

2008 年低温雨雪天气扰动 能量的积累和传播

葛 非¹ 肖天贵^{1,2} 金荣花³ 陈伟斌¹ 唐玮玮⁴

(1. 成都信息工程学院大气科学系, 610225; 2. 南京信息工程大学;
3. 国家气象中心; 4. 重庆市环境科学研究院)

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 通过波包传播的诊断方法, 对 2008 年 1 月我国南方地区大范围低温雨雪天气期间波包传播和积累进行了分析与研究。分析表明, 中低层 500hPa 和 700hPa 高度场的波包传播特征能够较好地反映期间出现的 4 次低温雨雪天气过程。4 次雨雪过程基本上产生于波包扰动能量积累的高值时段或处于低压系统持续稳定阶段, 雨雪天气处于波包大值区控制下。波包值的经向和纬向传播特征表明 2008 年 1 月我国南方地区持续低温雨雪天气过程, 主要受到青藏高原南缘系统异常活跃的影响, 南支槽活动频繁有利于来自印度洋和孟加拉湾的暖湿气流沿云贵高原不断向我国输送, 继而为我国长江中下游以及其南部地区低温雨雪天气提供了充足的水汽来源。偏北路径的冷空气, 副高西南侧偏东气流的扰动能量的传播和积累, 在波包传播图上都有一定的反映。该研究对进一步利用波包传播图预报天气过程提供了有意义的一种思路。

关键词: 波包传播诊断 低温雨雪天气 扰动能量

Propagation and Accumulation of Perturbation Energy in the Severe Cold Surge, Ice-snow and Frozen Disaster in South China During January 2008

Ge Fei¹ Xiao Tianguai^{1,2} Jin Ronghua³ Chen Weibin¹ Tang Weiwei⁴

(1. Chengdu Institute of Information Technology, 610225;
2. Nanjing University of Information Science and Technology;
3. China Meteorological Center; 4. Chongqing Institute of Environmental Science)

Abstract: By using the NCEP/NCAR reanalysis data and the diagnosis analysis method of wave packet propagation (WPD), wave packet propagation and accumulation during the extreme low

temperature, heavy snowstorm and frost disasters occurred in South China were analyzed. Results show that the characteristic of wave packet propagation at 500 hPa and 700 hPa can better display four processes of rainstorm weather. Accumulated perturbation energy has been maintaining high value when these four processes occur. Frozen weather appears in the high value region of wave packet. The characteristic of wave packet propagation shows that the persistent processes of severe weathers with cold surge, ice-snow and frozen rain on January 2008 are influenced by the Indian and Burma trough (IBT) in the south side of the Qinghai-Xizang Plateau. Because it is quite active, it also favors to the moisture transportation to China along the Yunnan-Guizhou Plateau from the Indian Ocean and Bay of Bengal. Perturbation energies of cold air in the northward path and in the eastward side of western Pacific subtropical high (WPSTH) are certainly reflected on the wave-packet map. It indicates that the diagnosis analysis of wave packet propagation (WPD) is meaningful to predict the weather process.

Key Words: wave-packet propagation (WPD) severe cold surge ice-snow weather perturbation energy

引 言

2008 年 1 月 10 日至 2 月初,我国南方地区出现 50 年一遇大范围持续低温雨雪冰冻天气,期间南方地区气温异常偏低、降水异常偏多。1 月,全国平均气温为 -6.6°C ,较常年同期(-5.9°C)偏低 0.7°C ,为 1986 年以来最低值。江淮、江汉、江南、华南大部以及云南西部累积降水量达 $50\sim 100\text{mm}$,华南中部、苏皖南部等地超过 100mm 。低温雨雪冰冻灾害造成的损失极为严重,受灾人口过亿,直接经济损失超过 1000 亿元,湖南、湖北、江西、安徽、贵州等地灾情尤其严重,很多地区为 50 年一遇,部分地区百年一遇,属历史罕见^[1-2]。许多专家研究表明^[1-4],这次气象灾害具有范围广、强度大、持续时间长、影响重的特点。其形成与 La Nina 的气候背景、强东亚冬季风的环流背景、西太平洋副高异常偏北、青藏高原南支槽系统的异常活跃以及对流层下部逆温层异常偏强等多种影响有关。进一步的研究表明^[4],这次持续低温雨雪灾害大体上经历了 4 次雨雪天气过程,持续不断的扰动系统的影响也是这次冷害天

气持续的重要原因。因此,研究其扰动系统的能量积累和演化特征也是一项有意义的工作。

围绕扰动能量传播的研究工作一直是气象研究中的重要内容。叶笃正^[5]早在 1940 年代就发表了正压 Rossby 波的能量频散理论;曾庆存^[6-7]使用非线性理论方法全面而系统地阐述了瞬变波的波包理论,同时研究了瞬变波的能量传播问题;缪锦海^[8]宋燕等^[9]将波包传播理论用于天气和气候诊断,得到江淮梅雨出入梅和副高北跳与波包传播的关系。但是直接利用波包理论和实际观测资料研究具体天气过程变化的成果还不多见。故此,本文应用缪锦海、肖天贵等^[8]提出的波包传播的诊断方法(WPD)和 2008 年 1 月和 2 月的 NCEP/NCAR 再分析资料,对南方地区这次极端的持续低温、雨雪、冰冻天气过程期间的扰动能量的积累和传播特征进行计算和分析。

