

江漫, 于甜甜, 钱维宏. 2014. 我国南方冬季低温雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析 [J]. 大气科学, 38 (4): 813–824, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13217. Jiang Man, Yu Tiantian, Qian Weihong. 2014. Analysis on atmospheric anomalous signals of winter low temperature and snow ice storms in southern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 813–824.

我国南方冬季低温雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析

江漫 于甜甜 钱维宏

北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871

摘 要 利用中国 549 个站点的温度和降水资料确定了 1960~2008 年发生在我国南方冬季的 23 次低温雨雪冰冻事件。对全球大气变量再分析资料做物理分解得到天气尺度扰动分量用于这些事件的早期信号分析。结果表明, 在低温事件发生时, 南方地区上空 300 hPa 对应有最大负高度扰动, 850 hPa 有负温度扰动。这些扰动的传播特性可以作为低温事件发生的早期信号。在低温雨雪站日数大于 10 的 11 次事件中, 它们的扰动信号平均可提前 11.2 天追踪到。

关键词 中国南方 低温 雨雪冰冻 物理分解 扰动场 前期信号

文章编号 1006-9895(2014)04-0813-12

中图分类号 P448

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13217

Analysis on Atmospheric Anomalous Signals of Winter Low Temperature and Snow-Ice Storms in Southern China

JIANG Man, YU Tiantian, and QIAN Weihong

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

Abstract In this study, a total of 23 winter snow-ice storms in southern China were determined based on the homogenized daily minimum temperature series and precipitation datasets at 549 stations from 1960 to 2008. By decomposing atmospheric variables into four components, the synoptic-scale atmospheric anomalies of these storms were analyzed. The centers of negative geopotential height anomalies and negative temperature anomalies were found at 300 hPa and 850 hPa, respectively, when surface weather events occurred. The centers of these anomalies can be traced as early signals to indicate the occurrence of surface snow-ice storm events. On an average, the early signals of 11 major snow-ice storm events were identified 11.2 days earlier.

Keywords Southern China, Low temperature, Snow-ice storm, Physical decomposition, Synoptic-scale anomaly, Early signal

1 引言

低温雨雪冰冻是发生在我国南方冬季的一种天气现象, 表现为近地面低温并伴有雨雪、冰冻的天气过程, 对于农林牧业和交通有较大的危害。国

外对于冻雨的研究起步较早 (Brooks, 1920), 而北美的冻雨天气多与锋面气旋有关 (Rauber et al., 1994), 它们并不适用于我国的静止锋模型 (赵思雄和孙建华, 2008)。国内也时有对于雨雪冰冻的个例分析 (王晓兰等, 2006)。直到 2008 年 1 月我

收稿日期 2013-07-18, 2013-10-31 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41375703, 公益性行业 (气象) 科研专项 201306032

作者简介 江漫, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事天气气候研究。E-mail: jiangman5932@163.com

通讯作者 钱维宏, E-mail: qianwh@pku.edu.cn

国南方发生了一次较长持续时间和较大范围的冻雨,给经济活动和人们的生活造成了严重影响和损失,一时间引起了专业人员的高度关注和研究热情(王遵娅等,2008;杨贵名等,2008;高辉等,2008)。

分析认为,大气环流系统的“组合性异常”是2008年雨雪冰冻灾害的直接原因(李崇银等,2008;王东海等,2008;丁一汇等,2008)。陶诗言和卫捷(2008)指出中亚冷槽或低涡是乌拉尔阻塞高压强烈发展使西风气流分支的一个结果,而北半球西风气流分成两支分别从高纬度和低纬度绕过青藏高原向东流动,最后在长江流域汇合是造成这次冰冻雪灾的一个重要大气环流条件。两支完全不同性质的干冷和暖湿气流在长江流域交汇,产生了持续性雨雪。每年夏季长江流域的梅雨也正是发生在这种环流形势下,因此2008年的这次雪灾是“冬行夏令”天气反常的具体表现(陶诗言和卫捷,2008)。

经过这次事件,人们也开始反过来寻找历史上具有持续性的雨雪冰冻事件,试图总结出这种天气发生时大气中存在的共同特征。李灿等(2009)提出了南方极端雨雪冰冻过程的定义,这些过程直接与西风槽和南支槽、中层低涡和切变线、西南急流、地面强冷空气等系统相联系,由此确定了1960年以来的5次类似过程。钱维宏和张宗婕(2012)则在“至少5天相邻5站的日最低温度同时小于第十个百分位阈值”的持续性极端低温事件定义(张宗婕和钱维宏,2012)基础上,进一步考虑将持续过程中存在站点最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 和日降水量 $\geq 1\text{ mm}$ 的事件定义为一次区域低温雨雪冰冻事件,由此确定了1960~2008年期间我国南方的23次低温雨雪冰冻事件。他们仅具体分析了2008年和2011年南方雨雪冰冻事件的个例。我国南方雨雪冰冻事件不是每年都会发生的,但一旦发生的影响是巨大的。对有记录的23次南方雨雪冰冻事件做综合与特例的解剖分析,并追踪事件发生前的早期信号,这对未来类似事件的中期—延伸期预报是有意义的。

本文首先介绍所用的资料和大气变量分解方法,再对1960~2008年期间发生的南方雨雪冰冻事件做大气变量分解后扰动信号的分析,最后给出可预报应用的结论与讨论。

2 资料和方法

本文取用中国地面站点温度和降水资料,以及全球大气变量再分析资料。地面温度来源于1960~

2008年中国549站的均一化逐日平均/最高/最低温度数据集(Li and Yan, 2009)。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,克服了迁站、观测仪器、观测规范改变等造成的偏差。降水资料来自中国气象局国家气象信息中心整编的中国地面资料气候日值数据集,为中国752个基本、基准地面气象观测站及自动站1951年以来逐日的数据。本文选取了与温度站点资料中一致的549站的降水资料,时间范围为1960年1月1日~2008年12月31日。大气变量采用的是NCEP/NCAR Reanalysis 1逐日平均的 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 格点资料(Kalnay et al., 1996),经度范围 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\sim 0^{\circ}$,纬度范围 $90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$,垂直方向17层从1000 hPa至10 hPa。

传统意义上,气候被定义为月、季或年时间尺度上多年平均的大气状态(Peixoto and Oort, 1992)。月平均、季节平均和年平均的气候可以由至少30年的观测数据计算得到。因此,某一时间段(如5天或10天)上的平均气流指的是大尺度的环境流场,而不是气候流场。对于极端天气事件来说,我们要考虑的是逐日变化的气候,而不是一段时间的平均气候,即地球上某日某个点的气候是仅由太阳赤纬角和下垫面强迫出的一种热力平衡状态,它具有年循环的周期变化,但不包含多尺度天气扰动和多时空尺度气候扰动的部分。于是,全球大气风场、位势高度场和温度场都可以分解成4个分量:纬圈平均的对称气候、非对称气候、纬圈平均的瞬变对称扰动和瞬变非对称扰动。在此逐日气候定义下的大气变量分解称为物理分解(钱维宏, 2011; 钱维宏, 2012a)。以全球大气温度变量为例,4分量物理分解可以写成:

$$T_y(\lambda, \varphi, t) = [\bar{T}(\varphi, t)] + T^*(\lambda, \varphi, t) + [T'_y(\varphi, t)] + T_y^*(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

其中,左端的 $T_y(\lambda, \varphi, t)$ 项是在确定年份 y 中的第 t 日,随经度 λ 和纬度 φ 变化的温度场。它可以表示历史或实时观测的温度场,也可以是模式预报产品输出的温度场。

式(1)中右端第一项 $[\bar{T}(\varphi, t)]$ 是年循环(365天)中第 t 天的某个纬圈 φ 的对称气候温度场。该项反映的物理意义是在年循环周期里,不同地理纬度带上因太阳赤纬角(辐射)和下垫面年变化引起的温度场对热力平衡状态的响应,它的变化大约滞

