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

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

陈文 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 100080

摘 要 本文系统地回顾了近几年来关于东亚季风系统的动力过程与机理方面的研究,特别是关于东亚季风系统年际和年代际变异与准定常行星波活动关系的研究。最近的许多研究表明东亚夏季风系统变异的动力过程主要与东亚/太平洋型(即 EAP 型) 遥相关有关,利用 EAP 型遥相关理论不仅可以说明东亚夏季风系统各成员之间内在联系的机理,而且可以揭示热带西太平洋热力和菲律宾周围对流活动影响东亚夏季风系统季节内、年际变化及其异常的经向三极子结构的动力过程;除了 EAP 型遥相关外,研究还表明北半球夏季从北非到东亚的对流层上层经向风异常存在一个沿急流传播的遥相关型,它对东亚夏季风系统异常的经向三极子型分布也有重要影响。并且,最近关于东亚冬季风变异与行星波活动的关系已做出许多研究,并获得很大进展。这些研究表明:北半球冬季准定常行星波传播波导在年际和年代际变化上存在着反相振荡特征,即若"极地波导"加强,则"低纬波导"将减弱,反之亦然;准定常行星波两支波导的反相振荡与北半球环状模(NAM)的年际和年代际振荡有紧密联系,而 NAM 的变化通过行星波活动的异常可以导致东亚冬季风的年际和年代际变化;此外,准定常行星波活动的年际变化与东亚冬季风异常之间的关系明显地受热带平流层纬向风准两年周期振荡(QBO)的调制,进一步的研究还提出了可能的机理。最后本文还指出:2005~2007 年冬季东亚冬季风的异常不仅与西伯利亚高压和阿留申低压的变异有关,而且与极涡的演变和准定常行星波活动密切相关。

关键词 东亚季风系统 EAP 遥相关型 准定常行星波 E-P 通量

文章编号 1006 - 9895 (2008) 04 - 0950 - 17 中图分类号 P433 文献标识码 A

Studies of the Dynamic Processes of East Asian Monsoon System and the Quasi-Stationary Planetary Wave Activities

CHEN Wen, GU Lei, WEI Ke, and HUANG Ronghui

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract The studies of the dynamic processes and mechanism of East Asian monsoon system (EAMS) variability and anomaly, especially on the relation of the interannual and interdecadal variabilities and anomalies of EAMS to quasi-stationary planetary wave activities, are systematically reviewed. During recent years, many studies showed that the dynamic processes of East Asian summer monsoon (EASM) system variability and anomaly are mainly associated with the East Asia/Pacific (EAP) teleconnection pattern. By using the EAP teleconnection theory, it can be described not only how the various components of EASM system are related, but also how the thermal effect of the

tropical western Pacific and the convective activities around the Philippines influence the variations of EASM system on intraseasonal and interannual timescales with a distribution of meridional tripole pattern. And studies also have shown that there is a summer teleconnection pattern of upper-tropospheric meridional wind anomalies along the jet stream from North Africa to East Asia, which has an important impact on the meridional tripole pattern of EASM anomalies, Moreover, the recent studies on the relations of the variabilities and anomalies of the East Asian winter monsoon (EAWM) to planetary wave activities have achieved important progress. The studies have shown that in the Northern Hemisphere winter, the variations of the two waveguides of planetary wave propagation have an outof-phase oscillation on both interannual and interdecadal timescales. If the polar waveguide is strengthened, then the low latitude waveguide may be weakened, and vice versa. And it is found that the oscillation of these two waveguides is closely related to the interannual and interdecadal variations of Northern Annular Mode (NAM), which can lead to the interannual and interdecadal variabilities of the EAWM via anomalous planetary wave activities. Besides, the results indicate that the relationship between the planetary wave activity and the EAWM on interannual timescale is strongly modulated by the tropical quasi-biennial oscillation (QBO) of zonal wind in the stratosphere, and possible mechanisms are further proposed. Finally, it has been shown that anomalous EAWMs from 2005 to 2007 are not only associated with the variations of Siberian high and Aleutian low, but also closely related to the evolution of polar vortex and the quasi-stationary planetary wave activities.

Key words East Asian monsoon system, East Asia/Pacific teleconnection pattern, quasi-stationary planetary wave, E-P flux

1 引言

季风形成的最根本、最直接的原因就是海陆热力差异[1,2],大尺度的海洋、陆地分布使得东亚地区成为一个强季风区域;另一方面,海陆分布引起的地理上不对称的非绝热加热会强迫出行星尺度的扰动,该扰动在大气中传播并与平均流相互作用,使得平均环流场发生改变[3~5]。因此,东亚季风系统不仅与海洋、陆面、冰雪、青藏高原等外强迫的强弱有关,而且与它内部的动力、热力过程密切相关,特别与地形和热源强迫所产生的准定常行星波的活动有关,即与行星尺度的扰动变化异常有关,所以,研究季风变异的机理需要开展准定常行星波的研究。

大气准定常行星波是指波长与地球半径相当或大于地球半径的大尺度波动,通常为纬向波数 1、2 和 3 的波动。由于其空间尺度大,演变周期长,具有准定常性,因而它的形成和演变对于大气环流的演变和短期气候的变动(variability)有十分重要的影响。所以,准定常行星波动力学一直是大气动力学特别是气候动力学中一个重要的前沿研究方向。早在 20 世纪 60 年代,Charney 和 Drazin^[6]就引进了波的折射指数,讨论准定常行星波在具有垂直切变理想气流中的传播特征;Dickinson^[7]指出准定常

行星波从高纬度的对流层向平流层传播时存在"波 导"现象,即"极地波导"。Matsuno[8]则研究了在 比较符合实际分布的基本气流中准定常行星波从对 流层向平流层的传播,并指出由于对流层准定常行 星波往平流层传播使得平流层发生爆发性增温。在 20世纪80年代初,由于全球大气环流研究的发展, 发现了全球大气环流异常存在着"遥相关"现 象[9],而大气环流异常遥相关的机理与行星波动力 学紧密联系在一起,从而大大促进了准定常行星波 在三维球面大气中传播的研究。Hoskins和 Kaloly^[10]的研究将叶笃正^[11]所建立的 Rossby 波在 纬向上的能量频散理论推广到二维球面大气中,提 出了准定常行星波在球面大气的传播理论,从而在 理论上解释大气环流遥相关的物理机制。之后,大 气行星波动的能量频散理论在大气环流和气候的研 究中得到广泛的应用。与此同时, 许多学者更多关 注行星波动在球面三维大气中的传播及其与基本气 流的相互作用。Huang 和 Gambo[12~14]利用波在非 均匀缓变媒质的传播理论,从观测事实和数值模拟 深入研究了准定常行星波在北半球冬、夏季的三维 传播特征,他们把叶笃正先生所建立的 Rossby 波 频散理论推广到冬、夏季球面三维大气中,并从观 测事实、动力理论和数值模拟提出准定常行星波在 北半球冬季的三维传播中存在着两支波导,除了

