

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11227. 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,

中国冬半年区域持续性低温事件的前期信号

张宗婕 钱维宏

北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871

摘 要 大气变量物理分解的方法应用于寻找中国区域持续性低温事件的前期信号。1960~2008 年的冬半年期间, 总数 115 次强的区域持续性低温事件的对流层低层出现了天气尺度温度的负值扰动, 而在对流层中高层至平流层出现了天气尺度位势高度的负值扰动。其中, 112 次事件分别在 850 hPa 和 300 hPa 上出现了温度扰动负值中心和位势高度扰动负值中心。追踪 850 hPa 层的温度扰动能够提前 5~9 天预示中国区域持续性低温事件的出现。

关键词 持续性低温事件 物理分解 高度扰动 温度扰动 前期信号

文章编号 1006-9895(2012)06-1269-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11227

Precursors of Regional Prolonged Low Temperature Events in China during Winter Half Year

ZHANG Zongjie, QIAN Weihong

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871

Abstract The method of physical decomposition of atmospheric variables was used to find possible precursors to indicate regional prolonged low temperature events in China. During the winter half years for 1960–2008, a total of 115 strong events had negative temperature transient anomalies in the lower troposphere and negative geopotential height transient anomalies from the middle-high troposphere to the stratosphere simultaneously. Among them, 112 events occupied the negative center of temperature transient anomalies on the 850 hPa level and the negative center of geopotential height transient anomalies on the 300 hPa level, respectively. The negative center of temperature transient anomalies on the 850 hPa level can be traced as precursors to indicate the occurrence of regional prolonged low temperature events in China over 5–9 days in advance.

Keywords prolonged low temperature events, physical decomposition, geopotential height anomalies, temperature anomalies, precursors

1 引言

冬半年, 中国受北方冷空气影响, 常常出现区域性的寒潮大风和低温雨雪天气过程, 可形成时间不太长的灾害性天气。由于冷空气不是在中国当地

形成的, 几乎所有寒潮过程的冷空气都可以找到源地。通常, 冷空气来自北极地区 (陶诗言, 1957)。进一步的研究证实, 侵袭中国的寒潮冷空气源地主要有三个 (Ding, 1990; 张培忠和陈光明, 1999): 新地岛以西的北冰洋洋面、新地岛以东的北冰洋洋

收稿日期 2011-11-16, 2012-05-03 收修定稿

作者简介 张宗婕, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端事件的分析与研究。E-mail: zhangzongjie20012004@gmail.com

通讯作者 钱维宏, E-mail: qianwh@pku.edu.cn

面、冰岛以南的大西洋洋面,沿三条路径进入中西伯利亚(43°N~65°N, 70°E~90°E)地区(陶诗言, 1959)。冷空气在那里加强,然后入侵中国。因此,中西伯利亚地区被称为影响中国的寒潮关键区。经过关键区后,冷空气以四条路径入侵中国(朱乾根等, 2000)。冷空气的向南传播主要形式是一种低频模态的 10~20 d 周期振荡(丁一汇, 1991; 马晓青等, 2008),有些强寒潮到达中国前,可在 500 hPa 天气图上,提前 5~6 d 追溯到有对应的冷槽自北欧逐日向东南移动(北京大学地球物理气象教研室, 1976),很多槽东移到中国东部沿海合并到东亚大槽中,使槽加深,甚至东移(丁一汇, 1991)。东亚大槽实际上是一气候槽,从欧洲移来的槽具有天气尺度的扰动。因此,每日中国东部及其沿海地区的环流系统中包含正常的气候部分和相对气候部分的偏差扰动。相对气候部分的偏差扰动,对区域极端天气事件才具有预示意义。对观测的逐日大气变量依据外强迫分离出正常的气候部分和相对偏差扰动的方法称为大气变量的物理分解(钱维宏, 2012a)。因此,运用物理分解的方法,提取大气变量中对寒潮或极端低温事件有指示意义的扰动信号,追踪和判断扰动信号的路径,才有可能做出寒潮或低温极端事件的预报。

寒潮事件的分析已有很多的工作(马晓青等, 2008; 王遵娅和丁一汇, 2006)。寒潮的基本定义是 24 小时,或 48 小时内降温大于 10℃,或伴随有大风和增压等剧烈的地面要素变化(钱维宏和张玮玮, 2007)。寒潮爆发明显表现为 1~2 d 的强冷空气降温过程,其后气温又会逐渐上升。本文涉及到的区域持续性低温事件与寒潮事件有所不同,考虑低温过程需要满足一定的阈值,并且具有区域持续性。区域持续性低温事件的确定可从单站持续性事件入手。单站持续低温事件的定义是:日最低气温低于常年值(常年值=当日及前后 5 d,共 11 d 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(Jones et al., 1999; Yan et al., 2002),连续日数超过 5 d(Zhang and Qian, 2011)。区域持续低温事件的定义是:在同一时间段内至少 5 d 有相邻 5 站同时发生单站持续低温事件(Zhang and Qian, 2011)。区域持续性低温事件的发生可能会经历不同的降温过程,如一开始低温事件可能由寒潮降温引发,并不断有冷空气补充而来,或缓慢降温达到持续性低温标准。对一个稳定区域的持续性低温事

件,冷空气最有可能来自对流层的中高层,而不像寒潮冷空气主要来自对流层低层的平流过程。典型的是中国东北夏季发生的区域持续性低温事件,与高空深厚的冷涡长期稳定有关。任何季节内,持续 5 d 以上的区域低温事件对农业的危害都是巨大的。

本文在以前确定的 552 次区域持续性低温事件的基础上(Zhang and Qian, 2011; 钱维宏, 2011),着重分析冬半年(9 月~次年 4 月)强区域持续低温事件。通过大气变量物理解析的方法(钱维宏, 2012b),提取出对极端事件有指示意义的天气尺度扰动信号,追踪区域极端事件发生之前天气扰动的来源、传播路径及提前时间(日数)。

2 资料和方法

温度站点资料来自中国 1960~2008 年 549 站的均一化逐日平均/最高/最低温度数据集(Li and Yan, 2009)中的逐日最低温度,该数据已经使用 MASH(Multiple Analysis of Series for Homogenization)方法(Szentimrey, 1999)进行了均一化订正。该资料克服了迁站、观测仪器、观测规范改变等人为造成的偏差。

大气变量采用的是 NCEP/NCAR Reanalysis 1 逐日 2.5°×2.5°格点资料(Kalnay et al., 1996),起止时间 1960 年 1 月 1 日~2008 年 12 月 31 日,经度范围 0°~360°,纬度范围 90°S~90°N,垂直方向 17 层(包括 1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa、100 hPa、70 hPa、50 hPa、30 hPa、20 hPa 和 10 hPa)。

