

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^{*1}

王东海 柳崇健 刘英 魏凤英 赵南 姜智娜
李英 陈菊英 王亚非 施晓晖 徐祥德

WANG Donghai LIU Congjian LIU Ying WEI Fengying ZHAO Nan JIANG Zhina
LI Ying CHEN Juying WANG Yafei SHI Xiaohui XU Xiangde

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081

2008-04-01 收稿,2008-05-09 改回.

Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, Wei Fengying, Zhao Nan, Jiang Zhina, Li Ying, Chen Guying, Wang Yafei, Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(3):405–422

Abstract The four successive freezing rain/heavy snowfall processes were undergone in the southern part of China from 11 January to 2 February 2008, under the background of the long-term lasting blocking in the middle-higher latitudes of the Euro-Asian continent (named “0801 Southern Snow-Disaster” hereafter). This severe weather event has the characteristic features of broad range, strong intensity, long duration and serious disaster. During this event the blocking situation in the higher latitudes is kept quasi-steady with minor changes, the weather systems in the lower latitudes are so active that the sufficient vapour supplies can be guaranteed, the favourable weather conditions to the formation of ice storm are met in the wide region within the southern China and so forth. The cause of formation of the temporally and spatially large-scale event itself might be, as a whole, traced back to the planetary-scale systems. The results from the research, in the polar vortex anomaly and its change with time, show that changes in the polar vortex in the stratosphere precede those in the troposphere, especially the polar vortex in the stratospheres in early December before this event commenced to gradually strength while the intensification of the polar vortex in the troposphere delayed dramatically with its rapid strengthening in the period between the middle of January and early February. This implies that indications of changes in the polar vortex in the troposphere and the severe weather events associated might be contained within the stratosphere, which is very meaningful to improving the 10–30 days’ extended forecasts. The results demonstrate that the significant factors that lead to the unusual atmospheric circulation and thus this severe weather event include: (1) the very active Arctic Oscillation (AO) that benefits the permanent maintenance of the planetary-scale waves; (2) transferring continuously of negative vorticity into the blocking area from its upstream around 50°N so as to cause repeatedly the blocking high on the verge of disintegration to reintensify with the result that the blocking conditions can be maintained for a long time; (3) the active southern branch of currents in the lower latitudes south of the Tibet plateau that ensures the abundant vapour supplies to the southern China; and (4) the favourable synoptic-dynamic-physical conditions to the formation and development of ice storm and so forth.

“0801 Southern Snow-Disaster” lasted for a longer period with an extremely severe icing. The data from the Cloud-Profile Radar on the satellite CloudSat are used in order to make the synoptic-dynamic-physical analyses of the typical cloud series during this event. The results show that the warm and humid southwestern currents climbing along the front form a structure con-

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(40633016), 科研院所社会公益研究专项资金项目(2002DIA20013)和中国气象科学研究院基本科研业务专项资金。

作者简介:王东海,主要从事中尺度天气动力学和数值天气预报和模拟等。E-mail:wangdh@cma.cma.gov.cn

sisting of two air masses with a clear dividing line between them and the thinner cold air mass under the front. There exists a melting layer between 2 and 4 km and, icing particles can be found above this layer as well as in the layer near the ground. On the other hand, there are the layers with their temperature ranging from 0 to 4 °C, in the middle-lower troposphere (850—700 hPa) in the large part of the southern China during this event as suggested by the conventional meteorological data. At the same time, the corresponding surface temperature kept generally between -4 and 0 °C with the relative humidity over 90%, which provides the falling supercooled waterdrops with a very favourable synoptic-physical conditions to form the severe glaze and to ice up at the surface via freezing, deposition and/or accretion.

Key words Disasterous weather, Low temperature freezing rain/heavy snowfall, Characteristic features, Causes of formation

摘 要 在欧亚大陆中高纬度长期维持阻塞形势的背景下,2008年1月11日至2月2日中国南方连续经历了4次低温雨雪冰冻天气过程(简称“0801南方雪灾”)。这次强天气事件过程范围广、强度大、持续时间长且灾害极为严重。其天气学特征表现为中高纬阻塞形势稳定少变,低纬系统活跃确保水汽输送,以及南方部分地区满足冰雪风暴形成的有利天气条件等。研究表明,导致大气环流异常从而促使这次低温雨雪冰冻强天气事件出现的主要因素包括:(1)北极涛动(AO)的异常活跃,有利于行星尺度波动的稳定维持;(2)阻塞上游50°N区域有极强的负涡度平流持续输送到阻塞区,使濒临崩溃的阻塞形势得以重新加强,从而使阻塞形势长时间稳定维持;(3)青藏高原以南低纬地区南支气流活跃,确保中国南方充沛的水汽来源;以及(4)长期存在有利于冰雪风暴生成发展的天气-动力-物理学条件等。

“0801南方雪灾”事件一个突出的特征就是冰冻现象极为严重。文中借助新型卫星CloudSat的星载云廓线雷达(CPR)资料对这次事件中典型云系进行天气-动力-物理学分析,揭示出西南暖湿气流沿锋面爬升,形成界限分明上下交替的两个冷暖气团,冷气团较浅薄;在2—4 km高度存在一个融化层,冰水不仅存在融化层之上,在近地面层亦含有丰富的冰粒子。结合常规观测资料分析发现,在此期间中国南方大部地区中层(大约在850—700 hPa)存在温度大约在0—4 °C的逆温层,地面气温大致维持在-4—0 °C且相对湿度在90%以上,分析表明,此次大范围冰冻灾害天气是由于冻结、凝华和冰雾粒子的附着增长等物理过程共同作用的结果。

“0801南方雪灾”事件持续时间较长,事件本身作为一个整体其成因可追溯到行星尺度系统。研究极涡异常及其随时间变化的结果表明,平流层极涡变化比对流层的超前,尤其是该事件前期平流层极涡进入12月后就趋于加强,而对流层的极涡加强则明显滞后,并且直到1月中旬至2月初才快速加强;这意味着平流层蕴含着对流层极涡变化及伴随的强天气事件的先期信号,这可能是中长期预报的一个值得深入研究的方向。

关键词 灾害性天气, 低温雨雪冰冻, 特征, 成因

中图法分类号 P435

1 引 言

2008年1月10日至2月2日,一场低温雨雪冰冻天气袭击了中国南方,影响了贵州、湖南、湖北、安徽、江西、广西、重庆、广东、浙江、福建、四川、陕西、江苏、云南、甘肃、河南、青海、西藏、山西和上海等20个省(区、市)。其影响范围之广,持续时间之长,强度之大、灾害之重为历史罕见(郑国光,2008)。

此次持续的低温雨雪冰冻天气事件强度大,表现为平均最低气温明显偏低,平均最高气温异常达历史同期最低值,雨雪量为历史同期第3位。长江中下游(包含湖南、湖北、江西、安徽、上海和江苏)及贵州平均最高气温异常偏低,明显低于1976/1977年,达历史同期最低值;河南、湖北、湖南、广西、贵州、甘肃、陕西和宁夏平均气温均为历史同期最低

值,安徽、江西、重庆和新疆为次低值。四川、陕西、甘肃和青海4省降水量达1951年以来历史同期最大值。浙江暴雪是1984年以来最强的一次,安徽和江苏的部分地区积雪深度创近50年极值。武汉最大积雪深度达27 cm,仅次于1955年(32 cm);麻城28 cm,仅次于1984年(39 cm)。贵州省冰冻灾害的影响范围及电线结冰厚度已经突破了有气象记录以来的极值,其中49个县(市)的冰冻持续日数突破了历史纪录。安徽省持续降雪时间,超过建国以来持续时间最长的1954和1969年,成为有资料以来降雪持续时间最长的一年,积雪深度总体不及1954年,与1984年相当,是1984年以来最大的一次降雪。江西省有60多个县市出现了冻雨天气,为1959年有气象记录以来最严重的一次。江苏省1月底的区域性暴雪过程历史罕见,其持续时间、积雪

深度及影响程度都为有记录以来之最。

此次低温雨雪冰冻天气持续时间长,从1951年到2007年冬季长江中下游及贵州区域平均最大连续冰冻日数历史资料统计分析,2007年12月1日至2008年2月2日的最大连续冰冻日数已超过历史冬季最大值。其中湖南省和湖北省雨雪冰冻天气是1954年以来持续时间最长、影响程度最严重的,江西省是1959年有气象观测资料以来影响最严重的。湖南省这次雨雪冰冻灾害是1954年以来范围最广、持续时间最长、灾害损失最严重的一年,且超过了1954年,冰冻出现站数为1951年以来最多,冰冻持续时间仅次于1983年和1954年。湖北省大部地区连续低温日数达16至18天,为1954年以来最长,连续雨雪日数15—18d,也为历史同期最长。长江中下游及贵州日平均气温小于 1°C 的最长连续日数仅少于1954/1955年,为历史同期次多年份。“0801南方雪灾”作为一次极端天气事件有多项气象纪录超过了当地自有气象纪录以来的极值,例如,湖北平均气温偏低为历史同期最低;江西冻雨持续时间破历史纪录;江苏区域性暴雪过程历时罕见,其持续时间、积雪深度及影响程度都是有记录以来的之最;安徽为有资料以来降雪持续时间最长的一年;贵州49县(市)的冰冻持续时间已经突破历史纪录,全省冰冻灾害的影响范围及电线结冰厚度已经突破了有气象记录以来的极值等等。

由冻雨引起冰冻灾害有些国家称为冰风暴事件。例如,在美国冰风暴是冬季一种较常见的灾害性天气现象。较强的冰风暴会压断电线,摧毁树木,冻死农作物等,严重影响交通和通讯。对于冰风暴的研究国外起步较早。早在1920年Brooks等就对冻雨形成的一般环境条件开展了研究。Marwitz(1980)与Cooper和Marwitz(1980)按稳定、中性、不稳定和消散4个阶段研究了圣胡安山脉雪暴冻雨典型的发展演变特征。Forbes等(1987)研究了美国东部Appalachian山脉阻挡引起的北卡及南卡州的雪暴冻雨问题。Dunn(1987,1992)研究了美国落基山脉对冷空气的阻挡作用引起的雪暴及冻雨。Robert等(1996)通过对1990年2月14—15日发生在Illinois州中东部的强冻雨事件的天气和中尺度特征的分析指出,温度、风速和湿度的细微变化会引起冻雨的落区、强度和持续时间产生很大的变动。Szeto等(1999)指出冻雨一般都发生在 35°N 以南