Dickinson 称之为"极地波导"外,还存在着"低纬波导",即行星波也能从中纬度对流层下层传播到低纬的对流层上层。

季风的变化与异常(变异)是季风区旱涝、酷 暑和暴雪等极端气候以及暴雨、沙尘暴和浓雾等极 端天气发生的直接原因,因此,要提高对极端气候 和极端天气的预报准确率,就必须研究季风变异的 成因。季风系统变异的成因非常复杂, 但不外乎与 外界强迫有关,或由于大气内部的动力过程。就东 亚季风而言,目前的研究多侧重于影响因子的研 究,特别是关注海洋、陆面、冰雪的热力变化对季 风变异的强迫作用,如关于热带西太平洋的热力变 化、热带太平洋的 ENSO 循环、青藏高原积雪和绕 流、西北干旱及半干旱区的热力变化等对东亚季风 变异的影响已做出许多研究。Huang 等[15,16]已综 述和回顾了有关这方面的研究。迄今为止,对季风 系统内部动力过程的分析则相对缺乏。事实上,大 气下垫面的海洋、陆面、冰雪的热力强迫必须通过 大气内部的动力、热力过程起作用,即外因要通过 内因才能起作用,因此,研究东亚季风系统的动力 过程也是非常重要的。最近几年,在国家重点基础 研究发展规划项目、中国科学院知识创新工程重要 方向项目以及国家自然科学基金有关项目的资助 下,在有关东亚季风系统变异的内动力学方面,特 别是与季风系统变异的动力过程有关的准定常行星 波动力学上取得了一些创新研究成果。因此,本文 主要回顾和综述我国最近几年来季风系统内动力学 的研究成果,特别是回顾我们研究组在有关东亚季 风系统变异的动力过程和准定常行星波活动这一大 气科学前沿领域研究中所取得的最新进展。

2 东亚夏季风系统变异的动力过程与 EAP 型遥相关波列

东亚夏季风系统的变异受热带太平洋和印度洋海气相互作用的影响,而这个影响是通过什么动力过程来实现的,这是一个直接与东亚夏季风系统变异成因密切相关的问题。

早在 20 世纪 80 年代初, Huang 和 Gambo^[17]的研究表明,在北半球夏季准定常行星波的三维传播中虽然两支波导不明显,特别是"极地波导"不明显,但是准定常行星波可以在对流层从低纬地区准水平地传播到高纬地区,这正是 Hoskins 和

Karoly^[10]所指出的准定常行星波在球面大气的传播。1987年,Nitta^[18]从观测事实首先指出菲律宾周围与日本周围大气环流的异常存在着相反振荡,即 Pacific-Japan (P-J)振荡;与此同时,黄荣辉和李维京^[19,20]利用北半球夏季准定常行星波的传播规律,并从观测事实、动力理论和数值模拟研究了北半球夏季菲律宾周围由对流活动异常所引起的北半球夏季大气环流异常的遥相关波列分布特征及其机理,从而提出东亚/太平洋遥相关,即 EAP 型遥相关。近几年来,利用这个理论,黄荣辉等进一步研究了东亚夏季风系统各成员之间内在的联系和机理以及热带西太平洋热力变化对东亚夏季风系统季节内和年际变化的影响及机理^[16,27,31]。

2.1 东亚夏季风系统成员变异内在联系及其机理

东亚夏季风系统的一个重要子系统是中国长 江、淮河流域的梅雨、日本的"Baiu"和朝鲜半岛的 "Changma",它们都是由东亚偏南夏季风与北方 南下的冷空气相遇而形成的东亚季风雨带。因此, 此季风雨带不仅受从孟加拉湾、中印半岛吹来的西 南季风的影响,还受西太平洋副热带高压和中纬度 扰动的影响。中纬度冷空气的活动受乌拉尔阻塞与 东北亚阻高(即鄂霍次克海高压)的影响[21]。因 此, 东北亚阻高的年际变异对于东亚夏季风系统有 一定影响。陆日宇等[22,23]的研究表明夏季西太平 洋副热带高压的年际变异与东北亚阻高的变异有很 好的反相关, 当热带西太平洋处于冷状态, 菲律宾 周围对流活动弱,不仅引起西太平洋副热带偏南、 偏西,而且引起东北亚阻高偏强,并且这两者之间 存在反相关的机理。研究结果还表明:由于 EAP 遥相关波列的传播, 使得热带西太平洋热力变化和 菲律宾周围的对流活动不仅影响西太平洋副热带高 压,而且影响鄂霍次克海高压。图 1 是当热带西太 平洋处于暖状态,由菲律宾周围强对流所激发的 EAP 型遥相关波列的分布示意图,如图所示,在我 国江淮流域、日本和韩国上空有一反气旋环流异 常,而在东北亚上空有一气旋环流异常,这表明在 热带西太平洋处于暖状态时, 菲律宾周围对流活动 强, 这将引起西太平洋副热带高压偏北偏强, 而东 北亚阻高偏弱,在这种情况下,位于江淮流域的梅 雨锋就偏弱;相反,在热带西太平洋处于冷状态 时,菲律宾周围对流活动弱,这将引起西太平洋副 热带高压偏南、偏西, 东北亚阻高偏强。

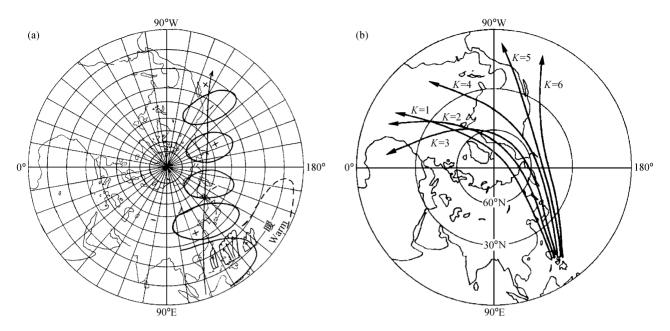


图 1 当热带西太平洋处于暖状态时由菲律宾周围强对流所激发的 EAP 遥相关型的分布示意图 (a) 及行星波传播路径图 (b)

