

2008年1月我国严重低温雨雪冰冻灾害与 东亚季风系统异常的关系

顾雷 魏科 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘要 鉴于2008年1月我国低温雨雪冰冻灾害所造成的经济损失的严重性, 作者从东亚季风系统有关成员的异常来探讨此灾害的发生成因。分析结果表明, 2008年1月在中高纬度乌拉尔地区阻塞高压异常发展和长时间的维持及东亚大槽位置的长时间的稳定, 这使得异常强冷空气不断沿蒙古高原东侧南下入侵我国华中、华东和华南地区; 而西太平洋副热带高压异常偏北, 大量暖湿空气沿副高西侧北上, 并与南下冷空气在长江流域相遇, 从而导致我国长时间的低温雨雪冰冻天气。进一步的分析结果表明, 利用在热带中、东太平洋的 La Niña 事件对我国冬季气候异常的影响并不能很好地说明此次灾害的发生, 而利用热带西太平洋和西北大西洋海温异常对中高纬度和副热带地区大气环流异常的影响可以较好地说明这次灾害的发生成因。此外, 2007年冬季北半球准定常行星波向低纬度地区上空对流层上层传播的加强和平流层极涡的下传也可能是2008年1月我国低温雨雪冰冻灾害的重要原因之一。

关键词 低温雨雪冰冻灾害 东亚冬季风 东亚季风气候系统 极涡

文章编号 1006-9585 (2008) 04-0405-14 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

Severe Disaster of Blizzard, Freezing Rain and Low Temperature in January 2008 in China and Its Association with the Anomalies of East Asian Monsoon System

GU Lei, WEI Ke, and HUANG Rong-Hui

*Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

Abstract Due to the severity of the economic losses caused by the blizzard, freezing rain and low temperature occurred in China in January 2008, the causes and mechanism of this disaster are studied using the NCEP/NCAR reanalysis and station observational datasets in China. The authors analyzed the anomalies which are associated to the components of the East Asian monsoon system. The results show that the development and maintenance of the Ural Blocking High over the Ural area in mid and high latitudes for anomalously long time caused the East Asian trough to stay in a stable state, which led to the continuous southward intrusion of cold air along the Mongolian Plateau to Central China, East China and South China. Meanwhile, the western Pacific Subtropical High shifted further northward and westward, which led to the northward transports of a large amount of wet air along the west edge of the Subtropical High from the Bay of Bengal and the convergence with cold air in the Yangtze River valley. The above circulation configuration led to the prolonged occurrence of heavy snowfall and low temperature. Moreover, the re-

收稿日期 2008-04-03 收到, 2008-05-04 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40730952 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-220

作者简介 顾雷, 男, 1968 年出生, 助理研究员, 主要从事东亚季风研究。E-mail: gulei@mail.iap.ac.cn

sults further show that the occurrence of this disaster can not be explained well by the influence of the La Niña event on wintertime climate anomalies in China. The sea surface temperature anomalies (SSTA) in the tropical western Pacific and Northwest Atlantic Ocean are important because of their influences on the Ural Blocking High and the position of western Pacific Subtropical High, respectively. Besides, we discussed the influence of quasi-stationary planetary wave activities, which shows intensification of propagation from mid and high latitudes toward the upper troposphere over low latitudes of the Northern Hemisphere. The influence from the stratospheric circulation, which is presented by downward propagation of strong stratospheric polar vortex, may also add to the circulation anomalies in East Asia.

Key words disaster of low temperature, heavy snowfall and freezing, East Asian winter monsoon, East Asian monsoon system, polar vortex

1 引言

2008 年 1 月我国西北、西南、华中、华南和华东地区很多省市遭受了 50 年来最严重的低温雨雪冰冻灾害^[1]。频繁的雨雪、长时间的持续低温,使上述地区交通一度中断,输电设备严重受损,煤炭运输受阻,加上春运高潮,使大量旅客滞留;另外越冬作物冻死,林木压折等,造成国民经济约 1 516 亿元的直接损失,百余人的重大人员伤亡。这次严重的低温雨雪冰冻灾害给我国大气科学研究提出了一个重要科学问题。由于近年来全球变暖,我国发生持续暖冬,因此,冬季严重低温雨雪冰冻灾害很少发生。为此,许多研究都集中在关于我国夏季旱涝和台风、暴雨灾害的发生机理和预测等科学问题,相对而言,对于冬季我国重大气候和天气灾害的发生机理和预测理论研究较少。

我国地处东亚强季风区,不仅东亚夏季风严重影响我国旱涝等灾害气候的发生,而且东亚冬季风的变动与异常也严重影响我国冬季低温冰冻、寒害、雪灾、早霜和晚霜等灾害的发生。早在 20 世纪 50 年代,陶诗言^[2~4]等就对东亚冬季风特征及寒潮活动做过系统的研究,之后,丁一汇等^[5, 6]对东亚冬季风特征及其与西伯利亚高压的关系做了深入的研究。近几年来,国内外关于东亚冬季风的变异特征及其机理的研究掀起了研究热潮。Chen 等^[7, 8]指出冬季东亚东部沿岸的风场与东亚冬季风强弱密切相关,并利用东亚沿岸的风场定义了一个可以表征东亚冬季风年际变化的东亚冬季风指数;随后, Wu 等^[9]利用西伯利亚高压和阿留申低压的气压之差也定义了一个可以衡量东亚冬季风年际变化的东亚冬季风指数;并

且 Jhun 等^[10]根据北极涛动(AO)与西伯利亚高压和阿留申低压的变化有十分密切的关系,利用(27.5~37.5°N, 110~170°E)与(50~60°N, 80~140°E)区域平均的 300 hPa 面上纬向风之差定义了一个东亚冬季风指数。这些指数从不同方面来定义东亚冬季风指数,以便描述东亚冬季风的年际、年代际和长期变化。

自从 Thompson 等^[11, 12]提出 AO 和北半球环状模(NAM)概念之后,国际上兴起了 AO 和 NAM 对北半球大气环流和气候影响的研究热潮,特别是关于 AO 和 NAM 对东亚冬季风影响的研究。Gong 等^[13]首先把东亚冬季风的变化与 AO 变化联系起来。并且,在 Huang 等^[14~16]关于准定常行星波在三维球面大气沿两支波导(即极地波导与低纬波导)传播研究的基础上,Chen 等^[17~19]从观测事实和数值模拟两方面研究了这两支波导的年际变化特征,指出了北半球冬季准定常行星波传播的两支波导存在明显的反相振荡的年际变化;还指出北半球行星波导的这种年际振荡直接影响着 NAM 的振荡,从而形成了 AO 并影响着东亚冬季风的年际变化。Huang 等^[20, 21]从观测事实研究了这两支波导的年代际变化,指出了北半球冬季准定常行星波传播的两支波导同样存在着反相互振荡的年代际变化特征;并且他们同样也指出这种振荡也直接影响着 NAM 和 AO 的年代际变化,并影响着东亚冬季风的年代际变化。黄荣辉等^[22]利用 NCEP/NCAR 再分析资料分析了 2005 年和 2006 年冬季(12 月至次年 2 月)欧亚大陆的气候和东亚冬季风的差异及其与北半球准定常行星波活动的关系,指出了 2005 与 2006 年冬季欧亚大陆所出现的截然不同的气候异常和东亚冬季风异常与这两年冬季北半球准定常行星

波活动密切相关。

很多研究已表明了东亚夏季旱涝气候灾害的发生与一个包括了大气—海洋—陆面耦合的东亚季风气候系统的年际、年代际变异密切相关^[23, 24]；且不少研究从东亚季风系统内动力过程来解释了海洋、陆面热力强迫对东亚夏季风变异影响的物理过程和机理^[25~27]。同样，东亚冬季低温雨雪冰冻灾害的发生也是与此东亚季风气候系统的变异密切相关的。鉴于有关东亚冬季气候和东亚冬季风异常的成因以环流系统异常研究较多，而从海—陆—气耦合的东亚季风气候系统的变异研究较少，因此有必要从海—陆—气耦合的东亚季风系统的变异来揭示 2008 年 1 月我国出现的低温雨雪冰冻灾害的成因。为此，本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和有关海温资料来分析造成 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害的欧亚大陆上空环流系统和东亚冬季风的异常情况，并从东亚季风气候系统的变异来分析 2008 年 1 月我国严重气候异常的成因，特别从热带中、东太平洋、西北大西洋海表面温度异常 (SSTA) 所造成欧亚大陆上空环流、东亚冬季风以及平流层极涡下传来讨论 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害的发生成因，并从准定常行星波活动的异常来揭示其机理。