1 资料及计算方法

所用资料为 2008 年 1—2 月的 NCEP/NCAR 位势高度场再分析逐日网格点资料,

水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。波包传播的诊断方法(WPD)的基本思路概述如下^[8-10]。

波包传播问题是研究窄带信号振幅随时间和空间的变化,也就是振幅随时间变化的空间传播问题。由于波能的传播随着波包传播而移动,因而波包传播的诊断方法为研究波能传播对各个系统的发展变化提供了较为定量的诊断方法。气象资料在一定条件下可以看成许多波动的组合,如:

$$P(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(x, y, z, t) \cos(k_i x + l_i y + m_i z + \omega_i t + \phi)$$

波动的能量是沿波动包络传播的。各波振幅 $A_i(x, y, z, t)$ 最大值的移动表示了波包的移动,也表示了这一波动的能量传播。采用差分滤波方法,得到位势高度场的高频波窄带信号 $P(x, y, z, t)$, 然后对窄带信号进行希尔伯特变换 $\hat{P}_i(x, y, z, t)$, 最后求出其解析信号 $P_c(x, y, z, t) = P(x, y, z, t) + i\hat{P}_i(x, y, z, t)$ 的振幅 $A(x, y, z, t)$, 即是所求窄带信号的波包值。波包值的大小代表了扰动能量的强弱,波包值的变化代表了扰动能量的变化和传播。

2 低温雨雪期间的环流形势及扰动特征

图 1 为 2008 年 1 月 11—31 日 500hPa 平均高度场及其高度距平场,可见中高纬度地区西高东低和东亚中低纬地区西低东高的环流形势非常显著(图 1a, b),乌拉尔山至贝加尔湖地区阻塞高压稳定,有利于地面冷空气在蒙古到我国东北堆积。而由于大气环流经向度加大导致的北支锋区南压并使高度场大幅下降,使东亚中低纬地区高度场呈东高西低分布,副热带锋区较多年同期异常强盛。西太平洋副热带高压异常偏北、偏强,强大的副高造成冷暖空气交汇作用加剧,阻塞高压南部的巴尔喀什湖冷涡则不断有分裂波动经

高原东移与从青藏高原南缘移过的副热带急流扰动同位相叠加,使南支槽加深,形成 $40 \sim 100^\circ\text{E}$ 之间稳定的负距平区,槽前西南气流将来自印度洋和孟加拉湾的水汽沿云贵高原向我国输送,直达长江中下游地区^[12-15]。这种环流形势下,冷空气从西伯利亚地区连续不断地入侵我国,并与强大的副高配合,为我国长江中下游及其南部地区出现低温强降雪天气提供了充足的条件^[16],也是 2008 年 1 月我国南方地区低温冷冻天气的环流背景。

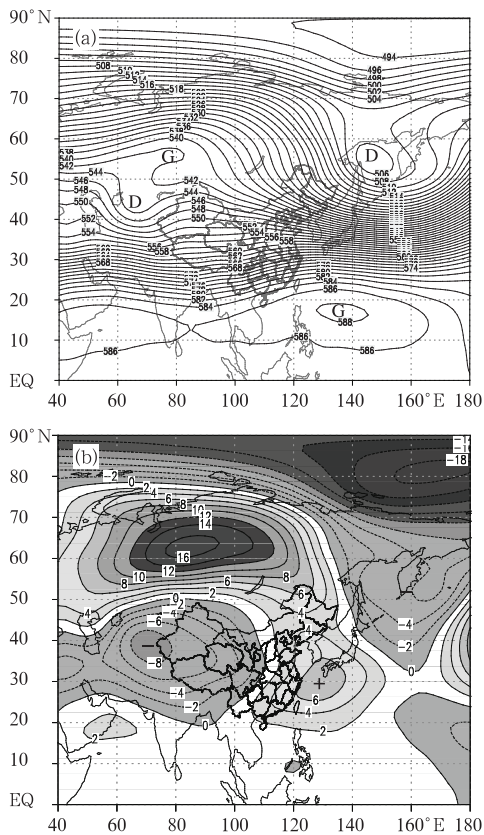


图 1 2008 年 1 月 11—31 日 500hPa 平均高度场(a),平均高度场距平(b), (单位:10gpm)

图 2 是长江中下游地区 500hPa 和 700hPa 平均高度值 1 月的逐日距平值演化曲线图,比较清晰地反映了 1 月持续低温冷冻天气过程中高度场的 4 次扰动的变化特