的地区。此外,高守亭和许秦(1995,1996)研究了美国东部Appalachian山脉对冷空气的阻挡作用及引起的美国东部的雪暴冻雨问题。

中国出现冻雨较多的地区是贵州省,其次是湖南、江西、湖北、河南和安徽等地,其中山区比平原多,高山最多。关于雪暴冻雨天气中国也有许多研究。如朱爱民和寿绍文(1994)研究了一次冬季暴雪过程锋生次级环流的形成。陈爱玉等(1999)通过对1965年以来如皋市发生的12例暴雪物理成因及卫星云图的特征分析,研究了春季暴雪发生的环境条件,指出暴雪发生在干、湿区交界的湿区一侧。邓远平等(2000),王文等(2000),张小玲等(2000),徐建芬等(2000)从各个角度集中研究了“96.1”青藏高原东北部暴雪过程,指出低空辐合、高空辐散的散度场结构及其演变与暴雪切变线的生成及暴雪的落区相对应,并指出对称不稳定确实是这次暴雪发生发展的一个动力学机制。林曲凤等(2006),迟竹萍等(2006),单宝臣等(2006),褚昭利等(2006)均研究了胶东半岛地区的雪暴事件,发现海岸锋生过程及其产生的沿岸辐合带是形成山东半岛冷流暴雪的主要原因,同时海岸锋同低层大气重力波耦合形成了海岸锋陷波。王晓兰等(2006)对2005年的湖南省特大冰冻灾害天气进行了分析,指出逆温层底高度偏低,逆温层顶气温偏高,阴雨持续时间长,是导致此次冰冻灾害严重的主要原因。此外,吴有训等(2000)曾对黄山地区的雪淞和雨淞特征作过气候分析,还有陈乾金等(2000)对青藏高原异常降雪相应的环流与气候特征作过深入分析,均得出了一些有意义的结果。但所有这些研究工作只是涉及一般性的天气过程,时空尺度也相对较小,并且鲜有涉及极端严重的天气气候事件的工作。

当今全球性强天气气候事件频发已是不争的事实(Easterling, et al, 2001; Karl, et al, 1991; Manton, et al, 2001; Wang, et al, 2000),仅在2008年1月,从中国和加拿大的暴风雪,孟加拉国的寒潮,英国和印度尼西亚的暴雨和洪水、泥石流,一直到美国的龙卷风和洪水等,此起彼伏,连续不断。然而,尽管冰风暴(ice storm)天气现象在冬季美国北方五大湖周边与加拿大接壤地区曾出现过(Bendel, et al, 1981),但像“0801南方雪灾”那样异常的持续雨雪冰冻天气却极为罕见。

最近王绍武(2008)从中国冷冬气候特征的角度

分析认为 2008 年 1 月的温度变化可能是年际变化的反应。本文拟针对“0801 南方雪灾”天气过程的天气特征和可能的天气动力学成因,以及长期维持冰冻天气的云物理条件等方面,进行较为系统的分析和讨论。

本文使用的资料主要包括 4 类:(1)1958—2008 年 1—2 月的 NCEP/NCAR 日平均再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度;(2)中国气象局提供的 1951—2008 年 1—2 月中国大陆 730 个台站逐日观测资料,物理量包括逐日降水量、最高气温、最低气温和日平均气温;(3)CloudSat 卫星观测资料:CloudSat 和 CALIPSO 两颗卫星于 2006 年 4 月 28 日发射升空,与美国 Aqua 和 Aura 卫星以及法国的 Parosol 卫星一起组成了 A-Train 星座(Stephens, et al, 2002),CloudSat 上装载的主要探测仪器是 94GHz 激光雷达——云廓线雷达(CPR),它是第一颗星载毫米波长的雷达(Im, et al, 2006),可以直接探测到从地面至 30 km 高度上云系的垂直结构,垂直分辨率为 240 m,每 90 min 环绕地球一周,卫星轨迹每 16 天重复一次,其产品分为 1B 和 2B 标准数据集,1B 数据为卫星接收到的雷达回波功率,利用 1B 数据以及 MODIS、ECMWF 数据可以反演得到 2B 数据,分为 GEOPROF、CLDCLASS 和 CWC,2B 包括了雷达反射率、云分类和云水含量(Mace, et al, 2007)。本文中采用的数据为 2B 数据集中的 GEOPROF 和 CWC;(4)地面与探空常规和加密观测资料等。

2 “0801 南方雪灾”天气特征

“0801 南方雪灾”期间南方大范围地区出现了长时间的低温天气,从 2008 年 1 月 11 日—2 月 2 日的全国平均气温距平分布(图 1)可以看出,湖北、湖南、贵州和广西省大部分地区的气温比常年同期偏低超过 4°C ,安徽大部、江西、浙江、江苏和广东部分地区比常年同期偏低超过 2°C 。

从 1951—2008 年 1 月 11 日至 2 月 2 日区域 ($25^{\circ}\text{--}35^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$) 平均降水量(图 2a) 时间演变可以看出,区域平均降水量为 67.8 mm,仅次于 1998(84.3 mm)和 1969 年(70.9 mm),区域平均降水量较常年同期偏多近一倍。虽然降水量并没达到历史同期最多,然而由于低温、雨雪天气长时间的维持,造成了罕见的冰冻灾害。从区域 ($25^{\circ}\text{--}35^{\circ}\text{N}$,

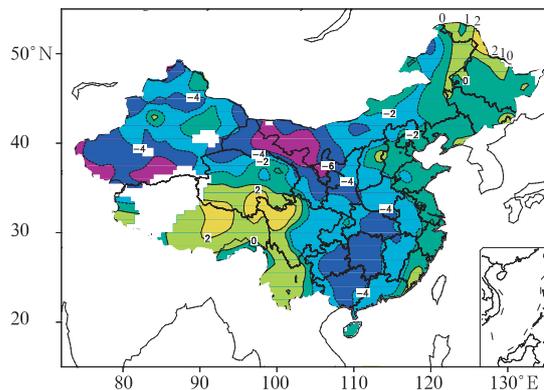


图 1 2008 年 1 月 11 日—2 月 2 日全国平均气温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$) 分布(多年平均取 1971—2008 年)
Fig. 1 The averaged temperature anomalies for the whole China over the period from 11 January to 2 February 2008 (unit: $^{\circ}\text{C}$, from the mean between 1971 and 2008)

$105^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$) 平均气温(图 2b)、最高气温(图 2c) 和最低气温(图 2d)的时间演变可见,最高气温和平均气温均为历史同期最低值,分别为 3.56°C 和 1.68°C , 而区域平均的最低气温亦仅次于 1963(-0.94°C)、1977(-0.62°C)、1993(-0.18°C) 和 1984 年 (-0.04°C),达到了历史同期最低值的第 5 位(为 0.37°C)。从 1951—2008 年线性拟合变化趋势可以看到,平均气温和最低气温的区域平均值呈逐年变暖的趋势,变化范围分别为 $4.7\text{--}5.15^{\circ}\text{C}$ 和 $1.44\text{--}2.70^{\circ}\text{C}$,而最高气温却表现为逐年降低的趋势,从 9.43°C 逐年下降至 8.6°C ,这一现象还有待作进一步深入的研究。

“0801 南方雪灾”期间,由于持续性低温致使中国南方出现了大范围持续性冻雨,贵州、湖南、江西、安徽、江苏、浙江和广西等省遭受了不同程度的冰冻灾害,其中以贵州和湖南灾害最为严重。贵州出现 23 年来罕见的冻雨天气,东部部分县(市)结冰厚度达 30—80 mm,有 49 个县市持续冻雨日子突破历史记录。湖南遭受 30 多年来最严重的冰冻影响,电线结冰厚度达到 30 到 60 mm。

总体来看,2008 年 1 月 11 日 00 时—2 月 3 日 00 时的雨雪天气(图 3)中,雨雪量较大的区域集中在长江中下游、华南大部及云南西北部等地,过程降水量 50—100 mm,苏皖南部、江南大部和华南部分地区超过 100 mm。与常年同期相比(图 3),长江以北大部分地区、江南南部、华南大部及云南西部、西藏东南部和西部等地降水偏多 1 至 2 倍,部分地区超过 2

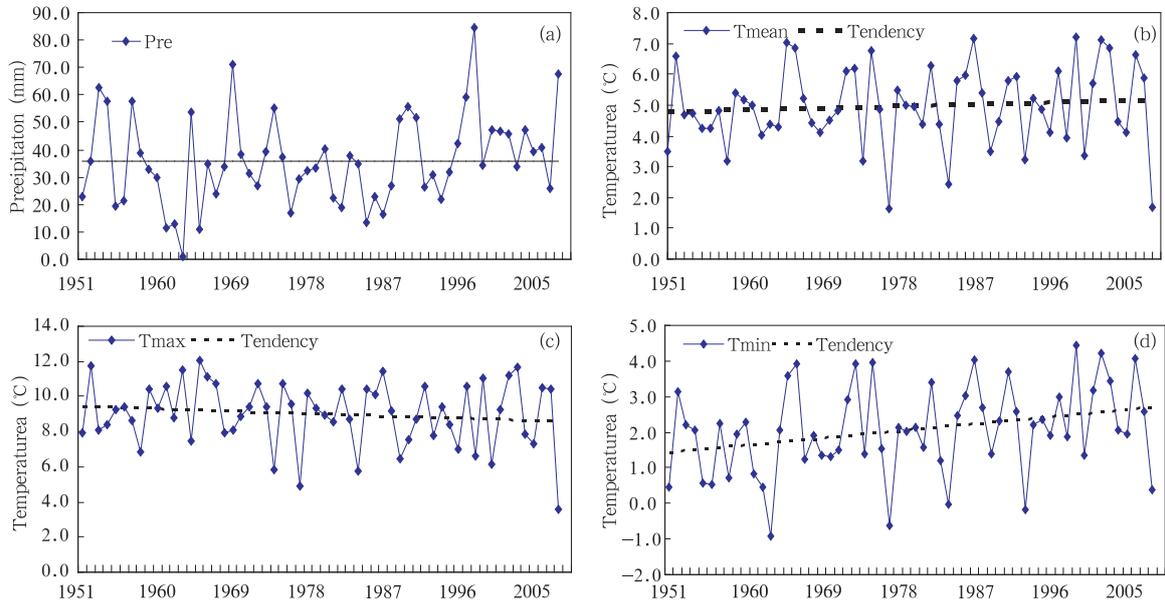


图2 1951—2008年1月11日至2月2日区域(25°—35°N,105°—120°E)平均的降水量(a,单位:mm)、平均气温(b,单位:°C)、最高气温(c)和最低气温(d)的时间演变(黑色粗实线为多年平均值,虚线为线性拟合趋势)

Fig.2 Changes in the area (25°—35°N,105°—120°E)-mean precipitation (a, unit: mm), mean temperature (b, unit: °C), mean maximum temperature (c, unit: °C) and minimum temperature (d, unit: °C) daily-averaged over the days from 11 January to 2 February every year between 1951—2008

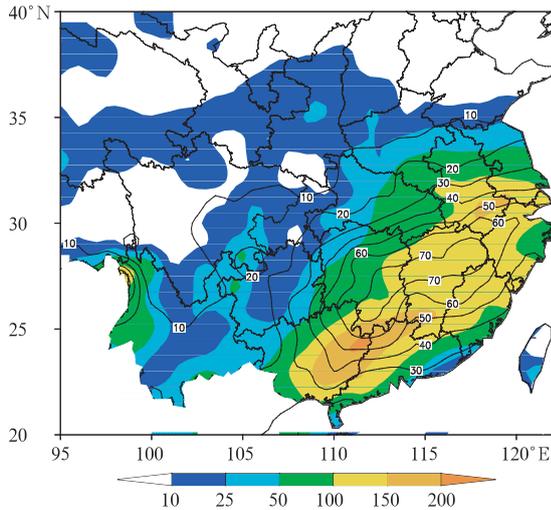


图3 2008年1月11日00时—2月3日00时(UTC,下同)累积降水量(阴影,单位:mm)和1971—2000年1月11日00时—2月3日00时累积降水量(等值线,单位:mm)的气候分布