利用历史的和当前观测的气象资料,物理分解得到逐日天气瞬时扰动变量,作为解释历史上区域持续性气象灾害事件的基本数据(钱维宏, 2012b)。显然,物理分解方法比传统的方法如球谐函数分解方法速度快,对极端天气事件(如区域持续低温)的指示意义更为清楚。

用近 30 年(1979~2008 年)逐日全球对流层至平流层大气观测的格点温度(或位势高度、风等)连续变量按照下式进行分解:

$$A(\lambda, \varphi, t)_Y = [\bar{A}_t(\varphi)] + A_t^*(\lambda, \varphi) + [A(\lambda, t)]_Y' + A(\lambda, \varphi, t)_Y^*, \quad (1)$$

其中,左端 $A(\lambda, \varphi, t)_Y^*$ 是第 Y 年第 t 日(相对 1 月 1

日) 随经度 λ 和纬度 φ 变化的原始 (或当前) 的气象观测温度场, 或预报的温度场。(1) 式右端第一项 $[\bar{A}_t(\varphi)]$ 是第 t 日气候 ($N=30$ 年) 平均及沿纬圈 (做经度平均后只随纬度 φ 变化) 的温度, 反映的是太阳辐射季节 (纬度) 变化确定的逐日气候变量场。格距 2.5° 经度时, 纬圈格点数从第 1 点至第 144 点。(1) 式右端第二项是相对第 t 日用第 $N=1$ 年至第 $N=30$ 年时间平均的空间格点变量, 减去相对第 t 日太阳辐射纬圈平均季节变化 $[\bar{A}_t(\varphi)]$ 后的气候逐日空间变量场, 反映的是海陆、地形差异调节的逐日空间变量分布; 前两项之和统称为逐日空间气候变量场, 反映了太阳直接辐射作用和海陆分布共同对变量的调节作用, 是分离天气尺度扰动分量的气候基础。(1) 式右端第三项是第 Y 年第 t 日逐日变量的纬圈平均偏差, 反映的是第 t 日逐日行星尺度瞬时变量扰动。(1) 式右端第四项是第 Y 年第 t 日的天气尺度瞬时变量扰动, 它直接与极端天气事件有关, 称为天气尺度瞬时变量扰动 (钱维宏,

2012b), 如天气尺度温度扰动和天气尺度高度扰动等, 本文是针对这一项的应用研究。

3 区域持续性低温事件的大气扰动结构

要寻找区域持续性低温事件的前期天气尺度扰动信号, 首先需要确定什么变量在哪个高度层次上可以指示地面的低温异常。我们分析了 1960~2008 年冬半年 115 次强的区域持续性低温事件, 发现与地面低温匹配的高度扰动信号在 300 hPa 最强, 温度扰动信号最强出现在近地面层。考虑中国除青藏高原以外, 大部分地区的海拔高度在 1500 m 以下, 因此选择 850 hPa (平均在 1500 m 左右) 的温度扰动场来研究前期信号的传播特征。于是, 我们取 850 hPa 层的温度扰动和 300 hPa 层的高度扰动做空间分析, 寻找地面低温事件的前期信号。

为了描述大气中高度扰动与温度扰动的配置关系, 图 1 给出了 1987 年 11 月 23 日~12 月 11 日

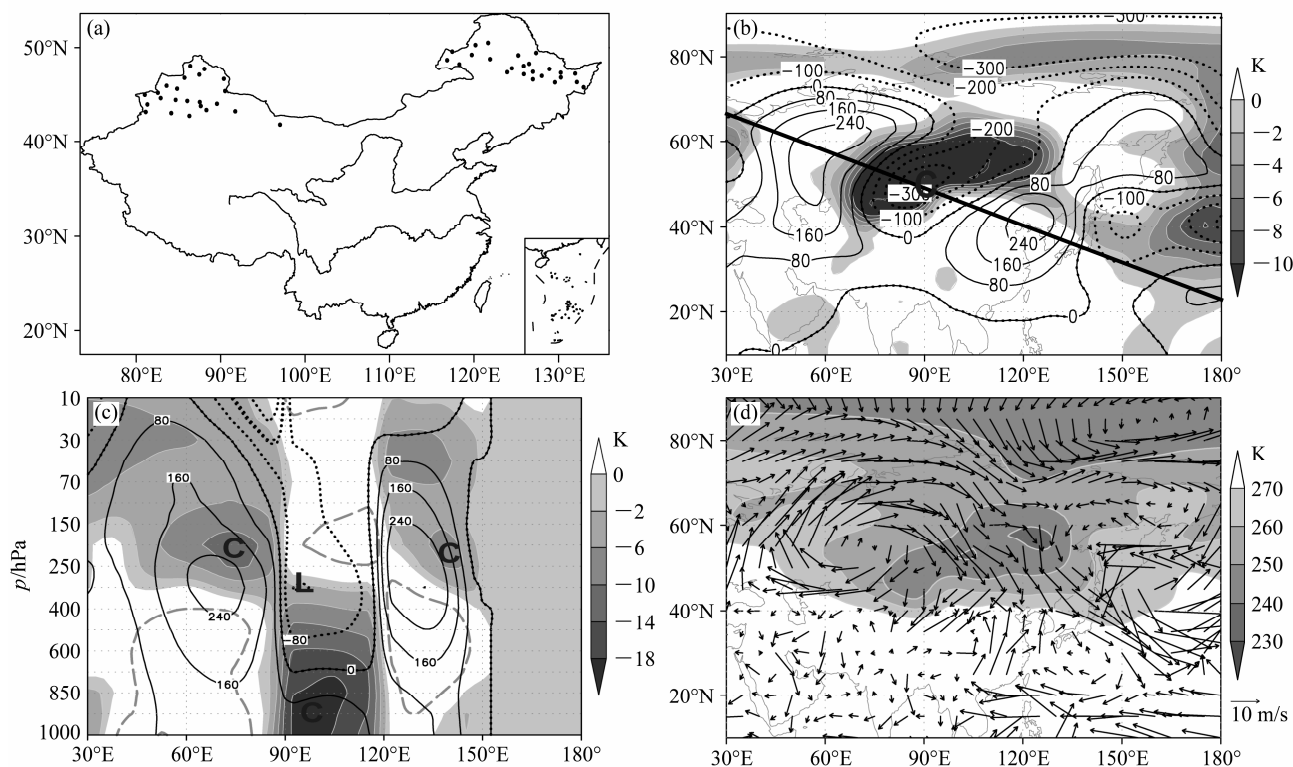


图 1 1987 年 11 月 25 日波及全国的持续性低温事件: (a) 地面极端低温站点; (b) 300 hPa 位势高度扰动 (单位: gpm) 和 850 hPa 温度扰动 (单位: K); (c) 沿 (b) 中粗实线的垂直剖面扰动量分布; (d) 850 hPa 风场 (单位: m/s) 和温度场 (单位: K)。(b、c) 黑色实线和点线: 高度扰动的正值和负值; 阴影: 温度扰动的负值; 灰色虚线: 4 K 间隔的温度扰动正值。“C” 指示 850 hPa 温度扰动低值中心, “L” 指示高度扰动低值中心

