

# 2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征

赵思雄 孙建华

中国科学院大气物理研究所，北京 100029

**摘要** 主要对2008年初我国南方的雨雪冰冻灾害天气的环流场与多尺度特征作了分析研究。结果表明：1) 大气环流持续异常，中高纬阻塞高压位于西西伯利亚长达20余天，副热带高压偏西偏北。在阻高与副高之间有一横槽维持，这种形势十分有利于冷空气从北方入侵。2) 环流系统较为深厚。不但在500 hPa，即使在200 hPa上也有很明显的经向环流发展，同样有阻高维持，温度槽明显落后于高度槽，有利于横槽的发展与维持。3) 西风带南支槽稳定维持且十分活跃，将大量水汽输送至中国大陆尤其是南方地区。北方的干冷空气与南方的暖湿空气交绥，出现了明显的中低纬系统的相互作用。4) 一条准静止锋长期稳定维持于长江流域，是雨雪冰冻天气的重要影响系统，这在冬季并不多见。5) 贵州和湖南地区，低层浅薄的冷空气垫与其上的暖湿空气形成了特有结构——逆温层，并有暖湿配合，有利于冻雨出现。由于涉及云微物理、微气象学等诸多影响，冻雨区的分布带有一定的局地性特征，因而，对其的精确预报尚需作更多的研究。6) 在上述研究基础上，本文提出了一个多尺度系统持续性的雨雪、冰冻天气物理模型。

**关键词** 冬季风 冻雨 准静止锋 层结 冰暴

**文章编号** 1006-9585 (2008) 04-0351-17    **中图分类号** P448    **文献标识码** A

## Multi-Scale Systems and Conceptual Model on Freezing Rain and Snow Storm over Southern China during January - February 2008

ZHAO Si-Xiong and SUN Jian-Hua

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

**Abstract** In this paper, the freezing rain and snow storm in Southern China during January and February 2008 which brought the severe damage have been investigated. There were four stages in this disastrous weather process, and the second stage (18-21 Jan) among them was the most severe one during which the freezing rain occurred in southern China very frequently. The paper concentrates on multi-scale systems, especially on the ones during the second stage. The results show that the freezing rain and snow storm were associated with the multi-scale systems and their interaction: 1) The long period anomaly of the atmospheric circulation was the important reason, for example, middle latitude Blocking High Pressure (BHP) was located near west Siberia for more than 20 days and also, the West Pacific Subtropical High (WPSH) extended to the north and west of its normal position. There was a trough between BHP and WPSH which is very favorite to southward invading of cold air from North China. 2) The deep systems in middle latitude from lower to upper troposphere can be found clearly, even at 200 hPa. Moreover, the thermal trough was behind the trough in geopotential height. It means that the trough in geopotential height will develop and maintain. 3) The Trough (disturbances) in South Branch (TSB) of westerlies stayed for the long period and was very active. The southwest current ahead the TSB can transport very rich moisture to China continent. Cold-dry air from north and warm moist air from south converged to each other and then the favorite environment of

收稿日期 2008-03-05 收到，2008-03-30 收到修定稿

资助项目 中国科学院大气物理研究所创新基金领域前沿重点项目 IAP07120 和国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301

作者简介 赵思雄，男，1940年出生，研究员，主要从事灾害气象学与中尺度天气动力学研究。E-mail: zhaosx@mail.iap.ac.cn

snowfall and freezing rain could appear. 4) Base on the mentioned above , the quasi-stationary front formed along the Yangtze River and in South China. This kind of quasi-stationary front can hardly be found during wintertime. The position of the stationary front was , to some extent , similar to that of Meiyu front in the summer , however , the baroclinity of the former was stronger than that of the later. 5) The stratification characteristics , inversion layer , warm nose , temperature and dew-point temperature at ground surface have also been analyzed in the period , especially in the second stage during freezing rain and snow storm. The formation of freezing rain was very sensitive to the mentioned-above key influencing factors. 6) Based on the results , one kind of the conceptual model of multi-scale systems for sustaining freezing rain and snow storm has been proposed.

**Key words** winter monsoon , freezing rain , quasi-stationary front , stratification , ice storm

## 1 引言

2008年初我国南方受到暴雪和冻雨灾害天气的袭击。时值春节前夕，给交通运输、电力供应、林业和农业以及人民正常的生产和生活造成了严重的影响，致使100余人死亡，直接经济损失1 500多亿元。这次雪灾、冻雨在一些地区为50年一遇，受到国内外的广泛关注。是一个非常值得深入研究的课题。

我国是世界上气象灾害频发的国家之一。除了夏季暴雨、台风和春季的沙尘暴之外，在冬季风期间寒潮、冷涌造成的大风降温，冷空气出海激发的西北太平洋温带气旋的爆发性发展，及东海气旋的快速生成，均对海上航行、石油生产及国防安全构成严重威胁<sup>[1]</sup>。特别是冷空气南下，冷涌在台湾海峡和南海地区等引发强风，在近赤道及马六甲海峡引发强烈降水<sup>[2]</sup>，更有甚者跨越赤道引起南半球热带气旋的发生，并通过Hadley环流反馈再影响北半球天气等<sup>[3]</sup>。对于冬季风期间影响中国大陆的灾害天气，如2001年“12·7”北京的“小雪大灾”，我国学者已作过诊断与模拟研究<sup>[4,5]</sup>。近年来我国冬季的强降雪过程也时有发生，诸如2005年12月山东半岛的暴雪<sup>[6]</sup>以及2007年3月辽宁的暴风雪均引起严重的后果。亦有过一些研究。然而，对于像2008年这类罕见的暴雪过程，尤其是冻雨过程的研究，还是很不够的。

冻雨是初冬或冬末春初时节的一种天气现象。多数情况下是云中降落的过冷却水滴（有时是经逆温层将上层的雪变为过冷水）在温度 $0^{\circ}\text{C}$ 的物体表面产生的一种冻结现象，我国

出现冻雨较多的地区是贵州，其次是湖南、江西、湖北、河南、安徽、江苏、山东、河北、陕西、甘肃及辽宁南部等，其中山区比平原多，高山最多。我国过去对冻雨做过一些研究，但还不够系统。已经注意到，贵州的冻雨多发生于西北部海拔较高的地区<sup>[7]</sup>。出现冻雨时多数情况下大气中有逆温层，地面气温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下，降雪时对流层中高层气温比冻雨要低<sup>[8]</sup>。另有人对沈阳桃仙机场和天津机场的冻雨做过研究<sup>[9,10]</sup>。这些工作为冻雨天气预报提供了参考。但是上述成果对于理解和认识今年这一严重的暴雪和冻雨仍感到力不从心，难以应对。

自气象学作为一门近代科学以来，距今大约有100多年的历史。近百年来，国外对冻雨天气及其形成机理有较多的研究，在20世纪初即有学者注意到了冻雨天气并对其进行了研究<sup>[11]</sup>。Stewart<sup>[12]</sup>对冬季的降雨类型及其形成条件进行了研究，对过渡带不同降水形态形成的机理进行了分析，并给出了过渡带降水形态分布的结构模型。美国学者对凝冻天气有较细致的划分，分为冻毛毛雨（Freezing drizzle）、冻雨（Freezing rain）和小冰粒（Ice pellet），对每类降水的形成天气条件进行了探讨，此外，还对这些不同类型降水的形成机理进行了较系统的研究<sup>[13,14]</sup>，Berstein<sup>[15]</sup>对美国冻雨的分布和其发生条件进行了总结，指出地形和水汽对冻雨的形成有关键作用，在冻雨的预报中应考虑天气系统、局地因素、过冷却水的厚度和层结廓线等。Rauber等<sup>[16]</sup>对冬季产生冻雨的天气尺度系统和中尺度系统也进行了分析和模拟研究，这些研究中采用中尺度数值模式可在一定程度上模拟出冻雨。国外的冻雨天气研究中，主要考虑欧美的锋面气旋模型，尤其强调暖锋和

输送带的作用,这对于我国的冻雨,尤其是像今年这样持续性的冻雨是难于完全适用的<sup>[17]</sup>。

2008年1月10日~2月2日期间,我国南方发生了严重的暴雪、冻雨天气。由于雪灾、冻雨造成电网供电中断,电力机车无法运行,大批旅客滞留广州等地。京珠北高速公路大面积结冰一度无法通车,江苏大部高速公路封闭,安徽部分国道、省道严重堵塞。贵州全省40多个市县大面积停电,湖南彬州停电长达10余天,成为受影响最重的地区之一<sup>[18]</sup>。在这次暴雨、冻雨灾害天气过程中有不少科学问题值得深入探讨:1)此次冻雨为何持续20余天?是何种环流背景所致?2)具体的影响天气系统是什么,为何是一条准静止锋,为何此锋面一直停滞于我国南方?又,该锋面的东段与西段造成的天气影响为何不同?3)湖南、贵州尤其是彬州为何成为了重灾区,冻雨形成的条件如何?为此,我们利用常规观测的高空和地面资料,以及NCEP资料,对2008年初的雨雪冰冻天气作一分析,以期对这次暴雪、冰冻灾害的成因有更多的了解,希望对今后预报的改进提出一些意见和建议。

本文主要分以下几个部分研究:第2节为2008年初雨雪、冰冻天气的基本情况;第3节为环流特征和天气过程;第4节为逆温层与地面、温度、湿度特征,第5节为一类我国南方持续性冻雨的多尺度系统物理模型;第6节为结论和讨论。在研究中为更清楚地了解我国冻雨的特征,我们还与北美、欧洲冻雨的特征作了一些比较。限于篇幅,对于这次雨雪、冰冻天气的重要影响系统——准静止锋与层结结构的更深入分析,将在文献[19]中给出。

## 2 2008年初雨雪、冰冻天气的基本情况

首先要回顾一下暴雪的定义,目前使用的“降水量”一词未明确区分降水的类型,是雨还是雪?降雪有时是以积雪的厚度来区分的,而其“降水量”是以积雪融化成水后相当的降水量来表述的。降雪又被分为小雪、中雪、大雪和暴雪,它们分别在24 h内降水为0.1~2.4、2.5~4.9、5.0~9.9以及10.0 mm等。冻雨有不同的定