后太阳赤纬角的变化 40 多天 (Qian and Tang, 2010)。式 (1) 中第二项 $T^*(\lambda, \varphi, t)$ 是年循环中第 t 天的随经度 λ 和纬度 φ 变化的纬向非对称气候温度。它虽然没有长期的或年际的变化, 但具有年循环 t (365 天) 的变化。在大尺度上, 它反映的是海陆热力对比随时间引起的温度年循环的变化。在小尺度上, 它反映的是局地海陆差异和城市等下垫面热力和动力作用引起的温度场年循环变化。上述两个气候温度场的叠加就是通常意义上的多年平均的在确定时刻的气候温度场, 但现在它也具有年循环 365 天的变化, 反映了太阳直接辐射作用和海陆分布共同对温度的调节作用, 是分离天气扰动分量的气候基础。式 (1) 右端第三分量 $[T'_y(\varphi, t)]$ 是行星尺度纬圈平均的大气瞬变扰动分量, 简称行星尺度瞬变扰动或行星尺度温度扰动, 该项与热带海洋或极地年代际、年际和季节内热力强迫变化有关。通过计算可以得到, 第三项所占的比重要远小于第四项所占的比重 (钱维宏, 2012b; Qian and Liang, 2012)。另外, 我们还将前三项, 即两项气候分量和行星尺度扰动分量之和称为第四项扰动分量的环境场。本文计算了 700 hPa 的环境风场来观察雨雪冰冻事件前期大气扰动信号的传播特征。式 (1) 右端最后一项是纬向非对称的瞬变温度扰动 $T_y^*(\lambda, \varphi, t)$, 它是天气尺度的逐日变化的分量, 实际上是要从观测的当前温度场中分离掉气候温度场和行星尺度的瞬变温度扰动场, 得到全球分布的瞬变温度扰动场。该分量与极端天气事件有关, 称为天气尺度瞬变扰动, 其形成原因是多尺度地形和热力强迫或大气内部波动非线性相互作用的结果。本文利用此物理分解的原理对 1960~2008 年期间发生在我国南方的雨雪冰冻事件对应的当日大气扰动结构进行分析并追踪前期大气扰动信号的移动。

3 1960~2008 年南方低温雨雪冰冻事件

持续性低温事件可以定义为持续 5 天以上, 至少有相邻 5 站日最低气温低于第十个百分位阈值, 在此基础上进一步考虑, 如果在低温事件过程中出现站点的最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$, 日降水量 $\geq 1\text{ mm}$, 则将这次事件定义为一次低温雨雪事件。根据此定义, 1960~2008 年我国南方 (35°N 以南) 共发生了 23 次低温事件。针对 23 次低温雨雪事件, 可以用持

续日数 X_1 、影响范围 X_2 、低温强度 X_3 和低温雨雪站日数 X_4 等 4 个强度指数对其进行评估。持续日数 X_1 即为从事件发生到结束时的总日数。影响范围 X_2 则为事件持续过程中逐日影响站点数的最大值。低温事件第 i 天影响的 j 个站点日最低气温距平的平均值为 $X_3(i)$, 低温强度指数定义为整个事件过程中最低的 $X_3(i)$ 值。而低温雨雪站日数 X_4 , 则等于每日所有达到最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 和降水 $\geq 1\text{ mm}$ 的站点数在事件发生过程中的总和。这 23 次事件各自的强度指数及排序见表 1, 总排序则是由低温雨雪站日数降序排列的。

表 1 1960~2008 年冬季 (12 月至次年 2 月) 南方冬季持续低温雨雪事件 (按低温雨雪站日数排序)

Table 1 Low temperature and snow-ice storms in southern China during winters (DJF) from 1960 to 2008 (in descending order of numbers of snow-ice stations)

排序	开始时间	持续时间		影响范围		低温强度		低温雨雪站日数
		天数	排序	站点数	排序	温度/ $^{\circ}\text{C}$	排序	
1	1969 年 1 月 28 日	12	4	111	2	-9.59	3	232
2	2008 年 1 月 13 日	22	1	74	6	-6.44	19	186
3	1972 年 2 月 3 日	9	10	86	4	-9.11	4	181
4	1996 年 2 月 17 日	10	8	132	1	-7.8	11	147
5	1960 年 1 月 22 日	7	14	43	11	-7.14	14	69
6	1974 年 2 月 23 日	7	16	79	5	-8.52	5	60
7	1970 年 1 月 4 日	6	18	55	7	-8.47	6	60
8	1984 年 1 月 18 日	15	3	44	10	-6.48	18	55
9	1983 年 12 月 23 日	10	7	22	16	-6.68	16	39
10	1969 年 2 月 19 日	6	17	26	14	-7.28	13	21
11	1968 年 2 月 4 日	11	6	29	13	-9.99	2	20
12	1982 年 12 月 25 日	6	20	21	17	-7.94	9	9
13	1993 年 12 月 14 日	6	21	7	21	-5.07	21	9
14	1988 年 2 月 29 日	9	12	24	15	-6.56	17	6
15	1978 年 1 月 17 日	5	23	7	22	-5	22	4
16	1971 年 1 月 28 日	9	9	21	18	-7.04	15	3
17	1964 年 1 月 25 日	8	13	10	20	-6.11	20	3
18	1972 年 2 月 27 日	5	22	48	9	-7.34	12	3
19	1961 年 1 月 11 日	11	5	35	12	-8.16	7	2
20	1974 年 12 月 18 日	6	19	6	23	-4.25	23	2
21	1963 年 1 月 6 日	15	2	90	3	-8.06	8	1
22	1972 年 2 月 27 日	9	11	48	8	-7.91	10	1
23	1974 年 2 月 7 日	7	15	11	19	-11.37	1	1
平均	—	9.1	—	45	—	-7.5	—	48

注: 字体加粗的行表示本文中要重点讨论的 11 次低温雨雪事件。

统计得出, 1960~2008 年冬季的南方低温雨雪事件频次具有明显的年代际变化, 1960 和 1970 年代发生的次数较多, 分别有 7 次和 9 次, 到了 1980 年之后开始逐渐减少, 1980 年代减少为 4 次, 1990 年代有 2 次, 2000 年以后则仅发生了一次。23 次事件中, 持续事件最长的是发生在 2008 年 1 月 13 日~

2月3日,长达22天;影响范围最大的则是1996年2月17~26日的事件,它在2月20日影响了132个站点;低温强度最强的事件发生于1974年2月7~13日,最低的低温距平为 -11.34°C ,但是它的低温雨雪站日数只有1。从低温雨雪站日数来看,1969年1月28日~2月8日过程中,共有232个,是最多的一次事件。另外,这次事件的持续时间、影响范围和低温强度分别排序第4、第2和第3,是一次非常强的低温雨雪事件。在这23次事件中,有些事件的低温雨雪站日数比较少,在整个事件过程中未达到10,因此我们重点关注表1中低温雨雪站日数大于10的11次事件。

4 低温雨雪冰冻事件的扰动结构

在表1中,1969年1月28日~2月8日发生的低温雨雪事件是比2008年的事件更为严重的过程。我们的分析将这次事件过程中受影响日数最多的区域选定为事件的中心范围,以方便确定温度的变化过程和追踪前期大气扰动信号的来源。图1a是这次持续了11天的事件过程中发生极端低温的站点以及它们受影响累积日数的分布。可以看到,这次事件主要发生在我国的长江中下游及华南地区,两湖平原受到影响的日数最多,达到了9天以上。我们选定一个区域($23^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)作