Fig.3 The accumulative precipitation from 00:00 UTC 11 January to 00:00 UTC 3 February 2008 (shaded, mm), and the averaged accumulative precipitation over 1971—2000 (solid,mm)

倍。全国平均降水量为1951年以来历史同期最大值。河南、湖北、安徽、江苏、湖南、江西西北部和浙江北部出现大到暴雪;湖南、贵州、安徽南部和江西等地出现冻雨或冰冻天气。

3 导致“0801南方雪灾”的若干主要因素

这次极端严重的天气事件的成因是多方面的,各种因素在时间上交叉在空间上相互作用,动力学机理十分复杂。

3.1 极涡变化与AO指数

从全球范围来看,类似中国“0801南方雪灾”的灾害性天气同期也发生在北半球的其他地区如北美、中亚和西亚等。因此,可以认为这是波及整个北半球的异常天气气候事件。

众所周知,AO是反映北半球冬季气候变率的第一模态。它通常以北半球冬季20°—90°N月平均海平面气压的EOF1为代表,因此由相应的时间系数或实时的海平面气压向EOF1的投影可以定义AO指数。

分析2007年10月至2008年2月各等压面标

准化位势高度距平(图 4a)及与 AO 指数(图 4b)的对应关系。极涡是影响中国天气的一个重要环流系统,冬半年极涡的扩大、缩小直接与中国温度的变化密切相关,而隆冬亚洲地区极涡面积的变化对中国温度分布趋势具有决定性的意义,冬季极涡活动甚至于直接影响中国的天气过程(刘宗秀,1986;李小泉等,1986)。分析 2008 年 1 月亚洲区极涡面积与中国 160 站 1 月平均气温和降水量的相关系数分布图(图略)可以看出,极涡面积与中国中东大部地区的气温有非常显著的负相关关系,相关系数大多超过 0.01 的显著性水平,表明 1 月亚洲区极涡面积大,1 月中国大部分地区的气温就偏低。同时,亚洲区极涡面积与长江中下游及黄淮西部地区降水存在显著的正相关关系,即 1 月亚洲区极涡面积大,1 月这些地区的降水就容易偏多。

另一方面, AO 的活动在很大程度上反映了整

层大气层极涡的异常变化,在一定程度上两者是等同的。为了搞清 AO 的变化特征及其影响,有必要详细说明 AO 的形成机制。迄今为止的研究结果表明, AO 的时间变率与北半球天气波及准定常波与纬向流的相互作用有关。天气波与纬向流的相互作用主要限制在对流层,它通过产生经向的动量通量来驱动 AO。这种相互作用关系基本上只是一种单向的强迫作用。10—20 d 的 AO 涛动与这种驱动有关。另一方面,中高纬度的准定常波在冬季可以向上传播至平流层,并在那里与极涡发生相互作用,导致 AO 的 30—60 d 尺度上的涛动。这种相互作用是双向的,即由准定常波产生的 E-P 通量可以强迫纬向流从而影响 AO,而与 AO 相关的纬向流的改变反过来也影响到波(准定常、天气波)的活动。这种对流层和平流层中两种尺度的涛动在图 4 中得到了非常好的印证。

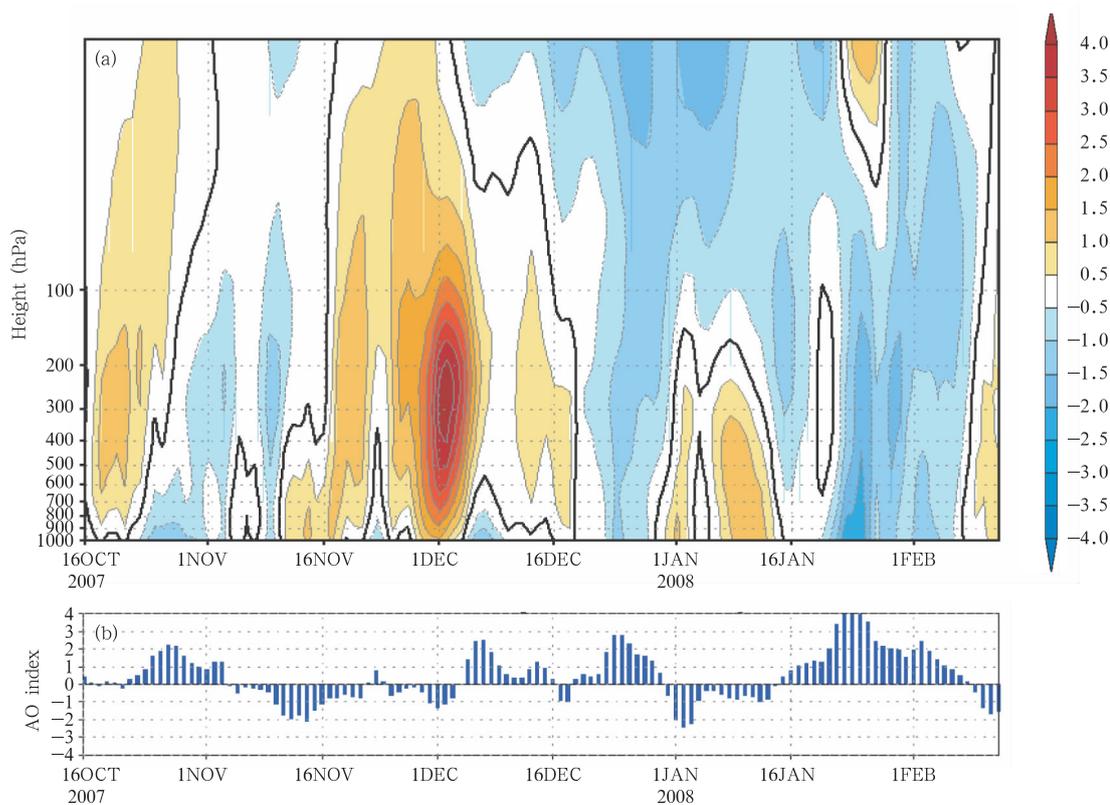


图 4 2007 年 10 月至 2008 年 2 月各等压面标准化位势高度距平(a)及与 AO 指数(b)的对应关系
(引自 <http://www.cpc.noaa.gov>)

Fig. 4 The normalized GPH anomalies at the different constant pressure levels and the corresponding AO index between October 2007 and February 2008 (from <http://www.cpc.noaa.gov>)

但是,图4显示在“0801南方雪灾”期间(或更准确地说是2007年10月以来)极涡或AO的垂直结构出现了非常明显的异常。主要表现在(1)平流层极涡变化振幅明显加强且周期变长;(2)平流层与对流层极涡变化基本上呈反位相,这一点特别重要,因为通常认为AO具有某种正压结构;(3)平流层极涡变化超前对流层的极涡变化,尤其是“0801南方雪灾”前期平流层极涡变化进入12月后即趋于加强,而对流层的极涡则明显滞后,并且直到1月中至2月初才快速加强;这意味着平流层蕴含着对流层极涡变化及伴随的强天气事件的预报信号。

2008年1月以来,北半球尺度最大、气候变率最显著的环状模态AO异常活跃,1月中旬以后AO指数从负位相转变为正位相,并不断加强,1月24—25日达到最大值,其数值是常年同期的数倍,这种强的正位相一直稳定维持,直至2月上旬才有所减弱,这种情况在历史同期是十分少见的。AO的显著增强直接导致中纬度与极地气压和大气质量的反向异常涛动。从2008年1月海平面气压距平图(图略)上可以清楚地看出,北半球呈现出十分典型的中纬度和高纬度气压变化的跷跷板结构,极地及高纬地区的海平面气压显著减弱,而中纬度海平面气压明显增强并存在两个显著的正异常中心,一个在副热带地区,一个在北太平洋地区。与AO相联系的基本环流特征的研究结果表明,当AO处于

正位相时,存在弱的副热带急流和强的极地急流,且极涡增强。AO与纬向西风异常呈明显的正相关关系,并从高纬到中低纬对流层存在垂直传播。已有研究还表明,这种大尺度的涛动对北半球的天气气候有重要影响,特别是对中国冬季的天气气候异常作用显著。这次发生在中国南方的低温、雨雪、冰冻灾害过程正是AO通过对北半球的阻塞形势、副热带高压与青藏高原南缘的南支低压系统的控制和影响造成的。1月中旬以来AO维持异常高的正位相,表明副热带高压异常加强,极地低压也异常加强,从而在中纬度地区产生强的西风异常,盛行纬向环流,副热带急流异常减弱,而极地急流异常加强,此时副热带和中纬度为异常的下沉气流,高纬度为异常的上升气流,导致南风异常增强,有利于低纬暖湿气流的活跃,为“0801南方雪灾”提供了充分的水汽条件。

3.2 北半球环流形势稳定维持异常型式

这次低温雨雪冰冻灾害的大气环流异常,在500 hPa高度距平场上反映得更为突出。从图5给出的2008年1月11日至2月2日500 hPa高度距平场中我们可以清楚地看出,乌拉尔山地区是十分显著的正异常,而中亚至俄罗斯东部是负异常,同时副热带高压偏强且位置异常偏北,青藏高原南缘有南支低压系统维持。这种强度和范围均异常偏大的“对偶式”距平分布,在动力学上是极其稳定的。乌

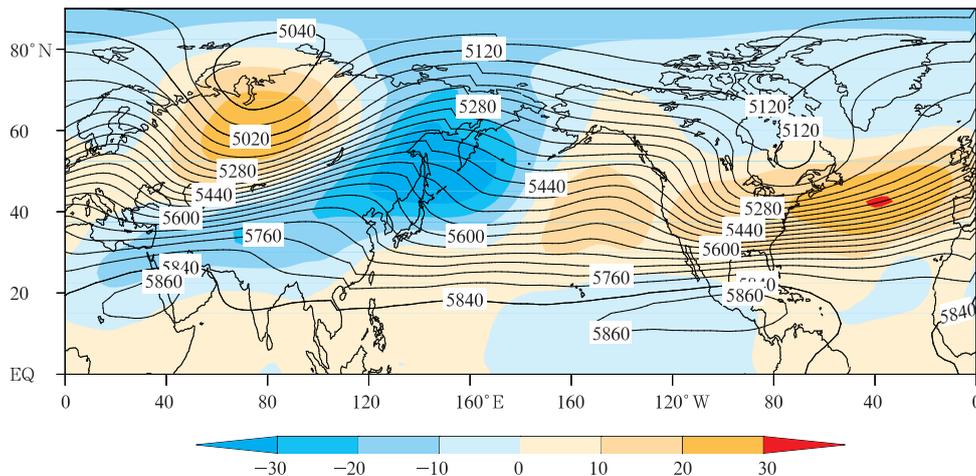


图5 1月11日—2月2日500 hPa位势高度场多年平均(1958—2006年)分布(等值线,单位:gpm)和2008年1月11日—2月2日500 hPa平均高度距平分布(阴影,单位:gpm)

Fig. 5 The averaged 500 hPa geopotential height over 1958—2006 (solid, unit: gpm) and the 500 hPa height anomalies in the northern hemisphere from 11 January to 2 February 2008 (shaded, from the mean between 1958 and 2006, unit: gpm)