义,它是初冬或冬末春初时的一种天气现象。当较强冷空气南下遇到暖湿气流时,冷空气象楔子一样插入暖空气的下方,近地面气温骤降至0以下(但又不能太低),暖湿空气被抬升,成云致雨,甚至成雪花。而雪花落下经暖层被融化(或低层毛毛雨直接落下),再至地面及地物,由于其上气温低而再冻结成冰,气象上把这种天气现象称之为“冻雨”。我国冻雨在冬季多有发生。

如前所述,2008年初的暴雪、冻雨灾害天气,大约始于1月10日,而于2月2日结束,其间又分为4次天气过程:即1月10~16日,降水的主要地区为长江中游地区;1月18~21日,强降水中心在长江中下游地区;1月25~29日,强降水中心在华南—长江流域一带;1月31日~2月2日,强降水中心主要集中于江南。其中影响最大的为第2和第3阶段。本文主要对环流背景、影响系统以及第2阶段的特征作了分析。为了讨论2008年初雨雪冰冻灾害天气,这里首先对该年1月10日~2月2日的环流特征及影响天气系统作一分析。为了更清楚其维持和演变的特征,我们将分别对每一阶段的环流特征作一较为仔细的探讨。

### 2.1 第1阶段的环流特征

从1月11~16日的500 hPa平均图(图1a)上,可以看到在西风带的北支有很明显的阻塞形势出现,在贝加尔湖和西西伯利亚一带有明显的高压脊,其东西两侧各为低压区,呈型。东侧低压区在蒙古国东部和我国东北北部,有利于冷空气沿超极地路径入侵我国。另一低压区位于里海、咸海一带有利于波动的向东传播。还应指出的是,在西风带的南支气流上,不断有小槽东移,在云南与中印半岛的北部有南支槽活跃与停滞,其槽前有大量的暖湿气流输送,非常有利于中国大陆上降水的发生。850 hPa平均的风矢量图(图1b)上最显著的特点是沿长江流域有一条准静止锋(切变线)维持,冬季很少有锋面象这样长期静止于长江流域的。该锋面的维持为我国南方雨雪天气的出现提供了十分有利的条件。上述环流和天气系统的异常,对降水很有利。

为了了解不同阶段降水的特征,我们对第1阶段每6 h降水量及冻雨分布作了分析,之所以分析6 h的降水量,是希望抓住尺度更小的系统,

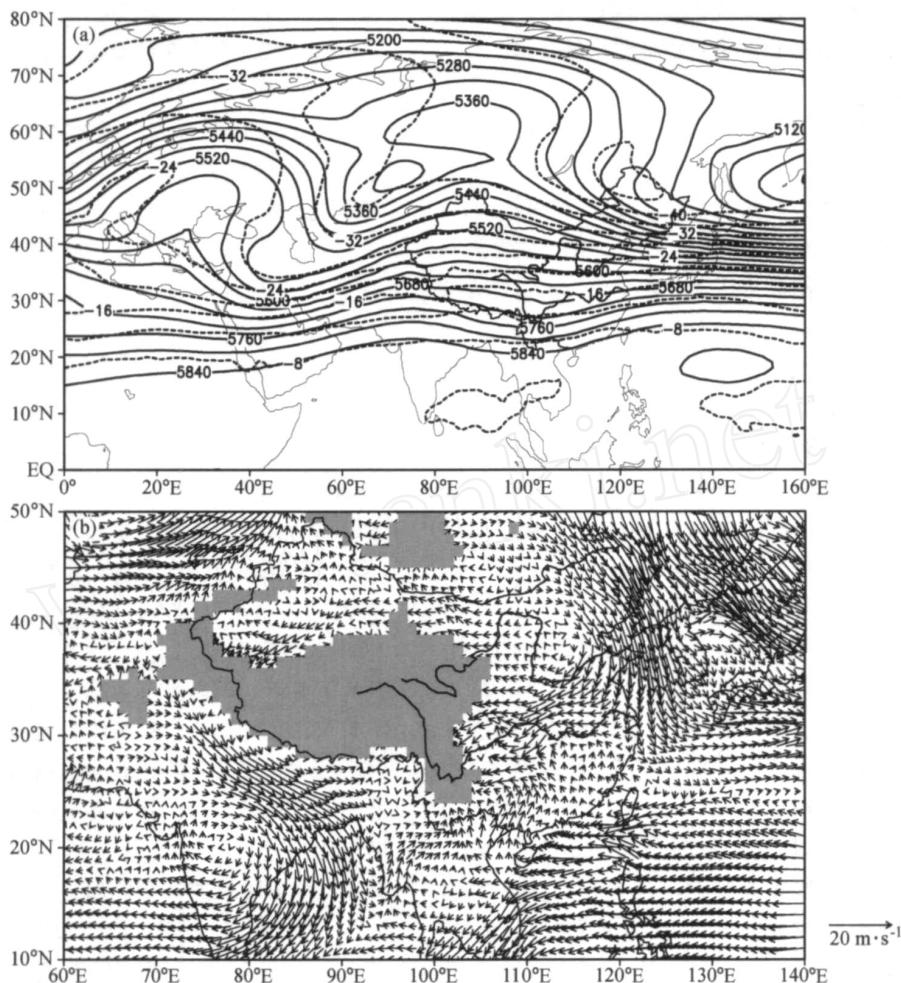


图1 2008年1月11~16日 (a) 500 hPa平均高度场(实线, 单位:gpm)、温度场(虚线, 单位: °C)和(b) 850 hPa风矢量场。阴影为地形>1 500 m

Fig. 1 The averaged circulation of 11 - 16 Jan 2008: (a) geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature (dashed line, units: °C) at 500 hPa; (b) wind at 850 hPa. The shaded represents the terrain > 1 500 m

同时也可对日变化的情况有所了解。从上述情况看, 第1阶段降水主要见于长江流域, 沿长江流域只有个别站有冻雨出现。值得注意的是, 12日1200 UTC ~ 1800 UTC在贵州有一些测站出现了冻雨(图2)。从整个雨雪天气来看, 这是一个重要的信号, 但是, 如果这次灾害天气仅有这一次过程, 则冻雨灾害不至于非常严重。

## 2.2 第2阶段的环流特征

1月18~21日为第2阶段雨雪、冰冻天气。这一阶段雨雪天气主要出现在长江流域, 且出现了严重的冻雨, 使灾情大大加重。图3是这一时期200和500 hPa的平均环流形势图以及850和1 000 hPa的风场图(其余阶段的200和1 000

hPa图未给出)。可以看到, 乌拉尔山附近的阻塞高压进一步发展, 与远东附近的高压脊连通, 形成了明显的高压坝, 而其南侧从贝加尔湖至里海与咸海, 有一东北东至西南西方向的横槽维持, 且高压脊区有明显的暖平流存在, 对该阻塞形势的维持非常有利。里海、咸海东侧已出现切断低压, 对南支槽的维持和涡度的输送有利。还要注意的是, 在地中海和北非另有一波动正在东传, 这可能是南支槽持续与活跃的又一原因, 使得在中国大陆上可以较长时期的出现“(寒潮)槽与(南支)槽迭加”, 这是引发和加重降雪天气的原因。从850 hPa风矢量场的分布可以看到, 这次过程中冷空气不断持续南下, 且来自西太平洋和

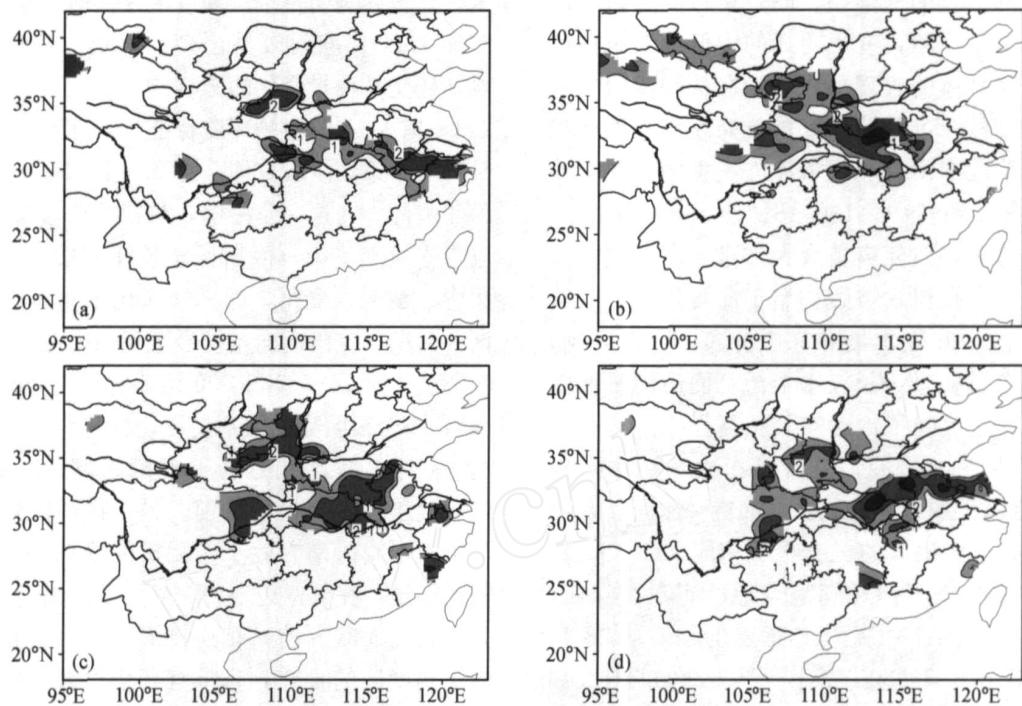


图2 2008年1月11~12日观测的6 h降水量(单位: mm)和冻雨(数字表示); (a) 11日1800 UTC~12日0000 UTC; (b) 12日0000 UTC~0600 UTC; (c) 12日0600 UTC~1200 UTC; (d) 12日1200 UTC~1800 UTC

Fig. 2 The 6 h observed precipitation amount (shaded, units: mm) and freezing rain (number) in Jan 2008; (a) 1800 UTC 11—0000 UTC 12; (b) 0000 UTC — 0600 UTC 12; (c) 0600 UTC — 1200 UTC 12; (d) 1200 UTC — 1800 UTC 12