2 低温雨雪冰冻灾害特征及其与东亚冬季风异常的关系

2.1 气候异常的特征

王遵娅等^[28]分析了 2008 年初我国低温雨雪冰

冻灾害的气候特征，并指出了 2008 年初发生在我国长江中、下游和江南、华南地区的低温雨雪冰冻灾害无论低温持续日数、降雪量或冰冻日数均为 1951 年以来冬季的最大值。从图 1a 可以看到，2008 年 1 月从我国西北经华中到华南、西南东部和华东西部气温比常年偏低 1~4℃，特别在西北地区气温较常年偏低了近 4℃，最大可达 7℃，而在我国青藏高原东南部气温却偏高 1~4℃。这表明 2008 年 1 月寒潮路径偏西，冷空气频繁沿高原东侧南下，这种持续低温使得在西南东部、华中经常发生冻雨天气，而华南北部、华东西部所降的雨夹雪由于气温偏低又很快发生冰冻。从图 1b 可以看到，我国 2008 年 1 月从西北经华北西部到华东、华南和西南地区东部降水（主要是降雪和雨夹雪）比常年偏多了 150%~200%，而在华中地区南部和高原东部降雪却比常年偏少。此外，东北和华北的降雪也比常年偏少。

2.2 2008 年 1 月东亚冬季风异常

为了研究 2008 年 1 月东亚冬季风的异常并与 2005 年 12 月东亚冬季风异常做比较，本文引用 Wu 等^[9]所定义的东亚冬季风指数，利用 NCEP/NCAR 再分析资料^[29]计算了 1948 年 1 月~2008 年 2 月冬季各月东亚冬季风指数 I_w 。根据定义， I_w 为沿 20~70°N 21 个纬度带（间隔为 2.5°）的 110°E 与 160°E 海平面气压差值之和的标准化，即利用下式来计算：

$$I_w = \frac{(M_t - \bar{M})_i}{\sigma}, \quad (1)$$

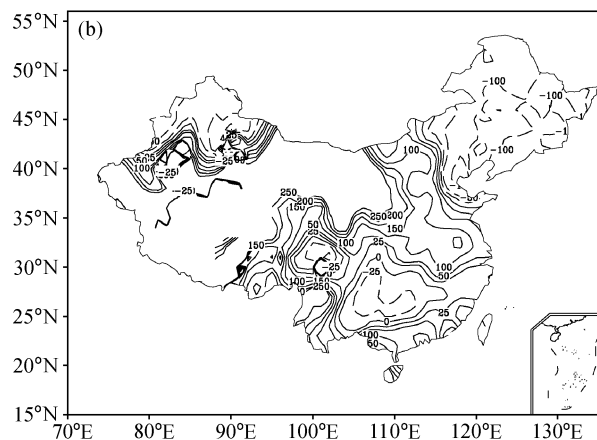
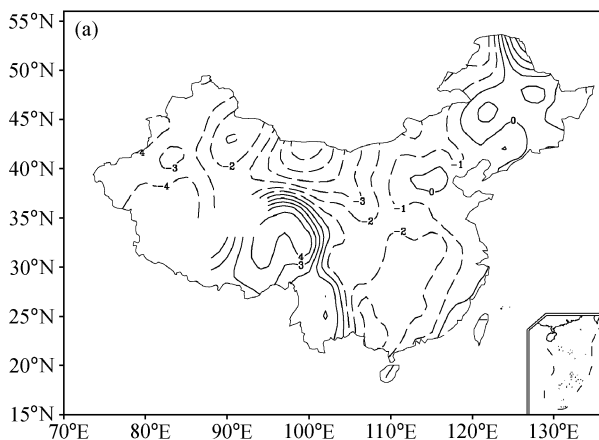


图 1 2008 年 1 月我国 (a) 气温距平 (单位:℃) 和 (b) 降水距平百分率的分布

Fig. 1 Distributions of (a) the surface air temperature anomalies (units: °C) and (b) rainfall anomaly percentages in Jan 2008. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies, respectively

其中, 对于 1 月和 2 月, t 为 1948 年 1 月~2008 年 1 月, $i=1, 2, \dots, 60$; 而对于 12 月, t 为 1948 年 12 月~2007 年 12 月, $t=1, 2, \dots, 59$ 。 $\bar{M}$ 为 1948~2007 年冬季各月份 M_i 的数学期望, σ 为 1948~2007 年冬季各月 M_i 的均方差。 M_i 为 1948~2007 年某一年冬季某月的 110°E 与 160°E 月平均海平面气压差沿 $20\sim70^\circ\text{N}$ 计 21 个纬度带 (间隔 2.5°) 之和,

$$M_i = \sum_{j=1}^{21} (p_{01} - p_{06}), j=1, 2, \dots, 21, (2)$$

其中 p_{01} 和 p_{06} 分别为 110°E 与 160°E 冬季 1 月平均海平面气压。然而, 这样所计算的 I_w 依赖于所参与统计的样本, 从而造成随后来所考虑样本的增加而需重新计算以前的指数。因此, 为了简便并依据世界气象组织 (WMO) 的规定, 本研究在计算 I_w 时, $\bar{M}$ 取为 1971~2000 年冬季各月的 M_i 的气候平均值, 而 σ 为 1971~2000 年 M_i 的均方差。因此, I_w 的正值愈大, 表明西伯利亚高压与阿留申低压的气压差愈大, 即东亚冬季风愈强; 相反, 若 I_w 的负值愈大, 则表明西伯利亚高压与阿留申低压的气压差愈小, 即东亚冬季风愈弱。

图 2a 和图 2b 分别是利用 (1) 式和 NCEP/NCAR 再分析的海平面气压资料所计算的冬季 12 月和 1 月东亚冬季风强度指数的年际变化。从图

2a 和 2b 可以看到, 无论 12 月或 1 月东亚冬季风都有很大的年际变化。由于本研究主要讨论 2008 年 1 月东亚冬季风的异常, 故主要考察 2005、2006 和 2007 年冬季的东亚冬季风指数的变化。从图 2a 可以看到这 3 年冬季, 东亚冬季风指数有很大差别。2005 年 12 月 I_w 为很大的正值, 是从 1948 年 12 月以来的最大值, 比它略小的有 1949、1952、1954 和 1966 年等; 而 2006 和 2007 年 12 月 I_w 为负值。这表明, 2005 年 12 月东亚冬季风很强, 从而引起了我国北方降雪偏多, 并在山东半岛引起暴风雪灾害; 而 2006 和 2007 年 12 月东亚冬季风很弱, 东亚出现暖冬。并且, 从图 2b 可以看到, 2006 和 2007 年 1 月 I_w 均为很小的负值, 而 2008 年 1 月 I_w 为较大的正值, 但它远不及 1963、1977 和 1981 年 1 月的 I_w 大。这表明 2006 和 2007 年 1 月东亚冬季风正常略偏弱, 而 2008 年 1 月东亚冬季风偏强。比较图 2a 和 2b, 2008 年 1 月的 I_w 也远不及 2005 年 12 月。因此, 从图 2b 可以明显看到, 2008 年 1 月东亚冬季风比 2005 年 12 月弱得多, 那么, 为什么 2008 年 1 月东亚气候异常却比 2005 年 12 月大得多? 这是必须深入研究的问题。