为此次事件的中心范围,大致包含了累积日数以两湖平原9天为中心向外至3~4天的区域,共有86个站点发生过极端低温事件。我们给出了这86个站点的平均逐日最低气温及其气候值和距平值,以及逐日降水(雪)量的序列(图1b)。在1月28日~2月8日,气温逐日气候值都在 0°C 以上,并且随时间逐渐增大。而观测气温和降水发生了两次波动,气温的每次波动发生在降水波动之后。第一次过程为1月28日~2月3日,平均降水量在1月30日达到最大值13.3 mm,日最低气温在1月31日达到持续性低温事件过程的最低值 -9.2°C ,距平值为 -10.2°C ,定义该日为事件的最强日;第二次过程为2月4日~2月8日,降温前降水达到5.9 mm的平均值,日最低气温距平在2月5日达到最低值 -9.08°C 。图2为1月30日温度在 115°E 的垂直剖面,可以看到在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围的近地面至500 hPa存在着“冷—暖—冷”的逆温结构,其中暖层位于700~850 hPa。这是典型的能够形成冻雨的垂直温度分布结构。暖湿空气上升至700 hPa以上形成冰晶或雪后下降至暖层融化成水滴,水滴继续下降到近地面的冷空气垫上再度凝结,特别会附着在低温物体的表面。

以最强日(1月31日)为例,对其大气变量做物理分解,去掉气候分量和行星尺度扰动分量,留

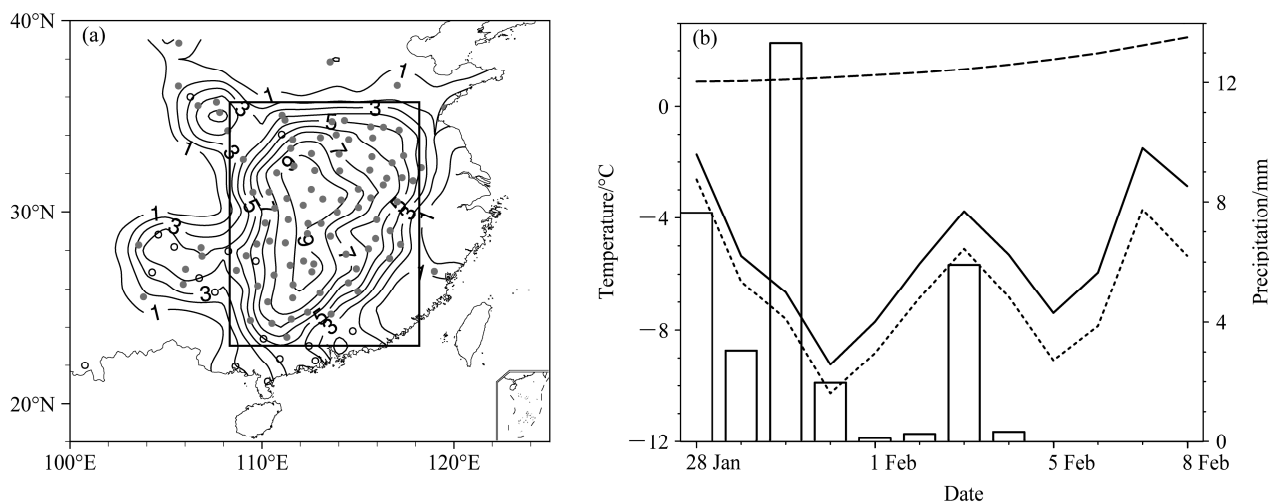


图1 1969年1月28日~2月8日的低温雨雪冰冻事件:(a)发生极端低温站点的分布(圆点)以及累积日数(等值线);(b)温度与降水序列。图1a中,实心点为至少有一天达到低温雨雪标准的站点,空心点为发生低温但是始终未达到雨雪冰冻的站点,方框为选定的事件中心范围($23^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$);图1b分别为事件中心区域平均的日最低气温观测值(实线)、气候值(长虚线)、距平值(短虚线),以及区域平均降水量(垂直条块)

Fig. 1 The low temperature and snow-ice storm from 28 January to 8 February 1969: (a) Low temperature stations (dots) and accumulated days (contours); (b) the daily regional-mean temperature and precipitation. In Fig. 1a, the filled dots indicate stations reaching the snow-ice standard for at least one day and the open dots indicate stations only reaching the low temperature standard, and the box ($23^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the central area of this event. In Fig. 1b, solid, long-dashed, short-dashed lines: observations, climatic values, anomalies for temperature; bars: precipitation

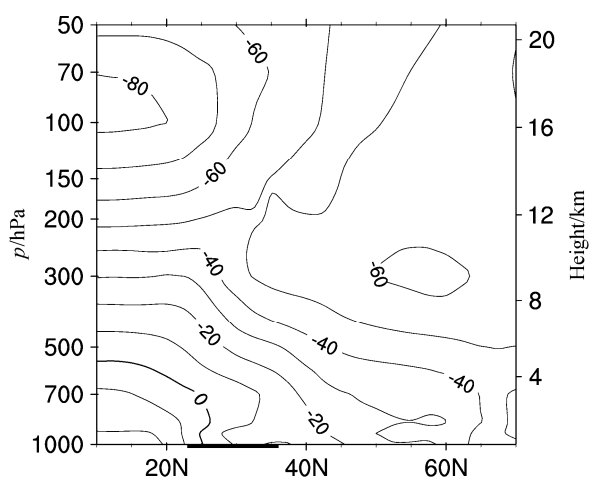


图2 1969年1月30日温度(单位: °C)在115°E的垂直剖面

Fig. 2 The vertical section of temperature (unit: °C) along the longitude of 115°E on 30 January 1969

下天气尺度扰动分量。图3a-c分别是1969年1月31日位势高度和温度的原始场、气候场和扰动场在115°E的垂直剖面。在未分解的变量场即原始场(图3a)上,我国南方对流层低层有一温度槽线由地面向北倾斜,在低层700~850 hPa存在逆温的结构,等位势高度线由南向北升高,总体表现为北方的冷空气以冷锋的形式南下。在气候场(图3b)上,30°N附近正是气候上副热带锋活动的位置。在去除气候分量和行星尺度扰动之后,天气尺度扰动分量(图3c)可指示极端低温雨雪事件所对应的大气变量扰动结构。事件发生时的对流层大气中对应着负温度扰动和负位势高度扰动。从地面至高空300 hPa存在负温度扰动,最强的负值中心位于对流层底部,约为-10 K。负位势高度扰动在20°N以北并随高度向北倾斜,扰动最大值中心位于300 hPa,达到-220 gpm。

图3d是11次事件最强日的位势高度扰动和温度扰动的合成,低温事件对应着负高度扰动和负温度扰动。负温度扰动轴线由地面至高空300 hPa向北倾斜,中心值位于700 hPa以下。负高度扰动中心位于300 hPa,也正是温度扰动零线所在的高度;300 hPa以上温度扰动转为正值。这种垂直方向上的配置关系可以从统计和动力两方面得到验证。首先,从30年的统计结果来看,高度扰动方差的最大值中心位于约150~300 hPa的对流层顶附近,而温度扰动方差的最大值中心则分别位于100 hPa、400 hPa和对流层底部850 hPa附近,并且100 hPa的温度扰动中心与对流层中下部(400 hPa及850

hPa)的温度扰动中心呈现出完全相反的正与负的对比。其次,从动力学方面进行推导,将全球大气高度和温度场分解为气候和相对气候的扰动偏差两部分: $\phi = \bar{\phi} + \phi'$, $T = \bar{T} + T'$, 并代入到静力平衡方程进行简化,得到扰动偏差部分的静力平衡关系: $T' = -1/R \cdot \partial \phi' / \partial \ln p$ 。扰动偏差部分中包含行星尺度扰动和天气尺度扰动分量,而行星尺度扰动分量的量级往往小于天气尺度扰动分量,因此在忽略掉行星尺度扰动分量后,天气尺度温度扰动和高度扰动之间仍存在着准静力平衡的关系。从该式中我们能够得出,当一个正的高度扰动随着等压面升高而逐渐减小时, $\partial \phi' / \partial \ln p > 0$, 则 $T' < 0$, 温度扰动(在正的高度扰动的上方)为负值;反之,在正的高度扰动的下方为正的扰动。本文分析的对流层下部低温事件正好与此描述的温度扰动和高度扰动的垂直分布相反。