Fig. 1 (a) Schematic map of the East Asia/Pacific teleconnection pattern distributions (i. e., EAP pattern teleconnection) and (b) propagating ray paths of planetary waves exited by strong convective activities around the Phillippines during the warming state of the tropical western Pacific

2.2 热带西太平洋热力变化对东亚夏季风系统季 节内变异影响的过程及机理

亚洲夏季风在南海爆发以后将在东亚上空向北 推进。早在20世纪50年代,叶笃正等[24]就指出东 亚上空在6月上、中旬存在行星尺度环流的突变, 这个突变将带来东亚夏季风在长江流域、淮河流域 的爆发。然而, Huang 和 Sun^[25]的研究表明有些 年份的夏季东亚上空在6月上、中旬行星尺度环流 的突变并不明显。最近,黄荣辉等[26,27]从再分析 资料、动力理论和数值模拟深入地研究热带西太平 洋的热力状态对西太平洋副热带高压及东亚夏季风 环流的影响过程。他们的研究表明: 当夏季热带西 太平洋处于暖状态, 菲律宾对流活动很强, 从而使 得东亚夏季风雨带在6月上、中旬明显由华南北跳 到江淮流域,并于7月初由江淮流域北跳到黄河流 域、华北和东北地区,这将引起江淮流域夏季风降 水的减少,往往发生干旱(图 2a);相反,当热带西 太平洋处于冷状态, 菲律宾周围活动偏弱, 这种情 况西太平洋副热带高压北进时,于6月中旬或7月 初向北突跳并不明显, 而是以渐进式向北移动, 从 而使得东亚季风雨带一直维持在江淮流域, 这将引 起此流域夏季风降水偏多,往往发生洪涝(图 2b)。

曹杰等[29]应用 Charney 和 Devore[30] 所提出的

大气环流演变的多平衡态理论,研究菲律宾周围对流活动强弱对热带西太平洋副热带高压季节内的非线性演变过程,结果表明:西太平洋副热带高压北进时在6月上、中旬是否发生突跳主要依赖于菲律宾周围对流活动的强弱,若菲律宾周围对流活动强,则它所引起的热力强迫强,此强加热强迫所产生的波动不仅与基本流相互作用强,而且波动之间的相互作用也强,因此,在此情况下西太平洋副热带高压于6月上、中旬将发生突跳式北进;相反,当菲律宾周围对流活动是弱的,则它所引起的热力强迫也弱,此弱加热强迫所产生的波动不仅与基本流相互作用弱,而且波动之间的相互作用也弱,因此,在此情况下,西太平洋副热带高压于6月上、中旬并不发生突跳式的北进,只是随外部热力强迫的振荡而振荡。

2.3 热带西太平洋热力变化对东亚夏季风系统年 际变化的准两年周期振荡的影响机理

黄荣辉等^[26,31]的研究表明东亚夏季风系统在年际时间尺度上的变异存在准两年周期振荡,并在空间上的分布显示出经向三极子分布;他们的研究还表明热带西太平洋热力变化也存在显著的准两年周期振荡,此振荡对东亚夏季风系统的准两年周期振荡具有重要影响;此外,他们还利用 EAP 型遥

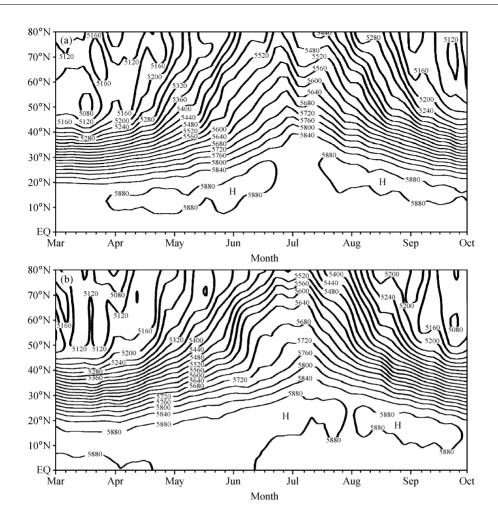


图 2 $1978\sim 2000$ 年期间菲律宾周围对流强 (a) 和对流弱 (b) 的夏季合成的沿 135° E 500 hPa 位势高度的纬度-时间剖面图 (单位: gpm)。高度场资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 [28]

Fig. 2 Composite distributions of the latitude-time cross sections of 500-hPa geopotential height (gpm) along 135°E for the summers with (a) strong convective activities and (b) weak convective activities around the Philippines during 1978 – 2000. Data are from the NCEP/NCAR reanalysis data^[28]

相关理论讨论热带西太平洋热力状态的准两年周期振荡影响东亚夏季风系统的准两年周期变化的物理机制,指出热带西太平洋海一气相互作用的准两年周期变化通过 EAP 型波列的传播从而影响东亚夏季风系统的准两年周期变化。图 3 是 1958~2000年东亚夏季风指数 I_{EAM} 与热带西太平洋 Niño. west $(0\sim14^{\circ}\text{N},130^{\circ}\sim150^{\circ}\text{E})$ 区域平均的月 SSTA 的落后,同时和超前相关,其中东亚夏季风指数 I_{EAM} 依图 1 所示的环流异常遥相关型而定义如下:

$$I_{\text{EAM}} = (\text{Nor}\Delta U_{\text{A850}} - 2\text{Nor}\Delta U_{\text{B850}} + \text{Nor}\Delta U_{\text{C850}}),$$
(1)

这里, $Nor\Delta U_{A850}$ 、 $Nor\Delta U_{B850}$ 和 $Nor\Delta U_{C850}$ 分别是 A $(10^{\circ}N \sim 17.5^{\circ}N, 110^{\circ}E \sim 140^{\circ}E)$ 、B(27.5 $^{\circ}N \sim$

35.0°N, 120° E ~ 150° E) 和 C (45° N ~ 52.5° N, 130° E ~ 160° E) 区域平均的夏季 850 hPa 高度上纬向风的标准化距平。由(1)式所定义的东亚夏季风指数与黄刚 [32] 所定义的 EAP 指数具有同样的优点。从图 3 可以看到两者相关系数具有准两年的变化,最大相关系数可达 0.45。这表明热带西太平洋热力状态的准两年变化对于东亚夏季风系统的变化有着很大影响,这个影响与 EAP 型波列的传播有关。

