

# 2008年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析

## III: 青藏高原—孟加拉湾气压槽

纪立人<sup>1,2</sup> 布和朝鲁<sup>1,2</sup> 施 宁<sup>3</sup> 谢作威<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所灾害性气候研究与预测中心, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

**摘 要** 针对2008年1月24日~2月2日我国南方地区雨雪低温过程, 分析了其中期演变特征及其可能机理。在亚非副热带地区, Rossby波能量从北非东北侧传播到东亚地区, 引起青藏高原附近气压槽的加深和西太平洋副热带高压的加强及北扩, 并与亚洲北部的高压脊配合, 造成了这次较长时间的雨雪低温过程。东北大西洋和西欧的反气旋式异常环流为亚非副热带急流 Rossby波与欧亚高纬度 Rossby波活动的主要波源区。在对流层上层, 贝加尔湖一带的高压脊在过程之前已形成, 而在这次过程中缓慢减弱, 来自上游 Rossby波能量主要起抵消摩擦耗散的作用。西太平洋副热带高压在偏北位置上维持主要由来自青藏高原和孟加拉湾地区 Rossby波能量的注入所致。亚洲冷高压系统的强度、位置及形态决定了这次我国南方地区低温过程的重要特性。

**关键词** 雨雪低温过程 Rossby波 西太平洋副热带高压

**文章编号** 1006-9585 (2008) 04-0446-13 **中图分类号** P448 **文献标识码** A

## 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

Ji Li-Ren<sup>1,2</sup>, Bueh Cholaw<sup>1,2</sup>, Shi Ning<sup>3</sup>, and Xie Zuo-Wei<sup>1</sup>

1 *Center for Disastrous Climate Research and Prediction, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

**Abstract** This study is aimed at the medium-range evolution features and possible mechanism of the rainy, snowy and cold weather of South China during January 24 to February 2, 2008. In the Asian-African subtropical area, Rossby wave packet emanating from northeast Africa propagates to East Asia. Consequently, it results in the deepening of pressure trough around the Tibetan Plateau/Bay of Bengal as well as the enhancement and northward expansion of western Pacific subtropical high. Cooperating with the invasion of the North Asian high ridge, the trough and subtropical high finally caused a persistent snowy and cold weather process. The anticyclonic anomaly circulations over the northeastern Atlantic/West Europe facilitate a primary wave source for Rossby wave activities both in

**收稿日期** 2008-03-10 收到, 2008-04-01 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项目 IAP07120 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403601

**作者简介** 纪立人, 男, 1933 年出生, 研究员, 主要从事数值天气预报和大气动力学的研究工作。E-mail: jlr@lasg.iap.ac.cn

the subtropical and the mid-and high-latitude region. In the upper troposphere, the high ridge over the Lake Baikal has been formed previously and gradually diminishes during this period. Therefore, the Rossby wave energy replenishment from the upstream mainly counteract against its frictional dissipation. The maintenance of western Pacific subtropical high in its northward position could be mainly attributed to the Rossby wave energy from Tibetan Plateau/Bay of Bengal. The strength, location, and shape of the Asian cold high are responsible for the key features of the low-temperature process.

**Key words** rainy, snowy and cold weather process, Rossby wave, western Pacific subtropical high

## 1 引言

2008 年 1 月 10 日~2 月 2 日, 我国南方地区遭遇了持续性低温、雨雪、冰冻天气的重大灾害事件, 全国 20 多省市受到影响。在这次气象灾害事件中, 接连出现了 4 次强烈灾害天气过程, 分别为 1 月 10~16 日、1 月 18~22 日、1 月 24~29 日以及 1 月 31 日~2 月 2 日。除后两次过程较为相似之外, 其他过程所表现的中期特征有明显的差异。前两次过程已分别在文献 [1, 2] 中加以分析。本文将在中期时间尺度<sup>[3]</sup>上, 针对后两次过程 (1 月 24 日~2 月 2 日), 深入分析沿副热带急流传播的低频 Rossby 波以及西太平洋副热带高压等系统的演变特征, 着重探讨其与这次强烈天气过程的内在关联。

## 2 资料和分析方法

与文献 [1] 一致, 本文所用数据主要为 NCEP/NCAR 逐日再分析资料<sup>[4]</sup>; 利用 Takaya 和 Nakamura<sup>[5, 6]</sup>推导出的三维波作用通量 (简称 T-N 通量) 描述准定常 Rossby 波的能量频散特征; 利用 250 hPa 瞬变涡动高度场的波包函数<sup>[7]</sup>来表征与天气过程相联的斜压扰动强度。

本文给出了两类波作用通量, 它们基本与文献 [1, 2] 中一致, 所不同的是时间段取为 1 月 24 日~2 月 2 日。

## 3 环流异常特征

首先分析 2008 年 1 月 24 日~2 月 2 日过程的平均环流特征。图 1a 和 1c 给出了这一时段对流层中层流函数和气温距平。为简便起见, 以后流

函数距平中心 (或环流) 称之为异常中心 (或异常环流)。在 500 hPa 层, 北非至东亚的副热带地区流函数场呈现正负相间的异常环流特征, 表明南支急流扰动非常活跃 (图 1a)。印度大陆和孟加拉湾以北以及巴尔喀什湖以南的亚洲广大地区负异常环流盛行, 其最强异常中心位于青藏高原附近, 强度超过  $-16 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 表明了南支槽在这一地区的加强。菲律宾以北地区则出现正距平, 说明西太平洋副热带高压在其脊线以北加强并向北扩展。乌拉尔山以东贝加尔湖以北地区出现强度可达  $4 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的正异常环流, 对应着一个中等强度的高压脊的维持。影响我国的“横槽类”寒潮过程往往与乌拉尔山脊相联系。与之相比, 上述高压脊的位置偏东南。在 500 hPa 位势高度场上, 该高压脊前的槽与印度、孟加拉湾槽合并, 形成一个东北—西南西走向的斜槽 (图略)。由图 1c 可见, 亚洲北部地区的 500 hPa 高压脊是暖性的, 其温度距平可达  $+3^\circ\text{C}$ 。与此相比, 南支槽加强区北侧负温度距平可达  $-6^\circ\text{C}$ 。与西太平洋副热带高压和南支槽的加强相对应, 我国南方及以东地区, 对流层中层温度偏高  $2\sim 3^\circ\text{C}$ 。

图 1b 和 1d 给出了这一时段海平面气压和表面温度场的异常特征。东亚地区,  $60^\circ\text{N}$  以南, 巴尔喀什湖以东, 青藏高原以北和以东地区亚洲大陆冷高压系统大范围加强, 最强异常中心 (约  $+8 \text{ hPa}$ ) 位于贝加尔湖以南, 比东亚寒潮爆发时的最强冷高压中心位置偏南约 10 个纬度, 这与其对应的 500 hPa 高压脊位置偏东南的现象比较一致<sup>[8, 9]</sup>。由图 1d 可见, 与亚洲大陆冷高压系统异常一致, 在贝加尔湖以南的东亚地区地面温度普遍降低, 其负距平为  $3\sim 9^\circ\text{C}$  (图 1d)。特别是, 这次过程平均地面温度的  $0^\circ\text{C}$  线 (图 1d, 粗实线) 已移到我国华南沿岸附近, 比其气候平均位置 (图 1d, 粗虚线) 偏南  $10\sim 15$  个纬度, 使我国南