图3给出的信息是,位势高度扰动和温度扰动分别在300 hPa和850 hPa最强,可以作为低温事件的大气扰动信号。图4是1969年1月31日300 hPa位势高度和850 hPa温度的原始场、气候场和扰动场的水平分布。从原始场上看,位于西伯利亚上空和乌拉尔山脉西部各有一个闭合的冷低压,我国东部地区和伊朗高原上分别有一个冷槽,两个冷槽中间的青藏高原上空为暖脊。东部的冷槽是北支槽和南支槽合并的结果(朱乾根等,2000),在我国南方地区则有一个明显的“冷舌”。在图4b的气候场上,西部乌拉尔山脉附近没有冷中心,只有一个低槽,而西伯利亚的冷中心和其南部延伸出来的槽更偏东,并且没有闭合的等高线,中纬度地区等高线则较为平直。在去掉气候场分量和行星尺度扰动分量之后,天气尺度扰动分量(图4c)上具有清晰的负温度扰动中心,并对应300 hPa上的负高度扰动。我国南方地区上空对应着-8K的温度扰动中心。此外,在其北侧和高原西侧还有多个负温度扰动。我们还将继续考察31日后低温的持续与这些扰动信号的关系。

5 低温雨雪事件前期信号

在对2008年1月我国南方雨雪冰冻事件对应的天气形势分析中,很多研究认为:造成2008年初我国南方低温的冷空气主要是从中亚,以西方路径连续侵入中国的(丁一汇等,2008;陶诗言和卫捷,2008;李灿等,2010)。事实上,至少有4次冷空

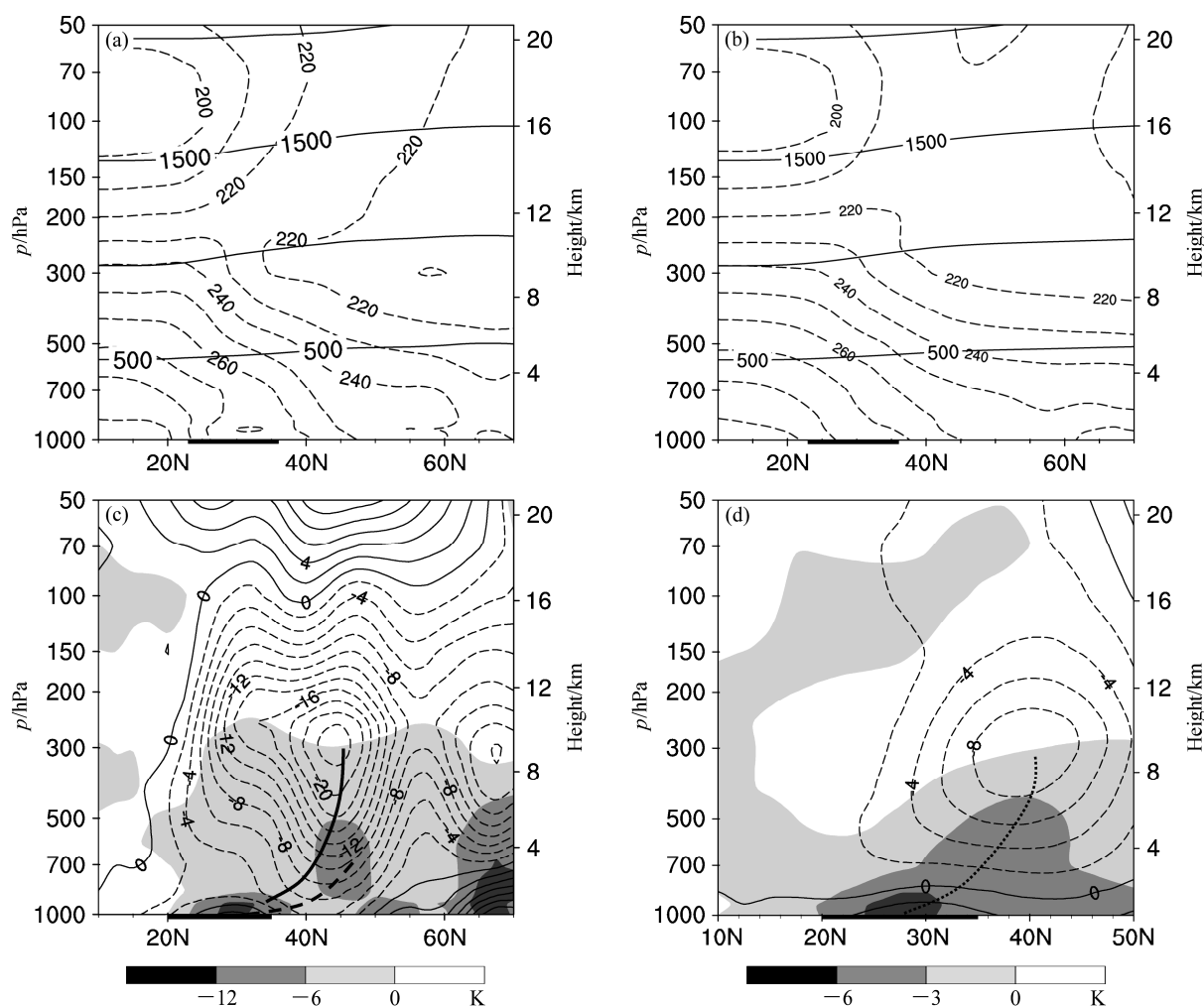


图3 位势高度(实线,单位: dagpm)和温度(虚线,单位: K)沿 115°E 的垂直剖面: (a) 1969 年 1 月 31 日; (b) 气候。位势高度扰动(等值线)和温度扰动(阴影)沿 115°E 的垂直剖面: (c) 1969 年 1 月 31 日; (d) 11 次低温雨雪冰冻事件最强日合成值。X 轴上黑色条块在 (a-c) 中和 (d) 中分别表示低温雨雪所在的纬度范围 (23°~36°N 和 20°~35°N); (a) 图粗虚线为我国南方对流层低层的温度槽; (c) 图粗实线和粗虚线分别为高度扰动槽线和温度扰动槽线; (d) 图粗短虚线为负温度扰动槽线

Fig. 3 The vertical sections of (a) geopotential height (solid line, unit: dagpm) and temperature (dashed line, unit: K) along 115°E on Jan 31 1969 and (b) the corresponding climatic values. The height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K): (c) Anomalies on 31 Jan 1969; (d) composites on the peak dates of 11 events. The black bars on the x axis of (a-c) and (d) are corresponding to latitudinal ranges of 23°~36°N and 20°~35°N, respectively. In (a), the heavy dashed line denotes the temperature trough in the lower troposphere in southern China; in (c), heavy solid line and heavy dashed line are troughs of height anomaly and temperature anomaly, respectively; in (d), the thick short-dashed line indicates the axis of negative temperature anomalies

气相继沿相近的西方路径从新疆侵入中国。来自中亚的冷空气是从该地区的稳定冷槽或冷低涡中分裂东移的。通过上节的分析, 300 hPa 的负位势高度扰动和 850 hPa 的负温度扰动可以作为低温雨雪冰冻事件的扰动信号。因此, 我们想知道, 扰动信号在事件发生前是如何传播的? 并且在其他的持续性低温雨雪事件中, 冷空气的传播有没有同 2008 年类似的特征?