征。可以看出,在 2008 年 1 月中下旬,长江中下游地区中低层的高度场有明显的下降并扰动变化,500hPa 和 700hPa 的扰动变化趋势基本一致。由图 2 可见,1 月 11 日到 2 月 3 日 500hPa 和 700hPa 高度场均呈明显下降趋势,表明长江中下游及其南部地区不断受到低值系统的影响,而期间又有 4 次明显的高度场扰动过程。第一次扰动过程是 1 月 7—16 日左右,7 日以后,高度场正距平值由 80gpm 开始迅速减小,到 11 日 500hPa 图上距平值为 10gpm,700hPa 图上距平值为 -10gpm。随后 700hPa 图上距平值开始增大,至 16 日,高度场距平值又达到一个相对大值,500hPa 图上为 30gpm,700hPa 图上为 40gpm。可见这一过程中长江中下游地区受低值扰动系统影响并且气压振荡升高。第二次扰动过程在 1 月 16—23 日左右,其间经历了高度场逐步降低,低值系统影响并逐步升

压的过程,16—21 日 500hPa 和 700hPa 上的高度扰动分别为 -70 和 -80gpm,随后到 23 日扰动达到 50gpm 左右的峰值。第三次扰动过程是 1 月 26 日至 2 月 2 日左右,此次过程中基本上是低压系统控制,整个地区的高度场都持续偏低,但其中还是可以看出 1 月 26—29 日和 1 月 31 日至 2 月 2 日两次扰动过程的变化,只是这两次扰动过程相隔时间较近,并且是低压系统比较稳定的状况下的扰动过程。考虑高度场扰动和低值系统的影响,结合 1 月 11 日到 2 月 3 日的强降温雨雪天气过程^[1]的比较分析,我们认为 1 月 11 日到 2 月 3 日期间出现的低温雨雪灾害过程是与上述几次扰动过程的发展影响有关的,而扰动过程中扰动能量的积累和传播影响则可能是雨雪灾害天气形成的重要原因。

3 低温雨雪期间 4 次扰动过程中平均波能变化和分布特征

波能传播理论表明,波包值的大小代表了扰动能量的强弱,波包值的增大和减小表示了扰动能量的积累和释放减弱^[11]。图 3 为 2008 年 1 月长江中下游地区 500hPa 和 700hPa 的波包平均值变化曲线图。图中可见,500hPa 图上,在第一次扰动过程中,8 日左右波包值开始增强,扰动能量逐步积累,到 11 日波包值达到峰值,之后波包值逐渐减小,扰动能量逐步释放,至 17 日波包值减弱到最小,这个过程在 700hPa 图上的反映也十分明显,11 日波包值达到峰值以后,能量逐步释放,17 日左右减弱到一个相对最小值,期间 10—16 日长江中下游地区出现了大范围的强降温雨雪天气。17 日以后,波包值又逐步增大,至 23 日前后达到峰值后又逐步减弱,18—22 日出现了雨雪天气,但雨雪期间波包值一直维持在较低位相,这显然与高度场扰动所处的位相有关。25—29 日和 31

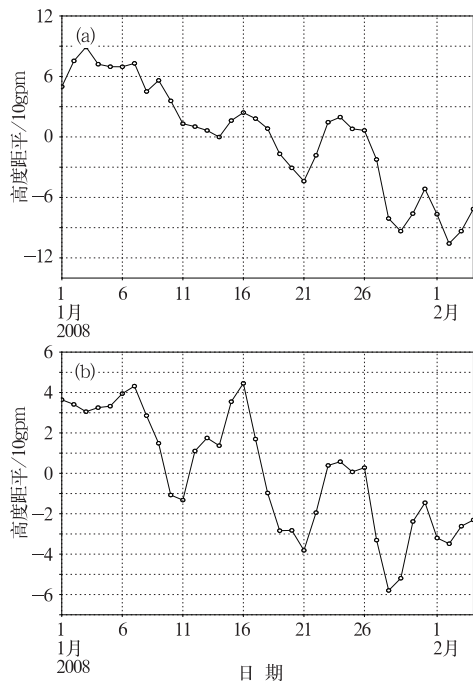


图 2 长江中下游 1 月份高度场距平曲线图
(a)500hPa, (b)700hPa, (单位:10gpm)