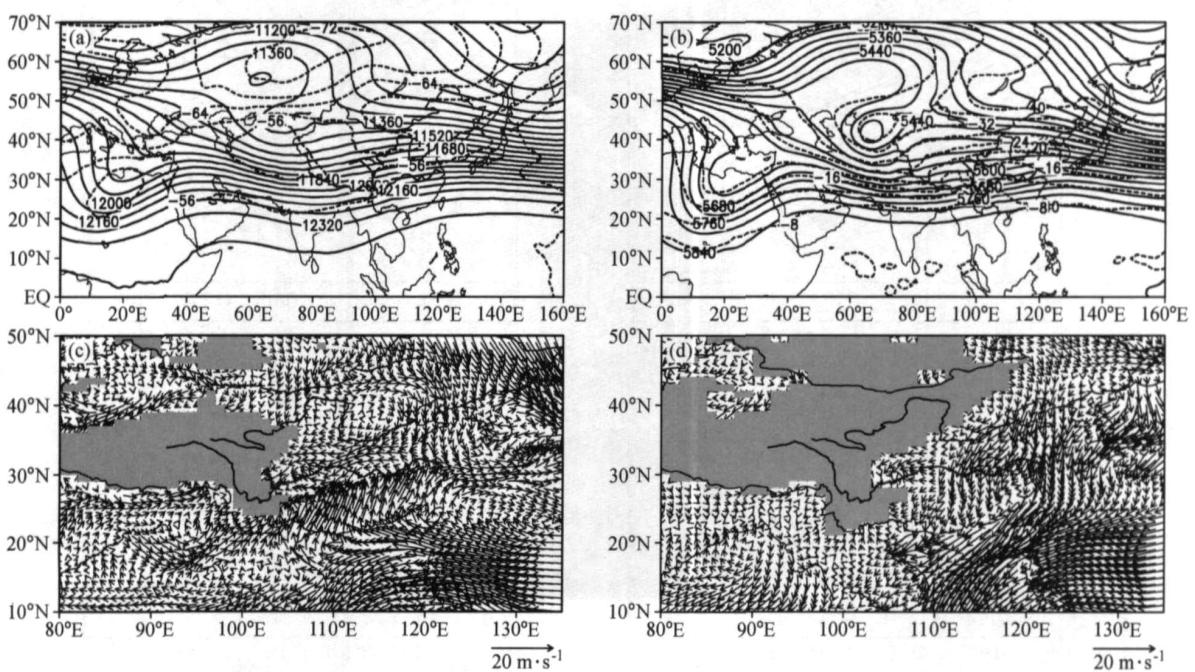


图3 2008年1月18~22日的平均环流: (a) 200 hPa 和 (b) 500 hPa 平均高度场(实线, 单位: gpm)及温度场(虚线, 单位: °C); (c) 850 hPa 和 (d) 1 000 hPa 风矢量场

Fig. 3 The averaged circulation of 18—22 Jan 2008: geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature (dashed line, units: °C) at 200 hPa (a) and 500 hPa (b), wind at 850 hPa (c) and 1 000 hPa (d)

南中国海的水汽输送加强，而且来自孟加拉湾的水汽亦有不少贡献，有很明显的中低纬系统的相互作用。其具体的表现形式为：在长江流域一直有一条切变线（准静止锋）的维持，该条切变线仍然是此阶段中国大陆雨雪冰冻灾害的重要影响系统。在第2阶段中，1月18、19日南方有大片区域出现冻雨，致使灾情大大加重。高压输电线严重受损，大批树木被毁均始于此阶段。图4给出了观测的6 h降水量和冻雨分布。可以看到，降雪的分布最初见于长江中上游，而后向长江中下游推进。这反映了冷暖空气相互作用的范围不断向长江中下游扩展。但需要指出，并非降雨（雪）强度越大的地方出现冻雨的机会越多，在一些场合下，二者出现的机会很不相同。18、19日冻雨区主要位于贵州和湖南等地，而不在江西、江苏和浙江。图4中尤其有意思的是，从18日0000 UTC（18日0800 LST）至1800 UTC（19日0200 LST），降水量不断增加，降水区不断扩大，而图4a上（凌晨）的降水量不大，几乎无明显的强降水区，但是，贵州和湖南仍有大片冻雨

区。这也许表明在凌晨和后半夜（即1800 UTC~2400 UTC）冻雨较易出现。以及冻雨出现的时段，还受某种日变化的影响。

### 2.3 第3、4阶段的环流特征

对于第3阶段，即1月25~29日，也值得进一步关注。在这一阶段中，与第2阶段有所不同，雨带先见于华南，而后推至长江流域。但冻雨仍集中于湖南、贵州，即冻雨区仍未出现在强降水区。后期，冻雨区向东扩展至我国东部。

从1月24~29日500 hPa的平均环流看（图5a），一个很明显的阻塞高压仍稳定维持于西西伯利亚一带，我国北方处于横槽的槽前。而里海、咸海处于另一低槽的槽前。另，在西风带的南支气流上，我国南方处于印缅槽的槽前，有利于水汽的输送，在其西边地中海与北非另有一槽维持，且与其北面欧洲的槽相连接形成一个深槽，这样的正涡度区的合并，非常有利于里海、咸海槽的维持。在1月24~29日850 hPa的平均风矢量图上（图5b），准静止锋的平均位置偏于长江以南，这可能与每日天气图上准静止锋摆动于长江流域

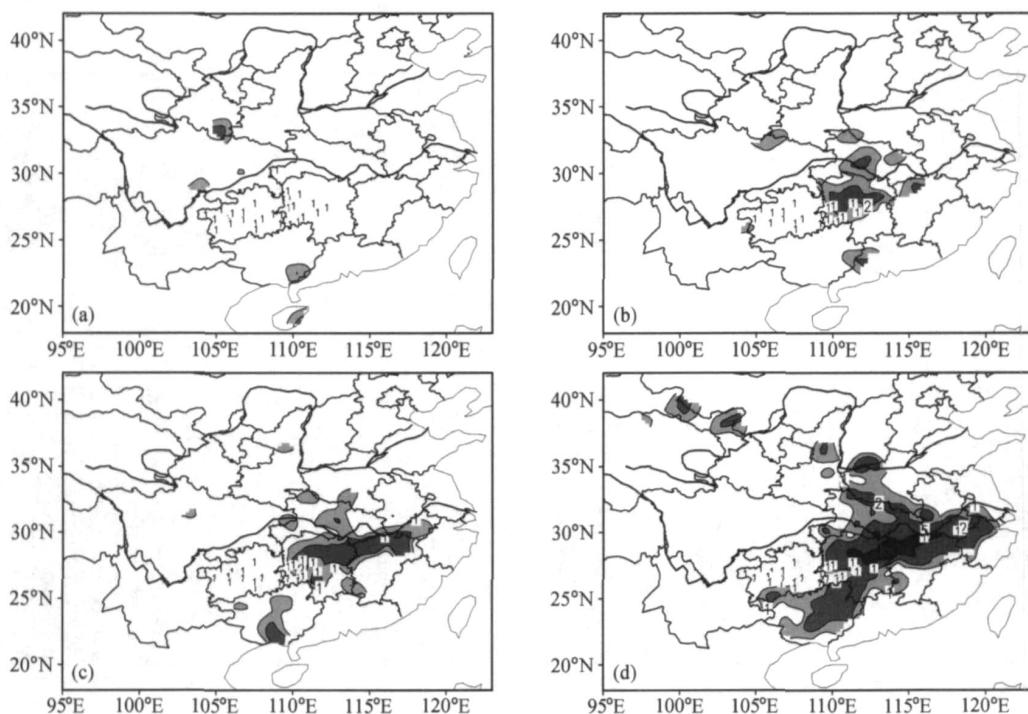


图4 2008年1月17~18日观测的6 h降水量（单位：mm）和冻雨（数字表示）：(a) 17日1800 UTC~18日0000 UTC；(b) 18日0000 UTC~0600 UTC；(c) 18日0600 UTC~1200 UTC；(d) 18日1200 UTC~1800 UTC

Fig. 4 The 6 h observed precipitation amount (shaded, units: mm) and freezing rain (number) in Jan 2008: (a) 1800 UTC 17-0000 UTC 18; (b) 0000 UTC - 0600 UTC 18; (c) 0600 UTC - 1200 UTC 18; (d) 1200 UTC - 1800 UTC 18

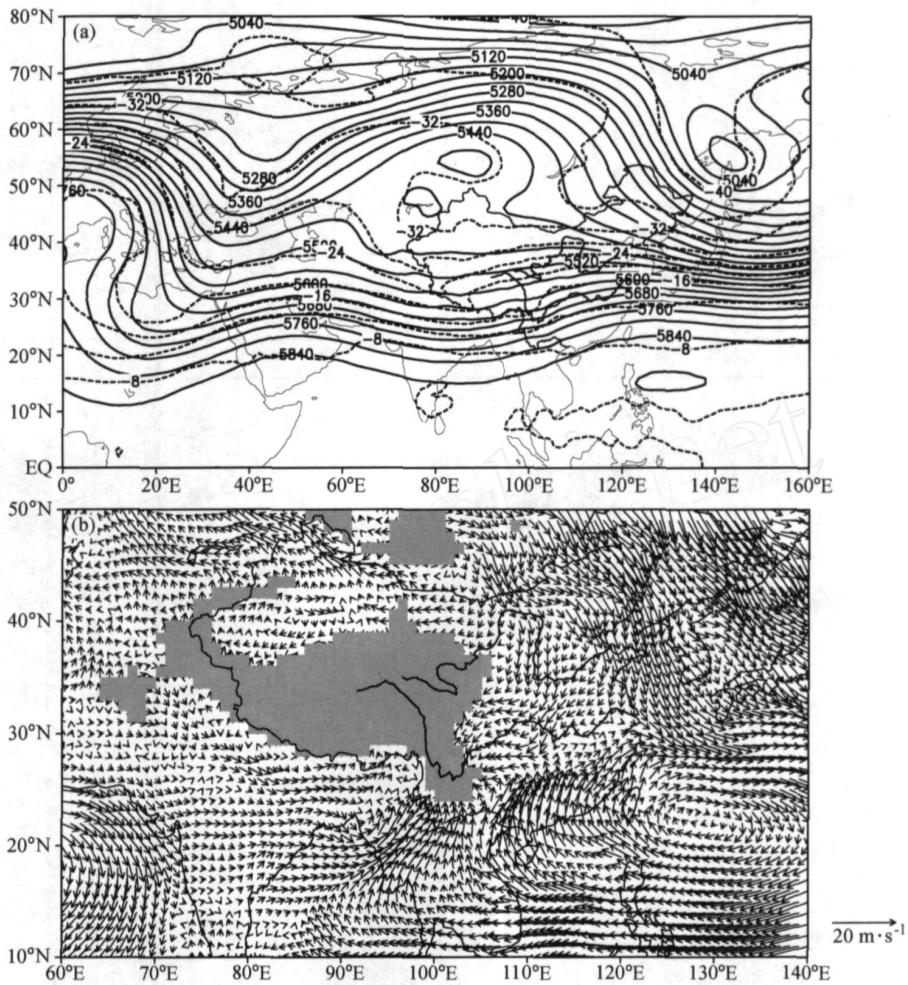


图 5 2008 年 1 月 24 ~ 29 日 (a) 500 hPa 平均高度场 (实线, 单位: gpm)、温度场 (虚线, 单位: ) 和 (b) 850 hPa 风矢量场