Fig. 1 A nationwide prolonged low temperature event on 25 Nov 1987: (a) Extreme low temperature sites; (b) geopotential height transient anomalies (gpm) at 300 hPa and temperature transient anomalies (K) at 850 hPa; (c) vertical cross section of geopotential height and temperature transient anomalies along the double solid line in (b); (d) wind field and temperature at 850 hPa. (b, c) Black solid lines and dotted lines: positive and negative values of geopotential height transient anomalies; shaded areas: negative values of temperature transient anomalies; grey dashed lines: positive values of temperature transient anomalies with 4-K interval. “C” and “L” indicate the negative transient anomaly centers of 850-hPa temperature and 300-hPa geopotential height, respectively

的一次持续性低温事件的高度、温度和风的天气尺度扰动及 850 hPa 风与温度的原始场。这次事件由北向南先后影响中国,持续了 19 d,出现的最低温度为 -11.83°C ,影响范围较大,中心位于(35.07°N , 110.03°E)。在 1960~2008 年的 552 个区域持续性低温事件中影响范围排在第 2 位(钱维宏, 2011)。在 1987 年 11 月 25 日,也就是事件开始的第 3 d,地面的极端低温站点主要分布在新疆北部和东北北部(图 1a)。其实,这天的低温也出现在了蒙古国。图 1b 给出了亚洲地区上空 300 hPa 的高度扰动和 850 hPa 的温度扰动。从图 1b 中可见,中国新疆以北至蒙古国地区存在一个匹配的 300 hPa 高度扰动低(负)值中心和 850 hPa 温度扰动低(负)值中心,对应地面上的低温区。沿着图 1b 中的双实线做垂直剖面得到图 1c 所示的温度扰动和高度扰动。双实线连接了“两正一负”三个高度扰动中心。在地面低温区对应的低层大气为温度扰动负值区,最大的温度扰动负值中心在 850 hPa 及其以下,达到 -10 K 。在地面低温区上空 250 hPa 以上,对流层至平流层为温度扰动的正值区。在地面低温区的上空 700 hPa 至平流层为高度扰动负值区,最大的负值中心(-150 gpm)出现在 300 hPa 附近。在其两侧为高度扰动的正值区,极大值也出现在 300 hPa 附近。

对照图 1c 与图 1d 看出,在稳定而深厚的平流层至对流层上部扰动低压槽的西北侧,有较强的西北风冷平流,使得对流层低层温度下降。图 1d 中,新疆—蒙古国—中国东北 850 hPa 上,温度扰动负值区与较强的西北气流对应。大量的例子分析表明,地面低温区上空 700 hPa 以上至平流层,存在天气尺度的高度扰动低值(负值)区,而在其两侧存在天气尺度的高度扰动高值(正值)区。在地面低温区上空的对流层中下层,大气温度扰动为负值,反映了天气尺度高度扰动槽底附近有极强的冷空气。这是一种稳定的对称低值温压扰动系统,可形成持续性的低温事件。这与阻塞环流形势崩溃,或长波系统移动下的 2~3 d 寒潮天气过程不同。

4 低温事件分类和前期信号路径

在 1960~2008 年的 552 次区域持续性低温事件列表中,冬半年出现了 115 次强的区域持续性低温事件(Zhang and Qian, 2011)。按照影响区域和范围,冬半年的 115 次强低温事件被分成了 8 种区

域类型(表 1)。由于站点温度资料不包括青藏高原,以下分析的区域都是指除了青藏高原外的新疆和中国东部地区。在 8 种区域类型中,次数最多的是西北类(25 次)和东北类(23 次),它们是冷空气影响中国的前沿地区。次数最少的是北方类(3 次),即整个北方地区由西到东受到同一次低温影响的次数很少。持续天数上,最长的是全国类强低温事件(10 d 以上),其次是北方类强低温事件(7~8 d)。持续最长的低温事件,它们的影响范围也广。

表 1 1960~2008 年冬半年(9 月~次年 4 月)8 种区域类型强的持续性低温事件(115 次)的影响范围和持续天数

Table 1 Extents and durations of eight regional categories of strong prolonged low temperature events (115 cases) during the winter half year (September to the next April) from 1960 to 2008

类型(次数)	影响范围	平均持续天数
全国(7)	除青藏高原的中国大部分地区	10
新疆—华南(16)	除青藏高原和东北的中国大部分地区	5
东北—华南(12)	东北到河套地区,以及江淮到华南、西南地区	5
中部(14)	华北、河套以西地区到华南、西南地区	5
西北(25)	新疆到河套的西部地区	5~6
北方(3)	北纬 35°N 以北地区	7~8
南方(15)	江淮到长江以南的整个南方地区	6
东北(23)	东北到华北的北部地区	5

由图 1c 看出,对流层低层的强低温扰动是中上层大气高度扰动深厚低值系统下的产物,而地面低温事件是低层大气温度扰动的向下延伸。因此,在下面的分析中,我们直接关注 850 hPa 的低温扰动。我们统计了 850 hPa 低温扰动的传播路径,得到了八类区域低温极端事件前期信号的移动路径,和平均提前天数(表 2)。对 1960~2008 年冬半年(9 月~次年 4 月)的 115 次强的低温事件,有 112 次可以平均提前 7 d 以上找到扰动信号。分析对应 850 hPa 温度扰动信号的移动路径,发现其中只有 3 次事件没有移动的前期信号,有 3 次事件前期同时受两个低温扰动的影响。根据表 1 中的 8 类区域低温事件,图 2 中点绘了每一类事件前期 850 hPa 温度扰动低值中心的开始位置和到达位置。

图 2a 给出了 7 次全国低温事件的前期扰动冷中心的最早位置,和低温事件开始时的温度扰动冷中心的到达位置。从图 2a 可见,低温事件开始时,这些扰动冷信号所在的纬度都在 40°N 以北的区域。在全国类的 7 次低温事件中,冷信号来自北路、西