日至 2 月 2 日的波包变化过程表明,波包值逐渐增强且维持在较高位相时产生雨雪天气过程,过程结束后波包值逐渐减弱,能量释放。上述分析表明,在高值系统向低值系统

的转化过程中,扰动能量积累后的释放阶段可能会产生雨雪天气,而在低压系统持续稳定时,雨雪天气可能产生在波包值较低位相维持时的阶段。

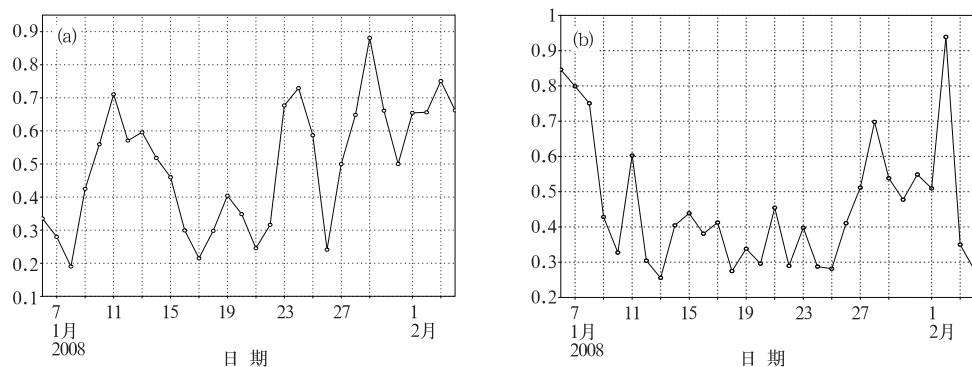


图 3 长江中下游地区 1 月份波包平均值曲线图

(a)500hPa, (b)700hPa

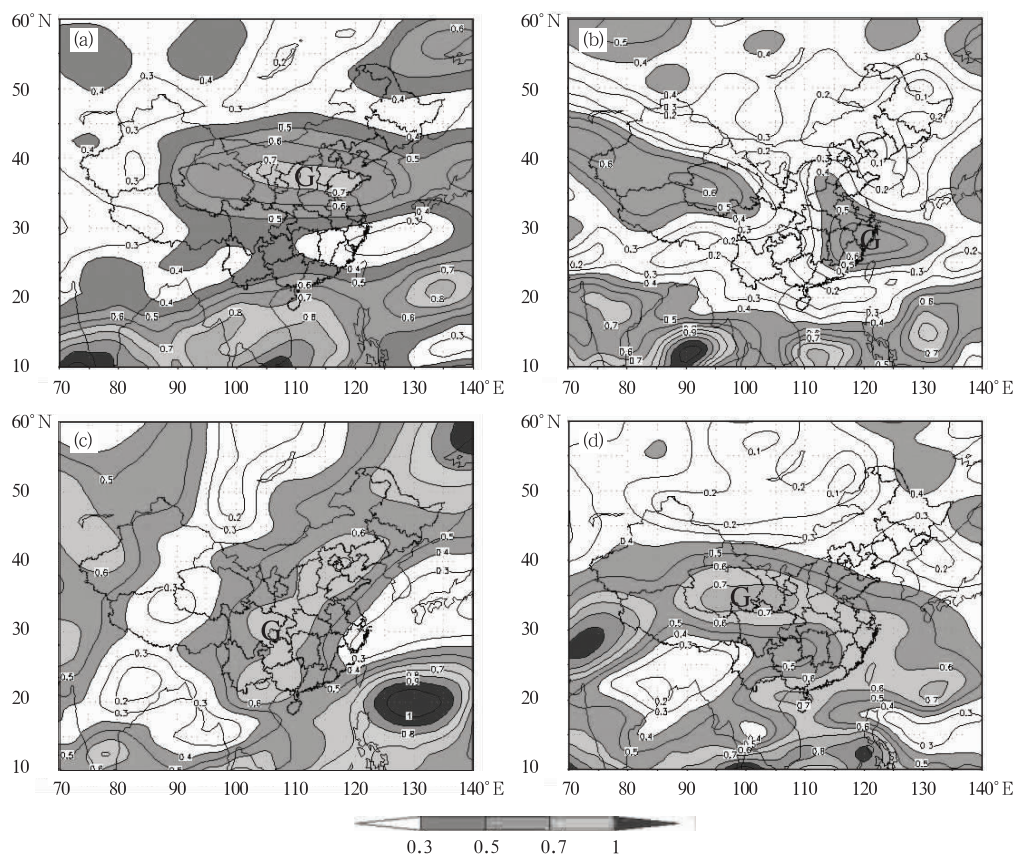


图 4 2008 年 1 月低温雨雪期间 4 次雨雪灾害过程的 500hPa 高度场平均波包图

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

波包值的意义表明,高频波波包分布图上的强中心常与强扰动的低压、低槽发展相联系,而波包分布图上的低值区常与扰动强度较小的高压相联系^[9,17]。根据图2、图3的分析我们确定了低温雨雪期间的4个雨雪天气时段,即1月10—16日、18—22日、25—29日、1月31日至2月2日,并且计算了相应时段的波包平均图,同时研究其分布特征,如图4、图5所示。

3.1 500hPa 高度场波包分布特征

由图4a可见,1月10—16日,我国西北、华北地区都处于波包的大值区,反映了冷空气可从西伯利亚地区连续不断地自西北方向入侵我国。低纬印度洋和中南半岛有两个明显的波包大值中心,波包值有着明显的纬向分布。湖北、湖南、安徽、江苏等长江中下游地区处于波包大值区的控制之下,扰动能量不断积累增强。此时黄淮南部及其以南地区先后出现降雨、雨夹雪转降雪天气,长江中下游大部分地区连续发生雨雪天气,部分地方出现大雪、暴雪。图4b上,1月18—22日中亚巴尔喀什湖到我国西北地区有一个东西走向的波包强中心,反映了巴尔喀什湖冷空气可经高原沿西北路径影响我国。印度洋和孟加拉湾地区被波包大值区所控制,有利于西南暖湿气流与西北路径的冷空气在我国长江中下游地区交汇,此时,湖北东部、湖南北部、江苏、安徽、江西、浙江都处于波包大值区,产生第二次连续性雨雪天气。图4c表示,26—29日期间,我国除西北地区外,大部分地区被波包高值区所控制。西太平洋上存在一个强波包中心,可能反映了2008年1月西太平洋副高异常偏北(脊线位置平均达到 17°N ,远远高于多年平均位置 13°N)^[12],导致副高偏东暖湿气流的影响。此时,长江中下游地区处于稳定的波包大值区,加之冷空气频繁南下,又产生了第三次大范围的雨雪