图 5 为 1969 年 1 月 20 日~2 月 6 日期间 850 hPa

负温度扰动信号的传播过程图, 背景为 700 hPa 环境风场。根据前人对我国南方低温雨雪冰冻事件的个例分析, 最大水汽输送、最大水汽辐合的层次, 以及最大正涡度、最大负散度、最大垂直速度、低空急流均考虑在 700 hPa。有研究指出, 700 hPa 西南暖湿低空急流对暴雪的形成起到了重要作用(朱红和黄玲琳, 2003; 彭春华和张端禹, 2008)。因此, 我们也选取 700 hPa 上的风场作为环境风场, 观察它与温度扰动信号传播的关系。最早在事件发

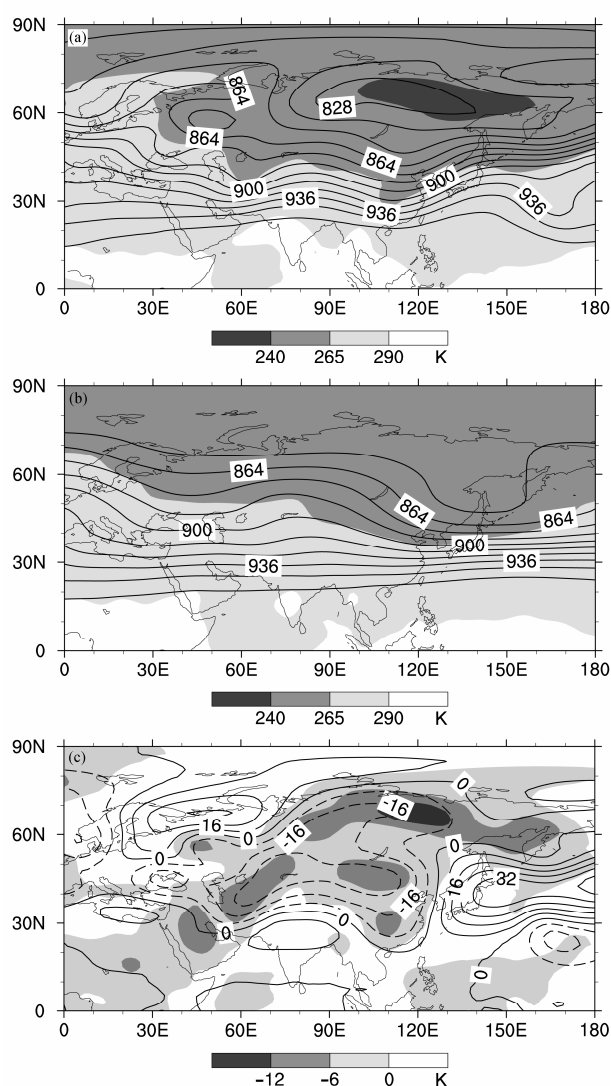


图4 1969年1月31日300 hPa位势高度场(等值线,单位: dagpm)和850 hPa温度场(阴影,单位: K)。(a)原始场;(b)气候场;(c)扰动场

Fig. 4 (a) The geopotential height (contours, unit: dagpm) at 300 hPa and temperature (shading, unit: K) at 850 hPa on 31 Jan 1969 and (b) the corresponding climatic values; (c) same as (a), but for the anomalies of geopotential height and temperature

生前8天的1月20日,在乌拉尔山脉上空可以发现有一个负温度扰动A,该扰动向南移动于1月24日到达45°N时分裂为两个扰动信号A1和A2。青藏高原引起西风发生绕流,在高原的西侧分为西北风和西南风两个分支,在高原的东侧汇合。在西南风的作用下,1月25日靠近高原西侧的扰动信号A1开始向东北方向移动,远离高原的A2则继续向南移动。1月27日A1到达高原的东侧,沿着高原东侧的西北气流向东南方向移动,而位于高原西侧的A2也开始在引导气流的作用下向东北方向移

动。1月28日A1到达了我国江淮流域,高原南侧绕流而来的西南气流携带了印度洋上的水汽,与冷空气汇合,导致了低温雨雪事件的开始。同日位于里海西侧上空有另一个负扰动B产生。此后1月31日A1继续南压,第一次过程发展到了最强的程度,此时A2和B分别移至蒙古高原上空和青藏高原西侧。2月4日A2并入我国南方地区上空,第二次过程开始。此后,B也同A一样分裂出更多的扰动信号B1和B2,先后绕高原向南方地区移动,使得低温一直持续至2月8日。由于B分裂出的扰动信号的中心值比较弱,并且南支槽减弱为较为平直的东西风,因此第二次的低温过程并没有第一次过程强,雨雪也较少。钱维宏和张宗婕(2012)在运用大气变量物理分解方法分析2008年1月低温雨雪过程时指出,影响这次过程的850 hPa低温扰动中心有4个,它们先后从中亚绕青藏高原北侧移动到我国南方地区,造成了中国南方4次低温雨雪冰冻(冻雨)过程。由以上分析可知,1969年事件的冷空气传播也存在同2008年雨雪过程相似的传播路径。

在扰动场上追踪所有事件的前期信号,将它们最早可以发现的位置和最强日的位置绘于图6,可以大致看到这些前期信号的传播方式和路径。11次事件各自的前期信号传播方式和提前天数列于表2。可以看到,11次南方雨雪冰冻过程是由28次负温度扰动信号移动造成的,平均每次过程要受到2~3个负温度扰动信号的影响,最早可以提前追踪15天,最晚也能提前8天发现,平均可提前11.2天。这些信号的传播方式可以分为两种类型,分别

表2 11次事件的28个前期信号传播特征

Table 2 The propagation characteristics of 28 early signals during 11 events

开始日期	持续 天数	最强日	信号提	
			前天数	信号传播方式
1960年1月22日	7	1960年1月24日	11	3次东南向
1968年2月4日	11	1968年2月14日	13	2次绕流+1次西南向
1969年1月28日	12	1969年1月31日	8	2次绕流
1969年2月19日	6	1969年2月21日	15	3次东南向
1970年1月4日	6	1970年1月5日	13	2次东南向+1次西南向
1972年2月3日	9	1972年2月9日	10	2次绕流+2次东南向
1974年2月23日	7	1974年2月26日	9	1次东南向
1983年12月23日	10	1983年12月29日	12	1次绕流+1次东南向
1984年1月18日	15	1984年1月22日	8	1次绕流+1次东南向
1996年2月17日	10	1996年2月20日	14	1次绕流+1次西南向
2008年1月13日	22	2008年2月3日	11	2次绕流+1次西南向