表 2 八种区域类型持续低温事件前期大气扰动信号的移动路径和平均提前天数

Table 2 Motion paths and average leading days of atmospheric anomalous precursors calculated from eight regional categories of prolonged low temperature events

类型	各移动路径低温事件的次数							平均提前天数
					西路+	西路+	东北+	
	西路	西北	北路	东北	北路	西北	西路	
全国	—	5	1	—	1	—	—	7.9
新疆—华南	4	10	1	—	—	1	—	9.5
东北—华南	1	5	4	—	—	—	1	8.8
中部	2	5	6	—	—	—	—	7.0
西北	9	15	—	1	—	—	—	7.8
北方	1	2	—	—	—	—	—	9.3
南方	6	5	3	—	—	—	—	7.6
东北	1	8	8	6	—	—	—	8.1

北路和西路—北路共同影响的事件分别有 1 次、5 次和 1 次。最早的信号可以提前 17 d，平均提前 7.9 d。

图 2b 绘出了 16 次新疆—华南低温事件的前期扰动冷中心的最早位置，和低温事件开始时的扰动冷中心的到达位置。在这些事件中，有 4 次事件的早期冷信号来自西路，10 次来自西北路，1 次来自北路，1 次来自西路和西北路的共同影响。在温度扰动场中，最早可以提前 16 d 确定扰动冷中心的位置，平均提前 9.5 d。在低温事件开始时，850 hPa 扰动冷中心位于中国西北到蒙古国以北地区。

东北—华南低温事件的温度扰动场中，共有 12 次的前期冷信号路径（图 2c）。其中，1 次事件的前期 850 hPa 冷信号来自西路，5 次来自西北路，4 次来自北路，1 次来自西路和东北路的共同影响，1 次没有前期信号。它们中最早的可以提前 16 d 确定低温扰动的位置，平均提前 8.8 d。在低温事件开始时，低温扰动冷中心已经到达 90°E 以东地区。

中部 14 次低温事件中（图 2d），有 2 次事件的大气温度扰动前期信号来自西路，5 次来自西北路，6 次来自北路，1 次没有前期信号。最早可以提前 18 天找到大气低温扰动的位置，平均提前 7 d。在低温事件开始时，850 hPa 低温扰动冷中心，多出现在内蒙到河套地区。

西北地区发生的低温事件最多（图 2e），有 25 次，其中有 9 次事件的大气温度扰动前期信号来自西路，15 次来自西北路，1 次来自东北路。最早可以提前 22 d 找到 850 hPa 上的低温扰动位置，平均

提前 7.8 d。在西北低温事件开始时，850 hPa 的低温扰动中心位于新疆北部地区。

北方低温事件出现最少（图 2f），只有 3 次，其中有 1 次事件的大气温度扰动前期信号来自西路，2 次来自西北路。最早可以提前 18 d 找到 850 hPa 低温扰动的位置，平均前期信号为 9.3 d。在北方低温事件开始时，850 hPa 低温扰动中心位于蒙古国以北地区。

南方低温事件共有 15 次，大气温度扰动的前期信号最早位置和路径给出在图 2g 中。其中有 6 次事件的前期信号来自西路，5 次来自西北路，3 次来自北路，1 次没有明显的前期信号。最早可以提前 14 d 找到 850 hPa 冷中心扰动位置，平均提前 7.6 d。在南方低温事件开始时，850 hPa 低温扰动中心位于中国中东部地区。

东北低温事件共有 23 次（图 2h），1 次事件的大气温度扰动前期信号来自西路，8 次来自西北路，8 次来自北路，6 次来自东北路。最早可以提前 17 d 找到 850 hPa 低温扰动的位置，平均提前 8.1 d。在东北低温事件开始时，850 hPa 低温扰动中心位于东北北部到蒙古国以北地区。

112 次低温事件可归纳为 4 种不同的冷空气影响路径（表 3），其中有 3 次低温事件受到 2 条冷空气路径的同时影响。西路冷空气移动形成的低温事件有 27 次。冷空气从 60°N 以南，90°E 以西的欧亚区域向东移动。以 1993 年 12 月的一次低温事件为例，12 月 14 日达到低温标准的站点，集中位于新疆北部（图 3a）。在当日的南北垂直剖面上，地面低温区上空对流层低层为负的温度扰动区，300~150 hPa 附近出现高度扰动负值中心（图 3b）。图 4 给出了 1993 年 12 月 13 日至 20 日的 850 hPa 低温扰动和 300 hPa 高度扰动移动过程。在事件开始前 18 d（图 4a），低温扰动出现在黑海附近，然后沿着 40°N~50°N 向东移动。在第 14 d 前（图 4b），850 hPa 的低温中心与 300 hPa 高度低值中心对应位

表 3 区域持续性低温事件的冷空气路径及次数
Table 3 Motion paths of cold air and total times of regional prolonged low temperature events

路径	方向	次数
西路	从 60°N 以南，90°E 以西的区域向东移动	27
西北路	从 60°N 以北，90°E 以西的区域向东南移动	56
北路	在 90°E~120°E 的区域向南移动	24
东北路	从 60°N 以北，120°E 以东的区域向西南移动	8