天气。2008年1月31日至2月2日,我国绝大部分地区处于波包大值区控制,出现了第四次雨雪天气过程。

3.2 700hPa 高度场波包分布特征

低层的波包大值区分布与中层基本一致,即在这四次过程期间,长江中下游地区都处于波包的大值区控制之内(见图5)。青藏高原南部波包大值区稳定,表明南支槽活动异常频繁,同时充足的暖湿气流从印度洋和孟加拉湾源源不断地向我国输送。从700hPa波包分布图上同样可以看出,第一次过程(图5a所示),青藏高原波包大值中心向东发展,南支槽系统稳定,我国西北、华北直至整个南方地区都处在波包大值区。此次过程中,安徽中北部、江苏北部、湖北、湖南等地区出现大到暴雪,湖南中南部、贵州西部和南部出现冻雨。第二次过程(图5b所示),在贝加尔湖和蒙古国的波包大值中心区向南发展,范围不断扩大,导致来自西伯利亚的冷空气连续侵入我国并与南支槽所带来的水汽汇合,华北、华南等地区被波包大值区持续控制,进而发生大范围雨雪冰冻天气过程。此次过程在整个低温冷害天气持续期间影响最为广泛,湖北、河南、安徽、江苏、湖南等地区出现了大到暴雪,贵州全省和广西东北部出现了冻雨天气。第三次过程强度最大,湖北东部、安徽、江苏和浙江北部出现暴雪,28日积雪深度达20~45cm;从图5c可以看出,西太平洋的波包大值中心与印度洋孟加拉湾的波包大值中心分别向西北和东北方向延伸,副高边缘偏东气流与南支槽共同发展,两个波包大值区在我国长江中下游地区汇合,从而产生了第三次雨雪天气过程。第四次过程(图5d),波包大值中心位于湖南、江西、江苏、浙江四省范围内,强中心不断发展波包大值区控制范围加大,我国南方大部分地区出现了第四次雨雪天气过程。