拉尔山阻塞高压的发展、维持并加强的形势有利于冷空气从西伯利亚方向入侵中国,而南支低压系统异常活跃,导致西南方向暖湿气流源源不断地输送水汽,与之配合的又有副热带高压稳定维持在偏北的位置,使冷暖空气总是在长江中下游及其以南邻近地区交汇,导致这些地区出现了一次又一次的强雨雪过程。通常情况下,冬季冷空气大规模南侵,造成中国寒潮天气,经常出现的环流演变特征是:在乌拉尔山地区有阻塞高压形成,其东北部为低压带,此低压带不断向东南移动,沿西伯利亚入侵南下,给中国大范围地区造成降温,而中国南方还常常受高压偏南气流影响,出现阴雨雪天气,随着乌拉尔山阻塞高压的崩溃,天气转好,这种过程一般为5—7 d。换句话说,通常情况下一次典型的寒潮天气过程正是始于如图5所显示的环流形势的。问题是这种配置的环流形势一般最多只维持5—7 d,而这次却时强时弱维持了约20 d之久,这意味着,对于2008年1—2月持续经历了20多天的寒潮天气过程。我们查阅了

1951年以来至今58 a的1月月平均500 hPa高度距平场的资料,就月尺度而言,图5这种异常的环流配置在历史上几乎没有出现过。正是这种异常配置的环流形势的长时间稳定和持续,导致中国南方地区出现持续的低温雨雪冰冻灾害天气。

3.3 阻塞高压稳定维持及其可能成因

上述阻塞形势总体上一直维持了约20 d之久,但事实上“0801南方雪灾”期间最初形成的阻塞高压经历了多次加强—减弱—再加强的过程。

利用NCEP再分析资料分析发现,从1月10日开始在亚洲大陆500 hPa位势高度场上存在着明显的4次阻塞过程,分别为1月10—15日、18—22日、25—29日及31日—2月2日,对应的阻塞中心分别为(62°N, 90°E)、(55°N, 70°E)、(55°N, 85°E)及(48°N, 70°E)。为了更直观地了解这4次过程,我们给出45°—100°E纬向平均的500 hPa位势高度随时间的演变(图6)。从图中可以清楚地看到这4次阻塞过程,且一次比一次位置偏南。

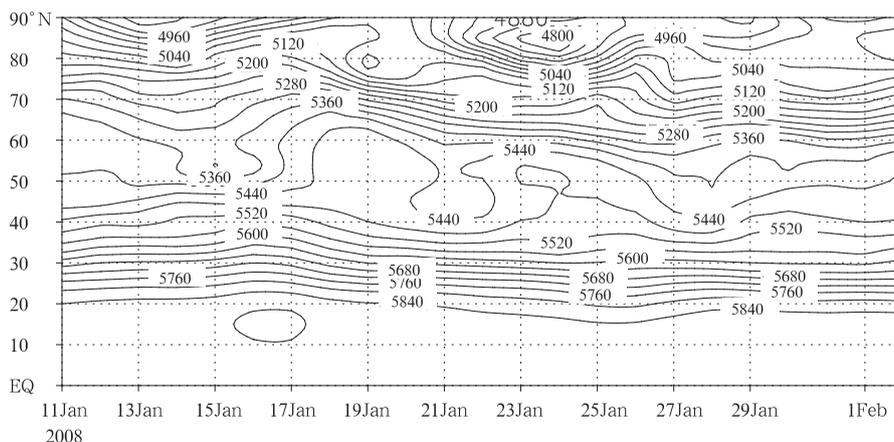


图6 45°—100°E之间纬向平均的500 hPa位势高度随时间的演变(单位:gpm)

Fig. 6 Changes in the latitude-averaged 500 hPa geopotential height with time over the longitudes between 45° and 100°E (unit: gpm)

由区域(25°—35°N, 105°—120°E)平均的逐日降水和温度分布(图7a)同样可见,“0801南方雪灾”包含了4次冷空气南下活动,并且从1月11日至2月2日经历了4次明显的降水过程,区域平均降水强度最大的一天出现在2月2日,超过了10 mm,而降水区域平均的距平(图7b)甚至超过了12 mm。同时,从1月11日开始,上述区域气温大幅下降,区域平均降温在10℃以上。从1月14日至2月3日,该区域日平均最低气温维持在-4—0℃,而区

域日平均最高气温基本在0—2℃,区域日平均气温则保持在-1—0℃左右(图7a)。持续的降温使得该区域在1月27日的平均距平甚至接近-10℃(图7b)。

不难看出,随着上述4次过程阻塞高压一次比一次位置偏南,特别是由于相邻两次过程间隔极其短暂,因而在整体上或在更大时空尺度范围上表现为一次持续性天气气候事件,而中高纬的高度场则表现为持续稳定的阻塞形势。

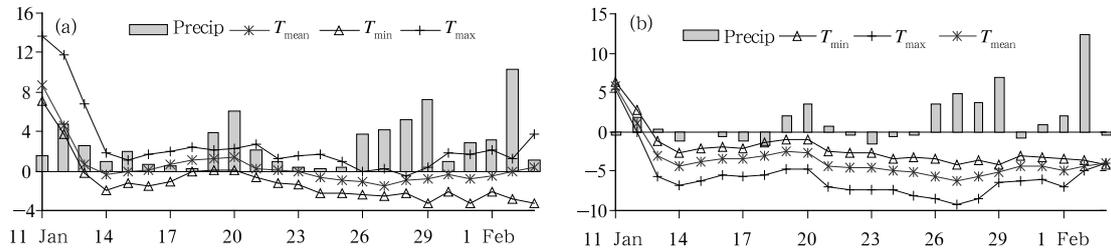


图7 2008年1月11日00时—2月3日00时逐日降水量(单位:mm)、日最高、日最低与日平均气温(单位:℃)的区域(25°—35°N, 105°—120°E)平均(a)和距平(b)的时间演变(多年平均取1971—2000年)

Fig. 7 (a) The evolution of the averaged daily precipitation (unit: mm) and daily maximum/minimum temperature and daily-averaged temperature (unit: °C) with time from 00:00 UTC 11 January to 00:00 UTC 3 February over the region (25°—35°N, 105°—120°E); (b) Same as in (a), but for their anomalies (The anomalies were computed relative to the climatologies of 1971—2000)

Berggren 等(1949)早就指出天气尺度波的涡度强迫结构对下游阻塞起着非常重要的作用。后来,Shutts(1983)采用理论模型进而阐述了此观点。Luo 等(2005)最近则进一步指出北负南正的涡度强迫对下游偶极子阻塞的形成起着重要的作用。由于负涡度代表反气旋,其被输送到阻塞区域,使濒临崩溃的阻塞形势得以重新加强从而促使阻塞高压获得再次发展。

为了探讨阻塞维持的可能机制,我们求取了2008年1月11日—2月2日期间500 hPa天气尺度波的平均涡度强迫项(图8),即

$$J_P = -J(\varphi_s, \nabla^2 \varphi_s)_P$$

上式中 φ 为流函数, ∇^2 为拉普拉斯算子, s 代表天气尺度部分(纬向波数6—18波), P 代表行星尺度部分(纬向波数0—4波)。

由图8可见,在1月11日—2月2日,阻塞上游50°N附近的一个区域存在着强的负涡度强迫,一直输送到阻塞区,从而对其维持起着非常重要的作用。

图8是2008年1月11日—2月2日500 hPa天气尺度波的平均结果,而给出这期间各日平均涡度强迫场可用以反映负涡度输送到阻塞区域的逐日演变(图略),从而揭示阻塞高压的减弱或重建对其上游涡度强迫输送的内在动力学关系,因篇幅关系此处不拟展开。

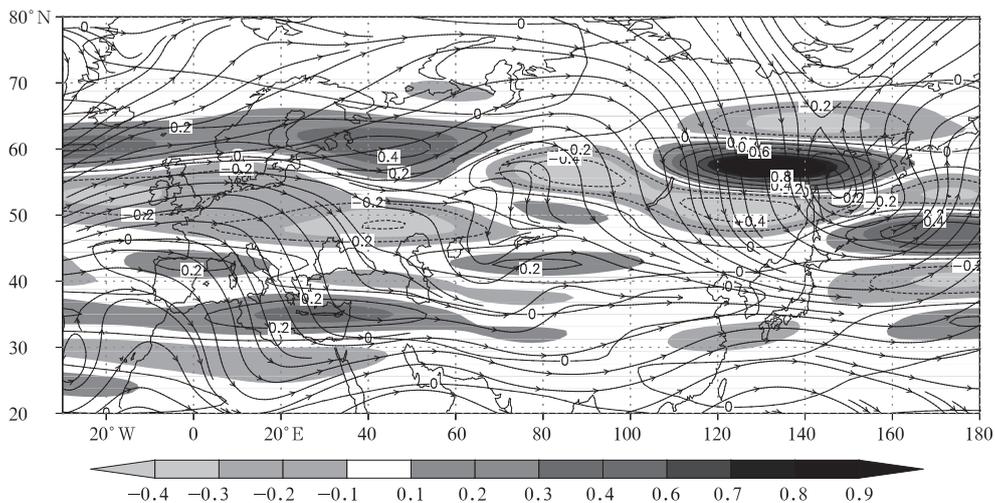


图8 2008年1月11日—2月2日500 hPa天气尺度波的平均涡度强迫项(阴影,单位:10⁻²⁰s⁻²)和平均流场

Fig. 8 The 500 hPa averaged stream field and mean vorticity forcing of the synoptic-scale waves (shaded, unit: 10⁻²⁰s⁻²) over the period of 11 January and 2 February 2008

3.4 中低纬度系统与水汽输送

从大尺度的环流形势着眼,持续性强降水的主要影响系统是北方的阻塞高压,南方的太平洋副热带高压和南支槽,它们同时存在并且稳定维持适当强度。

需要特别指出的是,冬季风期间单纯的东亚副热带高压位置偏北偏强并不能酿成中国南方的强降水,甚至造成南方降水偏少,1986/1987年冬季即是如此(朱乾根等,1988)。

我们从1951—2008年1月西太平洋副热带高压脊线位置变化曲线(图9)可以看出,2008年1月副热带高压位置是58年以来最偏北的,在 17°N 位置上,比多年平均的 13.3°N 整整向北推进了3.7个纬度。这是在中高纬存在阻塞形势的条件下强降水稳定维持在长江中下游的一个重要因素。

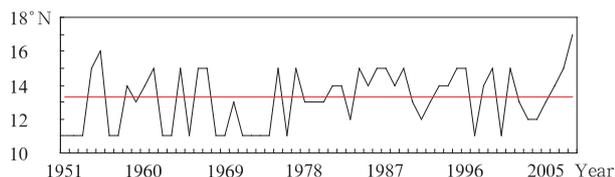


图9 1951—2008年1月西太平洋副热带高压脊线位置变化(直线是1971—2000年平均值)