3 从北非到东亚上空经向风异常遥相关型及其对东亚夏季风的影响和机理

Lu 等^[33]和 Lin 等^[34]的研究表明,利用夏季对流层上层经向风场可以很好地描述夏季北半球中高

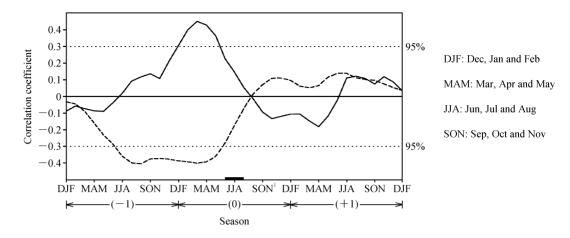


图 3 $1958\sim2000$ 年 I_{EAM} 与 Niño. west $[(0^{\circ}\sim14^{\circ}N, 130^{\circ}E\sim150^{\circ}E), 实线]$ 以及 Niño 3. 4 (虚线) 区域平均的季 SSTA 的落后、同时和超前相关。图下方 "0" 表示同时,"一"和 "十"表示海温超前和落后

Fig. 3 The lagged correlations between $I_{\rm EAM}$ and the seasonal mean SST anomalies (SSTA) averaged over the regions of Niño. west (0°-14°N, 130°E-150°E) (solid line) and Nino 3.4 (dashed line) during 1958 – 2000. "0" denotes the simultaneous correlation, and "—" ("+") the SSTA in the months before (after) $I_{\rm EAM}$

纬地区对流层上层大气环流的遥相关,从北非到东亚上空对流层上层经向风异常沿西风急流存在一个很明显的遥相关型。Lu和 Kim^[35]的研究进一步表明这个遥相关型是沿西风急流传播的 Rossby 波列所引起的。Yang等^[36]分析了亚洲和太平洋地区(亚太)及北美冬季气候年际变异与东亚急流的变异有一定关系,发现在北半球冬季东亚急流耦合了一个从亚洲大陆伸展到北美的遥相关型,这个相关型在东亚和西太平洋上空有很强的信号。

利用上述北非到东亚沿急流传播的北半球夏季中纬度经向风遥相关以及上述所述的 EAP 遥相关理论可以很好地解释 "东亚夏季风系统" 年际变异的空间分布三极子结构的机理,从而可以深入揭示我国夏季各区域旱涝气候灾害的发生机理。黄荣辉等^[26,31]的研究表明,热带西太平洋热力异常通过EAP 型遥相关不仅影响东亚夏季风系统的准两年周期变化,而且还通过 EAP 遥相关影响东亚夏季风环流异常在空间分布的经向三极子分布。最近,陶诗言和卫捷^[37]利用等熵位涡分析西太平洋副热带高压的北进和南撤的动力过程,指出沿中国东部沿岸高压脊(或低压槽)的形成与 Lu 和 Kim^[35]所指出的东亚上空对流层上层 Rossby 波列沿急流传播有关。因此,中纬度地区上空槽脊活动对于西太平洋副热带高压的南北移动也有一定影响。

图 4 是由夏季东亚上空 500 hPa 高度场的 EOF1 所回归的东亚上空 500 hPa 高度场距平分

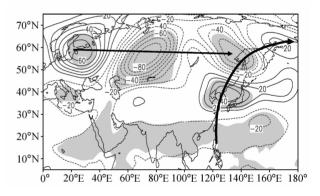


图 4 由 EOF1 所回归的东亚上空 500 hPa 高度距平场的分布 (资料取自 ERA-40 再分析^[39])。实、虚线表示正、负高度距 平; 阴影表示信度超过 95%

Fig. 4 Distribution of 500-hPa height anomalies over East Asia regressed by the time coefficients of EOF1. Solid and dashed contours indicate positive and negative height anomalies, respectively, and areas with confidence level over 95% are shaded. Data are from the ERA-40 reanalysis data $^{[39]}$

布,从图中可看到,东亚和热带西太平洋上空夏季风环流异常呈现出一个明显的经向三极子结构,这个分布型与 EAP 遥相关型分布相一致,而且与中纬度对流层上层经向风的遥相关也有一定关系。因此,东亚夏季风环流系统异常的经向三极子分布可能与从南到北的 EAP 型波列和对流层上层从西到东沿西风急流传播的 Rossby 波列相互作用有关。最近,Hsu和 Lin^[38]的研究也表明东亚夏季风降水异常的经向三极子分布是与 EAP 型遥相关和对流

层上层沿东亚急流传播的 Rossby 波列相互作用有 关。

4 东亚冬季风系统年际和年代际变异的动力过程及其与行星波活动的关系

东亚冬季风系统的变异,特别是强寒潮,同样 也会引起我国寒害、雪灾、冰冻、早霜和晚霜等气 候灾害的发生。比如2008年1月份,我国西北、华 北、华南、西南、华东的许多省市遭受50年来最严 重的暴雪、持续低温和冰冻灾害,造成了交通运输 中断、输电设备严重被毁,越冬作物冻死,使这些 地区遭受重大经济损失和人员伤亡。因此,研究东 亚冬季风系统变异的成因及机理在国内外逐渐兴 起,特别是关于东亚冬季风系统年际变异动力过程 的研究正在受到重视。自从 Thompson 和 Wallace[40]提出北极涛动(AO)概念之后,许多科学家 研究了AO对北半球中、高纬地区的冬季环流以及 东亚冬季风的影响[41~43]。这些研究不仅表明 AO 对于北半球冬季中、高纬度环流和东亚冬季风有严 重影响, 也表明 AO 与北半球的环状模密切相关。 最近, Chen 等[44]的研究表明北半球这种环状模的 变化和东亚冬季风的变异都与行星波活动有关。因 此,要揭示东亚冬季风系统年际和年代际变异的动 力过程也必须深入分析北半球行星波活动的年际和 年代际变异特征。