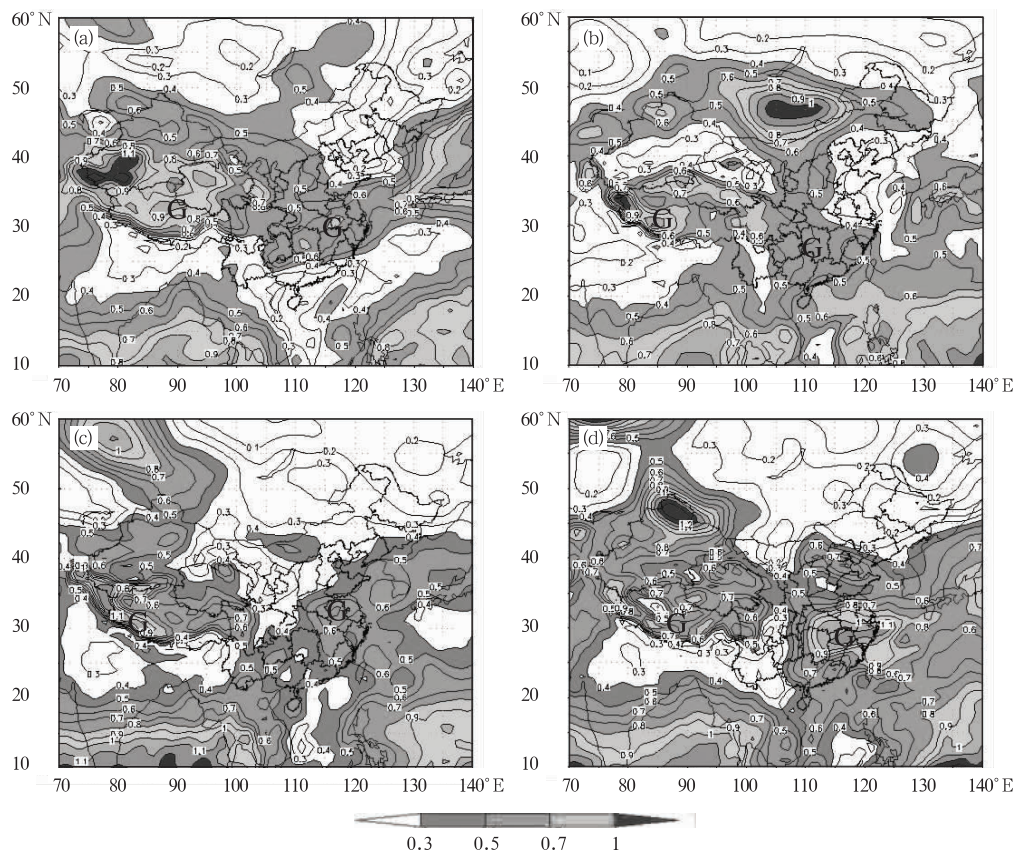


图 5 2008 年 1 月低温雨雪期间 4 次雨雪灾害过程的 700hPa 高度场平均波包图

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

图 4 和图 5 的波包分布特征表明,在四次低温雨雪天气出现的过程中,绝大部分发生强降雪(雨)的地区都是波包大值所控制的地区,这与文献[1]中所得出的发生强降雪(雨)的地区基本一致。中低层的高度场波包分布可以反映出这 4 次过程中扰动能量的变化,其波包分布能更清晰地反映出大气能量即扰动能量的变化。

3.3 4 次雨雪过程中降水量与波包分布特征的关系

图 6 是 2008 年 1 月低温雨雪期间 4 次雨雪灾害过程中降水量 $\geq 20\text{mm}$ 的分布图,主要反映了我国南方地区低温雨雪灾害期间

的异常降水情况。在这 4 次低温雨雪过程中,降水量与波包大值区的分布也有着较好的对应关系。由图 6a 可见,第一次过程发生时,降雨(雪)集中(降水量 $\geq 20\text{mm}$)在河南南部、湖北、安徽、江苏、湖南北部等长江中下游地区。同时,在 500hPa 波包分布图(图 4a)和 700hPa 波包分布图(图 5a)中,上述地区一直处于波包大值区的控制之下,扰动能量发展迅速并不断增强,第一次低温雨雪天气过程产生。第二次过程中(如图 6b 所示),降雨(雪)主要集中在河南南部、安徽、江苏、江西北部、湖南中北部等地区,此次过程绝大部分地区的累积降水量达 30mm 以上。而在图 4b、5b 中,波包强中心一直停留在长江

中下游地区以及我国东南部地区,使扰动能量持续积累,我国第二次大范围连续性冰冻雨雪天气产生。第三次和第四次过程的降雨(雪)主要集中在长江中下游地区和华南大部分地区,如图 6c,d 所示,由于这两次过程的间隔时间较短而且强度都相当之大,华南部分地

区的累积降水量达到 80mm 以上,其余地区的累积降水量也达 20~70mm。在波包分布图上,图 4c,d 和图 5c,d,也可以明显看出以上地区的扰动能量有着持续的发展和积累,使我国南方地区长期在波包大值区的范围内,出现了第三次、第四次的雨雪天气过程。

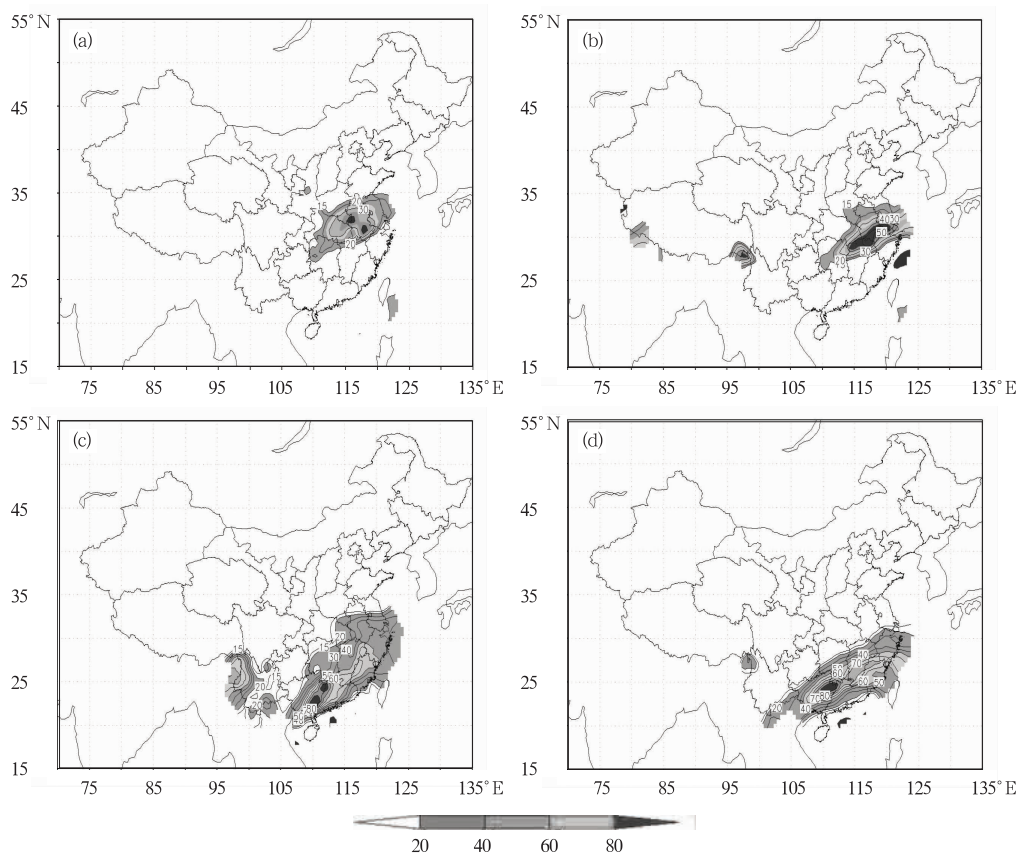


图 6 2008 年 1 月低温雨雪期间 4 次雨雪灾害过程的降水量分布图(降水量 $\geq 20\text{mm}$)