注:加粗事件是本文所具体列出的例子。

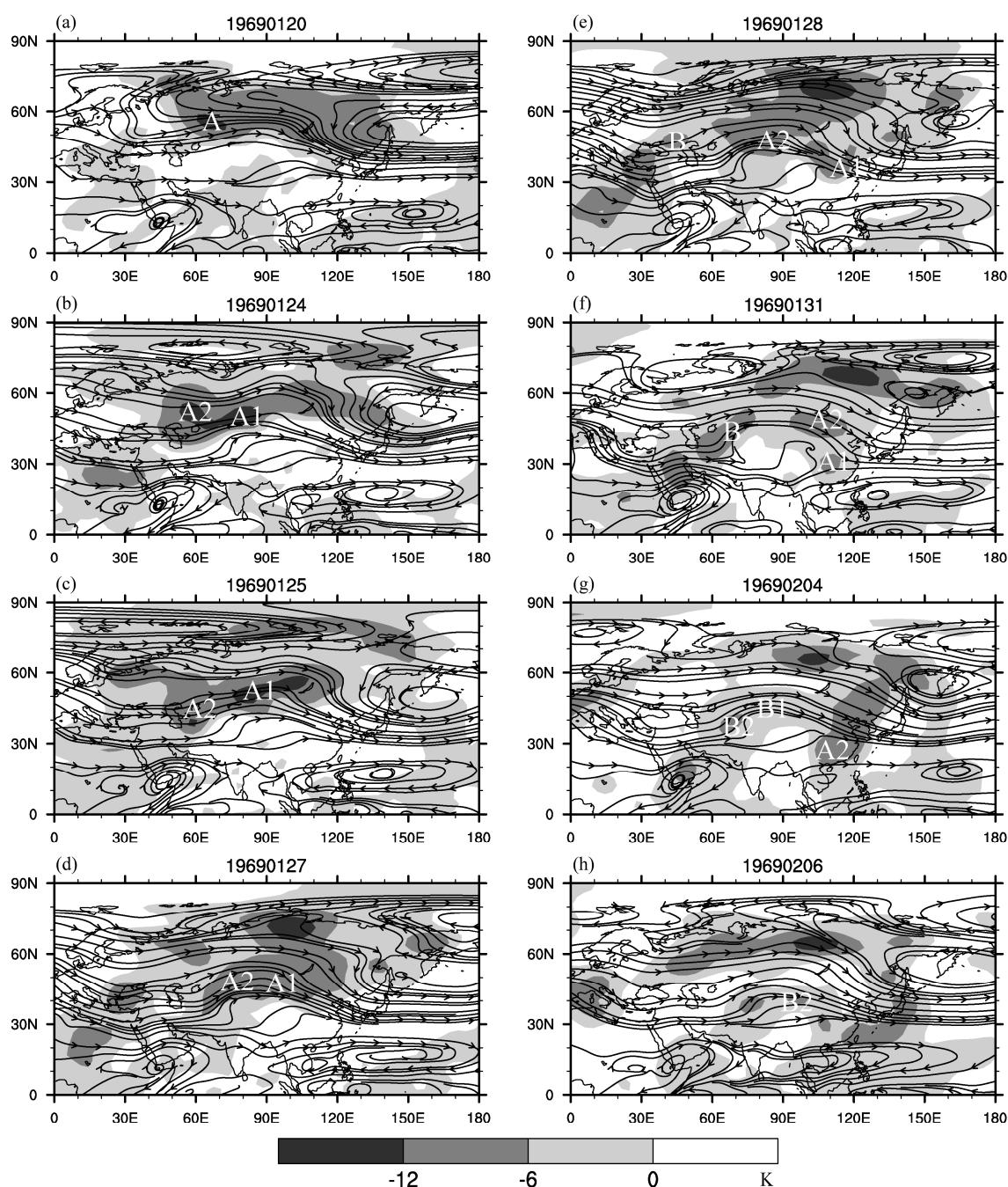


图5 1969年1月20日~2月8日850 hPa负温度扰动(阴影,单位:K)和700 hPa环境风场(流线):(a)1月20日;(b)1月24日;(c)1月25日;(d)1月27日;(e)1月28日;(f)1月31日;(g)2月4日;(h)2月6日。图中字母表示扰动信号,一个信号分裂成更多信号则在字母后加数字表示

Fig. 5 The negative temperature anomalies (shading, unit: K) at 850 hPa and environmental wind (streamline) at 700 hPa on (a) 20 January, (b) 24 January, (c) 25 January, (d) 27 January, (e) 28 January, (f) 31 January, (g) 4 February, and (h) 6 February in 1969. The letters on the figures denote the early signals with numbers added if signals split

见图6a和图6b。28次信号传播过程中,有11次信号是如1969年1月28日~2月8日的前期信号一样,传播至青藏高原以西的冷空气因高原阻碍而堆积,绕青藏高原随其北侧的反气旋式环流向东北移动至较高纬度,再向东南方向移动,影响我国南方

(图6a)。另外有17次信号是直接由高纬度向低纬度传播而来的(图6b)。11次绕高原传播的信号中,有5次受高原的阻碍后分裂为2个或以上的冷空气团,分批影响我国南方,因此容易造成持续时间较长的雨雪冰冻事件,如发生在1969年1月28

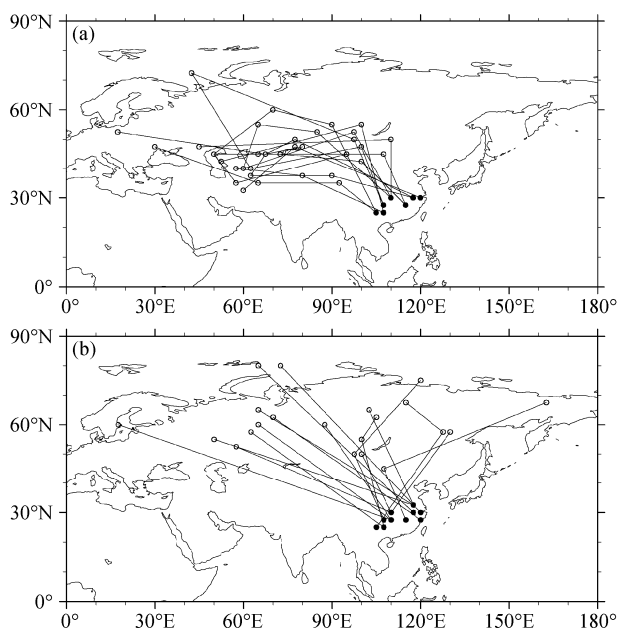


图 6 11 次低温雨雪事件的 850 hPa 温度扰动前期信号传播路径：(a) 绕青藏高原传播；(b) 直接由高纬度向低纬度传播。空心圆点表示低温事件发生前最早可以追踪到的信号位置，实心圆点表示低温最强日对应的信号位置

Fig. 6 The paths of early signals of 11 low temperature and snow-ice storms based on negative temperature anomalies at 850 hPa: (a) Propagating around the Tibetan Plateau; (b) moving directly from high to low latitudes. The open and filled dots indicate the positions of signals on the origin date and the peak date, respectively

日~2月9日和2008年1月13日~2月3日的事件(李灿等, 2009)。在17次直接移动来的信号中(图6b), 有13次是产生于欧洲地区及西伯利亚地区, 沿西北气流传播的; 4次则是产生于勒拿河沿岸及以东, 沿库页岛上空的气旋式环流, 向西南向移动影响我国的。

28个信号中有17个信号是由高纬度直接向低纬度传播影响我国南方的。1974年2月23日~3月1日发生的低温事件(图7)就是由1个向东南方向移动的信号影响造成的。这次事件的前期23~25日有雨雪过程。26日雨雪停止后, 低温距平下降到最低值 -8.52°C , 影响站点数最多(图7b)。在最强日(2月26日)的位势高度扰动和温度扰动沿 115°E 的垂直剖面上, 能看到与之前11次事件合成图类似的结构。对流层下部的负温度扰动中心指示着地面的低温事件, 对流层上部的负位势高度扰动中心则位于偏北的位置, 在更高纬度的位置存在着与此结构“对称”的配置。图8给出了事件前期信号的传播特征。在事件发生前9天的2月14日, 新地岛上空有负的温度扰动信号A出现并向东南方