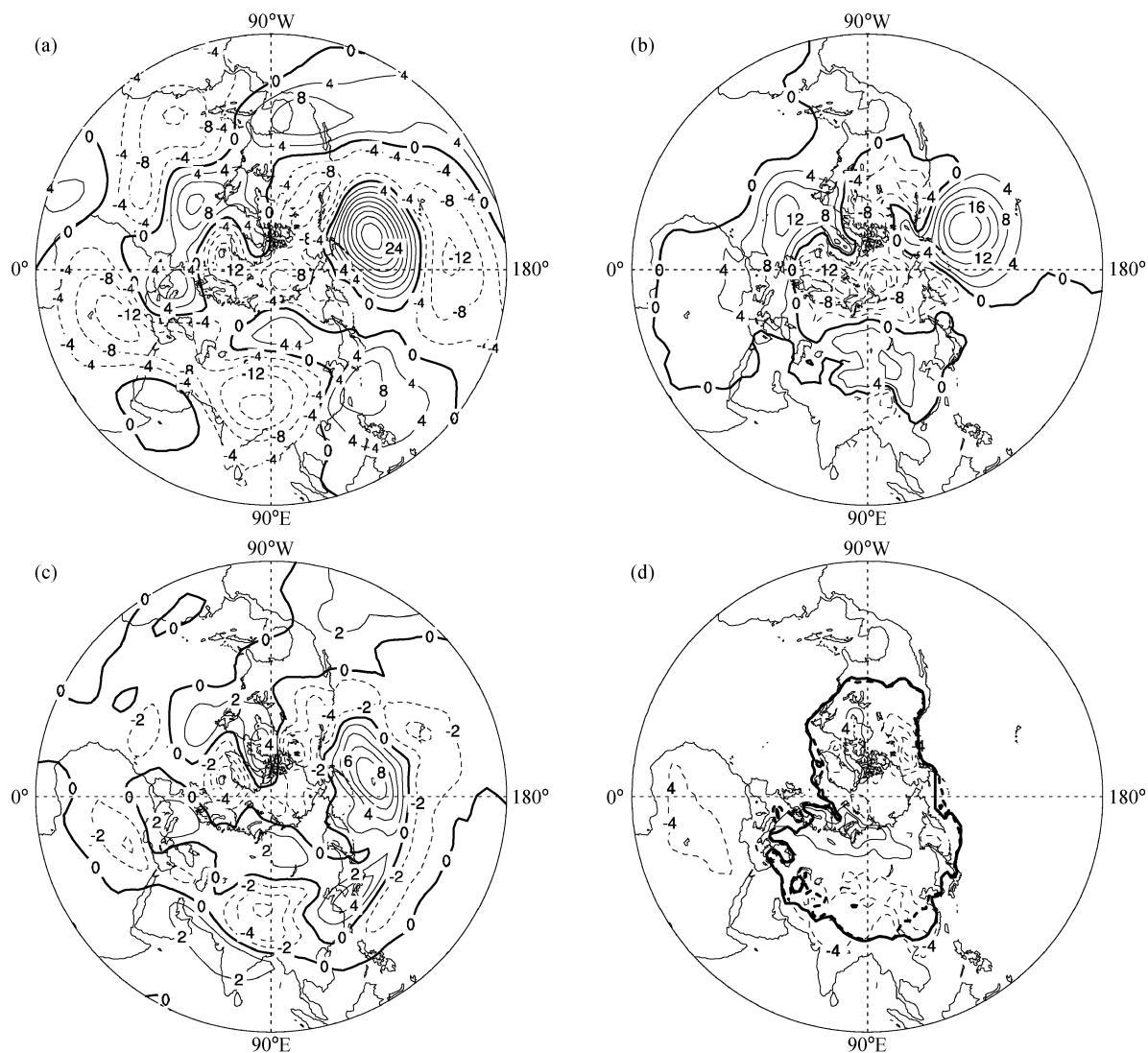


图1 2008年1月24日~2月2日平均的 (a) 500 hPa 流函数距平 (相对于多年平均, 单位:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )、(b) 海平面气压距平 (单位: hPa)、(c) 500 hPa 温度距平 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和 (d) 地表面温度距平 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。 (a) ~ (c) 中粗实线为零线, (d) 中粗实线代表地表温度场的零线, 粗虚线则为其多年平均场的零线

Fig. 1 Mean anomalies of (a) 500 hPa streamfunction (units:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) during 24 Jan to 2 Feb 2008, relative to the multi-year mean field; (b) sea level pressure (units: hPa); (c) 500 hPa temperature (units:  $^{\circ}\text{C}$ ); (d) surface temperature. Thick solid lines in (a) — (c) indicate zero lines. Thick solid line represents the zero line of the total surface temperature field during 24 Jan to 2 Feb, 2008 and the thick dashed line stands for its multi-year mean counterpart in (d)

方地区均处于冰冻状态。总体上, 这次过程的地面温度异常呈现北暖南冷的特征, 约以  $60^{\circ}\text{N}$  为界。

图2为这一时段平均的高层 (200 hPa) 纬向气流异常及其对应的 Rossby 波能量频散特征。波能量的频散特征是通过第一类波作用通量的计算给出。从图2a和2b上可看出, 亚洲副热带急流的加强在伊朗上空最为明显, 最大纬向风及其距

平可达  $70$  和  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其强度基本与东亚急流相当。另一个急流明显加强的地方是青藏高原上空, 其最大纬向风距平达  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这两个急流加强区连在一起, 为南支波动的活跃提供了波导基础。由图2c和2d可见, 北非流函数负距平区向东地中海和小亚细亚地区伸入, 并且波作用通量在这里强烈辐散, 说明小亚细亚地区是一个波源区。Rossby 波能量从这里向环波斯湾地区传