Fig. 9 Changes in the latitude of the subtropical ridge between 1951—2008

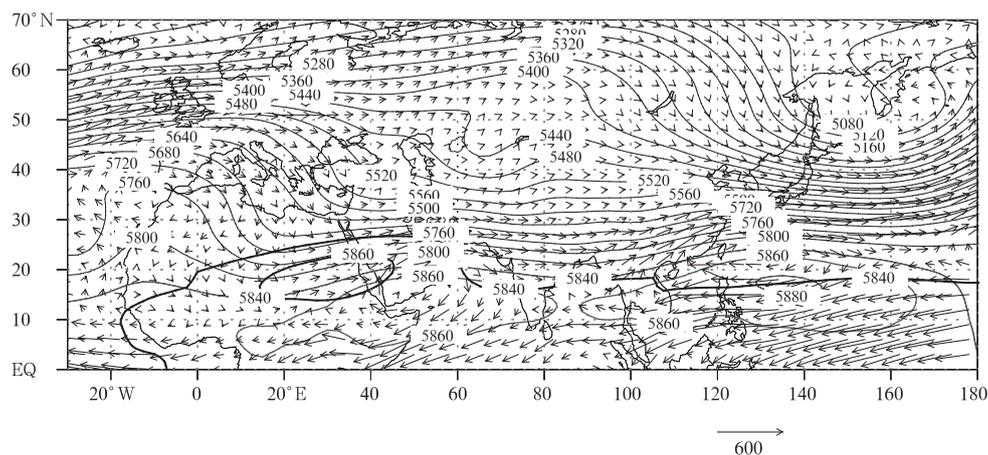


图10 2008年1月11日至2月2日平均的500 hPa位势高度场(等值线,单位:gpm)和整层水汽通量(矢量,地面至100 hPa,单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

(粗实线为气候平均值的5860和5840 gpm线;气候平均值时间为1958—2006年)

Fig. 10 The averaged 500 hPa geopotential height field (solid, unit: gpm) and the vertical-integrated (surface to 100 hPa) water vapor flux (vectors, in $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) from the over the period between 11 January and 2 February 2008 (The thick lines stand for the climate-averaged lines of 5860/5840 gpm over 1958—2006)

事实上,在2008年1月11日至2月2日平均的500位势高度场(图10),西太平洋副热带高压强度明显偏强,其北界比多年平均偏北5个纬距。副高西北侧的西南气流将来自热带西太平洋和南海的暖湿空气源源不断输送到中国南部大陆,由于大量暖湿空气沿着锋面抬升,在江南南部和华南北部形成稳定、持久的逆温层,使得这些地区在有利的天气-物理学条件下出现严重的持续性冻雨灾害天气。

另一个重要的中低纬度系统就是南支槽。“0801南方雪灾”期间青藏高原南缘的南支低压槽之活跃,是近十多年来少有的。1月10—17日,南支槽明显加深并稳定维持在 90°E 附近,南支锋区明显加强。1月24日—2月2日,在相同位置仍然维持一低值区,其中,27—28日,位于 90°E 附近的南支槽强烈加深,10个纬距内有7条40 gpm等值线(图略),南支锋区异常强盛,大量的暖湿空气源源不断地输送到中国南方地区,在南下冷空气共同作用下造成了南方的暴雪及强降雨。

15° — 25°N 平均的500 hPa位势高度沿经向的分布能同时刻画副热带地区这两个系统的强度和位置。“0801南方雪灾”期间该纬度带平均的500 hPa位势高度随时间的演变图(图11)清楚地显示出西低(槽)东高(脊)的型式及其变化。可以看出,在第1、3和4次强降水过程中,副热带高压西伸至 115°E

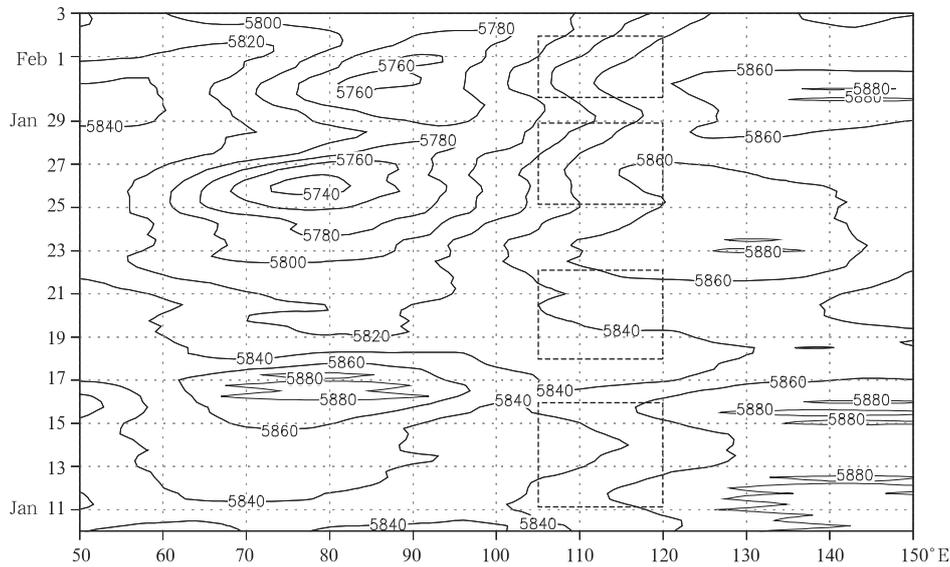


图 11 2008 年 1 月 10 日—2 月 3 日(15°—25°N)平均的 500 hPa 高度经向分布
随时间的演变(粗虚线框表示降水时段及大致经向范围)

Fig. 11 The evolution of the averaged 500 hPa geopotential height over the latitudes
(15°—25°N) between 10 January and 3 February 2008

附近,有利于冷暖空气在长江中下游及以南地区交汇。第 2 次降水过程副热带高压则相对较弱。但第 2 次强降水过程中青藏高原上有西风小槽东移,有利于下游降水。事实上图 11 显示南支槽逐渐东移,第 3、4 次过程中南支槽较强,加上副热带高压西伸位置适当,西南风低空急流加强,特别有利于水汽输送,降水也比前两次更强。

水汽对这次持续性雨雪天气而言是至关重要的。上文提到,水汽主要来自副热带高压外围西南气流输送的东海和南海的水汽以及南支西风槽前西南急流携带的孟加拉湾水汽。但值得注意的是,青藏高原的水汽也对其下游降水有重要贡献,图 10 给出的 2008 年 1 月 11 日至 2 月 2 日平均的水汽通量(地面至 100 hPa 的水汽通量整层垂直积分)清楚地显示出这一点。图 12 显示 4 次天气过程中不同来源水汽的相对贡献。第 3、4 次过程中,中国南方的水汽供应主要来源于东海和南海水汽以及孟加拉湾水汽。而第 1、2 次过程中,孟加拉湾的西南气流并不明显,东海、南海的水汽量也不多,而青藏高原上的水汽比较明显。高原上的水汽主要来自于西南方

向的阿拉伯海以及南方的孟加拉湾,随西风带短波槽东移向下游输送。尤其是第 2 次强降水过程中,青藏高原有丰富的水汽堆积。在副热带高压位置不太有利以及南支槽不明显的情况下,青藏高原上的水汽对下游降水有重要作用。

进一步对比分析 2008 年 1 月 20 日 00 时—2 月 1 日 12 时地基 GPS 反演大气可降水量(PWV)的演变特征(图 13,观测间隔为 6 h)与各雪灾区降水总量每 6 h 变化曲线(图略)可发现,云南区域平均 GPS 大气可降水量与(云南+贵州+广西)、(安徽+江苏+上海+浙江)和(湖南+湖北+江西)后期的降雪相关显著, GPS 大气可降水量超前降雪 24 h 相关系数分别为 0.6781、0.8198 和 0.6302,均超过 0.001 显著性水平;其次为四川区域,其超前 24 h 的相关系数分别为 0.5154、0.5926 和 0.4442,均超过了 0.01 的显著性水平;这表明云南和四川等区域的水汽含量多少对下游地区后期降水的发生具有一定的指示意义,同时可以认为,云南是导致此次南方雪灾的西南水汽输送通道中尤为重要的关键区域。

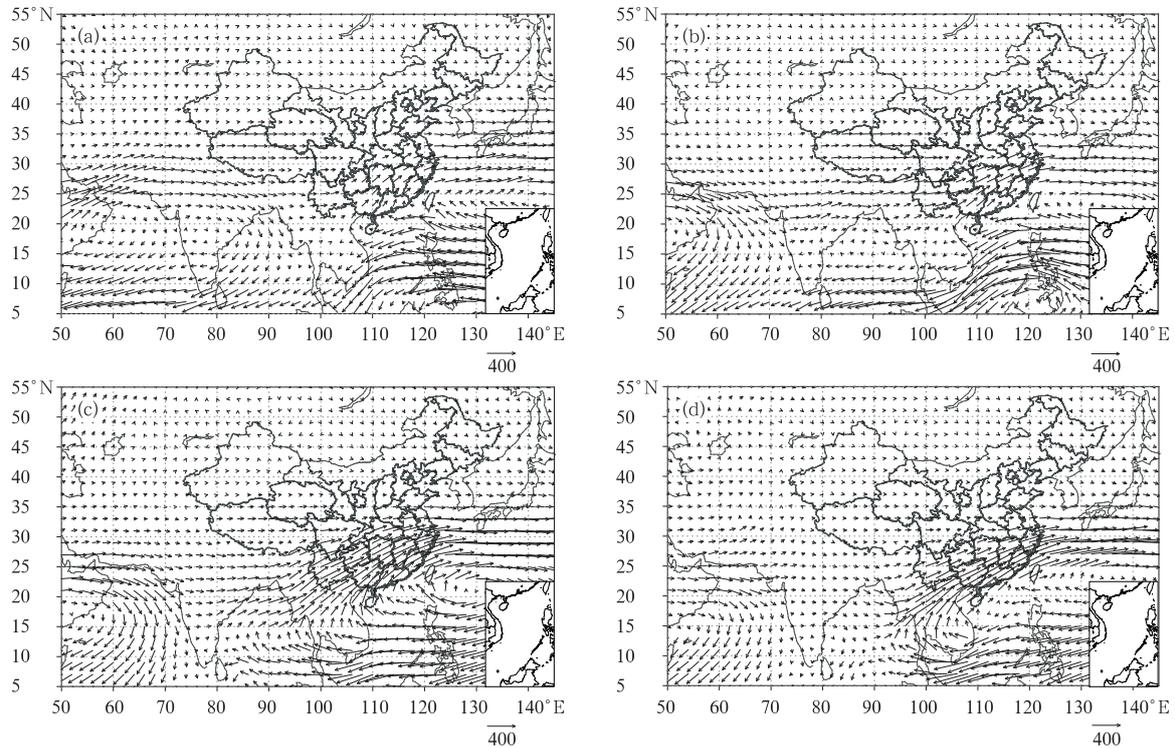


图 12 4 次降水过程中平均的整层水汽通量(地面至 100 hPa, 单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

(a. 1 月 10—16 日, b. 1 月 18—22 日, c. 1 月 25—29 日, d. 1 月 31—2 月 2 日)

Fig. 12 The vertical-integrated vapour flux field (unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) from the surface to 100 hPa over each of the four precipitation processes

(a. 10—16, Jan; b. 18—22, Jan; c. 25—29, Jan; d. 31, Jan—2, Feb)