2.3 东亚冬季风环流系统异常

为了讨论 2008 年 1 月东亚冬季风异常的成

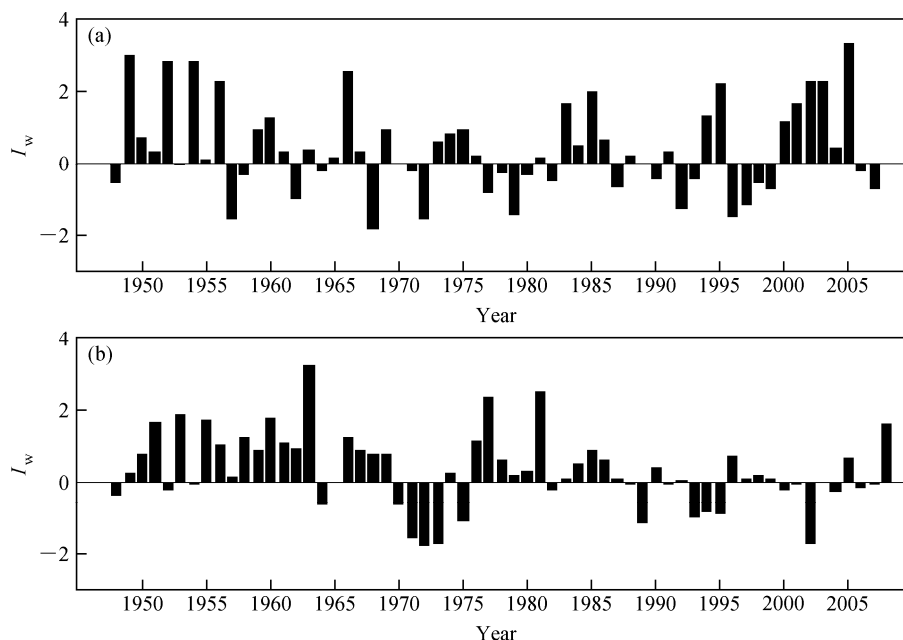


图 2 (a) 1948 年 12 月~2007 年 12 月和 (b) 1948 年 1 月~2008 年 1 月东亚冬季风指数

Fig. 2 Interannual variations of the East Asian winter monsoon index: (a) Dec 1948 to Dec 2007; (b) Jan 1948 to Jan 2008

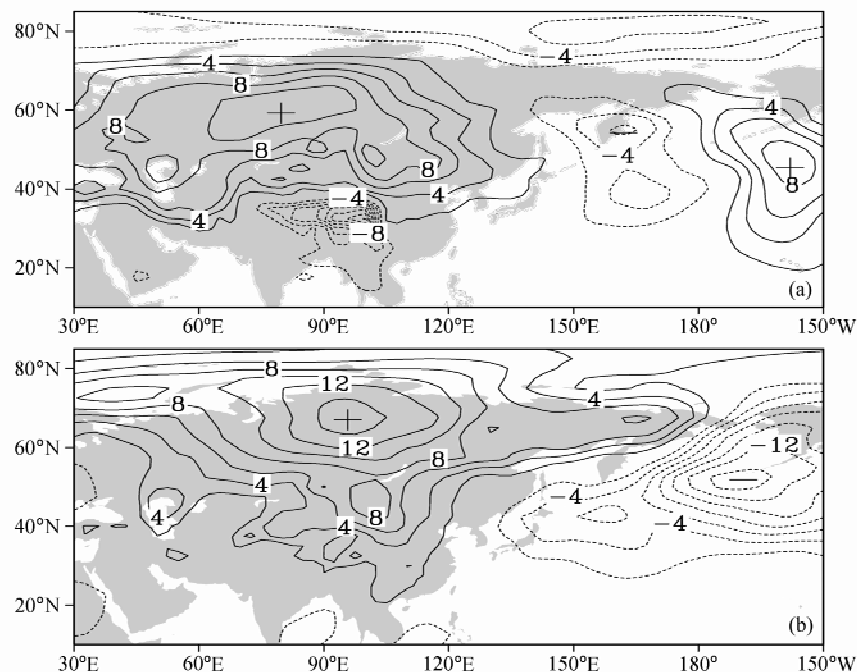


图 3 北半球 (a) 2008 年 1 月和 (b) 2005 年 12 月海平面气压距平分布 (单位: hPa)。以 1971~2000 年的气候平均态为正常值 (下同)

Fig. 3 Distributions of the monthly mean sea level pressure anomalies over the Northern Hemisphere for (a) Jan 2008 and (b) Dec 2005 (units: hPa). The anomalies are obtained by subtracting the 30 years climatology from 1971 to 2000

因, 首先分析 2008 年 1 月北半球海平面气压距平 (见图 3a) 并与 2005 年 12 月 (见图 3b) 做比较。从图 3a 可以看到, 在 2008 年 1 月西伯利亚和蒙古高原有正的海平面气压距平分布, 其中心位于乌拉尔以东地区, 而在鄂霍次克海和俄罗斯滨海地区和北美的西北部有负的海平面距平分布, 而在阿留申地区的东南侧的东北太平洋上空却有正的海平面距平。这表明, 2008 年 1 月西伯利亚高压偏强其中心偏西, 同时阿留申低压也偏西。然而, 比较图 3a 和 3b 可以看到, 2008 年 1 月无论西伯利亚高压或阿留申低压均比 2005 年 12 月弱。如图 3b 所示, 2005 年 12 月, 在西伯利亚有一个很强的正海平面气压距平, 而在阿留申地区有一个很强的负海平面气压距平, 因此 2005 年 12 月的 I_w 要比 2008 年 1 月的 I_w 大得多, 这表明 2008 年 1 月东亚冬季风要比 2005 年 12 月的冬季风弱。从图 3a 还可以看到, 2008 年 1 月西伯利亚高压中心虽然偏西, 但高压脊明显向东南方向伸展, 使得在 1 000 hPa 异常强的冷空气不断沿蒙古高原东侧南下入侵我国华中、华东和华南地区 (图略)。

2008 年 1 月东亚冬季风偏强也反映在北半球

850 hPa 风场。由图 4a 可以看到, 从乌拉尔地区经西伯利亚到蒙古高原有一反气旋环流异常, 这表明 2008 年 1 月此区域上空反气旋环流很强; 并且, 从东北亚经日本的北海道到鄂霍次克海上空有一气旋性环流异常, 这表明 2008 年 1 月此区域上空气旋环流很强。因此, 从蒙古高原到我国西北地区的河西一带有强的东北风距平风场, 这表明 2008 年 1 月东亚冬季风偏强, 来自西伯利亚的冷空气不断经蒙古高原东侧南下; 另一方面, 从图 4a 还可以看到: 从孟加拉湾到云贵高原有西南风的距平风场分布, 并且, 从热带西太平洋经南海到日本南部有一反气旋环流异常, 并在印度东部和孟加拉湾以及我国华南分别有一反气旋环流异常。这不仅表明强西太平洋副热带高压位于我国台湾以东副热带西太平洋上空, 且其比气候平均位置要偏北得多, 还表明从热带西太平洋、南海的偏东暖湿气流及从孟加拉湾和高原南侧来的西南暖湿气流流向我国长江中、下游和江南地区。这两支偏南气流把大量水汽输送到此区域, 并与从西伯利亚经蒙古高原东侧南下的冷空气在长江中、下游和江南地区形成稳定的切变线, 从而导

致了我国西南东部, 华中、华东和华南一带发生了低温雨雪冰冻灾害。

比较图 4a 与 4b 可以看到, 2008 年 1 月中高纬度的西伯利亚反气旋环流异常和阿留申气旋环流异常的位置都比 2005 年 12 月偏西。正如图 4b 所示, 2005 年 12 月一个强的反气旋距平环流位于西伯利亚北部, 一个强的气旋距平环流位于北太平洋的阿留申地区, 在我国东部有一支强的偏北风距平, 并从日本经朝鲜半岛到我国东北、山东半岛有明显的风场切变, 故导致日本和我国胶东地区降雪异常偏多, 造成了日本低温暴雪灾害以及我国山东半岛低温雨雪冰冻灾害。并且, 比较图 4a 和 4b 还可以发现, 2005 年 12 月与 2008 年 1 月在副热带地区上空大气环流有相当不同的异常分布。2005 年 12 月在我国华东、华南有偏北风异常, 而在中印半岛和孟加拉湾上空有东北风的异常, 这正与 2008 年 1 月的副热带地区环流异常的分布相反。因此, 尽管 2005 年 12 月东亚冬季风异常强, 但我国南方并没有出现低温雨雪冰冻

灾害。

上述分析结果表明, 东亚冬季风环流系统的变化与异常同时受中高纬度环流系统和副热带环流系统的控制。因此, 东亚冬季风环流系统的成员不仅包括中高纬度地区对流层下层的西伯利亚高压、阿留申低压和东亚的偏北风以及对流层中层的东亚大槽, 而且还包括副热带地区的西太平洋副热带高压与印度半岛经孟加拉湾到中印半岛的环流。为了更好地看到造成 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害的东亚冬季风系统各成员的异常, 我们根据上述 2008 年 1 月东亚冬季风环流异常的分析并综合, 从而给出如图 5 所示的引起我国 2008 年 1 月低温雨雪冰冻灾害的东亚冬季风系统异常示意图。