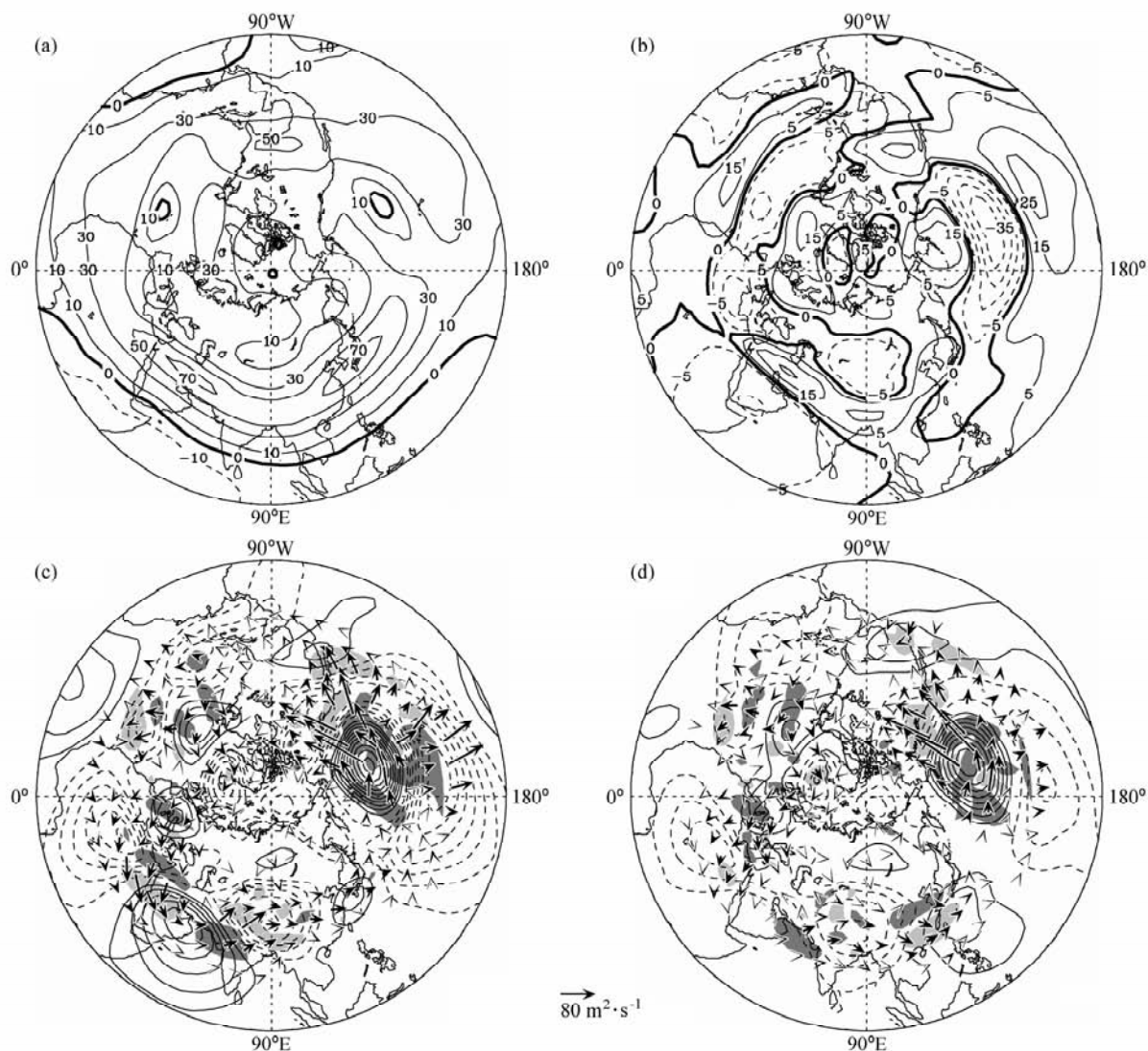


图 2 2008 年 1 月 24 日~2 月 2 日平均的 (a) 200 hPa 纬向风速 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、(b) 200 hPa 纬向风速距平 (相对于多年平均)、(c) 300 hPa 流函数距平 (等值线, 单位:  $10^6 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和对应的波作用通量 (箭头, 单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )、(d) 同 (c), 但为 500 hPa。(c) 和 (d) 中等值线间隔均为  $4 \times 10^6 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 零线已略去, 深 (浅) 阴影区为波作用通量散度大于 (小于)  $3 \times 10^{-6}$  ( $-3 \times 10^{-6}$ )  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的区域

Fig. 2 (a) Mean 200 hPa zonal wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) during 24 Jan to 2 Feb, 2008; (b) As in (a), but for 200 hPa zonal wind anomaly relative to its multi-year mean field; (c) As in (b), but for 300 hPa streamfunction anomaly (contour, units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) and its corresponding wave activity flux (arrow, units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ). In (c) and (d), isolines are drawn for every  $4 \times 10^6 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , and zero lines are omitted. Dark (light) shading represents the region where the divergence of wave activity flux is more (less) than  $3 \times 10^{-6}$  ( $-3 \times 10^{-6}$ )  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

播。在对流层高层, 与环波斯湾地区正异常环流对应, 波作用通量在沙特北部辐合, 而在巴基斯坦和印度西北侧强烈辐散。源自环波斯湾地区的 Rossby 波能量传播到青藏高原地区, 波作用通量在那里强烈辐合, 表明青藏高原地区为一个明显的波汇区。可见, 青藏高原一带气压槽的加深主

要是由来自上游 Rossby 波能量频散所形成。在对流层中层 (图 2d), 西太平洋副热带高压的加强和北扩受上游槽加深的影响, Rossby 波能量从上游向我国东南沿海及以东地区传播, 并且波作用通量在这里辐合。在对流层高层 (图 2c) 也存在上述波能量频散特征, 只是对应的正距平区处在偏

西北的位置,呈现斜压结构。至于西太平洋副热带高压异常的可能原因将在以后进一步讨论。

总之,北非至西太平洋的副热带地区 Rossby 波能量通过辐合辐散,传播到东亚地区,引起青藏高原附近气压槽的加深和西太平洋副热带高压的加强及北扩,并与亚洲北部的高压脊配合,造成了这次较长时间的雨雪低温过程。

实际上,就波作用通量及其辐散特征而言,最强的波源区在位于夏威夷群岛以北的北太平洋地区,与一个很强的正距平环流对应(图 1a、2c 和 2d)。它可能与 La Niña 背景下的海气相互作用过程有关。Rossby 波能量从这里向下游地区传播,到达北大西洋地区,进而影响地中海和北非地区。由于篇幅关系,暂不讨论这些问题。

## 4 中期演变特征及其机理

### 4.1 能量频散过程

图 3a~3d 给出了这一时段 300 hPa Rossby 波能量频散的中期演变特征。这里以 31 天滑动平均场作为缓变背景环流,通过第二类波作用通量的计算方法,给出逐日的波能量频散特征(详见第 2 节)。这次过程的前期(1 月 22 日,图 3a),阿留申群岛南侧存在较强的流函数距平中心(简称异常中心),强度达到约  $24 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,其波作用通量辐散也较强,源自这里的 Rossby 波向下游地区传播,在北美、东北大西洋至西欧、北非、波斯湾、青藏高原及其西侧分别对应着正负相间的距平中心。这时,西欧至北非地区的异常环流比下游地区强,波作用通量也强于下游地区,可以说明这里是 Rossby 波波包正在到达的区域。到了 1 月 25 日(图 3b),西欧至北非地区的异常环流显著减弱,而在波斯湾和青藏高原的正负异常中心比前期明显增强,其中青藏高原的负异常中心强度约  $-20 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由异常中心和波作用通量可看出,这时波包已到达青藏高原。1 月 28 日(图 3c)为止,波斯湾和青藏高原的正负异常中心的强度没有明显的变化,但青藏高原的负异常区向东移动,已经涵盖了我国南方地区,其最强中心位于  $90^\circ\text{E}$  以东。2 月 1 日北非和波斯湾一带的异常环流已衰弱,而青藏高原的负异常环流中心则移到长流流域的中下游地区。尽管有所减

弱,但其中心仍维持着约  $-12 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的强度。

图 3e~3h 为对应 500 hPa 层的演变情况。在这一时段,从北非至青藏高原的异常环流演变及 Rossby 波的能量频散特征与其 300 hPa 的状况相似,但 1 月 25 日之后波斯湾一带的异常环流相当弱,因而其与青藏高原异常环流之间波作用通量的链接很不明显。由此可以认为,500 hPa 层的青藏高原异常环流主要受其高层异常环流的影响,它们之间也呈现相当正压的结构。500 和 300 hPa 层上最明显的区别在于西太平洋副热带高压的变化,我们将在 4.2 节详细分析。

在对流层高层,1 月 22 日左右(图 3a)源自东北大西洋的 Rossby 波能量向下游传播,在巴尔喀什湖北侧形成相对弱的正异常环流,对应着一个高压脊。它缓慢向东移动,1 月 25 日(图 3b)到达贝加尔湖以西,一直维持到 1 月 29 日,2 月 1 日位于贝加尔湖北侧(图 3d)。对流层中层的情况(图 3e~3h)与高层相似,但正异常中心的范围向东南方向扩展。我们注意到,整个中期演变过程中贝加尔湖一带的高压脊缓慢减弱。因此,不难发现,这一高压脊在这次过程的前期已形成,来自上游 Rossby 波的能量注入主要是抵消摩擦耗散。

总之,这次雨雪低温过程主要是由青藏高原附近的南支槽加深和维持与贝加尔湖一带的高压脊维持相互配合所造成。这次过程中,东北大西洋和西欧的正异常环流为南支急流 Rossby 波与欧亚高纬度 Rossby 波活动的主要波源区。

### 4.2 西太平洋副高

过去的研究<sup>[10~12]</sup>指出,夏季西太平洋暖池区对流活动异常所激发的准定常行星波及其经向传播是西太平洋副热带高压偏北或北跳的一个重要原因,这也是被广泛引用的观点。2008 年 1 月 25 日~2 月 1 日的雨雪低温过程中,西太平洋副热带高压也偏北(图 3e~3h),出现了与夏季过程类似的现象。那么,西太平洋暖池区对流活动是不是出现这一现象的主要原因?