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

由图 6 的降水量分布与图 4 和图 5 的波包分布特征对比可以表明,降水主要集中在波包大值控制的地区。500hPa 和 700hPa 的波包分布特征与实况降水量有着比较明显的对应关系,反映出大气能量的扰动变化对低温雨雪灾害过程的影响。

4 低温雨雪期间扰动波能积累和传播特征

为了进一步研究 2008 年 1 月长江中下游地区发生低温阴雨雪天气的大气扰动能量的传播特征,分别给出 2008 年 1 月 500hPa

和 700hPa 高度场 $27\sim 32^{\circ}\text{N}$ 的时间-经度剖面(图 7a,c)和 $112\sim 117^{\circ}\text{E}$ 的时间-纬度剖面(图 7b,d)。从图 7 中可以明显的看出,沿东西方向出现了 4 个波包强中心,出现的时间分别是 1 月 11 日,1 月 18 日,1 月 26 日和 2 月 1 日,基本与南方地区这 4 次的强降雪过程对应。

如图 7a,1 月 8 日,青藏高原南部地区出现波包强中心,并有东传趋势,10 日传播到 105°E 附近,西太平洋地区亦有波包大值中心西传,同时低纬南海地区波包强烈发展,并向北传播,如图 7b;1 月 10 日前后,东传和西传的波包均传至长江中下游地区,使该区域波包强烈发展,形成同经纬度区域内同时期的波包最强中心,随后扰动能量释放,11 日第一次强降雨(雪)过程爆发。可见这次的雨雪天气的产生包括了高原及其南部地区、

印孟地区以及西太平洋等地区冷暖空气的扰动能量的传播和积累。1 月 16 日,如图 7c,d 所示,高原波包东传,贝加尔湖地区波包发展并积累,18 日扰动能量传播至长江中下游地区,在波包传播图上表现为稳定的波包大值系统,18—22 日长江中下游地区爆发第二次雨雪天气。此后,由于第三次、第四次雨雪天气发生的时间较为接近,如图 7a,b 可以看到,青藏高原南部波包向东传播,西南暖湿气流沿高原南侧不断影响我国,高纬地区波包大值区持续稳定积累,有利于冷空气的堆积。在图 7c,d 中,高原南部波包大值有明显的东传趋势,同样也反映了西南暖湿气流对我国的影响,而在高纬地区波包大值逐渐积累并向南传播,反映了低层的冷空气不断侵入我国。扰动能量不断的积累导致波能的不断增强,高纬的冷空气南下与西南气流交汇的共