3 2007 年冬季热带太平洋海表温度的热力影响

与东亚夏季风系统异常一样, 东亚冬季风系统的异常同样受海—陆—气耦合的东亚季风气候

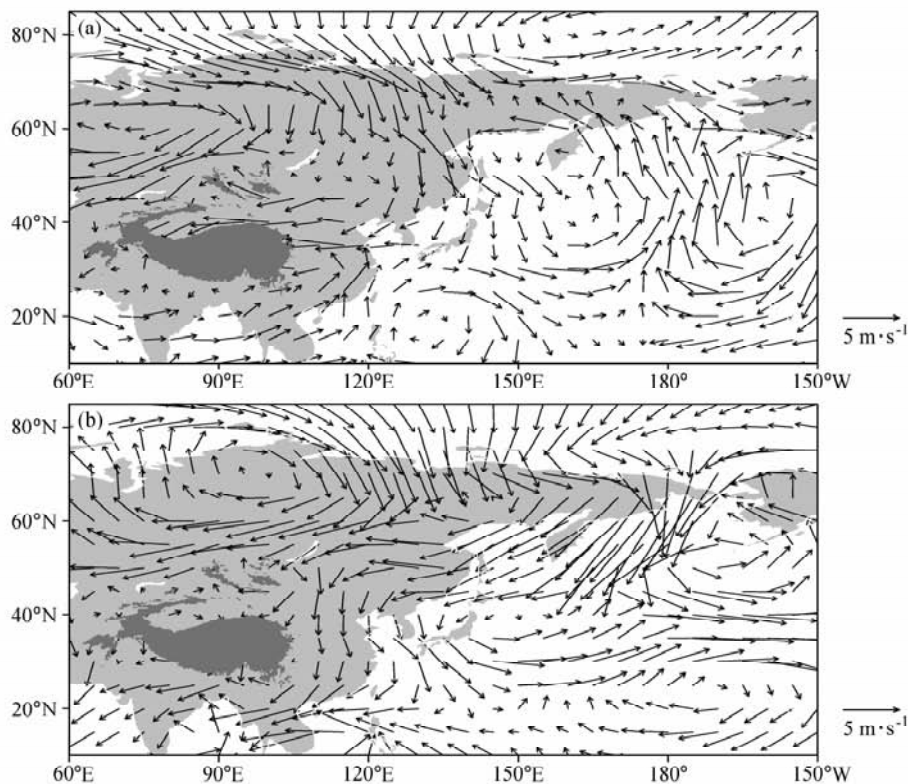


图 4 欧亚大陆和西太平洋上空 850 hPa 面上 (a) 2008 年 1 月和 (b) 2005 年 12 月距平风场分布

Fig. 4 Distributions of the monthly mean anomalous wind fields at 850 hPa over the Eurasian continent and the West Pacific for (a) Jan 2008 and (b) Dec 2005

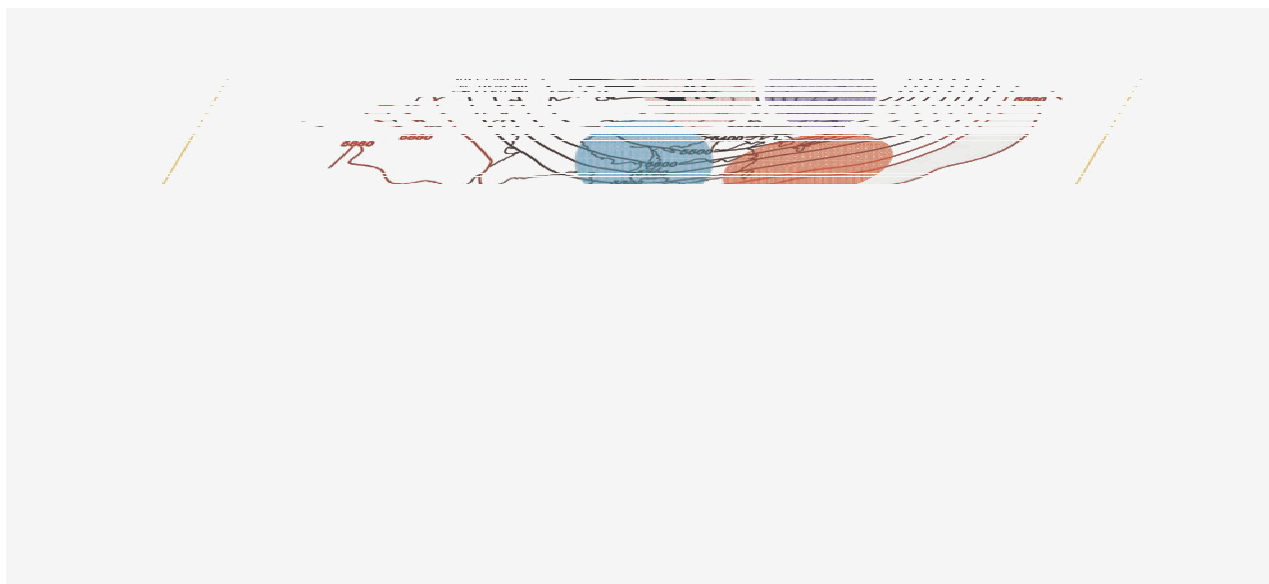


图 5 引起我国南方 2008 年 1 月严重灾害的东亚冬季风系统异常示意图

Fig. 5 Schematic map of the East Asian winter monsoon system anomalies, which are associated with the severe disaster in southern China in Jan 2008

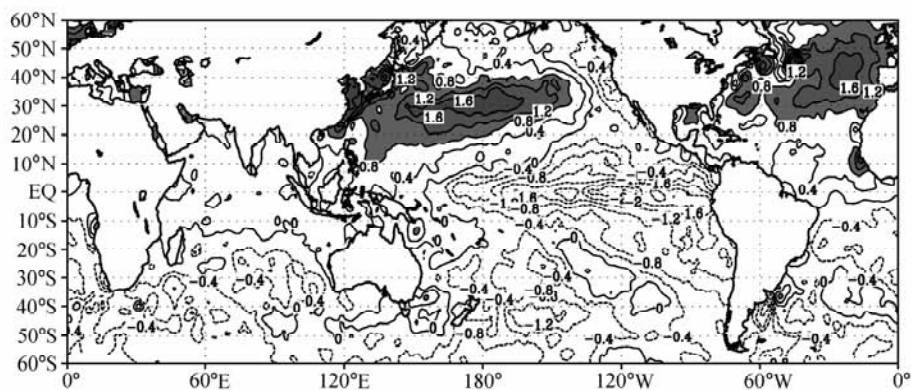
图 6 2007 年冬季全球海表温度距平分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。阴影区表示 SST 距平超过 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 6 Distribution of global SST anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) in the winter of 2007. The areas of SSTA over $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ are shaded

系统的影响。2008 年 1 月在我国发生的低温雨雪冰冻灾害与海洋热力异常密切相关。为此, 本节首先分析 2007 年冬季 (2007 年 12 月~2008 年 2 月) 全球海表温度距平分布 (见图 6)。从图 6 可以看到, 2007 年冬季在热带中、东太平洋海表温度 (SST) 有很大的负距平, 最大值可达 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 并且在西北太平洋和西北大西洋各有一个较大的正距平区域, 最大值可达 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为此, 首先分析 2007 年冬季热带太平洋区域的 SSTA 对 2008 年我国低温雨雪冰冻灾害的影响。

3.1 2007 年冬季热带中、东太平洋的热力影响

Chen 等^[18]以及陈文等^[30]的研究表明了热带

太平洋 ENSO 循环对于东亚冬季风环流和北半球行星波活动有很大影响。如图 6 所示, 2007 年冬季热带中、东太平洋 SST 距平呈现出较大的负距平, 2008 年 1 月热带东太平洋最大 SST 距平达到 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 为典型的 La Niña 事件。热带中、东太平洋发生的 La Niña 事件不仅对夏季气候异常有重要影响, 而且对冬季气候异常也有一定影响 (见文献 [18] 和 [31])。图 7 是 20 世纪 50 年代至今几次典型的 La Niña 事件发展阶段的冬季我国降水距平的合成分布 (最强的 9 次事件, 分别发生在 1965、1971、1974、1976、1985、1989、1996、1999 和 2000 年)。从图 7 可以明显看到,

