014 年冬季极端低温事件的 500 hPa 位势高度距平(等值线间隔: 20,单位: gpm)合成图:(a, b, c)第一类初始日期、峰值日期、 整个时段;(d, e, f)第二类初始日期、峰值日期、整个时间段;(g)第二类与第一类整个时段之差。灰色阴影表示为通过 95%的置信水平的区域, 图中方框区表示东北

Fig. 8 Distributions of composite geopotential height anomalies (contour interval: 20, units: gpm) at 500 hPa for extreme cold events during 1961–2014: (a, b, c) The beginning day, the peak day, and the whole period for SCECEs; (d, e, f) the beginning day, the peak day, and the whole period for SCECEs; (g) difference between SCECEs and FCECEs (SCECEs minus FCECEs) during the whole period. Light shading indicates significance at the 95% confidence level based on two-tailed Student's *t*-test; the black rectangle indicates NEC

上空,表明东亚大槽稳定,十分有利于冷空气活动 在东亚地区。第一类和第二类极端低温事件中长波 结构异同点均较为明显:从东亚经北太平洋至北美 洲大陆上空的负一正一负一正长波槽脊分布较为 相似;但是,从乌拉尔山至东亚上空的长波脊槽分 布在两类事件中不尽相同,最显著的区别在于,第 一类极端低温事件的长波脊位于巴尔喀什湖至贝 加尔湖附近,第二类则出现在乌拉尔山附近,其次, 第一类的长波槽主要位于东北亚上空,而第二类的 长波槽则明显偏西,控制着从贝加尔湖至中国华



图 9 1961~2014 年冬季极端低温事件时 300 hPa 的 E-P 通量 (箭头,单位: m² s⁻²)、散度 (阴影,单位: 10⁻⁵ m s⁻²)及流函数场 (等值线,单位: 10⁶ m² s⁻¹) 合成图: (a, c, e) 第一类初始日期、峰值日期、整个时段; (b, d, f) 第二类初始日期、峰值日期、整个时间段; (g) 第二类与第一 类整个时段之差。图中方框区表示东北

Fig. 9 Distributions of composite E-P flux (vectors, units: $m^2 s^{-2}$), its divergence (shaded, units: $10^{-5} m s^{-2}$) and stream function (contours, units: $10^6 m^2 s^{-1}$) at 300 hPa for extreme cold events during 1961–2014: (a, c, e) The beginning day, the peak day, and the whole period for FCECEs; (b, d, f) the beginning day, the peak day, and the whole period for SCECEs; (g) SCECEs minus FCECEs during the whole period. The black rectangle indicates NEC



(d) 第一类和 (e) 第二类长波,第二类与第一类 (c) 超长波和 (f) 长波之差。灰色阴影表示为通过 95%的置信水平的区域,图中方框区表示东北 Fig. 10 Distributions of harmonic analysis of composite geopotential height anomalies (contour interval: 10, units: gpm) at 500 hPa for extreme cold events during 1961–2014: (a, b) Ultra-longwave for FCECEs and SCECEs; (d, e) longwave for FCECEs and SCECEs; (c, f) differences in ultra-longwave and longwave between SCECEs and FCECEs (SCECEs minus FCECEs). Light shadings indicate the 95% confidence level based on two-tailed Student's *t* test, and the black rectangle indicates NEC

北、华东,乃至华中的宽广东亚地区上空(图 10d, e)。

第一和第二类事件中超长波和长波的 500 hPa 位势高度差值图显示,东北上游 60°E 到 90°E 之间 的中高纬度存在明显的北高南低异常(图 10c),这 是影响第二类极端低温事件的典型中高层环流型, 而图 10f 中并没有这样的特征,表明第二类事件更 多地受到超长波的影响,而第一类中长波作用较明 显。并且,超长波更具有驻波性质,传播慢,频散 慢,有利于冷空气堆积与活动,这与图9的分析结 果相一致。而第一类极端低温事件时,东北上空为 异常槽的超长波和长波的叠加,使得该槽较第二类 的要深,也进一步揭示第一类比第二类极端低温事 件发生范围小的重要谐波特征,这与图8所示的结 果吻合。综上可知, 位势高度负距平场中异常槽的 长波和超长波的扰动叠加,是形成极端低温事件的 基础,这种同位相扰动叠加能够诱发极端低温事件 发生,该结论与李尚锋等(2012)研究夏季极端低 温事件时的超长波、长波的扰动叠加特点相同。