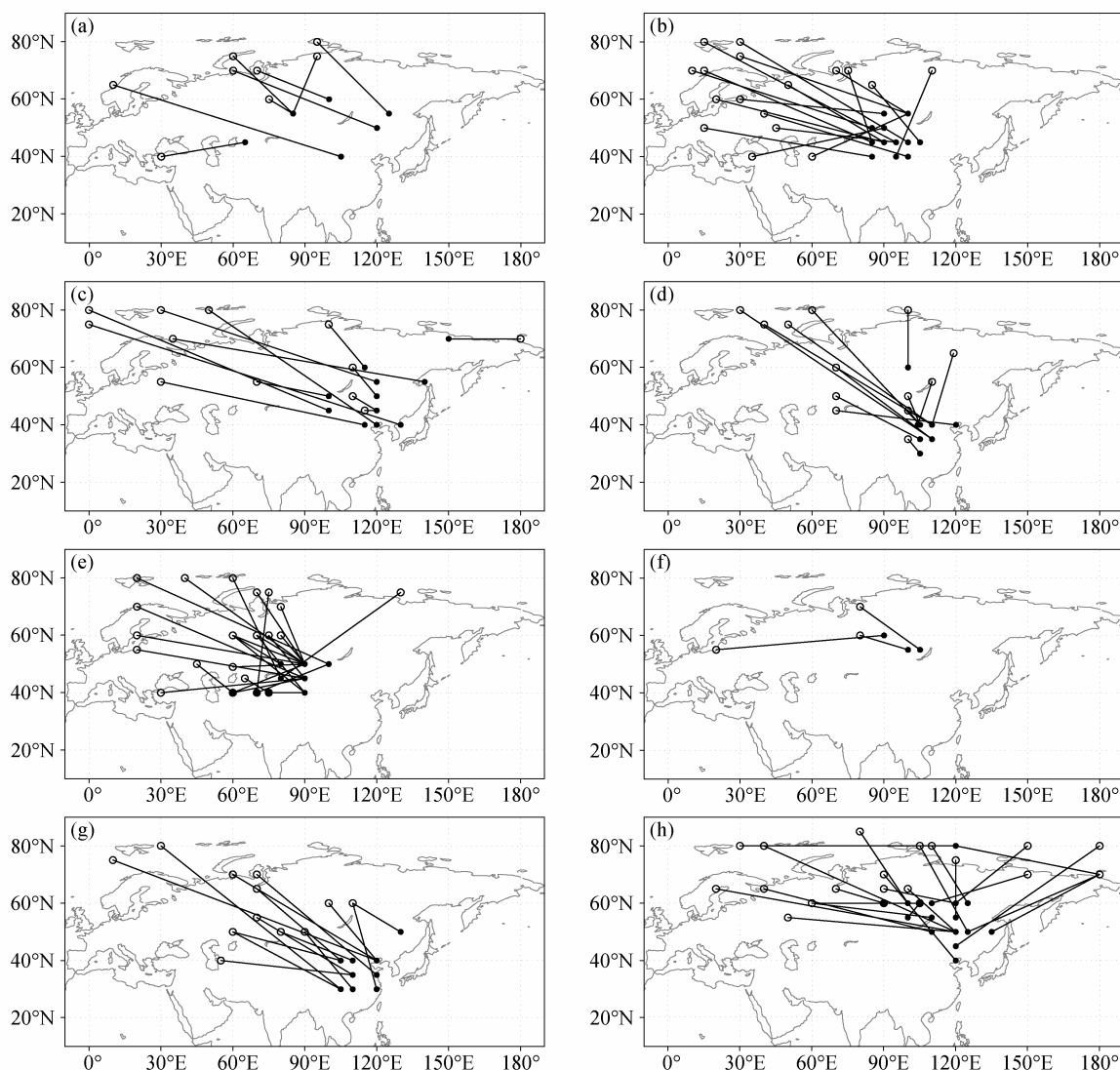


图2 八种类型低温事件对应的850 hPa大气温度扰动前期冷中心的位置:(a)全国;(b)新疆—华南;(c)东北—华南;(d)中部;(e)西北;(f)北方;(g)南方;(h)东北。空心圆点:可以追踪到的最早位置;实心圆点:低温事件影响我国时的大气温度扰动冷中心位置

Fig. 2 The positions of 850-hPa temperature transient anomaly centers for eight regional categories of prolonged low temperature events: (a) Nationwide; (b) Xinjiang–South China; (c) Northeast–South China; (d) Central China; (e) Northwest China; (f) North China; (g) South China; (h) Northeast China. Hollow circles: positions that can be traced at first; solid circles: final positions when low temperature events affected China

于50°E附近。到前10 d时(图4c),温度扰动负值中心和高度扰动负值中心移动到了60°E附近。到前第6 d(图4d)、第3 d(图4e)和事件开始(图4f)时(第0 d),不断有低温扰动负值中心和高度扰动负值中心移来,形成中国新疆北部和西北地区的地面持续性低温。

西北路冷空气形成的低温事件一共出现了56次。前期冷空气信号主要从60°N以北,90°E以西的欧亚区域向东南移动。1972年10月22日出现的低温,其低温区域从新疆向东南扩展到黄河中上游

和华北地区,最后到达中国西南地区(图5a)。在当日经过沿90°E~110°E平均的经向—垂直剖面上,地面低温区上空对流层低层出现温度扰动冷中心,300 hPa附近为高度扰动低(负)值中心(图5b)。1972年10月17日至29日有一次典型的前期西北路径冷空气低温过程(图略)。在事件开始前12 d,低温扰动出现在格陵兰海附近。此后逐日向东南方向移动,到事件开始时,大气低温扰动中心和高度扰动低值中心,到达新疆北部,并继续向东南方向移动影响新疆和华南地区。

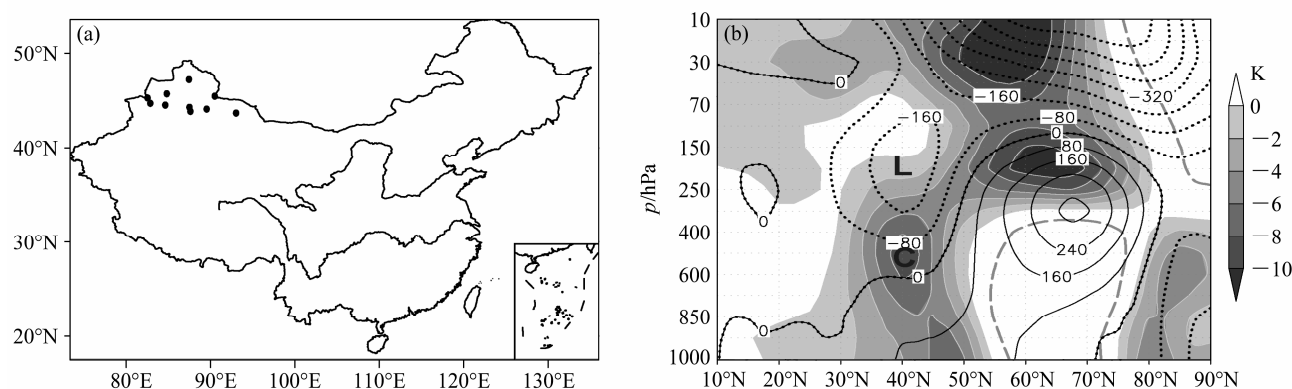


图3 新疆北部低温事件：(a) 1993 年 12 月 14 日地面极端低温站点；(b) 12 月 14 日沿 80°E~95°E 平均的位势高度扰动（单位：gpm）和温度扰动（阴影，单位：K）纬向—垂直剖面

Fig. 3 A low temperature event in northern Xinjiang on 14 Dec 1993: (a) Extreme low temperature sites; (b) meridional-vertical cross section of transient geopotential height anomaly (gpm) and temperature anomaly (shading, K) along 80°E-95°E