图 4 给出了 500 hPa 流函数及其异常与对应的 OLR 异常。由图 4a 可见,流函数场与位势高度场一样,都能较好地描述副热带高压系统。这

一时段气候平均的流函数零线基本与副热带高压的北界吻合。在这次过程中, 西太平洋副热带高压的中心偏西, 靠近菲律宾, 流函数零线比其气候平均位置偏北 5~7 个纬度 (图 4a 和 4b)。正流函数距平区 (图 4c) 不仅包括流函数零线以南的地区, 还包括流函数零线以北、我国江淮下游至日本南部地区。因此, 该正流函数距平反映的不只是西太平洋副热带高压的异常, 还反映副高北

侧西风急流的北抬 (见图 2a 和 2b)。由图 4d 可见, 在热带西太平洋, 对流活动减弱, 尤其在菲律宾及以东地区, OLR 距平可达  $+30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这不利于西太平洋副热带高压的向北移动或扩展。由此可见, 热带西太平洋对流活动异常并不是这次过程中西太平洋副热带高压偏北的主要原因。

由图 3e~3h 可见, 在 500 hPa 层上, 源自青

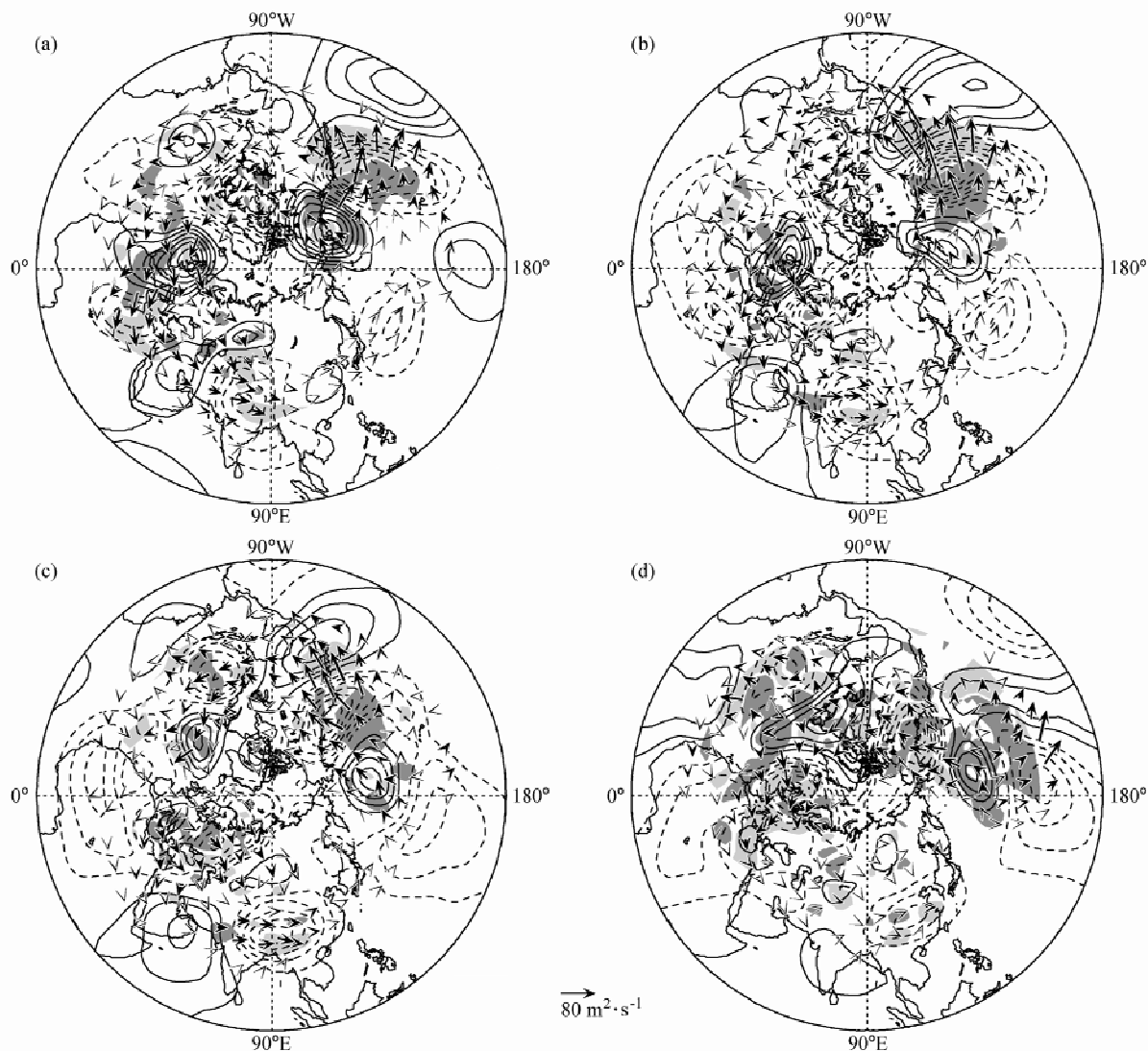


图 3 2008 年 (a) 1 月 22 日、(b) 1 月 25 日、(c) 1 月 28 日和 (d) 2 月 1 日 300 hPa 流函数距平 (等值线, 单位:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 及对应的波作用通量 (箭头, 单位:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), (e) ~ (h) 同 (a) ~ (d) 但为 500 hPa。(a) ~ (d) 和 (e) ~ (h) 中等值线间隔分别为  $4 \times 10^6$  和  $3 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 零线已略去, 阴影区的意义与图 2c 相同

Fig. 3 300 hPa streamfunction anomalies (contours, units:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the corresponding wave activity fluxes (arrows, units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) on (a) 22 Jan, (b) 25 Jan, (c) 28 Jan and (d) 1 Feb 2008. (e) — (h) are the same as (a) — (d), but for 500 hPa level. In (a) — (d) and (e) — (h), isolines are drawn for every  $4 \times 10^6$  and  $3 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively, and zero lines are omitted. Shading convention is the same as in Fig. 2c