4.1 东亚冬季风系统年际变异的动力过程及其与 行星波传播波导的年际振荡的关系

正如引言所述,理论研究、数值模拟以及观测资料分析的结果都表明在气候平均态下北半球冬季准定常行星波的传播存在两支波导。陈文等[45~47]的研究揭示出准定常行星波的传播具有明显的年际变化。由于行星波在三维大气中的传播发生异常,则 E-P 通量会产生异常的辐合或辐散,从而导致平均流的变化。为了研究准定常行星波活动的年际变化,陈文等[45,46]将 Wallace 和 Gutzler[9]发现大气环流遥相关型的方法应用到经圈上行星波的 E-P 通量散度场上,从而提出行星波传播异常在经圈平面上的遥相关,并定义了准定常行星波活动指数。陈文等[48]利用 NCAR/NCEP 再分析资料和上述定义,计算 1958 年至 2005 年各年冬季平均的行星波活动异常的指数变化(见图 5)。由图 5 可见,准定

场行星波活动有明显的年际变化,这种变化对应着行星波 E-P 通量散度场 EOF 的第一主分量,因而它描述了准定常行星波活动的主要模态。分析表明:对应于准定常行星波活动的高指数,在对流层有异常强"低纬波导",即从中高纬度向低纬度对流层顶附近的行星波传播异常强,而通过"极地波导"向平流层的传播明显减弱;另一方面,当行星波活动处于低指数时,则有相反的行星波传播的异常[45,46]。所以,北半球冬季准定常行星波传播的两支波导在其年际变化上存在反相振荡关系,当其中一支波导有异常增强时,则另一支波导会有异常的减弱。

由于准定常行星波的传播发生异常时, 会产生 E-P 通量的异常辐散或辐合,这必然会导致相应的 平均流的变化。图 6 给出对标准化的行星波活动指 数线性回归的纬向平均的纬向风场(图 6a)和 500 hPa 位势高度场的分布(图 6b)以及它们之间 的相关系数。从图 6a 不仅可以很清楚地看到在 55°N 附近西风增强和 35°N 附近西风减弱的一个南 北偶极子模态,这个偶极子模态从地面一直伸展到 平流层,而且还可看到纬向风异常与行星波活动指 数的相关系数均超过了99%的信度检验。应该指 出的是:图 6a 所显示的这种深厚的纬向风南北偶 极子型态正是纬向风年际变异的 EOF 的第一主分 量(见文献 $\lceil 41 \rceil$); 而图 6b 所示的由 EOF1 回归的 500 hPa 位势高度场则主要表现出纬向对称的空间 分布型,北极地区上空的低压和中纬度(主要在海 洋上) 高压之间的振荡, 这明显反映出 AO 的型

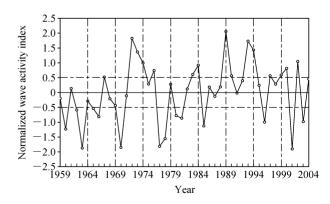


图 5 利用冬季行星波 E-P 通量散度场的遥相关所定义的准定常行星波活动指数标准化后的年际变化

Fig. 5 The interannual variations of normalized index for the wintertime planetary wave activity defined by using the teleconnection of E-P flux divergence

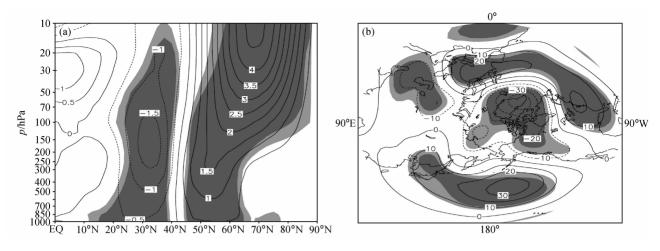


图 6 由标准化的行星波活动指数线性回归的纬向平均纬向风场(a,等值线间隔为 0.5 m/s)和 500 hPa 位势高度场(b,等值线间隔为 10 gpm)的分布。阴影:相关系数超过 95%(浅色)和 99%(深色)的统计信度。

Fig. 6 Distributions of the zonal-mean zonal wind (a) and the geopotential height at 500 hPa (b) regressed from the normalized planetary wave activity index. The shaded areas indicate those with significance levels over 95% (light) and 99% (dark). Contour intervals are 0.5 m/s in (a) and 10 gpm in (b)

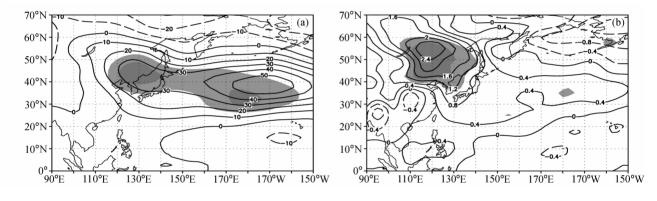


图 7 合成的行星波活动高指数年与低指数年的冬季(12 月~2 月)500 hPa 高度场之差(a,等值线间隔为 10 gpm)和 850 hPa 温度场之差(b,等值线间隔为 0.4 $\mathbb C$)的分布。浅、深阴影表示差异的显著性达到 95%、99%的信度

Fig. 7 Composite distributions of differences of (a) DJF 500-hPa geopotential height and (b) DJF 850-hPa temperature between high and low wave activity indexes winters. Contour intervals are 10 gpm in (a) and 0.4 °C in (b). Heavy and light shadings indicate areas at the 99% and 95% confidence levels, respectively

态^[40]。由此可见,AO 是与准定常行星波传播的两个波导之间的反相振荡密切相关。

为了进一步研究上述行星波传播两支波导之间的振荡对东亚冬季风的影响, Chen 等[44]采用合成分析的方法, 并由图 5 中以±0.5 为门槛值, 分别挑选出 15 个行星波活动的高指数冬季和 14 个低指数冬季合成而得到 500 hPa 高度场和 850 hPa 温度场的异常分布。从合成后的 500 hPa 高度场上可以看到行星波活动高指数年的冬季, 东亚大槽明显减弱(图 7a), 减弱的大槽说明影响东亚冬季气候的寒潮爆发很可能变少。因此, 在合成的 850 hPa 温度场上从西伯利亚、中国华北和东北、一直到朝鲜

半岛有明显的增暖(图 7b),其中中国华北和东北地区的增暖也可以从合成的中国 160 个观测站的差异图上得到证明^[44,49];并且进一步的研究发现,由于西伯利亚高压和阿留申低压会随着行星波活动的变化而同时增强或减弱,使得两个系统之间的气压梯度也同时增强或减弱,从而在西伯利亚高压东侧出现经向风的异常。这样在我国华北、东北以及西伯利亚部分地区出现北风或南风异常,这将导致该地区在冬季出现异常寒冷或者增暖。