5 结论和讨论

本文利用 CN05.2 日平均温度数据,给出了冬季东北极端低温事件定义,并将其按影响范围分为 第一类极端低温事件(简称:第一类)和第二类极 端低温事件(简称:第二类)两种,通过对两类极 端低温事件强度和频次的年代际特点、对应的环流 背景以及能量频散等的研究,得到以下主要结论:

(1) 1961~2014年,在年代际尺度上,第一类 极端低温事件发生强度减弱,而第二类的增大;总 的极端低温事件发生频次在 1990 年代以前总体减 少,但此后增多,第二类事件发生频次显著减少并 在 1990 年代以后基本消亡,第一类事件发生频次 前期比较稳定但在 1990 年代以后急剧增加。

(2) 就冬季各月而言,2 月份总的极端低温事件发生频次最高,其在1990年代以前要远大于12月和1月,在1990年代以前总体减少而后为增加,这与1月的情形比较一致;在整个时间段内,12月最低频次出现在1980年代,较1960年代稍微减少,而后开始增加;在1960年代和1970年代期间,冬季所有月份第二类事件发生频次要远大于第一类事件,2月第二类事件发生频次要大于12月和1月。

(3) 第一和第二类极端低温事件发生时,流函数场显示东北都是冷空气堆积区,在 E-P 通量散度

场上东北都处于波动能量辐散大值区中心;相比较 而言,第二类事件中波动能量传播比第一类要弱的 多,第一类事件则纬向传播比较明显,而且波动中 心值都比较大,这种方式的传播使得能量更容易频 散,不利于大范围和长时间维持。

(4) 第二类极端低温事件中西北路径冷空气比 第一类的要强,东北路径冷空气则相反,在第一类 极端低温事件中的强度要大于第二类;在 500 hPa 上位势高度距平场上,长波槽扰动叠加在超长波槽 上,这种同位相扰动叠加更易导致极端低温事件的 发生。

最后需要说明的是,本文从冬季东北地区极端 低温事件的角度出发,按其影响范围分为第一和第 二类极端低温事件两类。但是,对于中国其他地区 发生大范围的极端低温事件而东北没有出现的情 况在本文并没有讨论,这两种事件间的关系还应细 化并分别进行讨论,这些问题有待于进一步研究。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵评阅意见

参考文献(References)

- 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期 过程分析 I: 亚非副热带急流低频波 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 419–433. Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi Ning. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part I: Low-frequency waves embedded in the Asian–African subtropical jet [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 419–433, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.07.
- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011a. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. Atmospheric Science Letters, 12 (3): 273–280, doi:10. 1002/asl.333.
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011b. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 4 (4): 235–241, doi:10.1080/16742834.2011. 11446935.
- 陈海山, 孙照渤. 2001. 一个反映中国冬季气温异常的指标──东亚区 域西风指数 [J]. 南京气象学院学报, 24 (4): 458–466. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2001. An index of China winter temperature anomaly: East Asian regional westerly index [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 24 (4): 458–466, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2001.04.002.
- 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.
- 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等.2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪
 冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. 气象学报,66 (5):
 808-825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of

the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 808–825, doi:10.11676/qxxb2008.074.