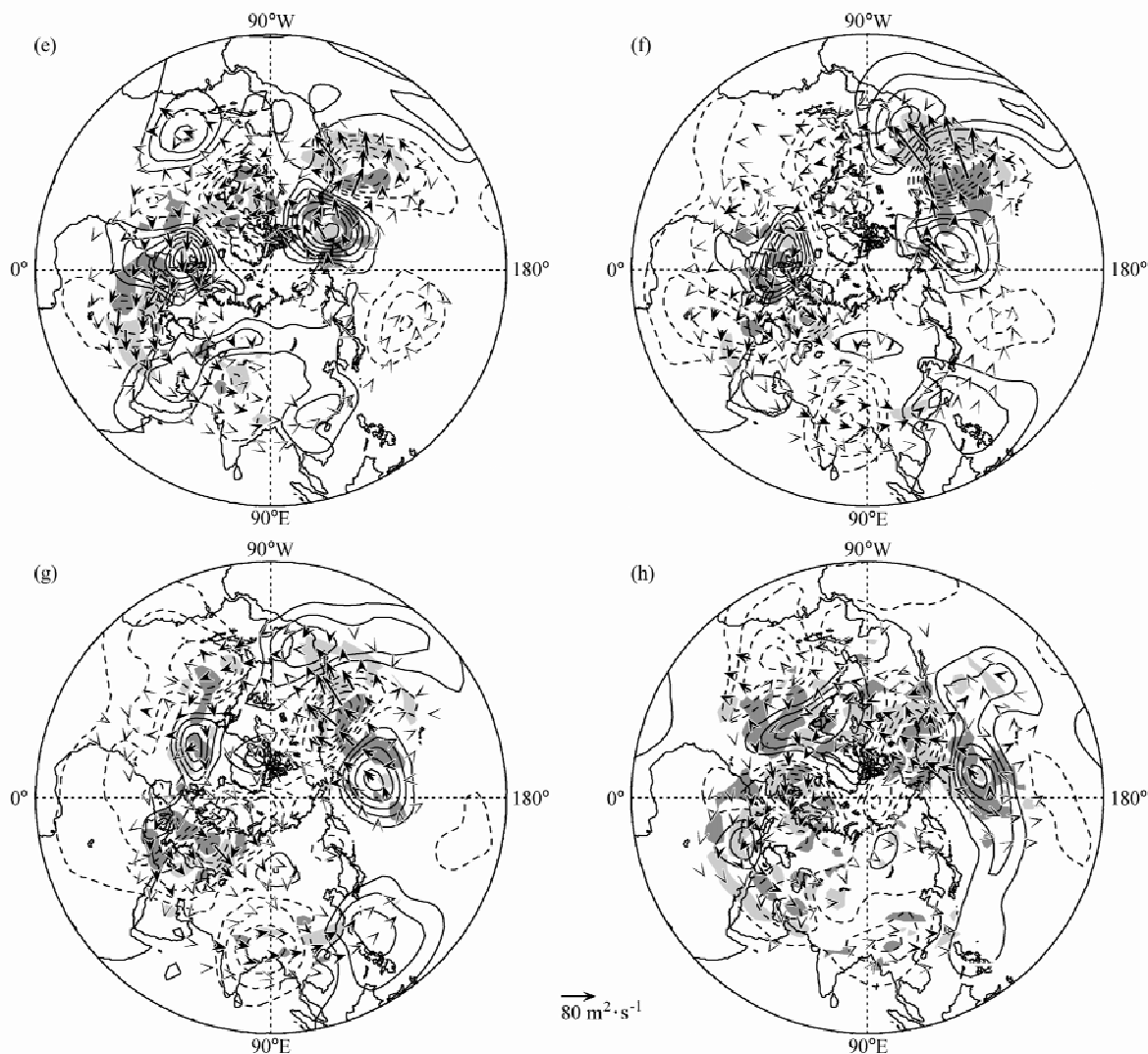


图 3 (续) Fig. 3 (Continued)

藏高原和孟加拉湾地区负异常环流的 Rossby 波能量向下游频散,在其下游形成了正异常环流,西太平洋副热带高压的向北扩展正与之对应。值得注意的是,青藏高原和孟加拉湾地区的负异常环流与其下游正异常环流的加强和减弱变化步调一致,两者之间的波作用通量的强度也表现相同的变化。因此可以得出,南支急流波动的能量频散使青藏高原和孟加拉湾槽的加深和维持,由此再向下游频散和波能注入造成了西太平洋副热带高压在偏北位置上维持。

#### 4.3 降水与低温过程

图 5 给出这次过程的降水量及对应的 250 hPa 斜压波波包函数异常 (相对于其 31 天滑动平均值)。斜压波波包函数表示 8 天以下的瞬变天气扰

动的强度,定性地表明瞬变斜压过程引起的降水情况。图 6 给出 850 hPa 位势高度和风的异常场。1月22日(图 5a 和 5e)我国没有出现强降水,较强斜压波波包函数距平(约 40 m)在孟加拉湾及蒙古境内。在 850 hPa 层,我国东部地区,包括东北地区,受贝加尔湖高压脊前的低压槽控制(图 6a 和 6e) 1月25日(图 5b 和 5f)我国淮河以南地区出现强降水,局部地区日降水量达 50 mm。这时,孟加拉湾强斜压波波包函数距平区向东北方向扩展,与我国西南地区的强降水过程对应。而在我国淮河以南的东部强降水区,斜压波波包函数减弱,说明这些地区的降水具有低频性质,并非瞬变斜压过程所致。贝加尔湖高压脊也进一步显著加深并向东南方向扩展(图 6b),它

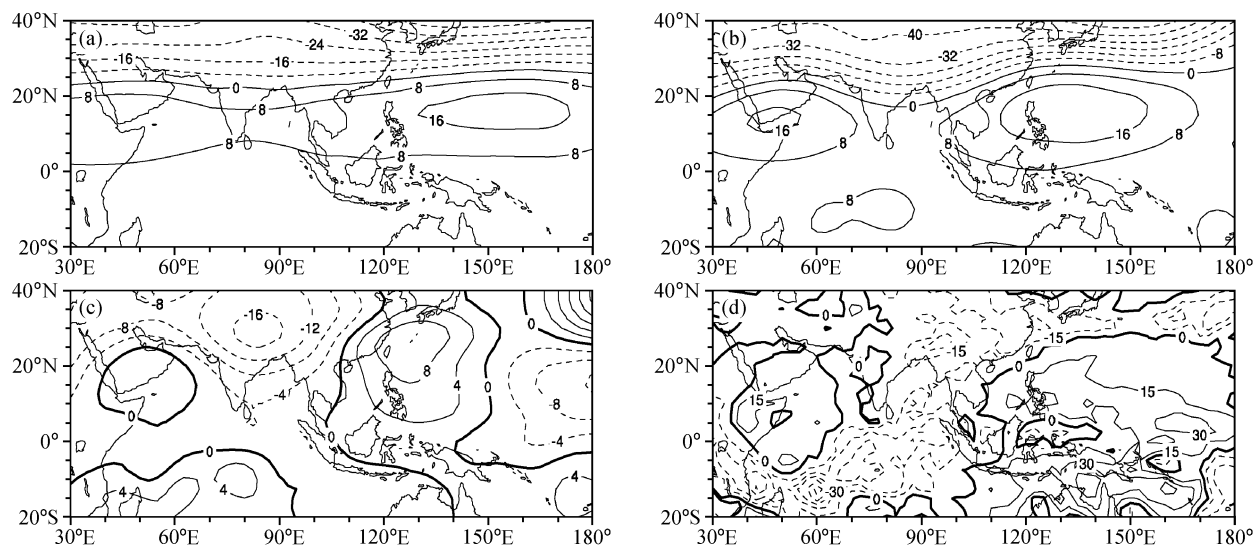


图 4 500 hPa (a) 2008 年 1 月 24 日~2 月 2 日多年平均流函数场 (单位:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 以及 (b) 2008 年流函数场和 (c) 流函数距平场 [(b) 与 (a) 之差], (d) 同 (c) 但为 OLR 距平场 (单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Fig. 4 (a) Multi-year mean 500 hPa streamfunction field (units:  $10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) during 24 Jan to 2 Feb; (b) is the same as (a), but for 2008; (c) 500 hPa streamfunction anomalies, that is the difference of (b) same as; (d) is the same as but for OLR anomalies (units:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