Fig. 5 The averaged circulation of 24 - 29 Jan 2008: (a) geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature (dashed line, units: ) at 500 hPa, (b) wind at 850 hPa

及华南之间有关。因为副高的平均位置偏北, 所以雨带仍先后维持在长江流域及华南一带。尽管这一阶段的降雨带在南北方向的摆动较大, 但是, 冻雨区主要仍在贵州、湖南, 后期向东扩展至江西、江苏等地(图 6)。这一点与第 2 阶段有所不同。

此后, 1 月 31 日 ~ 2 月 2 日降雨(即第 4 阶段) 主要出现在华南、江南一带, 后减弱。随着环流的调整和阻塞高压的移动, 整个雨雪冰冻天气过程结束(图略)。总之, 在 2008 年 1 月 10 日 ~ 2 月 2 日这一期间, 冬季环流出现了持续异常的特征及准静止锋长期停滞于长江流域等特点, 这为严重雨雪灾害天气的形成, 提供了十分有利的

环境。

### 3 中低纬系统的相互作用和锋生过程

国外在冻雨的研究方面已有一些工作。他们的结果表明, 冻雨发生时多与温带气旋, 尤其是暖锋有关, 这与欧美学派有关冬季中纬度的主要影响天气系统大体相近。而我国 2008 年初的冻雨过程却与一条准静止锋有关。这种情况在国外并不多见。如前所述, 环流形势稳定可能是锋面长期静止于长江流域的重要原因。这种准静止锋的结构非常特殊, 下层为浅薄的冷空气楔, 或称冷

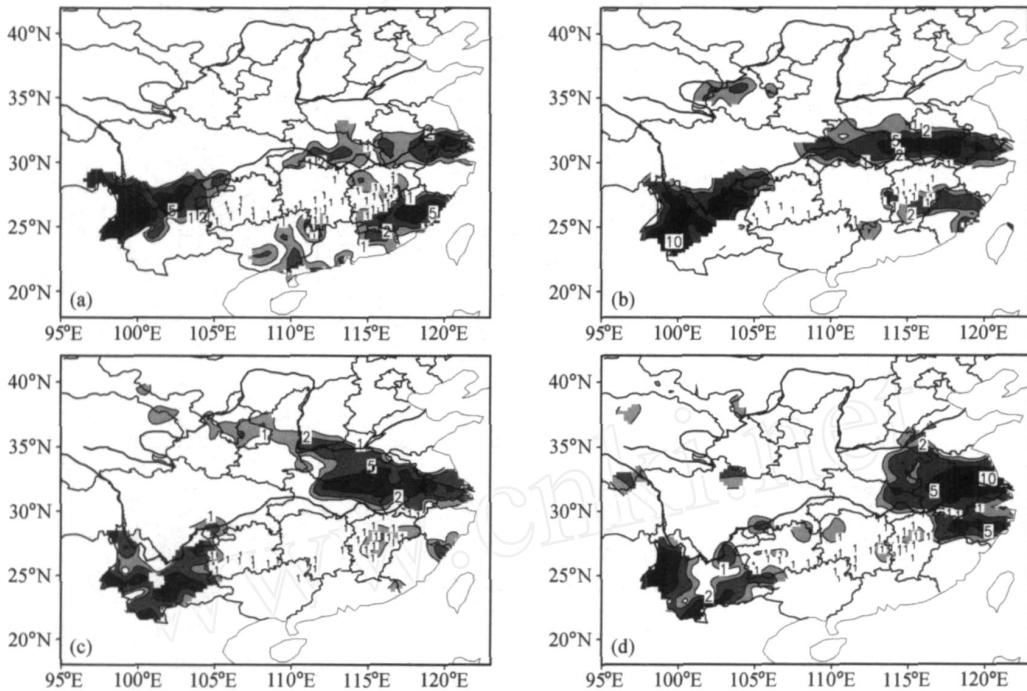


图 6 2008 年 1 月 26~27 日观测的 6 h 降水量 (单位: mm) 和冻雨 (数字表示): (a) 26 日 1800 UTC~27 日 0000 UTC; (b) 27 日 0000 UTC~0600 UTC; (c) 27 日 0600 UTC~1200 UTC; (d) 27 日 1200 UTC~1800 UTC

Fig. 6 The 6 h observed precipitation amount (shaded, units: mm) and freezing rain (number) in Jan 2008: (a) 1800 UTC 26 - 0000 UTC 27; (b) 0000 UTC - 0600 UTC 27; (c) 0600 UTC - 1200 UTC 27; (d) 1200 UTC - 1800 UTC 27

空气垫, 而来自低纬洋面上的暖湿空气则沿着冷空气垫向北向上爬升。从图 7 和图 8 可以看到, 无论是东段 ( $118^{\circ}\text{E}$ ) 还是西段 ( $112^{\circ}\text{E}$ ), 在对流层低层均维持着一个假相当位温的密集区, 且在这一期间锋区的位置大体均停滞少动。但仔细对比可以发现, 西侧剖面上假相当位温的水平梯度似乎比东侧剖面上的数值要大, 也许是在这一阶段, 冷空气路径较为偏西。从图上还可以注意到在锋面的暖空气一侧有很明显的水汽通量的辐合。在西侧剖面上水汽通量也比东侧剖面上的强, 这也许是降水带主要集中于长江流域, 尤其是其西段的原因。在第 3 阶段中从类似的剖面上可以看到相似的情况<sup>[19]</sup>, 此处不再重复。

虽然同为准静止锋, 但冬季 (1 月) 的准静止锋比春季 (4~5 月) 华南准静止锋的强度应该更强一些。为了探讨这一问题, 我们计算了锋生函数值。所采用的公式为

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla_{se}| = F_1 + F_2 + F_3 + F_4,$$

其中,

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{|\nabla_{se}|} \left[ (\nabla_{se}) \cdot \nabla \left( \frac{du_{se}}{dt} \right) \right], \\ F_2 &= -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla_{se}|} (\nabla_{se})^2 D_h, \\ F_3 &= -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla_{se}|} \left\{ \left[ \left( \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 - \left( \frac{\partial}{\partial y} \right)^2 \right] A_f + 2 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} B_f \right\}, \\ F_4 &= -\frac{1}{|\nabla_{se}|} \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right), \\ A_f &= \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, \quad B_f = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad D_h = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \end{aligned}$$

其中,  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  分别为非绝热加热项、水平辐散项、水平变形项及与垂直运动有关的倾斜项。图 9 和 10 给出了第 2 次过程沿  $112^{\circ}\text{E}$  的锋生函数的垂直剖面。与图 7、8 对比可以看见, 在假相当位温密集带附近, 有锋生函数的大值区, 且西侧剖面的数值要大于东侧剖面。表明与冬季冷空气有关的斜压性的贡献仍有其重要性, 而暖空气的向北输送, 致使锋生的作用加强。另一个值得注意的现象是随着降雪过程的进展, 锋生函数的数值随时间而减小, 这是由于冷暖空气的交绥虽然非常有利于锋生, 而其所诱发的锋区侧向环