4.2 QBO 对东亚冬季风和行星波活动关系的调制 作用

热带平流层纬向风存在准两年周期的振荡[50],

这种长周期的变化并不与季节变化直接相联系且具有一定程度的不规律性,其周期平均而言约为 26 个月,因此被称为准两年振荡 (QBO)。在中高纬度地区平流层大气环流也具有准两年周期振荡现象,比如北半球冬季极涡在热带 QBO 为西风时比热带 QBO 为东风位相时更强、更深厚^[51]。陈文等^[52~56]的一系列研究揭示出热带平流层 QBO 可以通过影响准定常行星波的传播而产生中高纬度平流层环流的准两年振荡。

图 8a 和 8b 是按照热带纬向风 QBO 不同位相合成的北半球冬季准定常行星波 E-P 通量的分布,从中可以看到,无论东、西风位相年,行星波都沿两支波导传播。然而,从图 8c 可以清楚看到: 热带纬向风 QBO 的西风位相年与东风位相年相比,沿极地波导传播的行星波明显减弱,而在对流层上层向低纬地区的传播显著增强。与此相对应的是: 西风位相年的冬季北半球 50°N 以北的平流层西风却明显增强,而从 20°N 到 50°N 的平流层西风却明显减弱(见图 9)。因而,平均纬向西风在热带纬向风 QBO 不同位相年的分布在热带外区域形成偶极子型,这就是所谓的"Holton-Tan"振荡[51]。其实,上述行星波传播的异常与纬向西风的关系与前一节中的年际振荡关系也是一致的,只是这里的关系主要局限于平流层和对流层上层。

由于热带纬向风 QBO 可以影响平流层和对流 层上层的风场结构,而该处的风场结构会影响对流 层行星波向上的传播,因此,热带纬向风 QBO 对 行星波传播的年际振荡及其与东亚冬季风关系可能 起到调制作用。为此, Chen 和 Li^[57]进一步将行星 波活动异常的冬季分成西风和东风位相的情况。图 10 给出按照热带平流层纬向风 QBO 不同位相合成 的冬季行星波活动高指数年与低指数年 500 hPa 高 度场差的分布。从图 10b 可以看到, 在 QBO 东风 位相的冬季东亚地区上空出现非常显著的正高度异 常, 若与图 7a 比较, 则可以看出此异常的强度有明 显的增加;而从图 10a 可以看到,在 QBO 西风位 相的冬季, 东亚大槽没有明显的变化, 显著的正异 常只出现在北太平洋地区。并且,与此相对应合成 的 850 hPa 温度场的差异同样表现出类似的变化 (图 11)。在 QBO 东风位相的冬季,显著的增温出 现在东北亚地区, 若与图 7b 相比, 此时增温的范 围和强度均有所增大;而在QBO 西风位相的冬季,

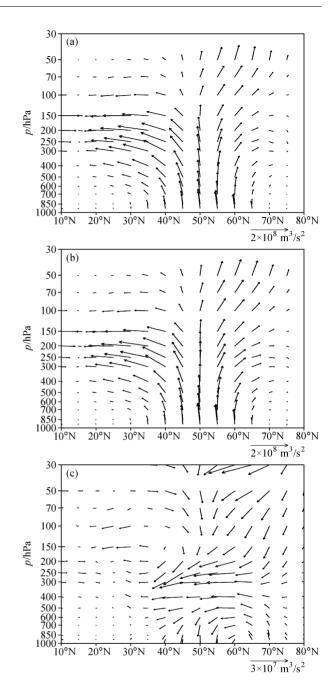


图 8 按照热带纬向风 QBO 不同位相合成的北半球行星波 E-P 通量分布:(a)西风位相年;(b)东风位相年;(c) 西风位相年减去东风位相年

Fig. 8 Composite distributions of planetary wave fluxes over the Northern Hemisphere for (a) the westerly QBO phase winters and (b) the easterly QBO phase winters, and (c) the difference between westerly and easterly phases (westerly minus easterly)

东北亚地区的增温并不显著,只是在中国中部出现 比较弱的减温。因此,东亚冬季的气候异常与准定 常行星波活动的关系明显地受到热带平流层纬向风

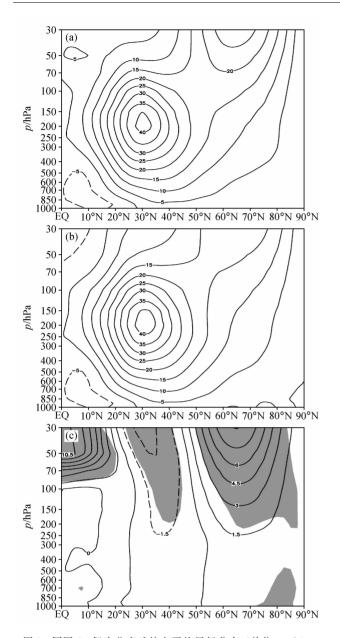


图 9 同图 8, 但为北半球纬向平均风场分布 (单位: m/s)。 (a、b) 等值线间隔为 5 m/s; (c) 等值线间隔为 1.5 m/s, 阴影 表示差异的显著性达到 95%的信度

Fig. 9 As in Fig. 8 except for the zonal mean zonal wind. Contour intervals are 5 m/s in (a) and (b), and 1.5 m/s in (c). Shadings in (c) indicate areas at the 95% confidence level

QBO 的调制。

4.3 东亚冬季风年代际变异的动力过程与行星波 传播波导的反相振荡的关系

东亚冬季风也有很显著的年代际变化,它从 1987年之后显著变弱,从而引起了东亚的持续暖 冬[16]。东亚冬季风的年代际变异同样与准定常行 星波活动有关。最近, Huang 和 Wang [58] 研究北半 球冬季准定常行星波活动的年代际变异及其对东亚 冬季风的影响,结果表明从20世纪80年代后半期 北半球准定常行星波活动发生了一个显著的年代际 变化。正如图 12b 和 12c 所示, 准定常行星波的 "低纬波导"从1987年起显著增强,即准定常行星 波从中高纬度对流层往低纬对流层上层传播增强, 这使得在 35°N 附近对流层上层行星波 E-P 通量辐 合增强;相反,在1987年之前,如图12a所示,"低 纬波导"较弱,而"极地波导"较强。根据波-流相 互作用原理,1987年之后,"低纬波导"的增强所 引起的 35°N 上空准定常行星波 E-P 通量的辐合将 引起 35°N 附近上空的纬向西风的减弱, 从而使 AO 加强, 东亚冬季风减弱。