所引导的冷空气与西太平洋副热带高压西侧的南风气流在长江中下游地区附近形成较明显的切变线 (图 6f), 基本与强降水区的北界对应。由图 6f 可知, 西太平洋副热带高压西侧的偏南气流在我国华南一带最强, 水汽输送充沛, 与这一天的最强降水中心所对应。1 月 28 日贝加尔湖高压脊有所减弱并向西收缩 (图 6c), 这使青藏高原东侧的偏北风显著加强, 同时西太平洋副热带高压也向南向东收缩, 切变线比前期偏南 (图 6g), 降水带也偏南 (图 5c)。这时我国主要降水带偏西扩展到我国西南地区, 一个强斜压波波包函数距平中心 (约 80 m) 与之对应 (图 5g), 表明这次西南地区降水过程主要是瞬变斜压过程引起的。在 2 月 1 日之后 (第 4 次降水过程), 贝加尔湖高压脊明显减弱 (图 6d), 西太平洋副热带高压也进一步向东收缩 (图 3d 和图 6h), 我国南方地区完全受 500 hPa 深槽和 850 hPa 气旋式涡旋气流控制。可见, 这时长江以南的强降水过程 (图 5d) 是青藏高原和孟加拉湾深槽向东移动到我国南方地区所造成的。实际上, 这也是第 3 次和第 4 次降水过程 (2 月 1 日~2 月 2 日) 的主要不同之处。由图 5h 可见, 该降水过程也有瞬变斜压性质。

图 7 为这次过程的海平面气压和表面温度的

演变情况。不难发现, 我国南方地区低温过程的演变与亚洲冷高压系统的强度、位置及形态密切相关。从 1 月 22 日~2 月 1 日, 亚洲冷高压的演变 (图 7a~7d) 与 850 hPa 位势高度异常的演变 (图 6a~6d) 一致, 但异常冷高压沿青藏高原东侧更加南扩。冷高压异常的影响范围, 包括其伸入位置, 决定了我国南方地区的低温程度 (图 7e~7h)。例如, 1 月 28 日 +4 hPa 的气压距平线到达四川, 受其影响长江中上游地区的温度比前期急剧下降, 距平达  $-12^\circ\text{C}$ 。就这次我国南方低温冰冻灾害而言, 亚洲冷高压系统的形态也是非常重要的原因。这次过程中, 亚洲冷高压中心位于阿尔泰山和杭爱山一带, 与其气候平均位置相比偏南偏西, 冷高压的南部沿青藏高原东侧南伸。其结果, 影响我国南方地区的冷高压脊线呈东北—西南走向, 由于高原的阻挡作用冷平流更有利于在高原东侧形成冷堆。这也正是这次低温过程的重要特点。

综上所述, 南支急流 Rossby 波向下游的能量频散和移动, 贝加尔湖高压脊向东南扩展以及两者之间的配合过程, 造成了这一时段的强降水过程。亚洲冷高压系统的强度、位置及形态决定了这次我国南方地区低温过程的重要特性。

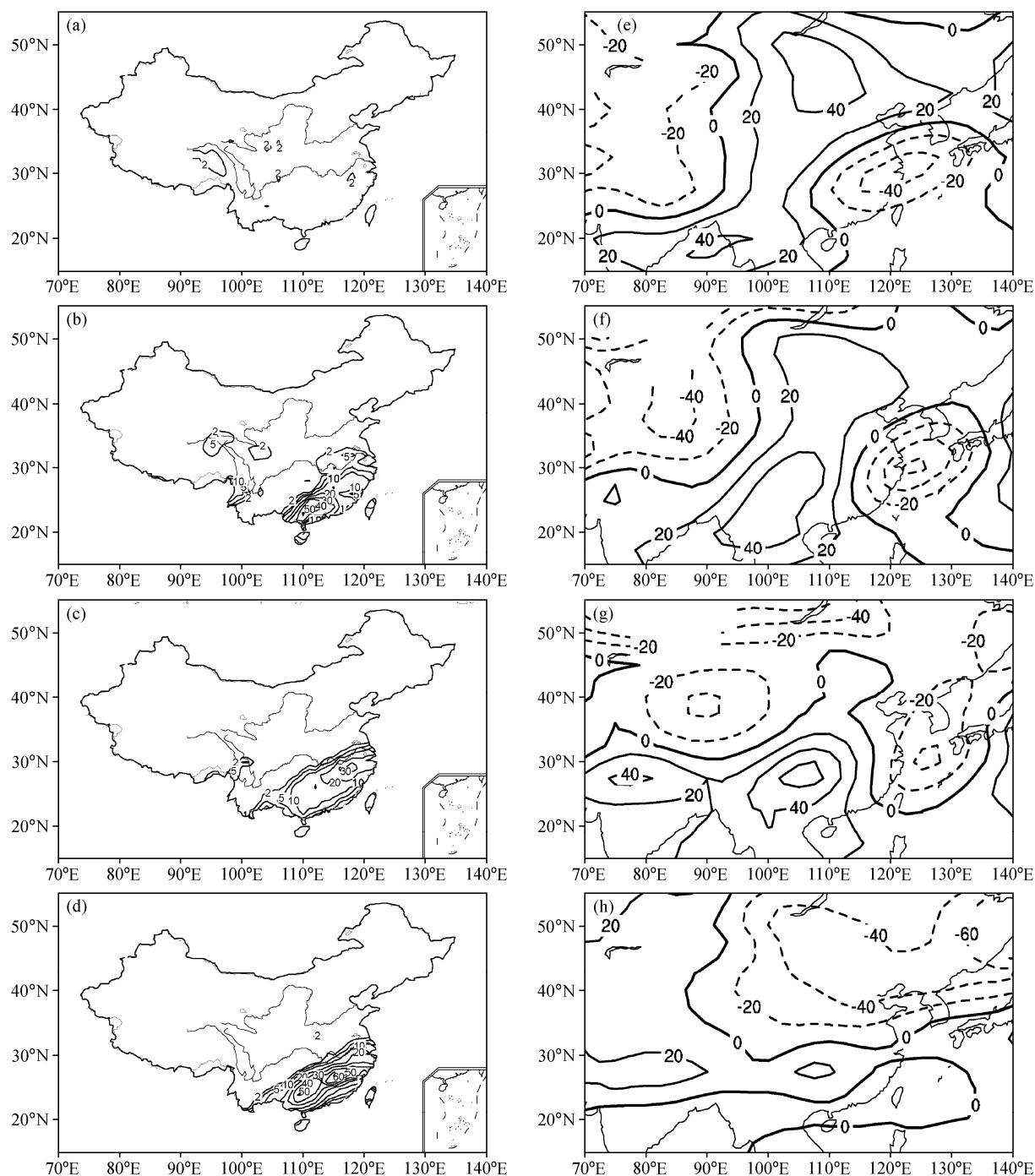


图5 2008年(a)1月22日、(b)1月25日、(c)1月28日、(d)2月1日降水量(单位:mm)。(e)~(h)同(a)~(d), 但为250 hPa斜压波波包函数相对于其31天滑动平均场的距平(单位:m)