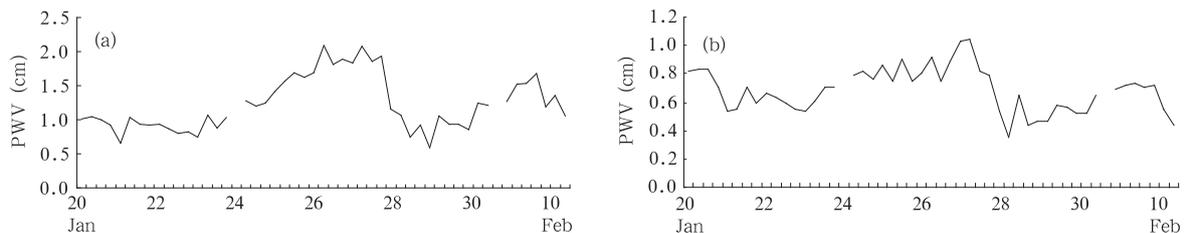


图 13 2008 年 1 月 20 日 00 时—2 月 1 日 12 时地基 GPS 反演大气可降水量(PWV)的演变特征(观测间隔为 6 h)(a. 云南, b. 四川)

Fig. 13 The evolution of the potential precipitable water vapour (PWV) from 00:00 UTC 20 January to 12:00 UTC 1 February retrieved from the ground-based GPS (6-hourly)(a. Yunnan, b. Sichuan)

3.5 云物理特征和大范围冰冻天气的成因分析

一般地说,冻雨多发生在冬季和早春时期。“0801 南方雪灾”期间出现冻雨较多的地区是贵州省,其次是湖南、江西、湖北、河南和安徽等地,其中山区比平原多,高山最多。冻雨天气造成了电网电线结冰,并一层层包裹着电线,最严重的使电线达到七八厘米的直径,远远超过电线设计的承载标准,最

终造成整个电网大面积损害。

持续性低温雨雪冰冻天气的形成一般需要满足这样的条件:稳定的有利于强冷空气不断南下的天气形势;来自海洋上空活跃的暖湿气流的交汇(水汽输送);以及(对于冰冻天气而言)近地面层丰富的过冷水滴和叠置于强冷空气之上的强“逆温层”的建立和维持。

上面提到,2008年1月中旬以来4次大范围的雨雪冰冻天气过程中,第3次即1月25日至29日是强度最大的一次。25日华南开始出现强降水,广西东南部、广东和福建部分地区出现中到大雨,随后雨带逐渐北抬,28—29日在河南南部、湖北东部、安徽、江苏和浙江北部出现暴雪,28日积雪深度达20—50 cm。与此同时,江西省出现大范围的冻雨天气,贵州大部分地区和湖南部分地区仍维持冻雨天气。我们利用美国新一代卫星 CloudSat 卫星观测资料,结合常规、FY-2C 卫星观测资料,着重分析此次冰冻天气形成的环流背景、天气条件和云微物理结构特征。CloudSat 上装载的主要探测仪器是 94 GHz 激光雷达——云廓线雷达(CPR)(Stephens, et al, 2002; Im, et al, 2006; Mace, 2004)。

第3次雨雪过程(1月25—29日)中,由于南支槽异常强盛,副热带高压加强西伸,加上乌拉尔山阻塞高压的发展维持,使中国中南大部处于副热带高压外围和南支槽前西南暖湿气流影响下,形成了有利于产生强降雨(雪)天气的水汽和冷空气条件。

图14是1月27日18时地面形势和FY-2C红外云图,此时在贵州、湖南和江西北部等地区出现雨

淞或冻雨。从该时刻地面气温和相对湿度图上(图略)可以看出,上述地区此时地面气温基本在 0°C 以下,近地面空气接近饱和,南方大部地区相对湿度在90%以上。说明此时水汽条件和近地面温度均有利于冰冻天气的发生。

图14中红外云图显示该时刻同时存在两支云系,一支是温度较高的南支槽云系,另外一支是温度较低的高原槽云系,结合 CloudSat 垂直剖面图(图15,系沿图14中AB线的剖面)我们发现,暖湿气流发展较旺盛,遇冷空气爬升,而冷空气则随偏北气流向南向南楔入暖气团下,形成了上下两条清晰的云带,且从 CloudSat 冰水含量垂直剖面图上观测到在近地面层有丰富的冰粒子存在。此时,在贵州境内 CloudSat 经过的地区(图14中蓝色虚线界定的椭圆区域),并未观测到有冻雨发生。分析沿图14中CD线的温度垂直剖面图(图略)可见,在图14蓝色虚线区域内,中层虽存在逆温层但其温度低于或接近于 0°C ,因而在地面只观测到小雪天气现象。然而,由于近地面层中的丰富冰粒子的存在,冰粒子遭遇气温较低的物体而直接附着其表面,这也是导致地面、电线等物体结冰厚度不断增加的重要原因之一。

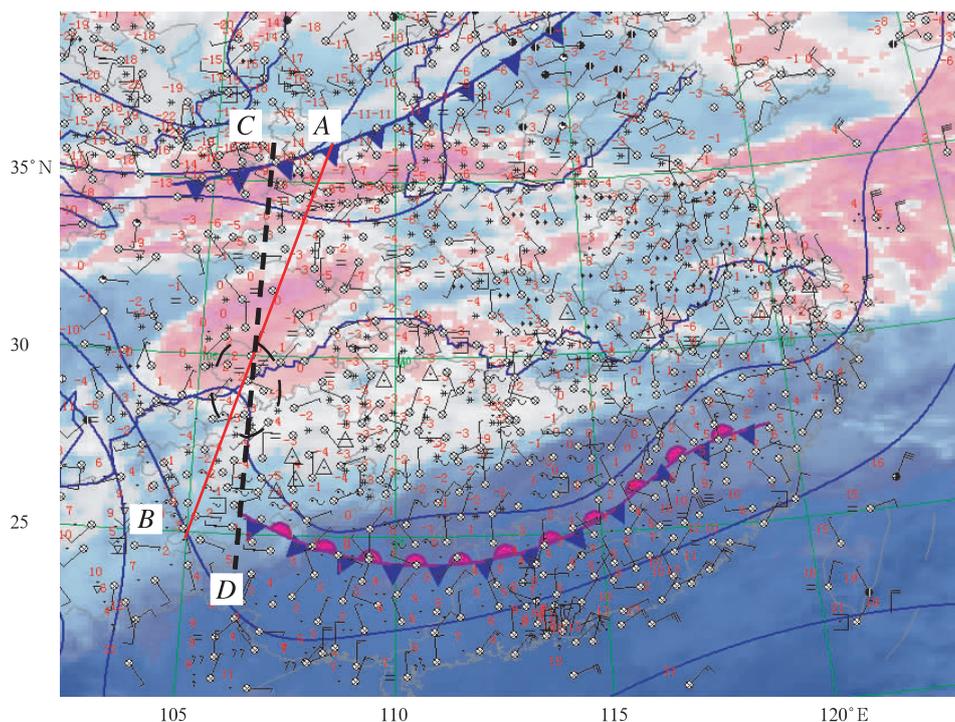


图14 2008年1月27日18时地面形势(AB为其扫过的轨迹)

Fig. 14 The surface weather chart at 18:00 UTC 27 January 2008 (AB as its track scanned)

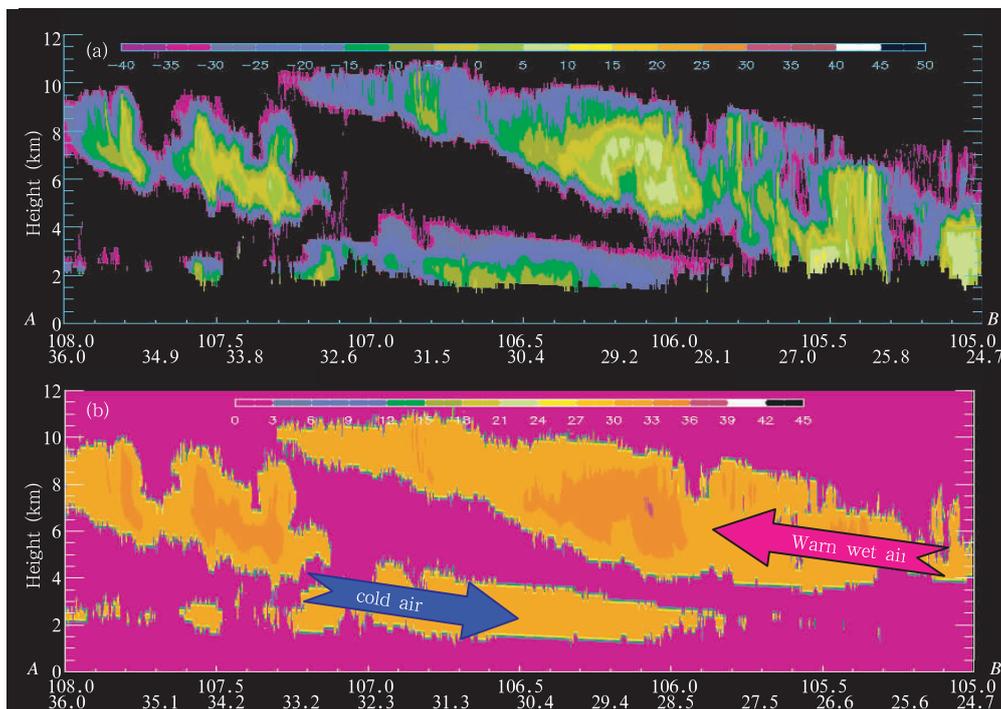


图 15 2008 年 1 月 27 日 18 时 CloudSat 观测的雷达反射率(a,单位:dBz)和冰水含量(b,单位:g/m³)垂直剖面

Fig. 15 The vertical cross section of the radar reflectivity at 18:00 UTC 27 January 2008 from the CloudSat (upper, unit: dBz) and the ice water content (lower, unit: g/m³)

2008 年 1 月 28 日 06 时地面形势和红外云图(图 16)与 27 日 18 时相比,冰冻区域范围更大,冷空气从低层入侵位置更靠南,此时贵州中东部,湖南、江西北部、安徽南部和江苏北部等地均为冻雨区。CloudSat 卫星正好扫过湖南省冰冻区,AB 为其扫过的轨迹。从其反射率看,冷暖气流交汇于 25°—30°N,暖湿气流发展旺盛,云系上分布着多个对流云团。取靠近 CloudSat 路径(图 16 中 AB 线)各探空站所作温度和水平风场垂直剖面图(图 17)可知,在中层存在强逆温层,强劲的偏南风将水汽源源不断地输送到长江中下游地区,而在其下层为风速相对较弱的冷空气入侵,导致该地区地面气温大都在 0 °C 以下(图 18),同时 24°—29°N,由于暖湿气流强盛在中层 850—700 hPa 形成了中心大于 4 °C 的强逆温层。充足的水汽、中层适当厚度的强的逆温层和适宜的地面温度,导致了湖南境内大范围的冰冻发生。2008 年 1 月 28 日 06 时 CloudSat 的垂直剖面(图 19)清楚地显示,在 26°—29°N 上空 2—4 km(对应逆温层)高度无冰粒子存在(图 19b),而在近地面层观测到冰粒子。其相应的雷达反射率亦可

见在 2—4 km 高度存在融化层(图 19a)。另一方面,在 29°N 以北较冷的区域,由于其上空逆温层较弱,天气现象表现为降雪。而在 26°N 以南,虽然上空存在强的逆温层,由于近地面层温度高于 0 °C,此时该地区为雨区。由此可见,强度和厚度适当的逆温层对冰冻的形成至关重要。