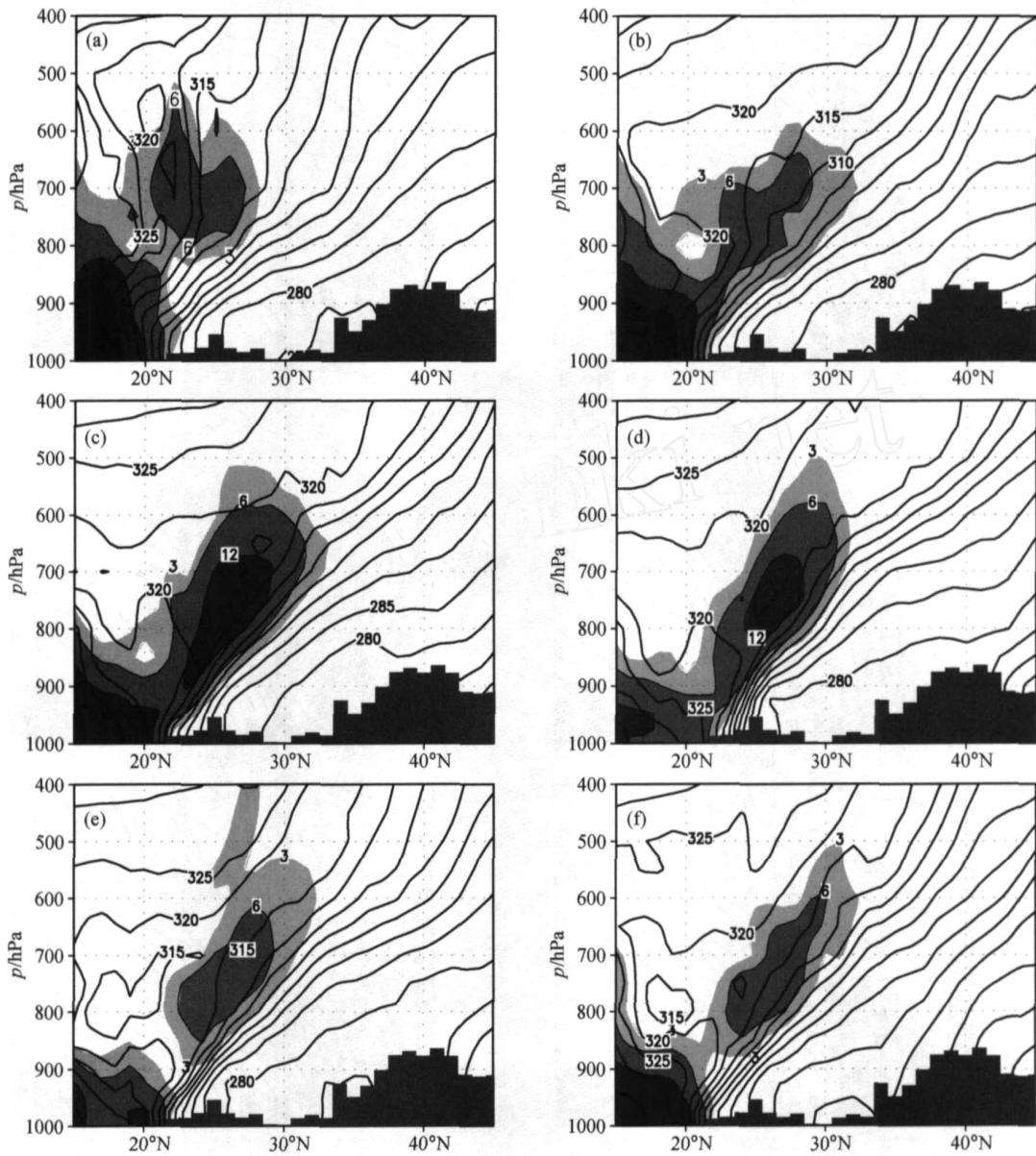


图7 2008年1月17~22日沿112°E的假相当位温(实线, 单位: K)和水汽通量(阴影区, 单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ): (a) 17日0000 UTC; (b) 18日0000 UTC; (c) 19日0000 UTC; (d) 20日0000 UTC; (e) 21日0000 UTC; (f) 22日0000 UTC。阶梯形阴影区为地形

Fig. 7 Vertical cross section of pseudo-equivalent potential temperature (solid line, units: K) and moisture flux (shaded, units:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) along 112°N at 17~22 Jan 2008. Step shaded area represents the terrain: (a) 0000 UTC 17; (b) 0000 UTC 18; (c) 0000 UTC 19; (d) 0000 UTC 20; (e) 0000 UTC 21; (f) 0000 UTC 22

流(暖空气上升, 冷空气下沉)则反过来又会抑制锋生的发展, 这表明了锋生过程的确也具有双重的性质。

#### 4 逆温层与地面温度湿度特征

在大尺度或天气尺度的有利背景下, 冻雨有

可能发生, 但不是绝对的。因为冻雨的出现还涉及到诸多的其他条件, 如逆温层和近地面层温度等。我们注意到此次冻雨过程主要发生于贵州、湖南等, 这能否从资料分析中找到一定的答案。分析表明: 除了大尺度与天气尺度的有利环境外, 温度廓线的垂直分布与近地面温度湿度的特征有很重要的影响, 且十分敏感。为了与孙建华和赵

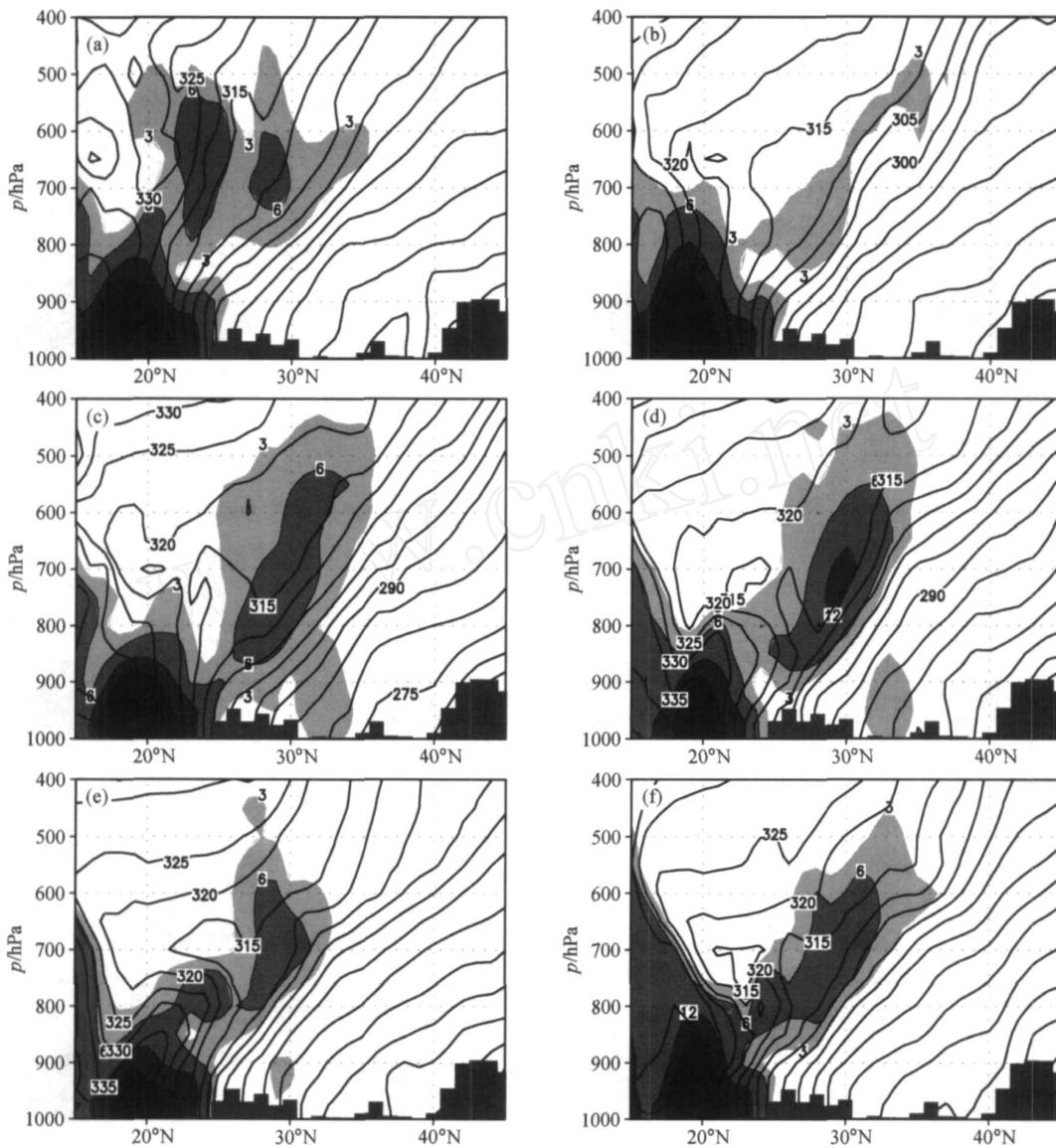


图8 同图7, 但为118°E

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the cross section along 118°E

思雄<sup>[19]</sup>文中有关第3阶段天气层结与地面温湿特征作相互参照, 本节着重对雨雪冰冻天气第2阶段的相关问题作一分析。

地面温度、风是冻雨形成的一个非常敏感的参数。为此, 图11给出了在第2阶段中长沙、郴州与南京的地面温度分布。可以看到在第2阶段中长沙的冻雨出现在19、20日, 郴州的冻雨出现在17日, 而南京在18、19日出现了降雪。长沙、郴州冻雨出现时, 地面温度均低于0℃, 这也是很自然的, 如果不低于0℃, 过冷却水到达地面

后不会再次冻结。另一方面, 可以看到湿球温度的分布, 冻雨发生时露点温度大约维持在-1至-2℃。多数情况下的温度露点差在2℃以内。这表明发生冻雨时地面附近比较潮湿, 地表面存在着较多的过冷却水滴。冻雨发生时地面温度一般为0~3℃。如果地面温度太低, 表明其相关的低层冷空气垫的气温偏低, 以至于落入低层中的过冷却水滴过早地凝结, 并再次以固态降水的形式到达地面, 反而不利于地面冻雨的出现。这也正是为何地面温度不是越低越有利于冻雨形成的