- 东北低温科研协作组. 1979. 东北地区冷夏、热夏长期预报的初步研究 [J]. 气象学报, 37 (3): 44–58. Northeast China Cold Summer Research Group. 1979. A preliminary study on the long range forecasting of the cold/warm summer in Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (3): 44–58, doi:10.11676/qxxb1979.028.
- Edmon M J Jr, Hoskins B J, McIntyre M E. 1980. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere [J]. J. Atmos. Sci., 37 (2): 2600–2616, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2600:EPCSFT>2.0.CO;2.
- 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 2012. 区域性极端低温事件的识别及其变 化特征 [J]. 应用气象学报, 23 (2): 195–204. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Cui Donglin, et al. 2012. The identification and changing characteristics of regional low temperature extreme events [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (2): 195–204, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.02.008.
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系 [J]. 应用气象 学报, 5 (2): 218–225. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (2): 218–225.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. Climatic Change, 42 (1): 131–149, doi:10.1023/A:1005468316392.
- 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.
- Li S F, Jiang D B, Lian Y, et al. 2016. Interdecadal variations of cold air activities in Northeast China during springtime [J]. J. Meteor. Res, 30 (5): 645–661, doi:10.1007/s13351-016-5912-6.
- 李尚锋, 廉毅, 陈圣波, 等. 2012. 东北初夏极端低温事件的空间分布特 征及其成因机理分析 [J]. 地理科学, 32 (6): 752–758. Li Shangfeng, Lian Yi, Chen Shengbo, et al. 2012. Distribution of extreme cool events over Northeast China in early summer and the related dynamical processes [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 32 (6): 752–758, doi:10.13249/j.cnki.sgs.2012.06.016.
- 李尚锋,孙钦宏,姚耀显,等. 2014a. 东北夏季极端低温天气事件的定 义及其冷空气路径分析 [J]. 地理科学, 34 (2): 249–256. Li Shangfeng, Sun Qinhong, Yao Yaoxian, et al. 2014a. Definition of extreme low-temperature events over northeastern China in summer and the related cold air path [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 34(2): 249–256.
- 李尚锋,应爽,姚耀显,等. 2014b. 东北夏季月低温事件的定义及大气 环流年代际特征分析 [J]. 气象与环境学报, 30 (3): 38-45. Li Shangfeng, Ying Shuang, Yao Yaoxian, et al. 2014b. Definition of monthly cool summer events over Northeast China and interdecadal characteristics of atmospheric circulation [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30 (3): 38-45, doi:10.3969/j.issn.1673-503X. 2014.03.006.
- 李威, 朱艳峰. 2007. 2006 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 33 (4): 108-111. Li Wei, Zhu Yanfeng. 2007. Global significant climate

events in 2006 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (4): 108–111, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.04.019.

- 李威, 蔡锦辉, 郭艳君, 等. 2010. 2009 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 36 (4): 106–110. Li Wei, Cai Jinhui, Guo Yanjun, et al. 2010. Global significant weather and climate events in 2009 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (4): 106–110.
- 廉毅, 安刚. 1998. 东亚季风 El Niño 与中国松辽平原夏季低温关系初探 [J]. 气象学报, 56 (6): 724–735. Lian Yi, An Gang. 1998. The relationship among East Asia summer monsoon El Niño and low temperature in Songliao Plains North East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (6): 724–735, doi:10.11676/qxxb1998.066.
- 廉毅,布和朝鲁,谢作威,等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环 流低频变化 [J]. 大气科学, 34 (2): 429–439. Lian Yi, Bueh Cholaw, Xie Zuowei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the northern hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 429–439, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2010.02.16.
- 刘实, 闫敏华, 隋波. 2009. 东北三省冬季气温变化的有关研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 5 (6): 357–361. Liu Shi, Yan Minhua, Sui Bo. 2009. Advances in the research of winter air temperature variation of three provinces in Northeast China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (6): 357–361, doi:10.3969/j.issn.1673-1719. 2009.06.007.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 817-830, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15189.
- Peng J B, Bueh C. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 4 (5): 281–286, doi:10.1080/16742834.2011.11446943.
- 沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2011. 2009 年中国东北夏季低温及其与前期海 气系统变化的联系 [J]. 气象学报, 69 (2): 320–333. Shen Baizhu, Liu Shi, Lian Yi, et al. 2011. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes of the air–sea system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (2): 320–333, doi:10.11676/gxxb2011.027.
- 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 [J]. 大气科学, 39 (1): 210-220. Shi Ning, Bueh Cholaw. 2015. A specific stratospheric precursory signal for the extensive and persistent extreme cold events in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 210-220, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.1403.13309.
- 司东,李修仓,任福民,等. 2012. 2011 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. 气象, 38 (4): 480–489. Si Dong, Li Xiucang, Ren Fumin, et al. 2012. Global significant weather and climate events in 2011 and the possible causes [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (4): 480–489.
- 隋素丽, 贺玉平, 张明芳, 等. 2007. 威海市 "2005.12" 连续暴雪特性初