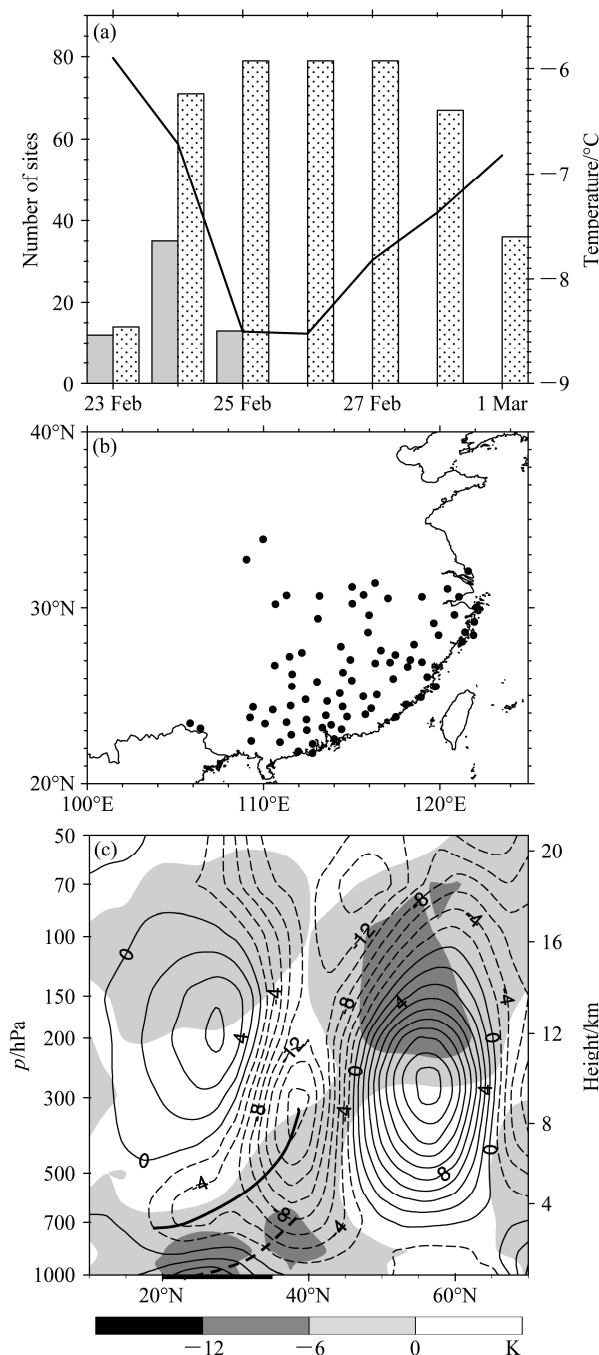


图 7 1974 年 2 月 23 日~3 月 1 日低温雨雪事件：(a) 逐日低温雨雪站点数（灰色条块）、极端低温站点数（点状填充条块）和站点日最低气温距平平均值（折线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；(b) 2 月 26 日地面极端低温站点；(c) 2 月 26 日位势高度扰动（等值线，单位：dagpm）和温度扰动（阴影，单位：K）沿 115°E 的垂直剖面。(c) 中：粗实线和粗虚线分别为高度扰动槽线和温度扰动槽线

Fig. 7 The low temperature and snow-ice storm from 23 February to 1 March, 1974: (a) Daily numbers of snow-ice stations (grey bar) and low temperature stations (dot-filled bar) and regional-mean surface minimum temperature anomalies (solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$); (b) low temperature stations on 26 February; (c) the vertical sections of geopotential height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K) on 26 February along the longitude of 115°E . In (c), heavy solid line and heavy dashed line are troughs of height anomaly and temperature anomaly, respectively

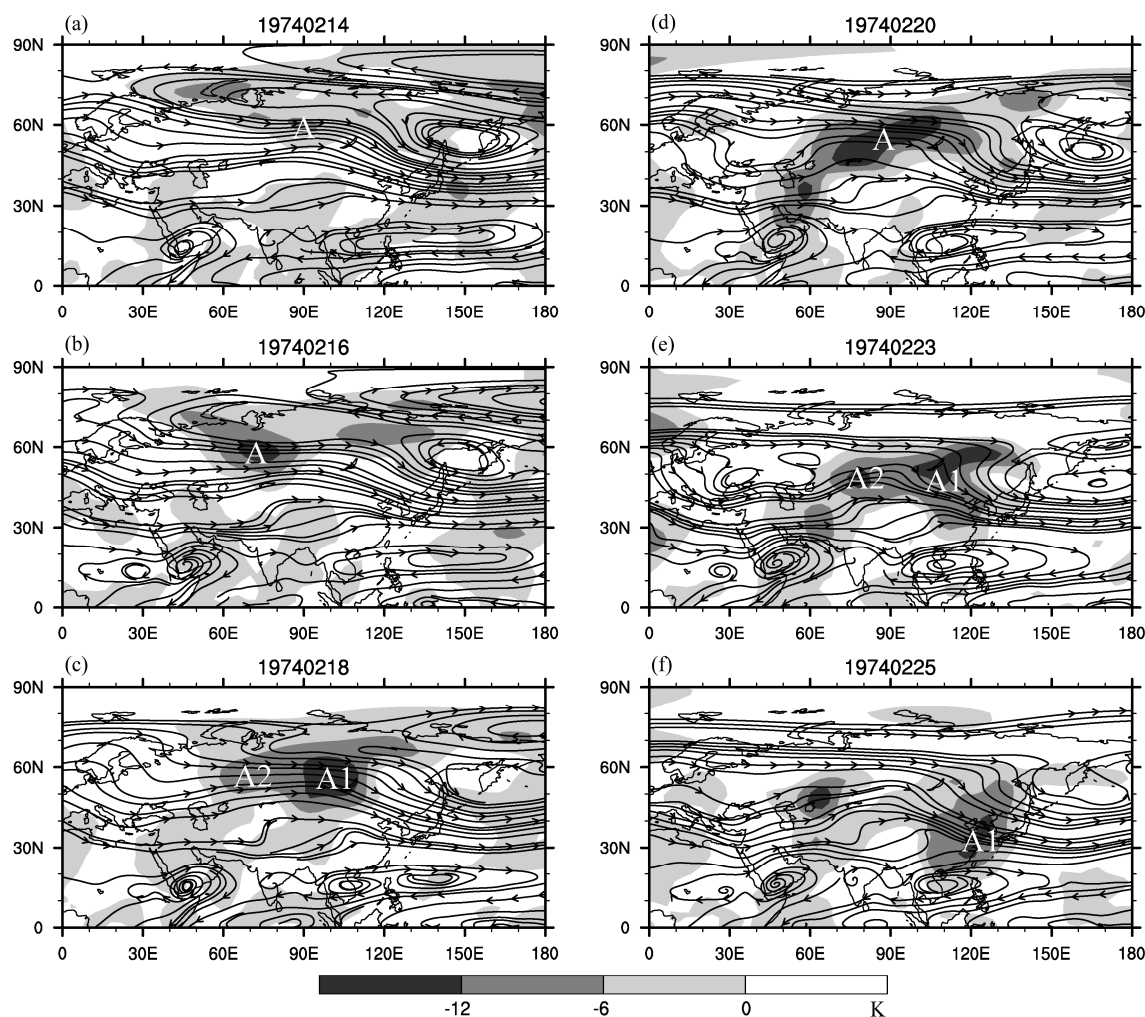


图8 1974年2月14日~2月25日850 hPa负温度扰动(阴影,单位:K)和700 hPa环境风场(流线): (a) 2月14日; (b) 2月16日; (c) 2月18日; (d) 2月20日; (e) 2月23日; (f) 2月25日

Fig. 8 The negative temperature anomalies (shading, unit: K) at 850 hPa and environmental wind (streamline) at 700 hPa on (a) 14 February, (b) 16 February, (c) 18 February, (d) 20 February, (e) 23 February, and (f) 25 February in 1974

向移动, 2月16日该信号到达乌拉尔山脉东部的西西伯利亚平原, 强度增加到 -12 K 。到了2月18日, 信号A分裂为东边一个较强的信号A1和西边一个较弱的信号A2。A1位于蒙古高原北部, 强度增强至 -14 K 以上。这两个信号2月20日在西伯利亚上空合并后又于2月23日重新分裂。东边的信号A1底部向南延伸至我国江南地区, 事件开始。2月23日后, 信号进一步向南压至华南地区, 影响站点数也进一步增多。

6 结论和讨论

本文根据持续性低温雨雪事件的定义确定了发生在1960~2008年冬季(12月至次年2月)中国南方地区(35°N 以南)的23次持续性低温雨雪

事件, 对这些事件的持续天数、影响范围和低温强度进行了综合评估。运用大气变量物理分解方法重点分析了低温雨雪站日数大于10的11次事件, 得到下列结论:

(1) 23次事件的平均持续时间为9.1天, 平均影响45个站点, 低温强度平均为 -7.5°C , 低温雨雪站日数为48。23次事件中, 最多的为1969年1月28日~2月8日, 为232个站日数, 2008年1月13日~2月3日的站日数为186, 排在第二位, 但是它的持续时间(22天)是所有事件中最长的。低温事件频次具有明显的年代际变化, 1960和1970年代较多, 1980年代以后逐渐减少。