当热带东太平洋 La Niña 事件处于发展期, 我国江南、华南和东南沿海地区冬季降水偏少。然而, 正如图 1b 所示, 2008 年 1 月我国南方降水却异常偏多, 加上长时间的低温, 从而导致了严重灾害的发生。这正与图 7 所示的 La Niña 事件发展期热带太平洋海温对我国冬季气候异常的影响相反。因此, 把热带太平洋的 La Niña 事件作为 2008 年 1 月我国南方低温雨雪冰冻灾害发生的主要原因, 还缺乏一定的说服力。

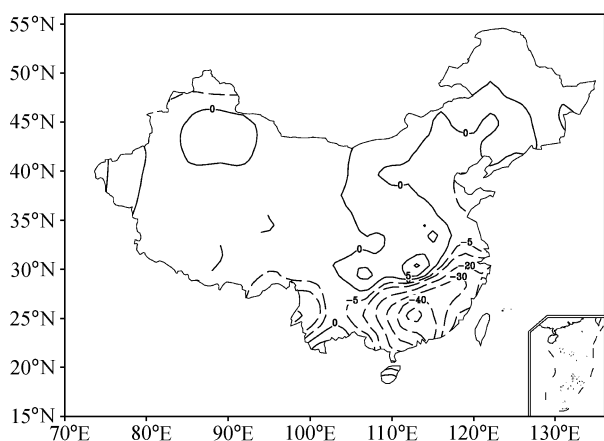
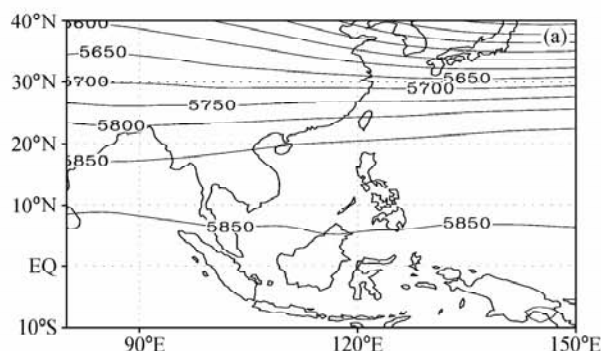


图 7 1951~2007 年期间热带太平洋 La Niña 事件发展期的冬季我国降水距平百分率的合成分布。实线和虚线分别表示正和负距平

Fig. 7 Composite distribution of the wintertime rainfall anomaly for the winters in the developing period of La Niña events during 1951—2007. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies of rainfall, respectively



3.2 2007 年冬季热带西太平洋海温对西太平洋副热带高压的影响

如图 6 所示, 2007 年冬季, 特别是 2008 年 1 月热带西太平洋出现较大的 SST 正距平。根据 Nitta^[25] 的研究, 这将使热带西太平洋上空, 特别是菲律宾周围对流活动增强。并且, Nitta^[25] 以及黄荣辉等^[26] 的研究都表明了热带西太平洋海温的升高是有利于西太平洋副热带高压的加强和位置偏北, 虽然这些研究是夏季热带西太平洋海温与西太平洋副热带高压的关系, 但这个结论是否也适合于冬季? 为此, 我们分析了 1978~2000 年冬季 (12 月至次年 2 月) 热带西太平洋 Niño. west ($0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域 SST 距平的年际变化, 并取其中 SST 距平大于 0.3°C 为热带西太平洋偏暖年, 这样 1984、1989、1996 和 1999 年为热带西太平洋冬季海温偏暖年。从图 8a 可以看到, 副热带高压位于从中印半岛、南海经菲律宾到热带西太平洋的上空; 如图 8b 所示, 在中印半岛及我国南海和华南上空有一较大的正距平中心, 因此当冬季热带西太平洋处于偏暖时, 西太平洋副热带高压位置偏西、偏北。然而, 在热带西太平洋处于偏冷的冬季, 东亚和热带西太平洋上空并不出现相反的位势高度场距平分布, 而在东南亚上空出现较零乱的正距平中心 (图略)。

上述结果表明, 2007 年冬季热带西太平洋处于偏暖状态, 它利于热带西太平洋副热带高压偏北, 因而可能对 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害起到一定作用。

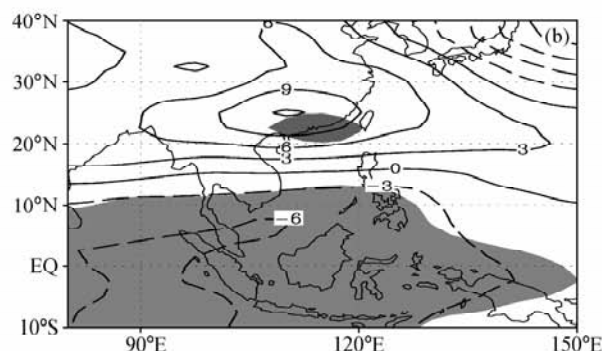


图 8 1978~2000 年 Niño. west 区域偏暖的冬季, 东亚和热带西太平洋上空 (a) 500 hPa 位势高度场及其 (b) 距平合成 (单位: gpm) 实线和虚线分别表示正和负的位势高度距平。阴影区表示信度超过 90%

Fig. 8 Composite distributions of (a) the 500 hPa geopotential height fields and (b) their anomalies (units: gpm) over East Asia and the tropical western Pacific for the winters of the warming state of the Niño. west region 1978—2000. The significance levels over 90% are shaded

4 2007 年冬季大西洋对东亚冬季风异常的热力影响

Wallace 等^[32]的研究表明了北半球冬季欧亚大陆大气环流存在一个称为欧亚 (EU) 型的遥相关, Hoskins 等^[33]从动力理论指出这种遥相关是由于 Rossby 波列在球面大气传播的结果。并且, Gambo 等^[34]从数值模拟的结果指出北半球冬季副热带大西洋 SSTA 能够激发形成 EU 型遥相关的 Rossby 波列。最近, Li^[35]的研究也表明了西北大西洋 SST 的变化严重影响着乌拉尔地区上空大气环流的异常, 西北大西洋海表的增暖对于乌拉尔地区阻塞高压的形成起着重要作用。

鉴于 Gambo 等^[34]研究所用的只是 1969~1979 年的资料, 为此, 本文利用 1949~2008 年 NCEP/NCAR 再分析资料, 使用 Gambo 等^[31]计算北半球纬向非对称高度场 (即扰动高度场) 的相关方法分别计算了冬季 (30~50°N, 15~40°W) 区域平均的西北大西洋 SSTA 距平与北半球 500 和 700 hPa 扰动高度场的相关系数分布 (见图 9a 和 9b)。无论从图 9a 还是 9b 都可以看到, 北半球冬季 500 或 700 hPa 扰动高度场与西北大西洋 SSTA 的相关系数从大西洋经欧亚大陆到西北太平洋存在着一个与 Wallace 等^[32]所提出的 EU 型遥相

关相似的 Rossby 波列分布。在副热带大西洋和西非上空为负相关区域, 在西北大西洋上空为正相关区域, 在北欧和中欧上空为负相关区域, 在乌拉尔山及西伯利亚地区上空为正相关区域, 在西北太平洋上空为负相关区域, 并在副热带西太平洋为正相关区域, 且在这些区域的最大相关系数均超过 95% 信度。这就可以说明, 当北半球冬季西北大西洋 SST 处于偏暖状态, 则在副热带大西洋和西非上空将出现负的高度场距平, 在西北大西洋上空将出现正的高度场距平, 在北欧和中欧将出现负的高度场距平, 在乌拉尔山及西伯利亚上空将出现正的高度场距平, 这有利于在此区域形成阻塞高压; 并且在日本海和西北太平洋将出现负的高度场异常, 这将有利于东亚大槽的维持和加深; 此外, 在副热带西太平洋上空和我国华南将出现正的高度场异常, 这有利于西太平洋副热带高压的加强和位置的偏北。