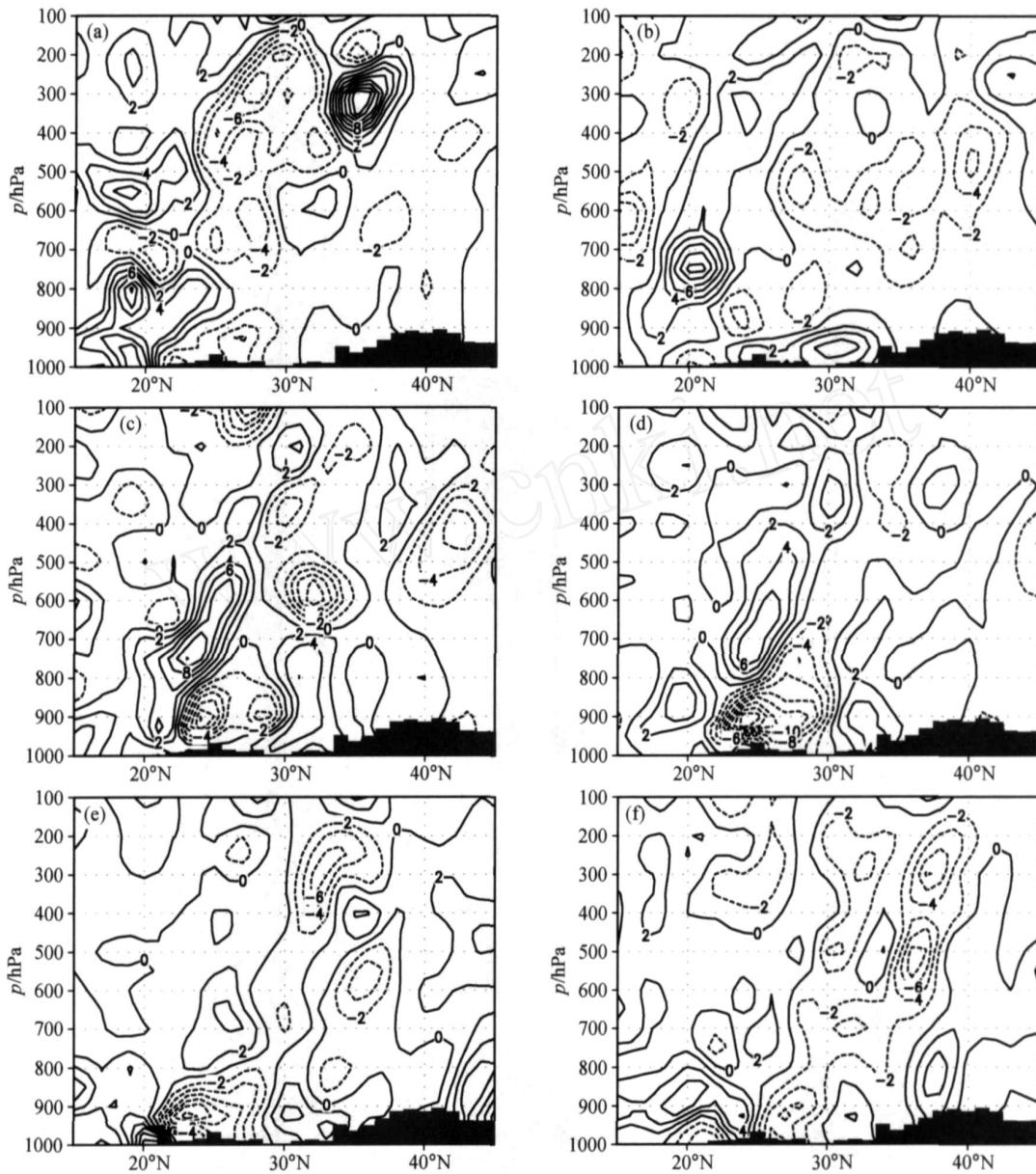


图9 2008年1月17~22日沿112°E锋生函数的垂直剖面(单位： $10^{-10} \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )：(a) 17日0000 UTC；(b) 18日0000 UTC；(c) 19日0000 UTC；(d) 20日0000 UTC；(e) 21日0000 UTC；(f) 22日0000 UTC。阴影区表示地形

Fig. 9 Vertical cross section of frontogenesis function along 112°E (units:  $10^{-10} \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) in Jan 2008: (a) 0000 UTC 17; (b) 0000 UTC 18; (c) 0000 UTC 19; (d) 0000 UTC 20; (e) 0000 UTC 21; (f) 0000 UTC 22. Shaded area represents the terrain

原因。对比一下南京的地面温度曲线，可以发现一些有趣的事，南京基本上地面温度均在0以上，且19日前温度露点差达到4~8，表明地面温度高不利于冻结，且最低层的湿度不大，也没有降水出现。此外，我们还要注意一下地面风场的变化。第2阶段中长沙和郴州基本上为偏北风，风速较大时为 $2\sim4 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种适当强度的风速有利于冻雨的生成，而过强或过弱则反

之<sup>[16]</sup>。南京的地面风向在1月18~20日基本上为偏东风，而不是偏北风。这表明在我国西部地区和东部地区受不同来源冷空气的影响，尤其是在第2阶段。至于我国近地面风场对冻雨更具体的影响，还需收集更多资料进行更深入的研究。

除了地面条件，对流层中下层的层结条件对冻雨的形成也非常重要。我们以第2次过程为例，对南北方向上的两个高空探测站，即郴州和长沙

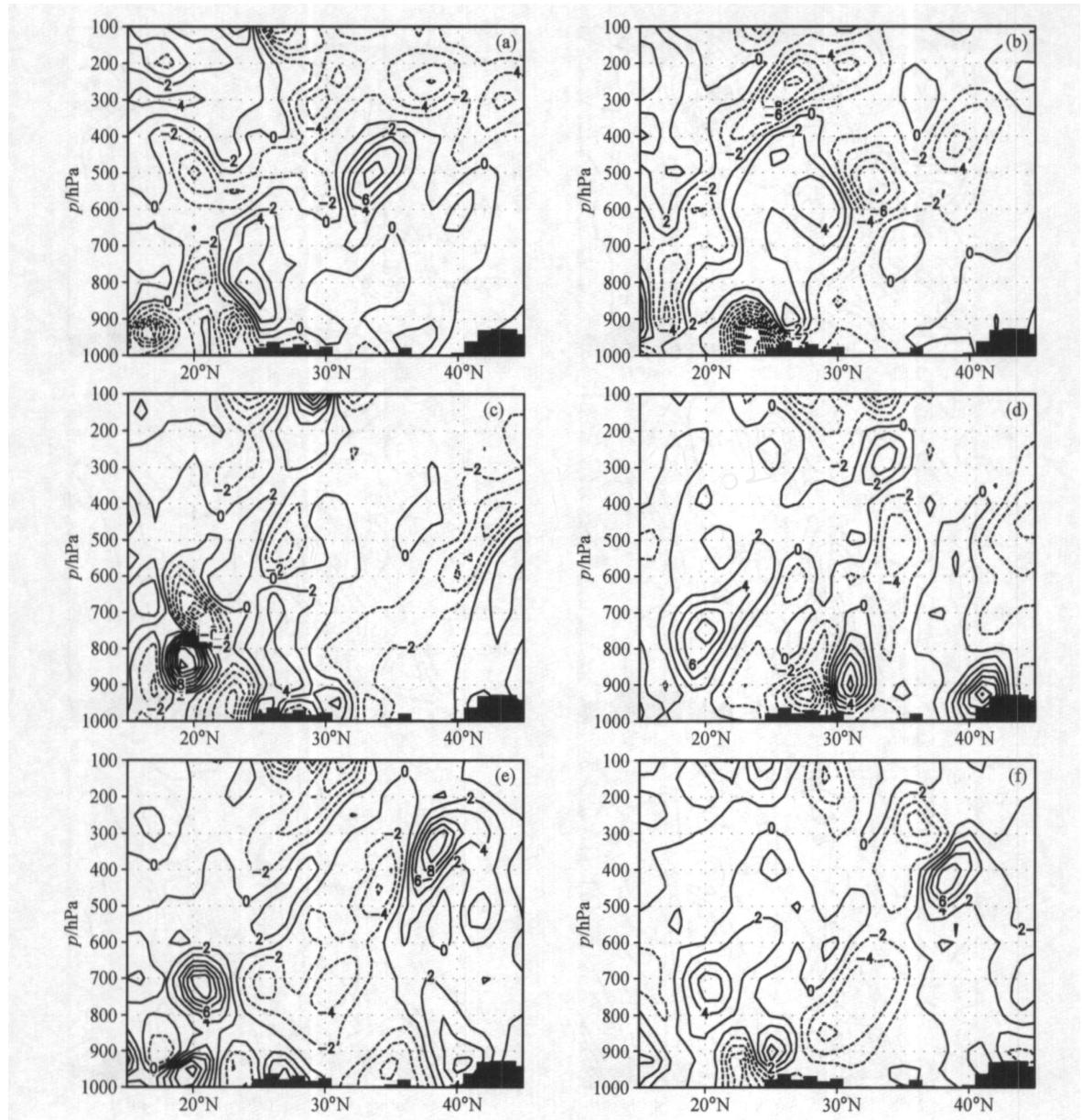


图 10 同图 9, 但为 118°E

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the cross section along 118°E

作一对比。然后, 再对东西方向上的两个测站, 即郴州和南京作一比较(图 12), 看其有何异同。分析表明, 长沙、郴州降冻雨时都有很明显的特点(图 12b 和 12c), 在对流层低层浅薄的冷空气层上, 均有一逆温层存在, 此逆温层的存在至关重要, 即当对流层中层的雪花下落至该逆温层时, 即开始融化成为云水或雨水, 而当液态水再向下落入近地面的冷气层时, 特别是到达地面和地物之上时, 如地面温度低于 0°C, 则可使过冷却水滴再次冻结, 而出现冻雨。产生冻雨时不但要有

逆温层而且暖鼻非常清楚, 所谓暖鼻即是指温度廓线上  $> 0^\circ\text{C}$  的那部分暖区(即暖层, 因在探空曲线上呈“鼻”状而得名), 但该暖区也不可太高太厚, 否则也均不利于冻雨的形成。还要注意到, 17 日 0000 UTC 长沙的温度探空曲线与同一时期郴州的探空曲线十分相似(图 12a)。也有逆温层存在, 且地面亦在 0°C 附近, 但是它整层温度小于 0°C, 没有暖鼻, 对冻雨的形成不利, 此时长沙只有降雪。再从东西方向比较, 即是长沙 20 日 0000 UTC 和南京 19 日 0000 UTC 探空曲线(图

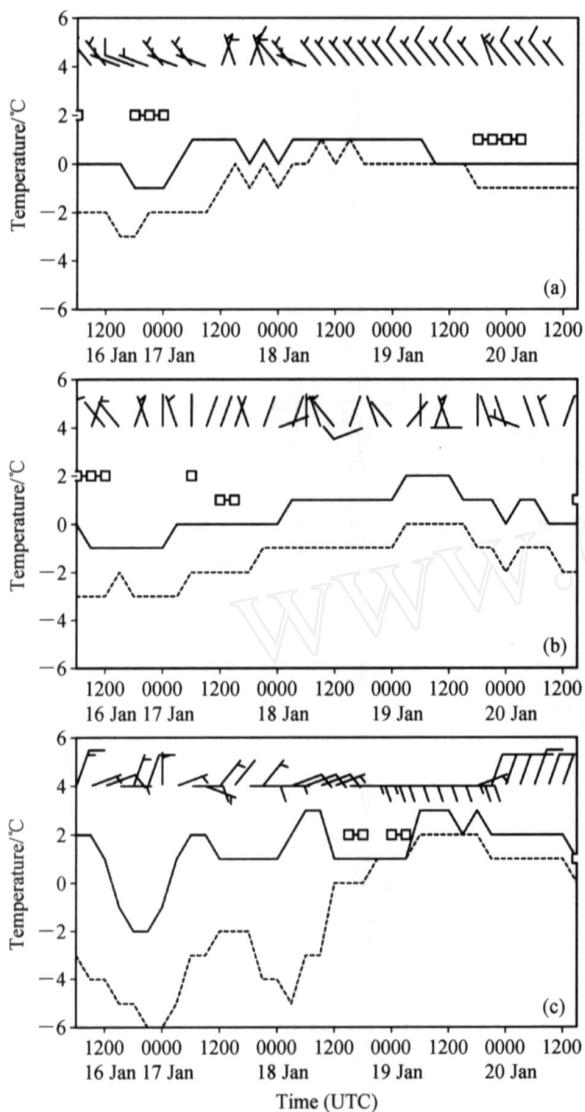


图 11 2008 年 1 月 17 ~ 20 日的地面温度 (实线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、露点温度 (虚线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的演变: (a) 长沙; (b) 郴州; (c) 南京。小方框表示降水类型, 等于 1 为冻雨, 等于 2 为降雪