步分析 [J]. 海洋预报, 24 (1): 32–37. Sui Suli, He Yuping, Zhang Mingfang, et al. 2007. A preliminary study of characteristics of durative snowstorms in December 2005 [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 24 (1): 32–37, doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2007.01.005.

- 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究 [J]. 气象学报, 30 (3): 226–230. Tao Shiyan. 1959. Study on East Asian cold waves in China during recent 10 years (1949–1959) [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 30 (3): 226–230, doi:10.11676/qxxb1959.031.
- 王绍武. 1964. 北半球 500 毫巴月平均环流特征及演变规律的研究—— 超长波 [J]. 气象学报, 34 (3): 316–328. Wang Shaowu. 1964. A preliminary study on the characteristics and evolution of mean monthly circulation. Part II: Ultra-long waves [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (3): 316–328, doi:10.11676/qxxb1964.033.
- 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 [J]. 气象学报, 71 (6): 1061–1073. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Shen Baizhu, 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 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (6): 1061–1073, doi:10.11676/qxxb2013.095.
- 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.
- 吴佳,高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报,56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (4): 1102–1111, doi:10.6038/cjg20130406.

- 吴晓红, 王绍武. 1996. 对流层大气环流的甚低频振荡 [J]. 气象学报, 54 (4): 427-436. Wu Xiaohong, Wang Shaowu. 1996. Very low frequency oscillations in the variations of tropospheric atmospheric general circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 427-436, doi:10.11676/qxxb1996.044.
- 易明建, 陈月娟, 周任君, 等. 2009. 2008 年中国南方雪灾与平流层极涡 异常的等熵位涡分析 [J]. 高原气象, 28 (4): 880–888. Yi Mingjian, Chen Yuejuan, Zhou Renjun, et al. 2009. Analysis on isentropic potential vorticity for the snow calamity in south China and the stratospheric polar vortex in 2008 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (4): 880–888.
- 易明建, 陈月娟, 周任君, 等. 2013. 亚洲东部冬季地面温度变化与平流 层弱极涡的关系 [J]. 大气科学, 37 (3): 668–678. Yi Mingjian, Chen Yuejuan, Zhou Renjun, et al. 2013. Relationship between winter surface temperature variation in eastern Asia and stratospheric weak polar vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 668– 678, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12032.
- 张培忠,陈光明. 1999. 影响中国寒潮冷高压的统计研究 [J]. 气象学报, 57 (4): 493-501. Zhang Peizhong, Chen Guangming. 1999. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (4): 493-501, doi:10.11676/ qxxb1999.046.
- Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (2): 338–351, doi:10. 1007%2Fs00376-010-0048-6.
- 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 [J]. 大气科学, 36 (6): 1269–1279. Zhang Zongjie, Qian Weihong. 2012. Precursors of regional prolonged low temperature events in China during winter half year [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1269–1279, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012. 11227.