Fig. 5 Daily precipitation (units: mm) on (a) 22 Jan, (b) Jan 25, (c) 28 Jan and (d) 1 Feb 2008. (e) — (h) are the same as (a) — (d), but for 250 hPa envelope function anomalies of transient eddies (units: m), relative to the corresponding 31-day running-mean field

## 5 结论和讨论

本文分析了2008年1月24日~2月2日我国

南方地区雨雪低温过程的中期演变特征及其成因。在这次过程中,对流层中上层,东北大西洋和西欧的正异常环流为亚非副热带急流 Rossby 波与欧亚高纬度 Rossby 波活动的主要波源区。Rossby

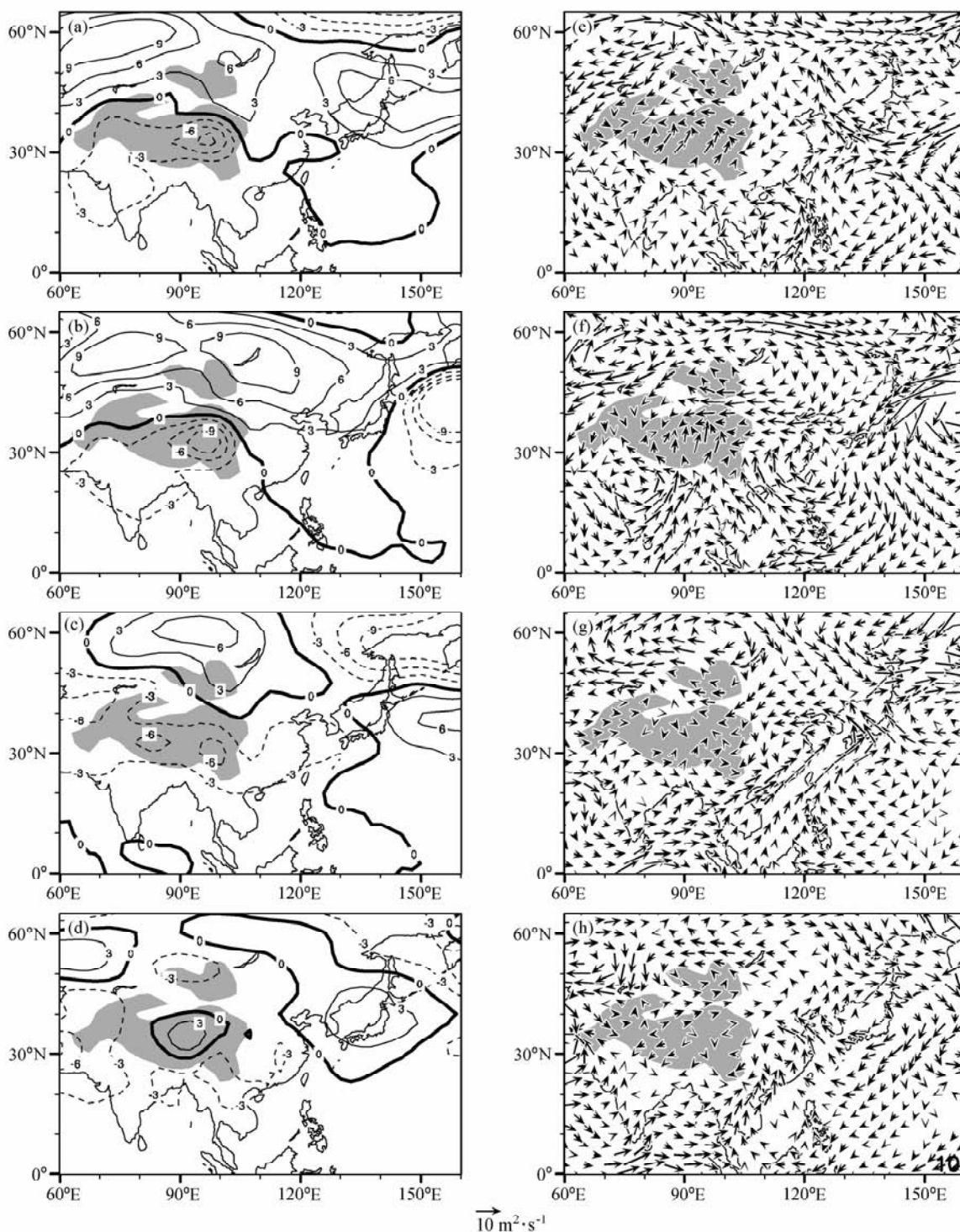


图6 2008 年 (a) 1 月 22 日、(b) 1 月 25 日、(c) 1 月 28 日、(d) 2 月 1 日 850 hPa 位势高度距平场 (相对于其多年平均场, 单位: gpm), (e) ~ (h) 同 (a) ~ (d) 但为 850 hPa 风距平 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。图中阴影区代表 1 500 m 以上的地形

Fig. 6 850 hPa geopotential height anomalies (units: gpm), relative to the multi-year mean field on (a) 22 Jan, (b) 25 Jan, (c) 28 Jan and (d) 1 Feb 2008. (e) — (h) are the same as (a) — (d), but for 850 hPa wind anomalies (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Shading marks the topography higher than 1 500 m