2005~2007 年东亚冬季风异常与 准定常行星波活动的关系

2005~2007 年东亚大陆冬季气候出现很大异 常。2005年冬季与2006年冬季北半球出现截然相 反的气候异常。黄荣辉等[59]利用 NCEP/NCAR 再 分析资料分析 2005 年和 2006 年冬季东亚气候和东 亚冬季风的异常情况。2005 年冬季 (从 2005 年 12 月~2006年2月,下同),北半球冬季从西欧经乌 拉尔地区到西伯利亚和东亚地区气温偏低,特别是 在乌拉尔山东侧,蒙古高原的西北侧气温比常年偏 低 2°(2)°(3)9、出现了冷冬; 而 2006 年冬季, 从西欧经 乌拉尔地区到西伯利亚以及东亚、南亚地区气温都 偏高,特别是从欧洲经乌拉尔地区到贝加尔湖地 区,气温比常年偏高2℃多,我国东北和重庆市周 围气候也比常年偏高 2℃多, 出现暖冬。东亚地区 2005年与2006年冬季气候的差别还反映在冬季东 亚的降水上。2005年冬季,由于东亚和东北亚地 区气温偏低, 东亚地区寒潮爆发频繁, 这导致我国 西北、东北地区以及长江流域冬季降水量比常年偏 多 50%~150%。特别是 2005 年冬季我国胶东半 岛和日本遭受暴雪灾害,造成了严重经济损失[60]; 相反,2006年冬季我国西北和华北地区降雪量比 常年偏少50%以上,并且,胶东半岛和长江下游地 区降水量也偏少,只是在东北、内蒙古北部、长江 中游地区和河套地区降雪偏多。2008年1月份,我 国西北、西南、华中、华南和华东地区很多省市遭 受50年来最严重的雪灾和冻害,我国西北、华北 西部、江淮流域、华南中南部、云南西部降水偏多

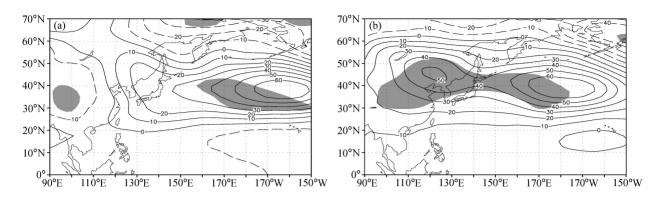


图 10 按照热带纬向风 QBO 不同位相合成的冬季行星波活动高指数年与低指数年 500 hPa 高度场之差的分布: (a) 西风位相年; (b) 东风位相年。等值线间隔:dagpm;阴影:差异的显著性达到 95%信度

Fig. 10 Composite differences of DJF 500-hPa geopotential height between high and low wave activity indexes winters for (a) the westerly QBO phase and (b) the easterly QBO phase. Contour interval is dagpm and the areas with confidence level over 95% are shaded

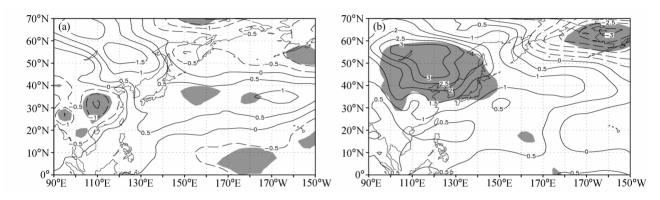


图 11 同图 10, 但为 850 hPa 温度场之差。等值线间隔: 0.5℃, 阴影: 差异达到 95%信度

Fig. 11 As in Fig. 10 except for differences of DJF 850-hPa temperature. Contour interval is 0.5 $^{\circ}$ C, and the areas with confidence level over 95% are shaded

50%~200%,其中在我国西北和云南省西北部降 雪量比常年偏多 2 倍;我国西北、华中、华南、华 东部分省市和西南地区东部气温比常年偏低 1~ 4℃,特别是西北地区气温比常年偏低 4℃多,有的 地区甚至更低。在 2008 年 1 月下旬,我国西北、华 中、华南、华东地区部分省市和西南东部气温为 50 年来最低^①。频繁的暴雪和长时间持续低温,使上 述地区交通一度中断,输电设备严重受损,造成了 1516 亿元以上的重大经济损失和百余人员死亡。 因此,对于上述三个冬季异常气候的发生成因有必 要进行分析。

5.1 东亚 2005 年与 2006 年冬季风差异及其与准 定常行星波活动的关系

黄荣辉等[59]进一步从大气环流和准定常行星

波的活动分析了 2005 年和 2006 年这两年冬季风的 差别及其动力过程,结果表明这两年冬季东亚气候 异常差异主要是由于东亚冬季风异常所造成。2005 年冬季东亚冬季风强,2006 年冬季东亚冬季风弱,而导致这两年东亚冬季风的差异是由于西伯利亚高压和阿留申低压的异常所造成。正如 Gong 等[42]和 Chen 等[44]所指出,这两个系统的变化是与 AO 和北半球环状模(NAM)的变异有关。黄荣辉等[59]还从这两年冬季北半球准定常行星波的活动差异,在动力理论上进一步讨论这两年冬季北半球气候和东亚冬季风差异的机理,分析结果表明:正如图 13a 所示,2005 年冬季北半球行星波活动为低指数,其结果造成了行星波 E-P 通量在高纬度对流层中、上层辐合加强,而在副热带地区对流层中、上层行星

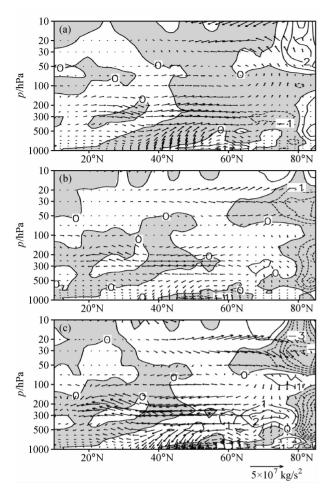


图 12 北半球冬季准定常行星波 $1\sim3$ 波合成 E-P 通量(× ρ^{-1})及散度分布图(单位: $m\cdot s^{-1}\cdot d^{-1}$):(a)1976~1987 年;(b)1988~2001 年,(c) b 图减 a 图。1971~2000 年行星波 E-P 通量的气候平均取为正常值,阴影表示 E-P 通量辐合区。资料取自 ERA-40 再分析资料[39]