从图 6 可以看到, 2007 年冬季在西北大西洋区域有正的 SSTA 分布, 最大距平值可达 1.6 °C。根据图 9a 和 9b 所示, 2007 年冬季西北太平洋的 SST 升高是有利于北半球冬季乌拉尔地区阻塞高压的形成和加强以及西太平洋副热带高压的加强和偏北。因此, 2008 年 1 月不仅乌拉尔地区上空的阻塞高压特别强, 而且西太平洋副热带高压也

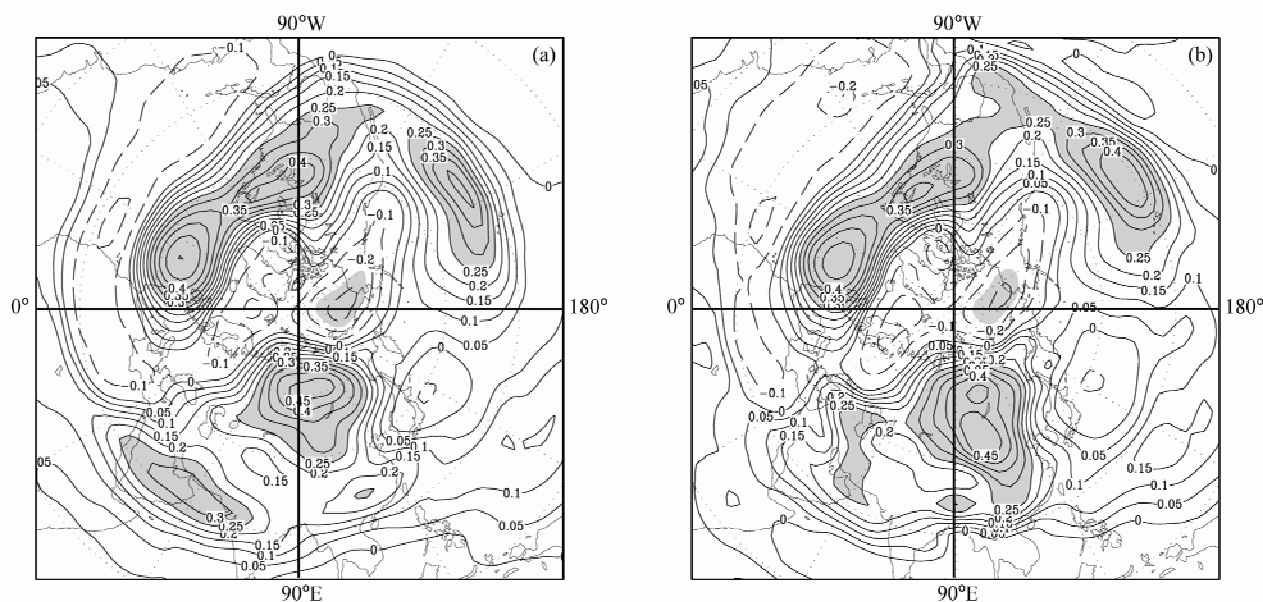


图 9 北半球冬季 500 hPa 扰动高度与大西洋 (30~45°N, 10~25°W) 区域平均的 SST 相关系数分布图。阴影区表示信度超过 95%
Fig. 9 Distributions of the correlation coefficients between the 500 hPa geopotential height and regional averaged SST over the Atlantic Ocean (30~45°N, 10~25°W) in Northern Hemisphere winter. The confidence levels over 95% are shaded

偏北。

综上所述, 2007 年冬季西北大西洋海温升高是造成我国 2008 年 1 月低温雨雪冰冻灾害发生的重要原因之一。

5 2007 年冬季东亚冬季风异常的内动力过程的影响

与东亚夏季风系统变异成因一样, 大气下垫面的海洋、陆面、冰雪对东亚冬季风系统的热力强迫必须通过冬季风环流系统内部的动力、热力过程来起作用。因此, 分析 2007 年冬季东亚冬季风系统变异的内动力过程对于认识 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害发生的物理过程是很重要的。Huang 等^[24]和陈文等^[30]的研究都表明了东亚冬季风异常的内动力过程是与准定常行星波活动异常密切相关, 为此, 本节着重分析 2007 年冬季, 特别是 2008 年 1 月东亚冬季风异常与 AO 变化及其与准定常行星波活动的关系。

5.1 2008 年 1 月东亚冬季风异常与 AO 的关系

正如引言所述, Gong 等^[13]把 Thompson 等^[11,12]所提出的 AO 概念应用到关于东亚冬季风变化的研究中, 他们的研究表明了 AO 指数的年际变化与东亚冬季风的变化有较好的关系。为此, 本节首先分析 AO 对 2007 年冬季, 特别是 2008 年 1 月东亚冬季风异常的影响。

图 10 是按照 Thompson 等^[11]所提出 AO 指数定义而计算的 2005 年 10 月~2008 年 2 月各月 AO 指数的变化。从图 10 可以看到, 2008 年 1 月 AO 指数为正, 而 2005 年 12 月 AO 指数为负 (-2.1)。若从季节时间尺度看, 2005 年冬季 (2005 年 12 月~2006 年 2 月) AO 指数均为负; 2006 年冬季, 从 2006 年 12 月到 2007 年 1 月 AO 指数为正值, 分别为 2.2 和 2.1, 但 2007 年 2 月转为负值; 而 2007 年冬季 (2007 年 12 月~2008 年 2 月) AO 指数均为正值。Wu 等^[9]的研究结果表明, AO 指数与一般 EAWM 指数有反相关系, 如 2005 年与 2006 年东亚冬季风指数与 AO 指数有很好的负相关。然而, 我们应看到, 东亚冬季风指数描述的是大陆与海洋东西气压差异所导致的经向气流的变化, 而 AO 描述的是中高纬度地区和副热带地区纬向气流的变化, 因此, 东亚冬

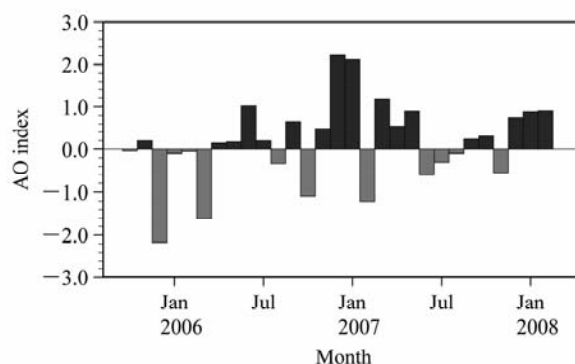


图 10 2005 年 10 月~2008 年 2 月 AO 指数的月际变化
Fig. 10 Monthly variations of the AO from Oct 2005 to Feb 2008

季风指数与 AO 的变化虽有一定关系, 但 AO 变化反映了南北两个纬度带气候的变化。陈文等^[36]的研究表明: AO 对我国冬季气温变化的影响主要在我国北部地区, 尤其是在东北地区, 而我国南方的温度影响较小。当 AO 为负时, 我国主要在东北、华北等北方地区的气温偏低, 而南方气温变化较小, 在西南地区甚至有正的温度异常; 当 AO 为正时, 我国东北、华北等北方地区的气温偏高, 而南方的气温变化不明显。2005 年 12 月 AO 指数为负, 我国北方气温偏低, 而南方气温却偏高; 相反, 2008 年 1 月 AO 指数为正, 这种大尺度环流场的异常有利于我国东北地区气温偏高 (图 1a)。因此, AO 变化引起的环流变化在东亚地区有区域性的限制, 东亚冬季风指数的变化影响了整个冬季风的强度, 而 AO 则对东亚季风的变化叠加有区域性的影响。对于 2008 年 1 月东亚冬季风的异常而言, AO 这种大尺度环流的影响似乎不能说明 2008 年 1 月我国南方地区低温雨雪冰冻灾害的发生。

5.2 2008 年 1 月东亚冬季风异常与北半球准定常行星波活动的关系

黄荣辉等^[22]的研究表明了 2005 年和 2006 年东亚冬季风异常与北半球准定常行星波活动的异常有很好的关系。为此, 本小节进一步从北半球冬季准定常行星波活动异常来探讨 2008 年 1 月东亚冬季风异常的成因。

若不考虑大气的粘性作用与外强迫, 在球面 P 坐标下波一流相互作用方程可写成^[37]