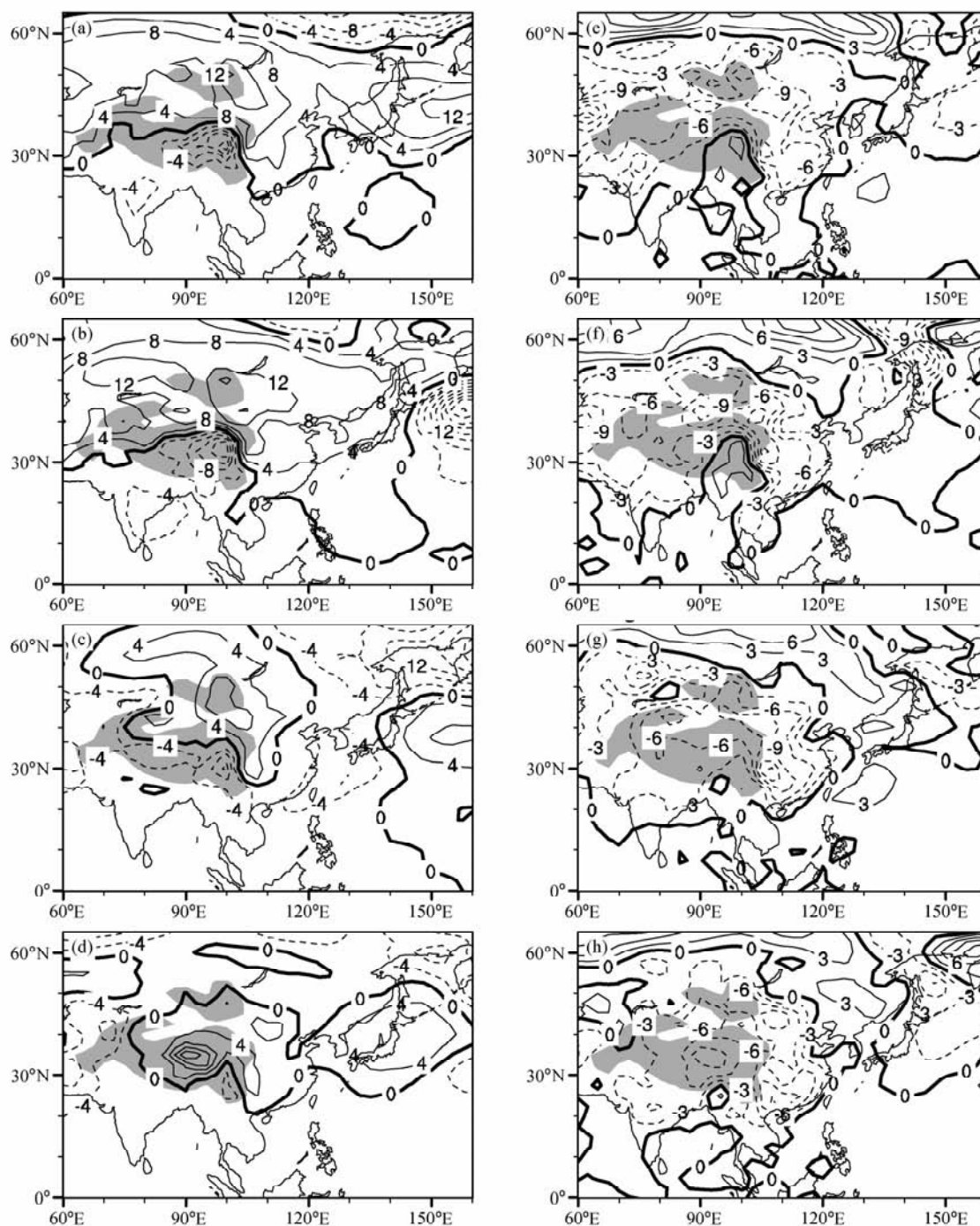


图 7 2008 年 (a) 1 月 22 日、(b) 1 月 25 日、(c) 1 月 28 日和 (d) 2 月 1 日海平面气压距平 (单位: hPa), (e) ~ (h) 同 (a) ~ (d) 但为地表温度距平 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。粗实线均为零线

Fig. 7 Daily sea level pressure anomalies (units: hPa) on (a) 22 Jan, (b) 25 Jan, (c) 28 Jan and (d) 1 Feb 2008. (e) — (h) are the same as (a) — (d), but for surface temperature anomalies (units:  $^{\circ}\text{C}$ ). Thick lines represent zero lines

波能量自此通过其能量的辐合辐散从北非地区传播到东亚地区, 引起了青藏高原附近气压槽的加深和菲律宾以北地区正异常环流的形成, 有利于我国南方地区盛行上升气流。而贝加尔湖一带的

高压脊在此过程的前期已形成, 并在这次过程中缓慢减弱, 来自上游 Rossby 波的能量注入主要是起了抵消摩擦耗散的作用。在对流层低层, 与对流层中高层相对应, 偏强的亚洲冷高压脊前的西

北气流和偏强的西太平洋副高西侧的偏南气流在我国南方地区形成切变线, 进而导致了此阶段的降水过程。值得注意的是, 在 2 月 1~2 日 (也即第 4 次过程) 中, 降水过程的成因与第 3 次的有所不同, 它主要是由 500 hPa 深槽及 850 hPa 气旋式涡旋所造成。青藏高原和孟加拉湾槽的加深和维持向下游注入 Rossby 波能量, 导致西太平洋副热带高压在偏北位置上维持。亚洲冷高压系统的强度、位置及形态决定了这次我国南方地区低温过程的重要特性。

通过系列工作“2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 I<sup>[1]</sup>、II<sup>[2]</sup>、III”, 我们发现 1 月 10 日~2 月 2 日的 4 次强烈天气过程均以亚洲北部冷高压系统与西太平洋副高 (北扩) 系统的相对稳定作为背景, 并与中纬度和副热带地区低频 Rossby 波的不同位相匹配而相继出现。在 1 月 10~16 日的过程中, 里海冷堆及其负异常环流作为重要波源, 引起亚非副热带急流低频 Rossby 波的向下游传播, 最终导致我国南方地区南支槽的加深以及西太平洋副高的北扩<sup>[1]</sup>。而在 1 月 17~23 日过程中, 上述里海异常环流移至中亚/帕米尔高原, 其东扩使对流层低层西太平洋副高在其西部出现“内凹外凸”结构, 从而形成切变线, 出现了雨雪过程<sup>[2]</sup>。在 1 月 25 日~2 月 2 日过程中, 中亚/帕米尔高原的负异常环流移至青藏高原, 其东移直接导致我国南方地区的雨雪天气过程。

在 2008 年初我国南方雨雪低温过程中, 亚洲北部冷高压—西太平洋副高—中纬度和副热带低频 Rossby 波这三者之间的关系值得深入研究。首先, 欧亚大陆上空高压脊的维持引导高纬度冷空气侵入较低的纬度, 从而有利于中纬度及副热带 Rossby 波活动的加强; 其次, 本系列的工作表明, 来自上游的 Rossby 波能量的堆积有利于西太平洋副高北扩形势的形成和维持; 最后, 数值试验结果表明<sup>[13]</sup>, 黑潮区暖海温异常 (2007 年底至 2008 年初) 不仅有利于西太平洋副高的北扩, 而且有利于叶尼塞/贝加尔湖地区阻塞型环流的稳定维持。由此看来, 亚洲北部冷高压—西太平洋副高—中纬度和副热带低频 Rossby 波这三者之间可能存在着某种必然的关联, 而且这种关联相当复杂。

致 谢 感谢中国科学院大气物理研究所赵思雄研究员和孙建华研究员对本文提出了建设性修改意见。

## 参考文献 (References)

- [1] 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 Cholaw, 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
- [2] 施宁, 布和朝鲁, 纪立人. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 II: 西太平洋副热带高压的特征. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 434~445  
Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part II: Characteristics of the western Pacific subtropical high. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 434~445
- [3] Shapiro M A, Thorpe A J. A global atmospheric research programme for the beginning of the 21st century. *WMO Bull.*, 2004, **53** (3): 222~226
- [4] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~471
- [5] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24** (23): 2985~2988
- [6] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a phase-Independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58** (6): 608~627
- [7] Nakamura H, Nakamura M, Anderson J L. The role of high-and low-frequency dynamics in blocking formation. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125** (9): 2074~2093
- [8] Ding Y, Krishnamurti T N. Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115** (10): 2428~2449
- [9] Ding Y. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1990, **44**: 281~292
- [10] Huang R, Li W. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia. Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia. April 10~15, 1987. Chengdu, China
- [11] 黄荣辉, 孙风英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的

- 对流活动对东亚夏季异常的影响. 大气科学, 1994, **18** (2): 141~151
- Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the convective activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the east Asian summer monsoon. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18** (2): 141~151
- [12] Bueh Cholaw, Shi Ning, Ji Liren, et al. Features of the EAP Events on the Medium-range Evolution Process and the Mid-and High-latitude Rossby Wave Activities. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53** (4): 610~623
- [13] 宗海峰, 张庆云, 布和朝鲁, 等. 黑潮和北大西洋海温异常在 2008 年 1 月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟. 气候与环境研究, 2008, **13** (4): 491~499
- Zong Haifeng, Zhang Qinyun, Bueh Cholaw, et al. Numerical simulation of possible impact of Kuroshio and North Atlantic SST Anomalies on the south China snow disaster in January 2008. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2008, **13** (4): 491~499