Fig. 11 The surface temperature (solid line, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), dew-point temperature (dashed line, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from 17 to 20 Jan 2008: (a) Changsha; (b) Chenzhou; (c) Nanjing. Square is type of precipitation, 1 and 2 represent freezing rain and snow, respectively

12d) 的比较 (图 12b 和 12c) 也很有意思。可以注意到, 长沙有逆温层和暖鼻存在, 但南京的探空曲线上虽有逆温层, 但逆温层均在 0  $^{\circ}\text{C}$  以下 (即无暖鼻存在), 因此没有雪花融化再冻结的问题, 难于出现冻雨。另外, 如逆温层所在高度太高, 暖层太高, 也很难出现冻雨, 大量的过冷却

水存在于空中, 可能反而会对飞机的航行构成威胁, 出现飞机结冰等重大事故。

## 5 一类我国南方持续性冻雨的多尺度系统概念物理模型

对于冻雨的发生可能存在多种类型的模型, 一次个例不可能包罗万象。本文给出的是一类东亚持续性冻雨的模型 (图 13)。图 13a 和 13b 分别给出了 200 和 500 hPa 的环流, 图 13c 和 13d 分别给出了 850 和 1 000 hPa 的流场。可以看到, 在图 13b 中, 反映了阻塞高压稳定, 副热带高压偏北, 西风带北支槽与南支槽相互迭加, 且这种稳定的形势在图 13a 中也有反映, 表明了系统的深厚。图 13c 反映了冷暖空气频繁交绥于长江流域, 形成准静止锋这一在冬季较少稳定出现于我国东部的天气系统。另外, 表明了非常浅薄的冷空气垫 (图 13d) 锁于来自南方的暖空气之下 (图 13c)。此外, 不同类型的降水对地面或地物的温度非常敏感, 冻雨区见于低于 0  $^{\circ}\text{C}$  处, 以及出现冻雨时的温度垂直廓线, 多数应有逆温层存在, 且有适当高度与厚度的暖层 (高于 0  $^{\circ}\text{C}$  的区域) 相配合, 近地面冷层不可太厚等。关于冻雨出现的更直接原因, 请参阅文献 [19] 的图 13。本文中图 13 给出的这次雨雪冰冻的环境场和多尺度影响系统的物理模型, 在一定程度上可以说明此次冻雨为何多次反复出现, 引发严重灾害的原因。

## 6 结论与讨论

本文对 2008 年 1 月 10 日 ~ 2 月 2 日期间发生于中国南方的低温雨雪冰冻灾害天气作了分析。这场大范围持久的雨雪冰冻灾害天气, 尤其是它造成的影响为我国数十年来所罕见。已有的结果表明, 造成这次严重冰冻灾害的主要原因为:

(1) 中纬度大尺度环流的持续异常。这次雨雪冰冻灾害大体包含了 4 次天气过程。在 4 次过程中, 基本的环流型变化不大, 即从 1 月 10 日 ~ 2 月 2 日的 20 余天中中高纬度西风带上始终维持了很明显的  $\alpha$  型阻塞形势。平均而言北半球的阻塞高压维持约 5 天左右, 阻高如此稳定是不多见的。在阻高东西两侧的低压区均有利于冷空气持

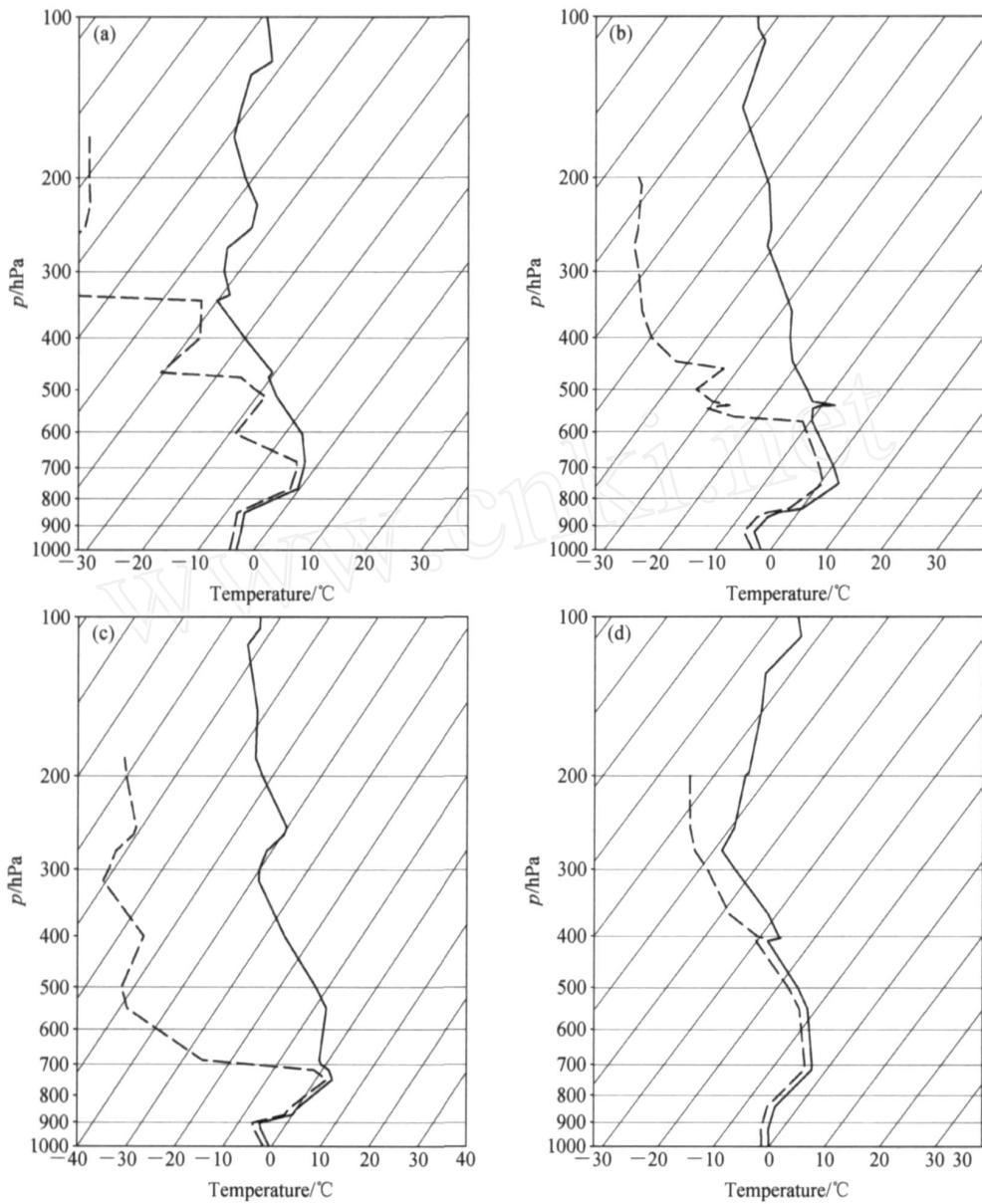


图 12 2008 年初雨雪冰冻天气第 2 阶段的探空曲线：(a) 长沙，17 日 0000 UTC；(b) 长沙，20 日 0000 UTC；(c) 郴州，17 日 1200 UTC；(d) 南京，19 日 0000 UTC。实线为温度，虚线为露点温度

Fig. 12 Sounding on skew  $T$ -log  $P$  diagrams in the second stage of Jan 2008: (a) 0000 UTC 17, Changsha; (b) 0000 UTC 20, Changsha; (c) 1200 UTC 17, Chenzhou; (d) 0000 UTC 19, Nanjing. Solid and dashed lines denote temperature and dew-point temperature, respectively

续地反复影响我国。又由于在这一时期副热带高压偏西偏北（而不像平均状况，冬季副高偏东偏南），致使在东亚中纬度地区，阻高的东侧 500 hPa 上出现了横槽，而不是如平均状况那样冬季经常见到的东亚大槽（槽线位于东亚沿岸）。横槽背景下有利于冷空气入侵中国大陆，而不是象东亚大槽背景下，有利于强冷空气长驱直入南进，

甚至到达海上激发温带爆发气旋，引发低纬度地区的强烈天气及海洋上的灾害性天气。这次过程的影响系统不但范围广，而且较为深厚，在 200 hPa 上均可见到上述西西伯利亚阻高以及东亚横槽的存在，且其温度槽落后于高度槽，预示该横槽将发展和维持。至于上述大气环流持续异常是受何种外强迫及内强迫因子的影响可参阅文献

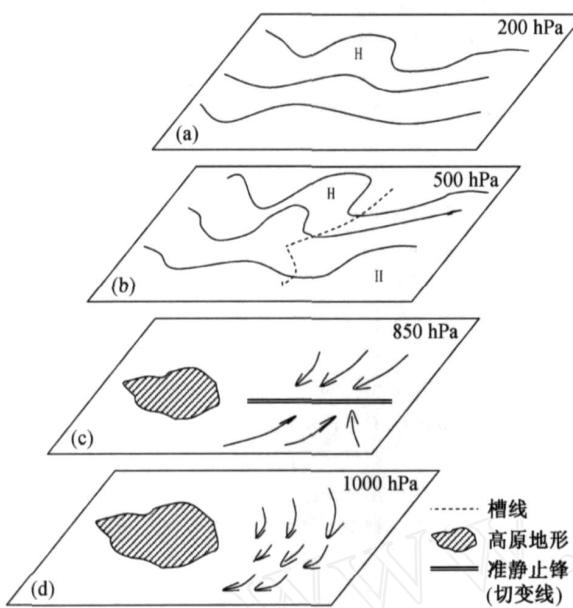


图 13 一类我国南方持续性冻雨的多尺度系统物理模型  
Fig. 13 One kind of multi-scale physical model for sustaining freezing rain in southern China