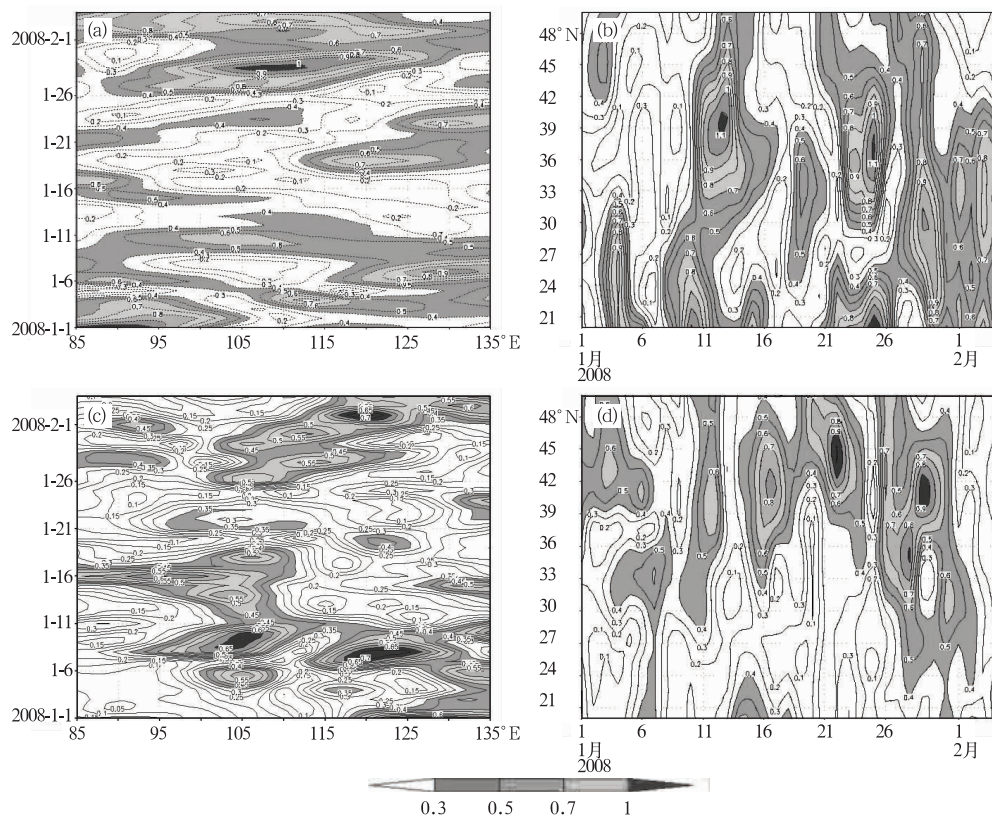


图 7 2008 年 1 月 $27\sim 32^{\circ}\text{N}$ 时间-经度剖面图(a;500hPa,c;700hPa)和 $112\sim 117^{\circ}\text{E}$ 时间-纬度剖面图(b;500hPa,d;700hPa)

同影响,促使了这两次雨雪天气过程的产生。

由此可见,2008年1月中下旬我国南方地区持续低温雨雪天气过程,主要受到青藏高原南缘系统异常活跃的影响,南支槽活动频繁有利于来自印度洋和孟加拉湾的暖湿气流沿云贵高原不断向我国输送,继而为我国长江中下游以及其南部地区低温雨雪天气提供了充足的水汽来源。偏北路径的冷空气,副高西南侧偏东气流的扰动能量的传播和积累,在波包传播图上都有一定的反映。图7表明,低层700hPa的波包传播特征与中层500hPa基本一致。4次雨雪天气过程的产生基本上都有经向或纬向扰动能量向我国南方地区的传播积累,通过波包值的计算和分析比较清晰,有一定预报意义。

5 结论与讨论

通过2008年1月中下旬我国南方地区持续低温雨雪天气期间波包传播和积累特征的讨论,发现中低层500hPa和700hPa高度场的波包传播特征能够较好地反映期间出现的4次低温雨雪天气过程。4次雨雪过程基本上产生于波包扰动能量积累的高值时段或处于低压系统持续稳定阶段,从波包分布图上看,雨雪天气处于波包大值区控制下。从波包的传播特征来看,4次雨雪天气过程中,波包能明显反映出过程的爆发和消亡特征;波包值的经向和纬向传播特征表明影响我国南方地区低温雨雪天气过程的扰动能量主要来自西北气流扰动、南支槽扰动、偏东气流扰动传播,这些扰动不仅提供了扰动能量的积累,也输送了充足的水汽。本次研究为今后利用波包传播及其变化特征来预报天气提供

了较好的指示作用。

致谢:该项工作得到中国气象局高原大气研究所开放基金项目和四川省教育厅科研项目(2005C018)支持。

参考文献

- [1] 王凌,高歌,张强,等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象, 2008, 34(4): 95-100.
- [2] 周宁芳. 全国大部分气温明显偏低南方低温雨雪冰冻肆虐—2008年1月[J]. 气象, 2008, 34(4): 127-131.
- [3] 张勇. 南方低温雨雪灾害历史罕见—2008年1月[J]. 气象, 2008, 34(4): 132-133.
- [4] 2008年1月气候评价[M]. 2008, 国家气候中心.
- [5] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere[J]. J. Meteor. 1949, 6: 1-6.
- [6] 曾庆存. 强迫基流上 Rossby 波包的结构和演变[J]. 中国科学, 1985, 377-395.
- [7] Zeng Qingcun. The evolution of Rossby wave packet in a three dimensional baroclinic atmosphere[J]. J Atmos Sci, 1983, 40: 73-84.
- [8] 缪锦海, 肖天贵, 刘志远. 波包传播诊断的理论基础和计算方法[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 461-467.
- [9] 宋燕, 缪锦海, 据建华. 波包传播特征与西太平洋副热带高压移动的关系[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 577-582.
- [10] 李湘, 肖天贵, 向洋. 1998年东亚夏季风波包传播特征研究[J]. 成都信息工程学院院报, 2007, 22(3): 365-368.
- [11] 缪锦海. 长波不稳定发展的传播与大气环流的季节变化的关系[J]. 气象学报, 1980, 38(3): 269-276.
- [12] 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 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, 2008, 34(4): 102-106.
- [13] 王秀娟, 吕非. 两次冬季寒潮、暴雪天气过程的对比分析[J]. 黑龙江气象, 2004, 2(4): 5-7.
- [14] 华云峰. 2004年12月28日金华暴雪过程诊断分析[J]. 浙江气象, 2005, 27(1): 5-8.
- [15] 刘延英, 吴宝俊. 2, 3月份大雪的物理现象条件[J]. 气象, 1988, 14(3): 25-28.
- [16] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社. 2005: 266, 113-130, 157-163.
- [17] 宋燕, 缪锦海. 阻塞高压形成、消失与波包的传播[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 413-417.