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v}^* = \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \nabla \cdot F, \quad (3)$$

其中, ρ 是空气密度, a 是地球半径, f 是科里奥利参数, φ 为纬度, $\bar{u}$ 为纬向平均气流, $\bar{v}^*$ 为平均剩余经圈环流, $\nabla \cdot F$ 为行星波 E-P 通量的散度, 在球坐标系中 $\nabla \cdot F$ 为

$$\nabla \cdot F = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} [F(\varphi) \cos \varphi] + \frac{\partial}{\partial p} [F(p)], \quad (4)$$

其中, $F(\varphi)$, $F(p)$ 分别是

$$\begin{cases} F(\varphi) = -\rho a \cos \varphi \overline{u'v'}, \\ F(p) = \rho a \cos \varphi \frac{Rf}{HN^2} \overline{v'T'}, \end{cases} \quad (5)$$

其中, R 是气体常数, H 是大气标高 (大约为 7 km), N 是 Brunt-Vaisala 频率, v' , v' 和 T' 分别为扰动纬向风、扰动经向风和扰动温度。为方便起见, 本文采用下式计算行星波 E-P 通量的散度 D , 即

$$D = \nabla \cdot F / \rho a \cos \varphi. \quad (6)$$

利用 2008 年 1 月扰动 u' , v' 和 T' 的再分析资料, 应用 (5) 式可计算出 2008 年 1 月的行星波 E-P 通量的分布, 并应用 (4) 和 (6) 式可计算出行星波 E-P 通量的散度。图 11 是计算的 2008 年 1 月北半球 1~3 波合成的准定常行星波 E-P 通量及其散度异常分布。从图 11 可看到, 2008 年 1

月北半球行星波 E-P 通量散度的异常在 50~70°N 纬度带的对流层中、上层有正距平, 这引起了中高纬地区对流层中、上层纬向平均纬向流的加速; 相反, 在 20~40°N 纬度带的对流层上层有负距平, 这引起了副热带上空纬向平均纬向流的减弱, 从而使得 2008 年 1 月的 AO 指数为正。并且, 在 2008 年 1 月准定常行星波从中高纬度对流层下层往副热带对流层上层传播加强, 从而引起了 2008 年 1 月副热带急流上扰动的增强, 这些扰动引起了江南和华南发生持续性降水。此外, 从图 11 还可看到, 行星波从高纬度对流层往平流层传播也比常年加强, 这引起了在平流层中、下层行星波 E-P 通量的辐合的异常, 而在对流层中、上层有强的行星波 E-P 通量的辐散的异常。

6 2007 年冬季平流层极涡的影响

冬季平流层极涡对对流层气候异常有较大影响^[38], 特别对东亚冬季风的强弱更有严重影响, 因此, 平流层极涡的下传对于 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害的发生也有重要影响。从图 12a 和 12b 分别可以清楚看到, 一个正的纬向平均纬向风距平从 2007 年 12 月中旬开始向对流层下传, 于 2008 年 1 月下旬传到对流层下层; 与此同时,

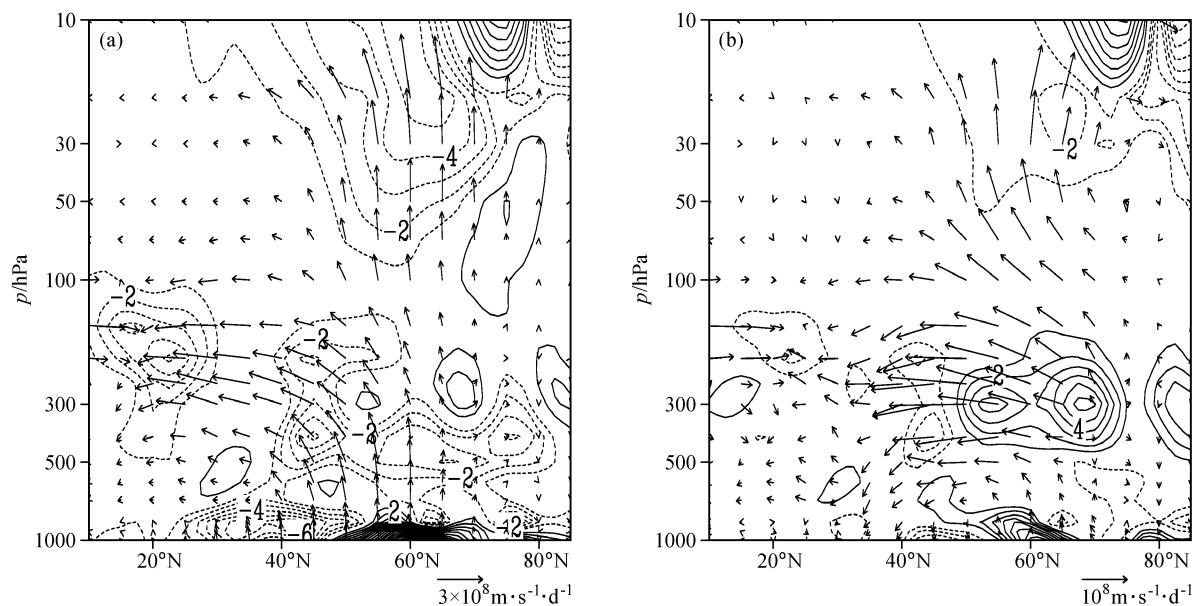


图 11 2008 年 1 月北半球准定常行星波 1~3 波合成的 E-P 通量(矢量)和散度(等值线)(a)及其距平分布(b)

Fig. 11 (a) Composite distributions of E-P fluxes of quasi-stationary planetary waves for wave number 1—3 and their divergences (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) and (b) their anomalies over the Northern Hemisphere in Jan 2008

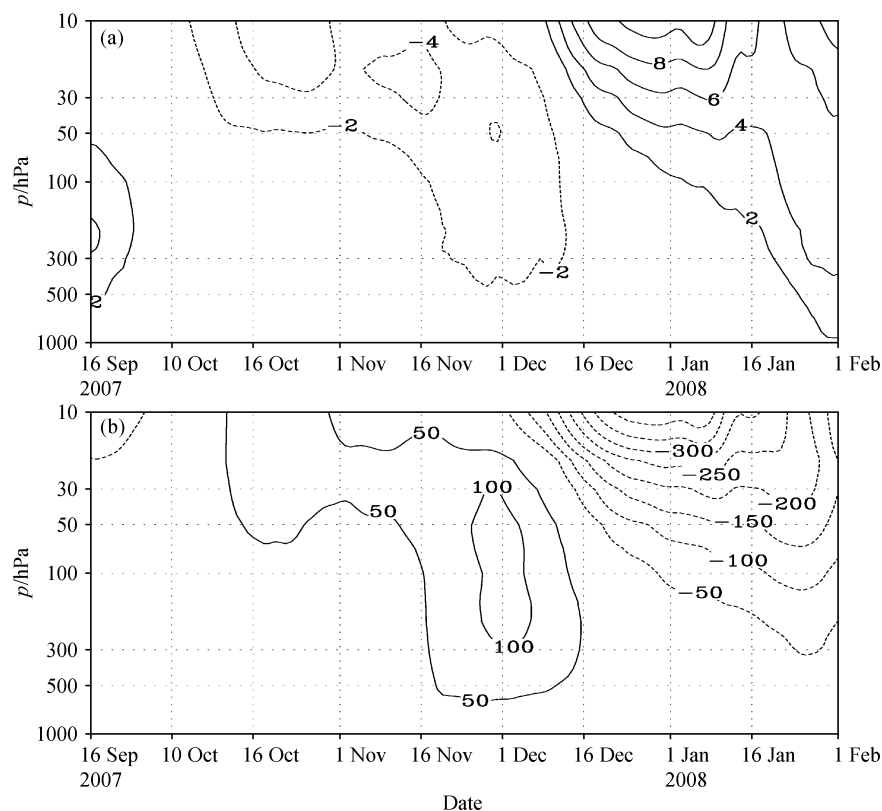


图 12 2007 年 9 月至 2008 年 2 月北半球 (a) 沿 60°N 纬向平均纬向风距平 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (b) 沿 70~90°N 纬向平均位势高度距平 (单位: gpm) 的时间-高度剖面