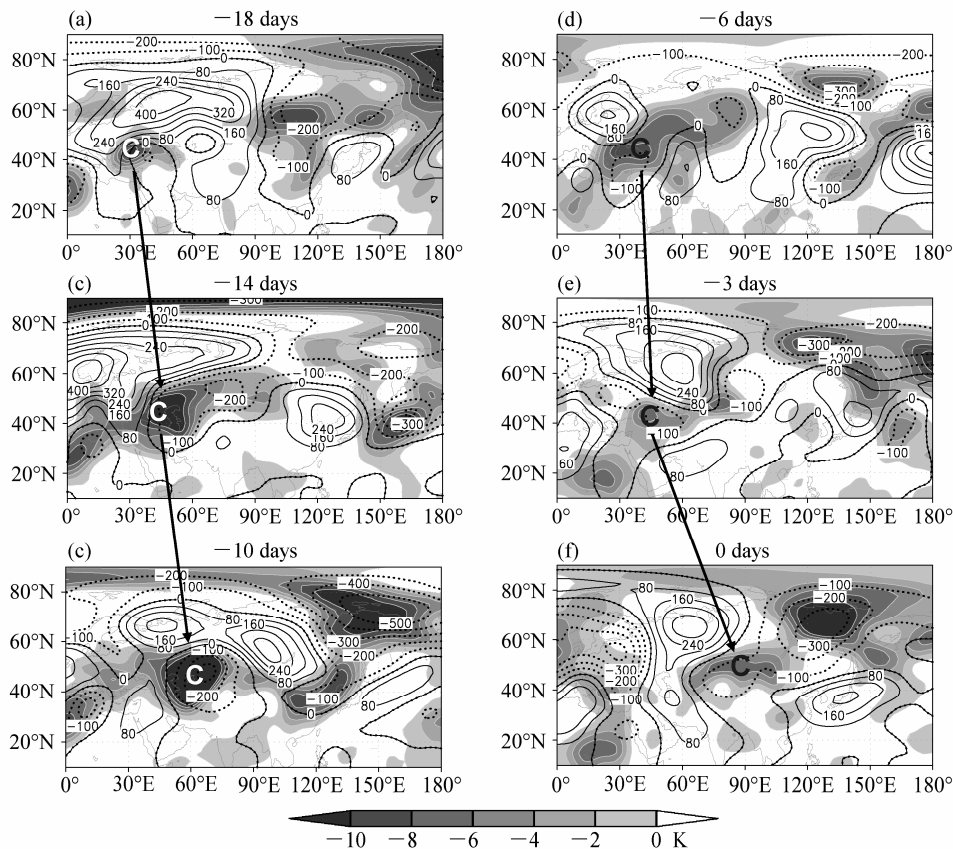


图4 新疆北部低温事件对应的前期 850 hPa 温度扰动（阴影，单位：K）和 300 hPa 位势高度扰动（单位：gpm）：(a-f) 分别为 1993 年 11 月 25 日、11 月 29 日、12 月 3 日、12 月 7 日、12 月 10 日、12 月 13 日。“C”为箭头连接的扰动中心位置

Fig. 4 850-hPa temperature transient anomaly (shading, K) and 300-hPa geopotential height transient anomaly (gpm) for the low temperature event in northern Xinjiang on (a) Nov 25, (b) Nov 29, (c) Dec 3, (d) Dec 7, (e) Dec 10, and (f) Dec 13 in 1993. “C” indicates the central position of anomaly linked by arrows

北路冷空气移动形成的低温事件有 24 次。冷空气多从 90°E~120°E 的区域向南移动。例如，1967 年 9 月 13 日（图 6a），地面极端低温站点分布从中国东北向西南扩展到华北和南方地区。在当日的经向—垂直剖面（图 6b）上，地面低温区上空对流层

低层为温度扰动低（负）值，而在对流层上层为高度扰动低（负）值区。对 1967 年 9 月 7 日至 19 日的低温过程，前期冷空气由北路路径形成东北—华南低温事件。在事件开始前 9 d，低温扰动和高度扰动低值中心从西伯利亚地区缓慢向南移动。到事

件开始时, 低温扰动中心和高度扰动低值中心位于西伯利亚到蒙古国地区, 并向南移动影响中国东北到华南地区。

东北路冷空气移动形成的低温事件有 8 次。冷空气扰动信号多从 60°N 以北, 120°E 以东的东北亚—西北太平洋区域向西南移动。例如, 1977 年 2 月 14 日, 地面极端低温集中出现在中国东北的东北部地区(图 7a)。当日高空扰动要素场上(图 7b), 低温扰动中心出现在地面低温区上空的 850 hPa 附近, 高度扰动低值中心出现在地面低温上空的 300 hPa 附近。对 1977 年 2 月 8 日至 16 日的 850 hPa 低温扰动和 300 hPa 高度扰动的移动过程, 低温事件的 10 d 前, 大气低温扰动和高度扰动从 70°N 日界线附近, 范围逐日向西南方向扩张, 到事件开始时, 扰动向西南扩展到中国东北地区。

表 4 统计了四种路径扰动冷空气的提前天数。其中, 提前 1~3 d 可以追踪到低温扰动信号和高度

扰动信号的有 22 次, 提前 4~6 d 有信号的 26 次, 提前 7 d 以上有信号的 67 次。针对不同路径, 低温扰动和高度扰动的前期信号天数也有很大差别。对于西路路径, 西北路径, 北路路径和东北路径, 平均提前天数分别为 9.1 d, 9.2 d, 5 d 和 7.9 d。

表 4 四种路径扰动冷空气的提前天数
Table 4 Leading days of four type anomalous cold-air tracks

路径	无前期信号	提前天数			平均值
		1~3 d	4~6 d	7 d 以上	
西路	—	3	8	16	9.1
西北路	—	5	12	39	9.2
北路	—	13	4	7	5.0
东北路	—	1	2	5	7.9
总计(百分比)	3*	22(19.1%)	26(22.6%)	67(58.3%)	—