(2) 对低温发生时的大气变量进行物理分解, 扰动分量能更好地指示地面极端低温雨雪事件所对

应的大气变量扰动结构。事件发生时对流层分布着负温度扰动和负高度扰动。负温度扰动轴线由地面至高空 300 hPa 向北倾斜, 中心值位于 700 hPa 以下, 负位势高度扰动中心位于 300 hPa, 也正是负温度扰动零线所在的位置, 300 hPa 以上温度扰动则由负值转为正值。陶诗言和卫捷(2008)也曾指出 2008 年的雨雪冰冻事件之前 500 hPa 上是看不出明显信号的, 明显的信号存在于 300 hPa。当用物理解析法得到高度扰动后, 这样的信号就清楚了。

(3) 11 次低温雨雪事件是由 28 次负温度扰动信号移动造成的, 这些信号平均可以提前 11.2 天追踪到。在 28 次信号传播过程中, 有 17 次信号是直接由高纬度向低纬度传播的。而另外的 11 次信号是传播至青藏高原以西的冷空气受高原阻碍堆积, 绕青藏高原随其北部的反气旋式环流向东北移动至较高纬度, 再向东南方向移动, 影响我国南方。17 次直接传播而来的信号中, 分为向东南方向传播的 13 次信号和向西南方向传播的 4 次信号。11 次绕高原传播的信号中, 5 次信号是受高原的阻碍后分裂为 2 个或以上的冷空气团, 分批影响我国南方, 形成了持续时间较长的雨雪冰冻事件。

本文所做的工作是先确定事件, 当事件发生时向前追溯与事件有关的大气变量扰动信号, 这是由结果找原因的“倒向问题”。如果考虑相反的情况, 当有一个扰动信号在远离中国的源地产生时, 未来几日它是否传播过来, 强度会发生怎样的变化, 会对我国的哪个区域造成影响, 将会持续多久, 这便是“正向问题”, 它们是单凭经验外推无法较为准确地掌握的。统计得到, 事件发生时 850 hPa 平均最强的温度扰动为 $-4\sim-6$ K。将所关心区域上空的扰动信号的强度阈值设定为 -4 K 时, 指示低温雨雪事件的命中率为 67.6%, 说明扰动信号对于低温雨雪事件预报有一定的参考价值和意义。近年来, 数值预报的发展使得天气形势预报的可用时效超过了 7 天(矫梅燕等, 2006), 因此在对极端低温事件进行实际预报时, 我们可以将物理解析方法同模式预报产品相结合, 对模式预报出的位势高度场和温度场进行分解, 提取出天气尺度的扰动分量, 从而对极端事件进行延伸期预报。钱维宏和张宗婕(2012)在 2011 年初就利用未来 10 天的欧洲中期数值天气预报产品做扰动场的分解, 得到 850 hPa 层温度扰动信号的传播。他们实际提前 4 天预报出了 1 月 16~21 日我国南方的一次雨雪冰冻过

程事件的开始和提前 9 天预报出了事件的结束。

参考文献 (References)

- Brooks C F. 1920. The nature of sleet and how it is formed [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 48: 69–73.
- 丁一汇, 王遵亲, 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.
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II 成因分析 [J]. *气象*, 34 (4): 101–106.
- Gao Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: II. Possible climatic causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 101–106.
- 矫梅燕, 龚建东, 周兵, 等. 2006. 天气预报的业务技术进展 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 594–601.
- Jiao Meiyun, Gong Jiandong, Zhou Bing, et al. 2006. An overview of the development of weather forecasting [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (5): 594–601.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- 李灿, 张端禹, 冯明, 等. 2009. 南方极端低温雨雪冰冻过程天气学特征分析 [J]. *暴雨灾害*, 28 (4): 321–327.
- Li Can, Zhang Duanyu, Feng Ming, et al. 2009. Analysis of synoptic characteristic of extremely low temperature and snow-ice weather in South China [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28 (4): 321–327.
- 李灿, 张礼平, 吴义城, 等. 2010. 南方极端低温雨雪冰冻过程东亚季风环流特征及与 El Niño/La Niña 事件的关系 [J]. *暴雨灾害*, 29 (2): 142–147.
- Li Can, Zhang Liping, Wu Yicheng, et al. 2010. Circulation characteristic of East Asia winter monsoon of extremely low temperature and snow-ice weather in southern China and its correlation with El Niño/La Niña events [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 29 (2): 142–147.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113–122.
- Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113–122.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 2 (4): 237–243.
- 彭春华, 张端禹. 2008. 2008 年低温雨雪冰冻极端气象灾害预报服务技术交流会议述评 [J]. *暴雨灾害*, 27 (2): 177–181.
- Peng Chunhua, Zhang Duanyu. 2008. Comments on communion conference of prediction and service skills about the extremely low temperature and snow-ice disasters in 2008 [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 27 (2): 177–181.
- Peixoto J P, Oort A H. 1992. *Physics of Climate* [M]. New York: American

- Institute of Physics, 520pp.
- 钱维宏. 2013. 基于大气变量物理解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 中华人民共和国国家知识产权局, ZL201110061438.7.
- Qian Weihong. 2013. Medium-range forecast system and method of snow and freezing weather based on physical decomposition of atmospheric variables. State Intellectual Property Office of the People's Republic of China, ZL201110061438.7.
- 钱维宏. 2012a. 中期—延伸期天气预报原理 [M]. 北京: 科学出版社, 380pp.
- Qian Weihong. 2012a. Principles of Medium to Extended Range Weather Forecasts (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 380pp.
- 钱维宏. 2012b. 天气尺度瞬变扰动的物理解原理. [J]. 地球物理学报, 55 (5): 1439–1448.
- Qian Weihong. 2012b. Physical decomposition principle of regional-scale atmospheric transient anomaly [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1439–1448.
- Qian W H, Tang S Q. 2010. Identifying global monsoon troughs and global atmospheric centers of action on a pentad scale [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 3 (1): 1–6.
- 钱维宏, 张宗婕. 2012. 南方持续低温冻雨事件预测的前期信号 [J]. 地球物理学报, 55 (5): 1501–1512.
- Qian Weihong, Zhang Zongjie. 2012. Precursors to predict low-temperature freezing-rain events in southern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1501–1512.
- Qian W H, Liang H Y. 2012. Propagation of planetary-scale zonal mean wind anomalies and polar oscillations [J]. Chin. Sci. Bull., 57 (20): 2602–2614.
- Rauber R M, Ramamurthy M K, Tokay A. 1994. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's Day ice storm [J]. Wea. Forecasting, 9 (2): 183–208.
- Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH) // Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. Budapest, Hungary: WCDMP-41, 27–46.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 337–350.
- Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 337–350.
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析 [J]. 气象学报, 66 (3): 405–422.
- Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (3): 405–422.
- 王晓兰, 李象玉, 黎祖贤, 等. 2006. 2005 年湖南省特大冰冻灾害天气分析 [J]. 气象, 32 (2): 87–91.
- Wang Xiaolan, Li Xiangyu, Li Zuxian, et al. 2006. Analysis of freezing-hazard event in 2005 in Hunan Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (2): 87–91.
- 王遵亲, 张强, 陈峪, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征 [J]. 气候变化研究进展, 4 (2): 63–67.
- Wang Zunya, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. 2008. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China [J]. Adv. Clim. Change Res. (in Chinese), 4 (2): 63–67.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. 气象学报, 66 (5): 836–849.
- Yang Guiming, Kong Qi, Mao Dongyan, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 836–849.
- 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.
- 赵思雄, 孙建华. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 351–377.
- Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 351–377.
- 朱红, 黄玲琳. 2003. 南方大雪预报温度条件浅析 [J]. 浙江气象科技, 24 (1): 26–28.
- Zhu Hong, Huang Linglin. 2003. Analysis on conditions of temperature forecast for winter snow storm in southern China [J]. Zhejiang Meteorology (in Chinese), 24 (1): 26–28.
- 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 Methods of Synoptic Meteorology (3rd ed.) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.