综上所述,“0801 南方雪灾”期间大范围的冰冻天气是由于地面平均气温长时间接近或低于 0 °C,持续性降水导致相对湿度高,在近地面附近形成了有利于雨淞形成的逆温层,满足了冻雨形成的条件。然而逆温层的存在并不是冻雨产生的充分条件,当近地面层有大量冰粒子或过冷水滴存在时,在合适的风速条件下与路面、电线等物体碰撞时冻结或直接附着其表面,使结冰厚度不断增加,亦可造成严重的冰冻灾害。贵州省地处高原,近地面温度相对更低,因此在近地面层中存在大量的过冷却水滴或冰晶,即使没有强逆温层的存在,亦造成了严重的冰冻灾害。因而,此次大范围冰冻灾害天气是由于冻结、凝华和冰雾粒子的附着增长等物理过程共同作用的结果。

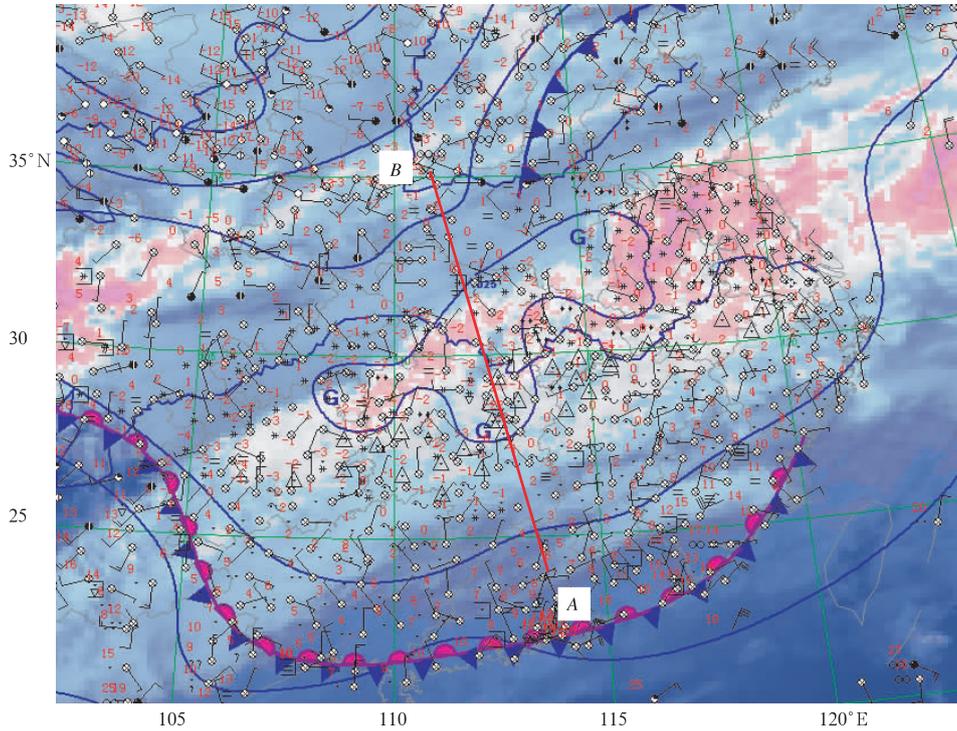


图 16 2008年1月28日06时地面形势图和FY-2C红外云图(AB为其扫过的轨迹)

Fig. 16 The surface weather chart at 06:00 UTC 28 January 2008, AB as its track scanned

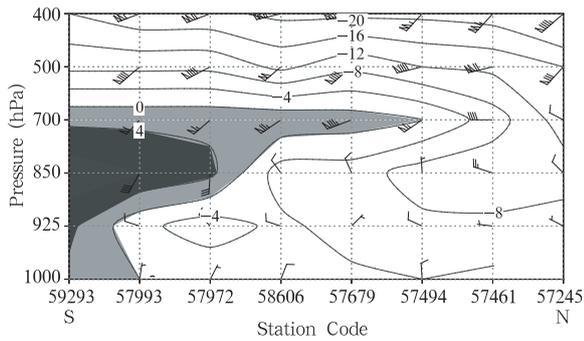


图 17 2008年1月28日00 UTC沿图16中AB线由南至北各探空站观测垂直分布

(红实线为等温线,阴影为大于0°C的区域,风羽为各测站实测风;全风标4 m/s)

Fig. 17 The vertical cross section of the soundings at 00:00 UTC 28 January 2008 along the AB in Fig. 16 from the south to north

(The solid red-lines are the isothermal line with the area larger than 0 °C shaded and the barbs denote the observed winds; a full wind bar is 4 m/s)

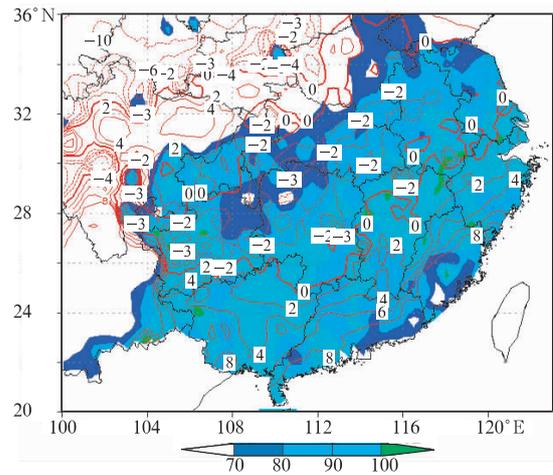


图 18 2008年1月28日06时地面气温

(等值线,单位:°C)和相对湿度(阴影,单位:%)分布

Fig. 18 The surface air temperature (the contours, unit: °C) and relative humidity fields (shaded, unit: %) at 06:00 UTC January 2008

以上仅从冻雨产生的基本条件初步分析了“0801南方雪灾”中冰冻灾害的成因及其云垂直结构特征,对于贵州、湖南等不同地域冻雨形成的差

异、结冰强度、冰冻天气形成的机理及其预测还有待做进一步深入细致的研究。

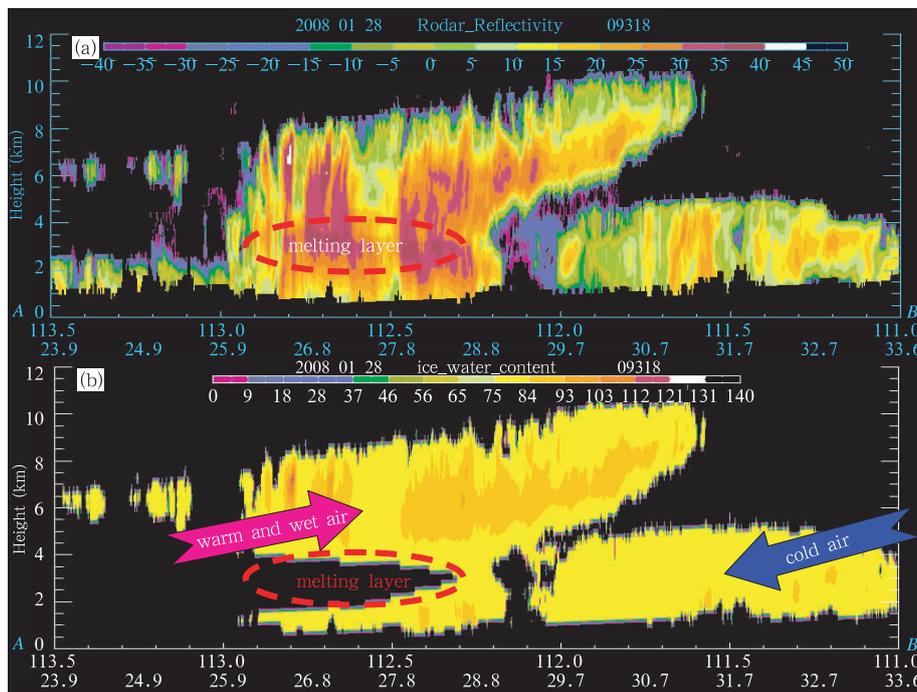


图 19 2008 年 1 月 28 日 06 时 CloudSat 观测的雷达反射率(a, 单位: dBz)和冰水含量(b, 单位: g/m^3)垂直剖面(红色虚线区域为融化层)

Fig. 19 The vertical cross section of the radar reflectivity at 06:00 UTC 28 January from the CloudSat (a, unit: dBz) and ice water content (b, unit: g/m^3) (The area circled with the dashed red-line shows a layer with the icing rain/snow melt)

4 结论和讨论

在欧亚大陆中高纬度长期维持阻塞形势的背景下,2008年1月10日至2月2日中国南方连续经历了4次低温雨雪冰冻天气过程。这次极端天气事件过程范围广、强度大、持续时间长且灾害极为严重。其天气学特征表现为中高纬阻塞形势稳定少变,低纬系统活跃确保水汽输送,以及南方部分地区满足冰雪风暴形成的有利天气条件等。

本文从行星尺度经由天气尺度/大尺度环流直到云尺度全面分析了“0801南方雪灾”的特征和成因。研究表明,导致大气环流异常从而促使这次冰冻极端天气事件出现的主要因素包括:(1)AO的异常活跃,有利于行星尺度波动的稳定维持;(2)阻塞上游 50°N 附近的区域有极强的负涡度平流持续输送到阻塞区,多次使濒临崩溃的阻塞形势得以重新加强,从而使阻塞形势长时间稳定维持;(3)青藏高原以南低纬地区南支气流活跃,确保中国南方充沛的水汽来源;以及(4)长期存在有利于冰雪风暴生成发展的天气-动力-物理学条件等。

由于“0801南方雪灾”事件持续时间较长,事件本身作为一个整体其成因可追溯到行星尺度系统。本文关于极涡异常及其随时间变化的研究表明,平流层极涡变化超前对流层的极涡变化,尤其是该事件前期平流层极涡进入12月后即趋于加强,而对流层的极涡加强则明显滞后,并且直到1月中至2月初才快速加强;这意味着平流层蕴含着对流层极涡变化及伴随的强天气事件的先期信号。因此,在着眼于10—30 d的预报中关注平流层内可能蕴藏的强信号,是今后非常值得努力的一个研究方向。

“0801南方雪灾”事件一个突出的特征就是冰冻现象极为严重。本文借助新型卫星CloudSat的星载云廓线雷达(CPR)资料对本次事件中典型云系进行天气-动力-物理学分析,揭示出西南暖湿气流沿锋面爬升,形成界限分明上下交替的两个冷暖气团,冷气团较浅薄;在2—4 km高度存在一个融化层,冰水不仅存在融化层之上,在近地面层亦含有丰富的冰粒子。结合常规观测资料分析发现,在此期间中国南方大部地区中层(大约在850—700 hPa)存在温度大约在 $0-4^\circ\text{C}$ 的逆温层,地面气温大致维

持在 $-4-0^{\circ}\text{C}$ 且相对湿度在90%以上,分析表明,此次大范围冰冻灾害天气是由于冻结、凝华和冰雾粒子的附着增长等物理过程共同作用的结果。

事实上,“0801南方雪灾”提出了一系列的科学问题,这其中包括:北半球大气环流异常特征及其产生理理(特别是涉及海温异常和冰雪覆盖等重要因子);平流层与对流层的相互作用;中纬度典型阻塞环流系统的发生发展机理及可预报性;西太平洋副热带高压持续偏强偏北的物理机制;南支槽和高原槽的异常活动机理;灾害性雨淞形成的动力物理机理以及南方低温雨雪冰冻灾害天气的长中短期预报理论和方法等,这些科学问题有待今后做深入的研究。另外,2008年1月赤道太平洋正处于La Nina期间,但此时中国华南降水增多却与El Niño盛期时中国冬季降水异常的分布相类似(Zhang, et al, 1999, 2002)。当然,已有的研究表明El Niño和La Nina对中国降水的影响并不表现为相反分布的特征(Zhang, 1996)。因此,La Nina对中国降水的影响仍然是一个需要进一步研究的课题。

致谢:在这次罕见冰雪发生过程中,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室(LaSW)曾多次主持召开研讨会,参加研讨会的专家有来自本实验室的张人禾、倪允琪、赵平和孙健等科研人员;有来自中国科学院大气物理研究所的陶诗言、周晓平、赵思雄、高守亭、卫捷和孙健华等;来自北京大学大气科学系的陶祖钰和张庆红等;还有来自北京应用气象研究所的许焕斌。同时在研讨过程中还得到了周秀骥和陈联寿两位院士的指导,以及中国气象科学研究院相关部门和专家的协助和支持。另外,在本文成文过程中在资料收集处理方面得到了中国科学院大气物理研究所的博士生李俊和胡开喜的帮助。在此对上述所有专家学者表示衷心的感谢!同时感谢两位评审专家的宝贵意见和建议!