注: 百分比是相对于 115 次路径的比例。
*表示在冬半年 115 次强事件中, 有 3 次事件没有可以追踪的前期信号。

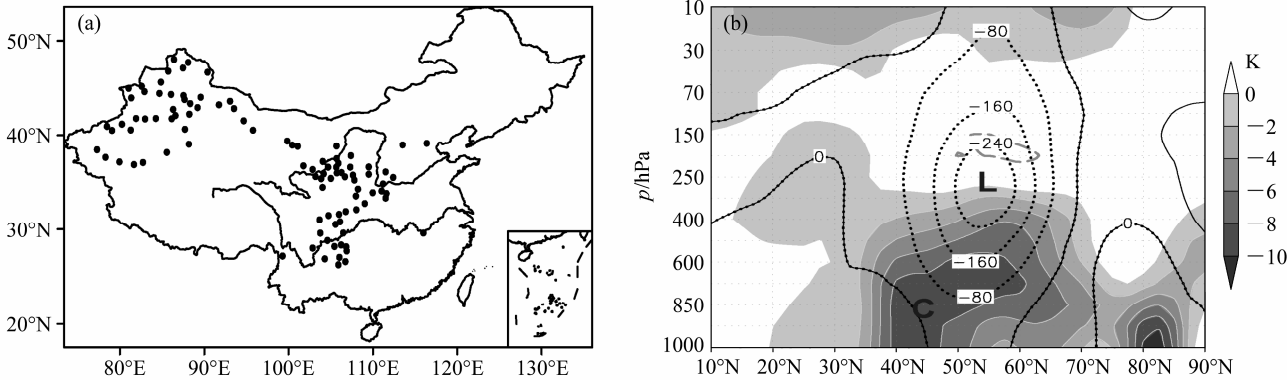


图 5 新疆—华南低温事件: (a) 1972 年 10 月 22 日的地面极端低温站点; (b) 10 月 22 日沿 90°E~110°E 平均的位势高度扰动(单位: gpm)和温度扰动(阴影, 单位: K) 纬向—垂直剖面图
Fig. 5 A low temperature event over the Xinjiang–South China region on 22 Oct 1972: (a) Extreme low temperature sites; (b) meridional–vertical cross section of geopotential height transient anomaly (units: gpm) and temperature transient anomaly (shading, K) along 90°E–110°E

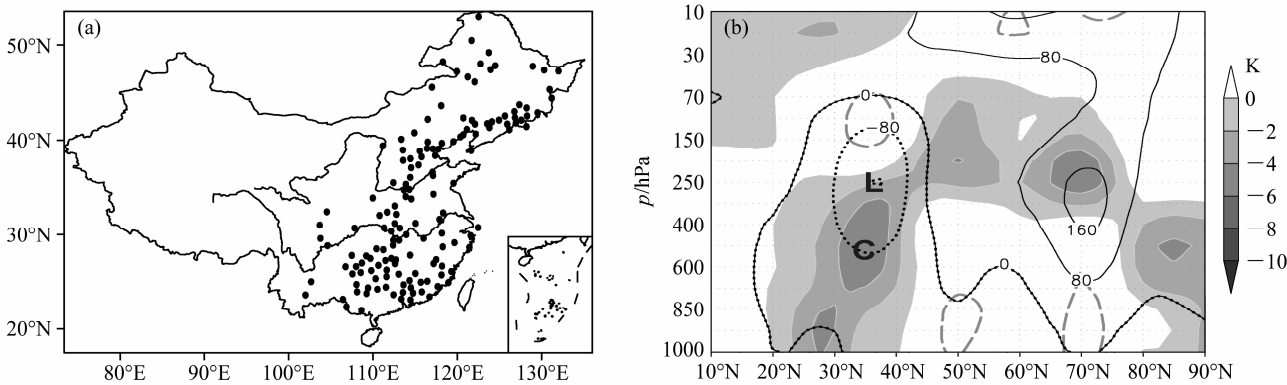


图 6 东北—华南低温事件: (a) 1967 年 9 月 13 日的地面极端低温站点; (b) 9 月 13 日沿 100°E~130°E 平均的位势高度扰动(单位: gpm)和温度扰动(阴影, 单位: K) 纬向—垂直剖面图
Fig. 6 A low temperature event crossing Northeast China–South China on 13 Sep 1967: (a) Extreme low temperature sites; (b) meridional–vertical cross section of geopotential height transient anomaly (gpm) and temperature transient anomaly (K) along 100°E–130°E

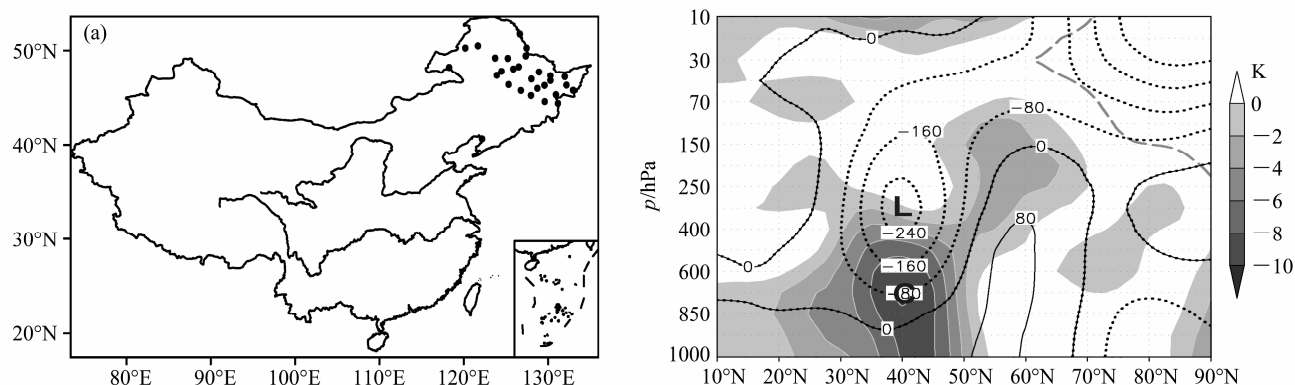


图7 东北低温事件：(a) 1977年2月14日的地面极端低温站点；(b) 2月14日沿110°E~130°E平均的位势高度扰动（单位：gpm）和温度扰动（阴影，单位：K）纬向—垂直剖面

Fig. 7 A low temperature event crossing Northeast China on 14 Feb 1977: (a) Extreme low temperature sites; (b) meridional-vertical cross section of geopotential height transient anomaly (gpm) and temperature transient anomaly (shading, K) along 110°E–130°E

在112个有前期扰动信号的事件中，一些事件有2次或2次以上的前期信号，即前一个扰动正在影响或影响刚结束，后一个扰动又移动到该区域，使得低温事件的持续时间延长。1967年11月18日至1968年1月2日全国低温事件的持续时间有46 d，形成了近49年来552次区域低温极端事件中持续时间最长的一次。这次事件中，第一个信号在事件开始前8 d位于西西伯利亚，沿北路移动。第二个信号在事件开始前5 d位于地中海附近，沿西路移动。第三个信号在事件开始后2 d位于哈萨克斯坦附近并且东移。第四个信号在事件开始后13 d位于里海附近，沿西路移动。第五个信号在事件开始后30 d位于西伯利亚，沿北路移动。第六个信号在事件开始后35 d位于东西伯利亚，沿东北路移动。可见，发生在中国的持续时间很长的低温事件，是由多次大气低温扰动和高度扰动从其他地区移动而来，先后影响形成的。