[20~22] 等。

(2) 西风带上的南支槽(波动)异常活跃, 并长期停滞于中南半岛和南中国海等处。而不是如多年冬季平均状况那样, 南支槽移动较快, 或不太活跃, 仅引发华南地区的“雨”。本例中的南支槽作为低纬度的系统向中国大陆输送了大量的水汽, 为雨雪的发生提供了充足的“原料”。还要注意的是在西风带的上游里海、咸海也有较深的低压槽, 甚至有切断低压维持, 更远者可追溯到地中海至北非一带的低槽, 这些上游正涡度大值区的维持或向东移动无疑对影响我国南支槽的活动和维持有利。

(3) 有一条近乎东西走向的准静止锋, 长期停留于长江流域及江南一带, 这是具体影响此次我国南方雨雪低温的天气尺度系统。从形态上看这类准静止锋与初夏长江流域的梅雨锋较为相似, 但动力热力性质有较大区别, 其斜压性比梅雨锋要强。这次冬季的准静止锋能较长时间的稳定维持, 也许是由于北方干冷空气与南方的暖湿空气势均力敌持续交绥的结果。在国外冻雨期间, 多以温带气旋, 尤其是暖锋的发展为主, 而本例中以及中国大量的个例中, 暖锋的表现很不明显。因此, 我们应对这类弱冷锋以及准静止锋(或切

变线) 给予更多的注意。

(4) 温度垂直廓线与暖鼻的分布。此次雨雪冰冻过程中, 我们已经注意到, 主要的冻雨区集中于贵州, 其次为湖南。对探空资料的分析已揭示, 在对流层低层有逆温层长期存在, 逆温层的作用非常重要, 但不是唯一条件。此外, 同时还必须有“暖鼻”相配合。没有暖鼻, 上层的雪花下落过程中难于融化, 可以一直降落到地面。但是, 在冬季低层出现毛毛细雨的情况下, 没有暖层也可能有冻雨, 当然难以达到此次过程的严重程度。

(5) 各种微物理过程、微气象因素的作用及反馈的影响。各种降水(尤其是固态降水)在上述逆温层中及暖层中融化后, 会引起云滴、雨滴的碰并, 自动转换, 以及由于相变引起冷却, 反过来会对暖层产生负反馈的影响。此外, 温度日变化对逆温层也有影响, 白天午后升温, 夜间凌晨降温。因此, 要对逆温层和暖层作为一个动态的随时间而变的结构特征来加以考虑。只看一个时刻的探空尚难以对未来的变化作出定论。近地面及地物的温度对冻雨的产生也是至关重要。降水物经逆温层和暖层而成为过冷却水下降时, 如地面温度太低, 则其上冷气层气温也低, 一旦低于0 $^{\circ}$ C, 则在进入冷层后, 立即冻结, 降落地面时为固态降水, 无法形成冻雨。地面温度以0~ -3 $^{\circ}$ C为宜, 温度露点差以<2 $^{\circ}$ C更佳。锋区侧向环流会抑制锋生的作用, 产生负反馈等影响, 而地面冻结升温的负反馈可能使地面温度增加。这些都可能改变冻雨形成的环境条件。因此, 上述微物理过程和微气象过程会随时随地变化, 使用的资料不能停留在某一时刻, 一成不变。

(6) 上述条件表明, 2008年初我国南方雨雪冰冻灾害天气是在各种条件均非常有利的情况下发生的, 属于多种尺度系统的影响及其相互作用。因此, 这种持续反复的严重冻雨并不是每年都会出现。在上述分析的基础上, 我们提出了一类东亚持续性冻雨的多尺度系统概念模型, 另, 有关准静止锋与层结结构等更详细的分析见文献[19]。

(7) 要改进预报, 特别是要事先预报出上述冻雨发生的有利条件, 确是一件比较困难的事情, 因此, 为了更深入地探讨, 有许多问题还需要进

一步弄清。以下就其问题作一讨论：

关于雨雪冰冻灾害性天气的持续性问题。应弄清中纬度阻塞高压的建立、维持与崩溃的机理，以及西风带南支波动的发展及其影响。弄清静止锋的动力热力结构与锋生的维持机制，以提高 10 ~ 30 d 延伸预报的精度。

关于冰冻灾害的精细预报问题。要较准确地预报出温度垂直廓线，逆温层及暖脊的结构与时空变化特征。需发展适合于我国冬季的云微物理过程的参数化方案。发展精细的陆面过程模式，以更好地预报地面温度及描写过冷却水冻结时对地面温度的反馈影响，还要进一步开展我国冻雨形成机理的深入研究。

目前世界上正在开展的定量降水预报 (Quantitative Precipitation Forecast) 是一项新的比较困难的任务。然而，即使这样的预报取得成功，仍然不能完全满足冻雨预报的需求。因为它需要对降水分类作出具体的预报。是雨？雪？雨加雪？还是冻雨？因此，在发展定量降水预报 (QPF) 的同时，应大力开展降水的分类预报。

此外，从防灾减灾的角度来考虑，更需要知道的是如果冻雨发生，是一般的冻雨，还是多次反复出现的冻雨？地面及地物上是否结冰以及冰层的厚度？对不同行业分别会造成多大的影响？以对其灾害的严重程度作出评估，且最好在事前作出预评估。这不仅涉及到科学本身，还涉及社会和经济发展的诸多问题，是更为艰巨的任务，但这正是今后需要努力的方向。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Jia Yiqin , Zhao Sixiong. A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean. *Advances in Atmospheric Sciences* , 1994 , **11** ( 3 ) : 251 ~ 270
- [ 2 ] Wangrongchai A , Zhao Sixiong , Zeng Qingcun. A case study of a strong tropical disturbance and record heavy rainfall in Hat Yai , Thailand during the winter monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences* , 2005 , **22** ( 3 ) : 436 ~ 450.
- [ 3 ] 赵思雄，曾庆存. 东亚强寒潮-冷涌越过赤道并引发南半球热带气旋和强降水的个例研究. 气候与环境研究, 2005, **10** (3) : 507 ~ 525
- Zhao Sixiong , Zeng Qingcun. A study of east Asia strong cold wave—surge crossing equator and influencing the development of tropical cyclone and heavy rainfall in the southern hemisphere. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2005 , **10** ( 3 ) : 507 ~ 525
- [ 4 ] 赵思雄，孙建华，陈红，等. 北京“12·7”降雪过程的分析研究. 气候与环境研究. 2002 , **7** ( 1 ) : 7 ~ 21
- Zhao Sixiong , Sun Jianhua , Chen Hong , et al. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2002 , **7** ( 1 ) : 7 ~ 21
- [ 5 ] 孙建华，赵思雄. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究. 气候与环境研究，2003，**8** (4) : 387 ~ 401
- Sun Jianhua , Zhao Sixiong. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2003 , **8** ( 4 ) : 387 ~ 401
- [ 6 ] 黄翠银，沈新勇，孙建华，等. 一次由海岸锋引发山东半岛暴雪过程的研究. 气候与环境研究, 2008, **13** (4) : 567 ~ 583
- Huang Cuiyin , Shen Xinyong , Sun Jianhua , et al. Analysis of coastal front snowfall in Shandong Peninsula. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2008 , **13** ( 4 ) : 567 ~ 583
- [ 7 ] 叶茵，杜小玲，严小冬. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析. 贵州气象, 2007, **31** (6) : 11 ~ 13
- Ye Yin , Du Xiaoling , Yan Xiaodong. The spatial and temporal distribution of freezing rain at Guizhou and its circulations. *Journal of Guizhou Meteorology* (in Chinese) , 2007 , **31** (6) : 11 ~ 13
- [ 8 ] 何玉龙，黄建菲，吉廷艳. 贵阳降雪和凝冻天气的大气层结特征. 贵州气象, 2007, **31** (4) : 12 ~ 13
- He Yulong , Huang Jianfei , Ji Tingyan. The features of stratification for the freezing rain and snow at Guiyang. *Journal of Guizhou Meteorology* (in Chinese) , 2007 , **31** (4) : 12 ~ 13
- [ 9 ] 杨向东. 桃仙机场一次冻雨天气分析. 辽宁气象, 1999 , (2) , 11 ~ 12
- Yang Xiangdong. The diagnosis on a freezing rain at Tiaoxian airport. *Liaoning Meteorological Quarterly* (in Chinese) , 1999 , (2) , 11 ~ 12
- [ 10 ] 吕胜辉，王积国，邱菊. 天津机场地区冻雨天气分析. 气象科技, 2004 , **32** (6) : 456 ~ 460
- Lü Shenghui , Wang Jiguo , Qiu Ju. Analysis of freezing rains at Tianjin airport. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese) , 2004 , **32** (6) : 456 ~ 460
- [ 11 ] Root C J. Ice storm in Illinois. *Mon. Wea. Rev.* , 1912 , **40** ( 3 ) : 373 ~ 384
- [ 12 ] Stewart R E. Precipitation types in the transition region of winter storms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1992 , **73** (3) : 287 ~ 296
- [ 13 ] Zerr R J. Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor.* , 1997 , **36** : 1647 ~ 1661

- [14] Stewart R E, King P. Freezing precipitation in winter storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1270~1279
- [15] Bernstein B C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. *Wea. Forecasting*, 2000, **15**: 485~507
- [16] Rauber R M, Ramamurthy M K, Tokay A. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's Day ice storm. *Wea. Forecasting*, 1994, **9**: 183~208
- [17] Houston T G, Changnon S A. Freezing rain event: A major weather hazard in the conterminous US. *Nat. Hazards*, 2007, **40**: 485~494
- [18] 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 556~566  
Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 556~566
- [19] 孙建华, 赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 368~384  
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008. *Climatic and Envi-*
- [20] 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 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. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 419~433  
Bueh Cholao, Ji Liren, Shi Ning. 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. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 419~433
- [21] 纪立人, 布和朝鲁, 施宁, 等. 2008年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 III: 青藏高压-孟加拉湾气压槽. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 446~458  
Ji Liren, Bueh Cholao, Shi Ning, et al. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part III: Pressure trough over the Tibetan Plateau/Bay of Bengal. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 446~458
- [22] 杨辉, 李崇银. 冬季北极涛动的影响分析. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 395~404  
Yang Hui, Li Chongyin. Influence of Arctic Oscillation on temperature and precipitation in winter. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 395~404