Fig. 12 Time-altitude cross sections of (a) the zonal mean zonal wind anomalies along 60°N (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) the zonal mean geopotential height anomalies along 70–90°N (units: gpm) over the Northern Hemisphere from Sep 2007 to Feb 2008

一个负的纬向平均高度场距平从 2007 年 12 月中旬开始也从高纬度平流层向对流层下传, 于 2008 年 1 月下旬也下传到高纬度对流层下层。这些都表明了北半球平流层极涡于 2007 年 12 月中旬从高纬度平流层下传, 于 2008 年 1 月下旬到达北半球高纬度对流层下层。极涡的下传不断把平流层冷空气注入到高纬度对流层, 这对于 2008 年 1 月东亚大槽的维持起到一定作用, 从而对 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害的发生起到重要作用。

7 结论和讨论

鉴于 2008 年 1 月在我国发生的低温雨雪冰冻灾害所造成经济损失的严重性, 本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 从东亚季风气候系统有关成员的异常分析了此灾害的发生成因。分析结果表明, 2008 年 1 月在中高纬度的乌拉尔地区上空阻塞高压异常发展和长时间的维持以及东亚大槽位

置的长时间稳定, 使得异常强的冷空气不断沿蒙古高原东侧南下入侵我国华中、华东和华南地区, 而在副热带地区的西太平洋副热带高压异常偏北, 使得携带大量湿空气的副热带气流沿副高西侧北上, 并与南下冷空气在长江流域相遇, 从而导致了我国 2008 年 1 月低温雨雪冰冻灾害的发生。进一步的分析结果表明, 利用发生在热带中、东太平洋的 La Niña 事件对我国冬季气候异常的影响并不能很好地说明此次低温雨雪冰冻灾害的发生, 而利用热带西太平洋和西北大西洋海温异常对中高纬度和副热带环流异常的影响可以较好地说明这次灾害的发生成因。此外, 分析结果还表明, 2007 年冬季北半球准定常行星波向低纬对流层上层传播的加强和平流层极涡的下传也可能是造成 2008 年 1 月我国低温雨雪冰冻灾害的主要原因之一。

2008 年 1 月发生在我国低温雨雪冰冻灾害的成因是多方面的, 是东亚季风气候系统中诸多成

员变异共同作用的结果, 它绝不可能是单一因子所造成的, 因此, 应进一步从控制东亚冬季风系统的海—陆—气耦合气候系统各成员的变异深入分析。并且, 一般在热带中、东太平洋发生 La Niña 事件的冬季我国南方往往降水偏少, 而 2008 年 1 月热带中、东太平洋发生了 La Niña 事件, 我国降水距平分布却异常偏多, 这与 La Niña 事件发生的冬季我国降水距平分布恰相反。另外, 在 AO 指数为正的冬季, 一般东亚冬季风偏弱, 然而, 2008 年 1 月 AO 指数为正, 东亚冬季风却偏强。这些都是值得进一步研究的科学问题。

参考文献 (References)

- [1] 中国气象局国家气候中心. 全国气候影响评价. 2008 年 1 月, 1~6
National Climate Center/CMA. *China Climate Impact Assessment* (in Chinese). January 2008, 1~6
- [2] 陶诗言. 冬季中国上空平直西风环流条件下的西风波动. 气象学报, 1956, **27**: 345~360
Tao Shiyun. The westerly waves in the westerly circulation over China in winter. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1956, **27**: 345~360
- [3] 陶诗言. 阻塞形势破坏时期的一次东亚寒潮过程. 气象学报, 1956, **28**: 63~74
Tao Shiyun. A process of cold wave over East Asia during the breaking period of blocking situation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1956, **28**: 63~74
- [4] 陶诗言. 十年来我国对东亚寒潮的研究. 气象学报, 1959, **30**: 226~230
Tao Shiyun. Study on East Asian cold waves in China during recent 10 years (1949—1959). *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1959, **30**: 226~230
- [5] 丁一汇. 东亚冬季风的统计研究. 热带气象, 1990, **6**: 119~128
Ding Yihui. A statistical study of winter monsoon in East Asia. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1990, **6**: 119~128
- [6] 丁一汇, 温市耕, 李运锦. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究. 气象学报, 1991, **49**: 430~439
Ding Yihui, Wen Shigeng, Li Yunjin. A study of dynamic structures of the Siberian high in winter. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, **49**: 430~439
- [7] Chen Wen, Graf H F. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relationship to the global circulation. Max—Planck—Institute für Meteorologie Report, 1998, No. 50
- [8] Chen Wen, Graf H F, Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**: 48~60
- [9] Wu Bingyi, Wang Jia. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**, doi: 10. 1029/2002 GL015373
- [10] Jhun J G, Lee E J. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, 2004, **17**: 711~726
- [11] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1297~1300
- [12] Thompson D W J, Wallace J M. Annual modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, 2002, **13**: 1000~1016
- [13] Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 2073~2076
- [14] Huang Ronghui, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part I: Forcing by topography. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 78~92
- [15] Huang Ronghui, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part II: Forcing by stationary heat sources and forcing by topography and stationary heat sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 93~108
- [16] Huang Ronghui, Gambo K. On other wave guide in stationary planetary wave propagation in the winter Northern Hemisphere. *Science in China*, 1983, **26**: 940~950
- [17] Chen W, Graf H F, Takahashi M. Observed interannual oscillation of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**: 2073, doi: 10. 1029/2002GL016062
- [18] Chen W, Takahashi M, Graf H F. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relation to NAM and SST. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: D24, 4797, doi: 10. 1029/2003 JD003934
- [19] Chen Wen, Yang Song, Huang Ronghui. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D14110, Doi: 10. 1029/2004 JD005669
- [20] Huang Ronghui, Wang Lin. Interdecadal variations of Asian winter monsoon and its association with the planetary wave activity. Proceedings in the Symposium of Asian Monsoon. Winter MONEX: A Quart Century and Beyond, Kuala Lumpur Malaysia, 4—7 April 2006, **26**
- [21] Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. Characteris-

- tics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24**: 993~1023
- [22] 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 等. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系. *大气科学*, 2007, **31**: 1033~1048
Huang Ronghui, Wei Ke, Chen Jilong, et al. The East Asian winter monsoon anomalies in the winters of 2005 and 2006 and their relations to the quasi-stationary wave activity in the Northern Hemisphere winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**: 1033~1048
- [23] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. *大气科学*, 2003, **27**: 770~787
Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asian climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 770~787
- [24] Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. Climate variations of the summer monsoon over China. *East Asian Monsoon*, Chang C P, Ed. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. 213~270
- [25] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impacts on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **64**: 373~390
- [26] 黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. *大气科学*, 1988, **14** (特刊): 95~107
Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia in summer and its physical mechanism. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1988, **14** (Special Issue): 95~107
- [27] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 243~256
- [28] 王遵娅, 张强, 陈峪, 等. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征. *气候变化研究进展*, 2008, **4**: 63~67
Wang Zunya, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China. *Advance in Climate Change Research* (in Chinese), 2008, **4**: 63~67
- [29] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [30] 陈文, 顾雷, 魏科, 等. 东亚季风系统的动力过程和准定常行星波活动的研究进展. *大气科学*, 2008, **32** (4): 950~966
Chen Wen, Gu Lei, Wei Ke, et al. Studies of the dynamic processes of East Asian monsoon system and the quasi-stationary planetary wave activities. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 950~966
- [31] Gambo K, Kudo K. Three-dimensional teleconnections in the zonally asymmetric height field during the Northern Hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1983, **61**: 36~52
- [32] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnection in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 784~812
- [33] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1179~1196
- [34] Gambo K, Lu L. Numerical simulation of Eurasian teleconnection pattern in atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter. *Adv. Atmos. Sci.*, 1983, **4**: 385~394
- [35] Li Shuanglin. Influence of the Northwest Atlantic SST anomaly on the circulation over the Ural Mountains. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 971~988
- [36] 陈文, 康丽华. 北极涛动与东亚气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. *大气科学*, 2006, **30**: 863~870
Chen Wen, Kang Lihua. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual time scale: Roles of quasi-stationary planetary waves. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 863~870
- [37] Edmon M J, Hoskins B J, McIntyre M E. Eliassen-Palm section for the troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 2600~2617
- [38] Black R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic oscillation. *J. Climate*, 2002, **15**: 268~277