5 结果与讨论

本文按照大气变量物理解析的方法，分析了低温事件的扰动场结构，确定了与低温事件相关的扰动信号的层次。在低温事件发生时，地面低温区上空850 hPa存在低温扰动，位势高度扰动的负值中心在300 hPa信号最强。平均而言，地面低温区上空700 hPa以上至平流层存在天气尺度的位势高度扰动槽，而在其两侧存在天气尺度的位势高度扰动脊。在地面低温区上空的对流层下层，大气温度扰动为负值区，反映了中上层天气尺度位势高度扰动槽附近，有极强的冷空气聚集，形成的低温扰动低

值中心位于对流层的低层。因此，850 hPa上的天气尺度温度扰动可以作为未来事件的前期信号，也可以指示当日的地面低温位置。

1960~2008年冬半年（9月~次年4月）影响中国的115次区域性强低温事件可按照影响范围分为8个地区类，分别为全国类、新疆—华南类、东北—华南类、中部类、西北类、北方类、南方类和东北类。西北类和东北类的低温事件的次数较多，分别为15次和23次。在115次低温事件中，112次可以平均提前7 d找到前期信号。850 hPa低温扰动的信号路径可分成西路、西北路、北路和东北路。提前1~3 d可以追踪到低温扰动信号和位势高度扰动信号的有22次，提前4~6 d有信号的26次，提前7 d以上有信号的67次。针对不同的路径，前期大气扰动信号天数存在很大的差异。对于西路路径（56次）、西北路径、北路路径和东北路径，它们平均的提前信号天数分别为9.1 d、9.2 d、5 d和7.9 d。

在112个有前期扰动信号的事件中，大多数事件有2次或2次以上的前期信号，即前一个扰动正在影响或影响刚结束，后一个扰动又移动到该区域，使得低温事件的持续时间延长。最典型的是1967年11月18日至1968年1月2日的全国低温事件，持续时间46 d，由6个前期大气温度扰动信号先后影响造成，形成了552次区域低温极端事件中持续时间最长的一次。

本文的分析顺序是：在确定的定义下得到中国一个时期内发生的区域持续性低温事件；对这些低温事件按照强弱排序，对大气变量做物理解析得到

天气尺度位势高度扰动和温度扰动;对排序靠前的若干低温事件寻找大气扰动信号,绝大多数低温事件可以提前 7 d 找到大气扰动的前期信号。

由已经发生了的低温事件,去寻找大气扰动信号,这称为“倒向问题”。通过大量“倒向问题”例子的分析,我们可以积累对低温事件有预报意义的认识。预报实践是一个“正向问题”,即把每天观测到的,或数值模式预报的大气变量分解成扰动分量,以此寻找事件发生的前期信号。“正向问题”是用前期扰动分量预报未来可能发生的低温事件。我们可通过历史大气变量的分解,定量地得到有扰动信号出现后对应有与无低温事件的次数。用历史观测资料做“正向问题”,这是需要进行的下一步工作。夏季的热浪和冬季的低温都属于温度异常。我们对热浪事件的“正向问题”分析有了一个初步的结果,即从前期信号出发预报出现热浪事件所占的正确率为 40%左右(丁婷和钱维宏,2012)。这个比值依赖于热浪标准。如果把热浪标准从高于 35℃降低到 34℃,又把时间集中在夏季,事件预报的正确率比值就会提高。这些是绝对标准,用相对标准会更合理。

另外,还需要进一步从物理机制上解释持续性低温事件中扰动信号的传播和维持机理。本文只是分析了一些前期大气扰动信号的事实和与区域持续性低温事件的对应关系。一个重要的事实是,低温事件的前期信号来自对流层顶附近的位势高度扰动。这可能说明,上层(平流层)大气中的扰动对对流层的环流和区域异常天气也有重大的影响(Baldwin et al., 2003)。

参考文献 (References)

- 北京大学地球物理气象教研室. 1976. 天气分析和预报 [M]. 北京: 科学出版社, 570pp. Teaching and Research Division of Meteorology, Department of Geophysics, Peking University. 1976. Weather Analysis and Forecasting (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 570pp.
- Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. 2003. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts [J]. *Science*, 301: 636–640.
- 丁婷, 钱维宏. 2012. 中国热浪前期信号及其模式预报 [J]. *地球物理学报*, 55: 1472–1486. Ding Ting, Qian Weihong. 2012. Statistical characteristics of heat wave precursors in China and model prediction [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55: 1472–1486.
- 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: 281–292.
- 丁一汇. 1991. 东亚寒潮冷空气的传播和行星尺度作用 [J]. *应用气象学报*, 2 (2): 124–132. Ding Yihui. 1991. The propagation of the winter monsoon during cold air outbreaks in East Asia and the associated planetary-scale effect [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2 (2): 124–132.
- 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: 131–149.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (4): 237–243.
- 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 [J]. *大气科学*, 32 (2): 380–394. Ma Xiaoqing, Ding Yihui, Xu Haiming, et al. 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 380–394.
- 钱维宏. 2011. 气候变化与中国极端气候事件图集 [M]. 北京: 气象出版社, 259pp. Qian Weihong. 2011. Atlas of Climate Change and China Extreme Climate Events (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 259pp.
- 钱维宏. 2012a. 如何提高天气预报和气候预测的技巧? [J]. *地球物理学报*, 55: 1532–1540. Qian Weihong. 2012a. How to improve the skills of weather and climate predictions? [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55: 1532–1540.
- 钱维宏. 2012b. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理 [J]. *地球物理学报*, 55: 1439–1448. Qian Weihong. 2012b. Physical decomposition principle of regional-scale transient anomaly [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55: 1532–1540.
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1267–1278. Qian Weihong, Zhang Weiwei. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (6): 1267–1278.
- Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH) [C]. *Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. WCDMP-41. Budapest, Hungary*, 27–46.
- 陶诗言. 1957. 东亚冬季冷空气活动的研究 [R]. 中央气象局: 短期预报手册. Tao Shiyan. 1957. A study of activities of cold airs in East Asian winter [R]. Chinese Meteorological Administration: Handbook of Short-Term Forecast (in Chinese).
- 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (3): 226–230.
- 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 14–22. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 14–22.
- Yan Z W, Jones P D, Davis T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures

in Europe and China based on daily observations [J]. *Climatic Change*, 53: 355–392.

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.

Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 338–351.

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. *Principles and Applications of Synoptic Meteorology* (3rd edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.