References

- Bendel W B, Paton D D. 1981. A review of the effect of ice storm on the power industry. *J Appl Meteor*, 20: 1445-1449
- Berggren R, Bolin B B, Rossby C G. 1949. An aerological study of zonal motion, its perturbation and break-down. *Tellus*, 1: 14-37
- Brooks C F. 1920. The nature of sleet and how it is formed. *Mon Wea Rev*, 48: 69-73
- Chen A Y, Li C L, Chen X Y. 1999. A comparison of heavy snow of formation in Spring and Winter. *Meteor Mon (in Chinese)*, 25(11):37-39
- Chen Q J, Wang L H, Gao Bo, et al. 2000. Comparative analysis of circulation and climatic between less-snow year 1985 and more-snow year 1986 for Tibetan plateau. *Acta Meteor Sinica(in Chinese)*, 58(2): 202-213
- Chi Z P, Gong D L. 2006. A numerical simulation of cloud microphysics parameters for sustaining snowfall in Shandong province. *Meteor Mon (in Chinese)*, 32(7):25-32
- Cooper W A, Marwitz J D. 1980. Winter storms over the San Juan Mountains. Part III: Seeding potential. *J Appl Meteor*, 19: 942-949
- Deng Y P, Cheng L S, Zhang X L. 2000. Three-phase cloud explicit precipitation scheme and mesoscale numerical simulation for generated cause of the “96.1” snowstorm. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19(4):401-414
- Dunn, L B. 1987. Cold air damming by the front range of the Colorado Rockies and its relationship to locally heavy snow. *Wea Forecasting*, 2: 177-189
- Dunn L B. 1992. Evidence of ascent in a sloped barrier jet and an associated heavy-snow band. *Mon Wea Rev*, 120: 914-924
- Shan B C, Zhang C, Li J H, et al. 2006. A diagnosis of the first snow storm in the Weihai District in early winter in 2005. *J Shandong Meteor (in Chinese)*, 26(4):17-18
- Easterling D R, Evans J L, Ya Grosman P, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bull Am Meteor Soc*, 81: 417-425
- Forbes G S, Anthes R A, Thomson D W. 1987. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Mon Wea Rev*, 115: 564-591
- Im E, et al. 2005. Cloud profiling radar for the CloudSat mission. *IEEE Aerosp. Electron Syst Mag*, 20: 15-18
- Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. 1991. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change. *Geophys Res Lett*, 18: 2253-2256
- Li Xiaoquan, Liu Zongxiu X. 1986. The North-hemisphere and partition 500 hPa polar vortex area indexes. *Meteor Mon (in Chinese)*, Suppl 2: 69-83
- Lin Q F, Wu Z M, Liang Y H. 2006. Mesoscale features analysis of a cold-air outbreak snow storm event in Shandong peninsula. *Periodical of Ocean University of China(in Chinese)*, 36(6): 908-914
- Liu Zongxiu. 1986. Calculation of the North-hemispheric polar vortex intensity indexes and its relationship with changes in temperature in China. *Meteor Mon (in Chinese)*, Suppl 2: 84-89
- Luo D H. 2005. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part I: Effect of topography. *J Atmos Sci*, 62: 5-21
- Mace G G, Marchand R, Zhang Q, et al. 2007. Global hydrometeor occurrence as observed by CloudSat: Initial observations from summer 2006. *Geophys Res Lett*, 34, L09808, doi:10.1029/2006GL029017
- Manton M J, Eral J. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *Int J Climatol*, 21: 269-284
- Marwitz J D. 1980. Winter storms over the San Juan Mountains.

- Part I: Dynamical processes. *J Appl Meteor*, 19: 913-926
- Qin Xu, Shouting Gao, Fiedler B H. 1996. A theoretical study of cold air damming with upstream cold air inflow. *J Atmos Sci*, 53(2): 312-326
- Qin Xu, Gao Shouting. 1995. An analytic model of cold air damming and its applications. *J Atmos Sci*, 52(3): 353-365
- Robert M R, Mohan K R, Tokay A. 1996. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event; The St. Valentine's Day ice storm. *Wea Forecasting*, 6:183-208
- Shutts G J. 1983. The propagation of eddies in diffluent jetstreams; Eddy vorticity forcing of blocking flow fields. *Quat J Roy Meteor Soc*, 109: 737-761
- Stephens G L, et al. 2002. The cloudsat mission and the A-Train. *Bull Ame Meteor Soc*, 83(12): 1771-1790
- Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al. 1999. The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada. *J Atmos Sci*, 56(10):1261-1281
- Wang S W, Gong D Y. 2000. Enhancement of the warming trend in China. *Geophys Res Lett*, 27(16): 2581-2584
- Wang S W. 2008. Climatological aspects of severe winters in China. *Adv Climate Change Res (in Chinese)*, 4(2):68-72
- Wang W, Cheng L S. 2000. Numerical study of conditional symmetric instability of "96.1" snowstorm. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 19(2): 129-140
- Wang X L, Li X Y, Li Z X. 2006. Analysis of freezing-hazard event in 2005 in Hunan province. *Meteor Mon (in Chinese)*, 32(2): 87-91
- Wu Y X, Chen J W, Yang B G. 2000. Type of the winter air temperature in Huangshan mountain and its climatic analysis of snow glaze and rime. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 58(3): 376-384
- Xu J F, Tao J H, Xiao J P. 2006. A meso-scale analysis of Qinghai-Xizang plateau snow storm and its vortex source study. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 36(6):908-914
- Zhang R A, Sumi A, Mkimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 16: 229-241
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asia Monsoon; A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Japan*, 74: 49-62
- Zhang R, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn. *J Meteor Soc Japan*, 80: 213-227
- Zhang X L, Cheng L S. 2000. Dynamic diagnoses of the genesis and development for mesoscale shear line during "96.1" snowstorm II: Diagnoses of divergence and its variability. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 19(4):285-294
- Zhang X L, Cheng L S. 2000. Dynamic diagnoses of the genesis and development for mesoscale shear line during "96.1" snowstorm I: Diagnoses of vorticity and vorticity variability. *Plateau Meteor(in Chinese)*, 19(3): 285-294
- Zhen G G. 2008. China is experiencing a rare catastrophe of low temperature snowfall event with freezing rain. available at <http://www.cma.gov.cn/>
- Zhu A M, Shou S W. 1994. Diagnosis of frontogenetical secondary circulation in a winter snowstorm event. *J Nanjing Insti Meteor (in Chinese)*, 17(2): 183-186
- Zhu Q G, Xie L A. 1988. 1986—1987 Northern winter Asia/Australia circulation anomalies with their relation to the western pacific SST. *J Tropical Meteor (in Chinese)*, 4(3):254-262
- Zhu Z L, Cui Y S, Li J H. 2006. Numerical simulation and analysis of a local snow storm event. *J Shandong Meteor (in Chinese)*, 26(2):17-19

附中文参考文献

- 陈爱玉, 李存龙, 陈新育. 1999. 春、冬季暴雪成因对比分析. *气象*, 25(11):37-39
- 陈乾金, 王丽华, 高波等. 2000. 青藏高原 1985 年冬季异常少雪和 1986 异常多雪的环流及气候特征对比研究. *气象学报*, 58(2): 202-213
- 迟竹萍, 龚佃利. 2006. 山东一次连续性降雪过程云微物理参数数值模拟研究. *气象*, 32(7):25-32
- 褚昭利, 崔宜少, 李建华. 2006. 一次局地性暴雪的数值模拟及分析. *山东气象*, 26(2):17-19
- 单宝臣, 张成, 李建华等. 2006. 威海地区 2005 年初冬首次暴雪诊断分析. *山东气象*, 26(4):17-18
- 邓远平, 程麟生, 张小玲. 2000. 三相云显式降水方案和高原东部 "96.1" 暴雪成因的中尺度数值模拟. *高原气象*, 19(4):401-414
- 李小泉, 刘宗秀. 1986. 北半球及分区的 500 hPa 极涡面积指数. *气象*, 增刊 2:69-83
- 林曲凤, 吴增茂, 梁玉海等. 2006. 山东半岛一次强冷流降雪过程的中尺度特征分析. *中国海洋大学学报*, 36(6): 908-914
- 刘宗秀. 1986. 北半球极涡强度指数的计算及其与我国温度变化的关系. *气象*, 增刊 2:84-89
- 王绍武. 2008. 中国冷冬的气候特征. *气候变化研究进展*, 4(2):68-72
- 王文, 程麟生. 2000. "96.1" 高原暴雪过程湿对称不稳定的数值研究. *高原气象*, 19(2): 129-140
- 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. *气象*, 32(2):87-91
- 吴有训, 陈健武, 杨保桂. 2000. 黄山冬季气温分类及雪、雨淞和雾淞的气候分析. *气象学报*, 58(3):376-384
- 徐建芬, 陶健红, 夏建平. 2000. 青藏高原切变线暴雪中尺度分析及其涡源研究. *高原气象*, 19(2):187-197
- 张小玲, 程麟生. 2000. "96.1" 暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 I: 涡度和涡度变率诊断. *高原气象*, 19(3): 285-294
- 张小玲, 程麟生. 2000. "96.1" 暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 II: 散度和散度变率诊断. *高原气象*, 19(4):285-294
- 朱爱民, 寿绍文. 1994. 一次冬季暴雪过程锋生次级环流的诊断分析. *南京气象学院学报*, 17(2):183-186
- 朱乾根, 谢立安. 1988. 1986—1987 年北半球冬季亚澳地区大气环流异常及其与西太平洋 SST 异常的联系. *热带气象*, 4(3):254-262
- 郑国光. 2008. 我国正在经历一场历史罕见低温雨雪冰冻灾害. <http://www.cma.gov.cn/>