Fig. 12 Composite distributions of the E-P fluxes ($\times \rho^{-1}$) and their divergence ($\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1} \cdot \mathbf{d}^{-1}$) for the quasi-stationary planetary waves 1–3 averaged for the Northern Hemisphere winters of (a) 1976–1987 and (b) 1988–2001, and (c) the difference between them. Normals are the climatological mean E-P fluxes for 30 winters from 1971 to 2000. The areas with negative anomalies are shaded. Data are from the ERA-40 reanalysis data^[39]

波 E-P 通量辐散加强,这引起了北半球极锋急流减弱,而副热带急流加强,这有利于西伯利亚高压的发展,从而引起了东亚冬季风增强;相反,如图 13b 所示,2006 年冬季北半球行星波活动为高指数,其结果造成了行星波E-P 通量在高纬度地区对流层中、上层辐散加强,而副热带对流层中、上层辐合加强,这引起了北半球中高纬度地区极锋急流加强,而副热带急流减弱,这不利于西伯利亚高压

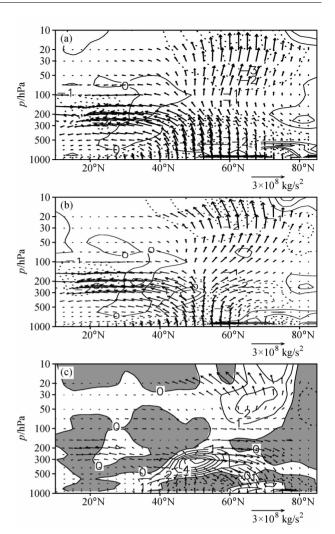


图 13 北半球 2005 年冬季 (a) 和 2006 年冬季 (b) 准定常行星波 $1\sim3$ 波合成 E-P 通量 $(\times \rho^{-1})$ 及其散度分布 (单位, $m\cdot s^{-1}\cdot d^{-1}$) 以及它们之差 (c, 2006 年冬季减去 2005 年冬季)。 (a, b) 实、虚线表示正值 (辐散)、负值 (辐合)。资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 $[^{28}]$

Fig. 13 Composite distributions of the E-P fluxes ($\times \rho^{-1}$) of quasi-stationary planetary waves with wave numbers 1–3 and their divergence ($\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1} \cdot \mathbf{d}^{-1}$) over the Northern Hemisphere in the winters of (a) 2005 (Dec 2005 – Feb 2006) and (b) 2006 (Dec 2006 – Feb 2007), and (c) the difference between them. The solid and dashed isolines in the distributions of divergence of planetary wave E-P fluxes indicate positive (divergence) and negative (convergence) values, respectively. Data are from the NCEP/NCAR reanalysis data^[28]

的发展,从而引起了东亚冬季风减弱。

5.2 关于 2007 年冬季东亚气候异常及其与准定常行星波活动的关系

鉴于 2008 年 1 月份我国遭受暴雪冰冻灾害的 严重性,我们从大气环流和准定常行星波活动分析 这次我国南方暴雪冰冻灾害发生的成因。分析结果表明,造成 2008 年 1 月份南方暴雪冰冻灾害除了与热带东太平洋 La Niña 事件的影响有一定关系外,还有其他重要原因。首先,造成这次严重雨雪冰冻灾害是由于北大西洋异常偏暖,根据李双林的研究^[61],由于EU型遥相关^[26],北大西洋的异常增暖会使乌拉尔阻高异常发展和长时间稳定,因而造成东亚大槽长时间稳定在蒙古高原上空,从而如图14 所示,使得槽后偏西路径的冷空气不断南下,导致切变线长期维持在长江流域;其次,2007 年冬季

热带西太平洋异常偏暖,热带西太平洋上空对流活动异常发展,根据黄荣辉和李维京的研究^[19,20],由于东亚/太平洋型遥相关,热带西太平洋对流活动的发展会导致西太平洋副热带高压异常偏北,因而2008年1月西太平洋副热带高压比常年偏北5个纬距。由于西太平洋副高异常偏北,来自孟加拉湾的暖湿气流不断流向长江流域,造成切变线一直稳定在长江流域上空,从而在冬季出现夏季长江流域"梅雨"季节的环流形势(见图14)。

除上述因子之外, 平流层极涡的下沉也是这次

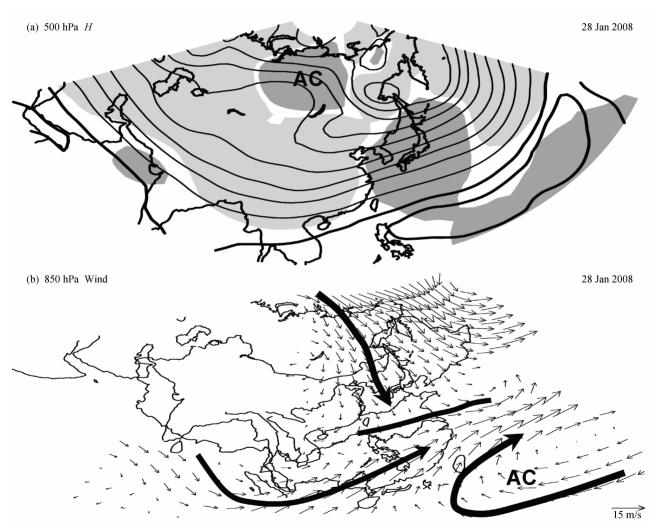


图 14 造成 2008年1月份我国长江流域和华南雨雪冰冻灾害大气环流示意图 (资料来源于 NCEP/NCAR 再分析资料 $[^{28}]$)。(a) 2008年1月28日500 hPa 高度场 (等值线) 和异常分布 (阴影),深和浅阴影区分别表示高度场异常大于25 gpm 和小于-25 gpm,AC 表示反气旋。(b) 2008年1月28日东亚上空850 hPa上的风场分布,粗箭头分别表示带来冷空气和水汽的风系,粗实线表示切变线。

Fig. 14 Schematic map of the general atmospheric circulation causing the disaster of severe snow and persistent ice-freezing in the Yangtze River valley and South China in Jan 2008; (a) 500-hPa geopotential height (contour) and its anomalies (shading), dark and light shadings indicate the regions with anomalies greater than 25 and less than -25 gpm, respectively; (b) 850-hPa wind field over East Asia, the bold arrows indicate the main winds which bring cold air and water vapors to Southeast China, and heavy line denotes the shear line. AC denotes the anticyclone. Data are from the NCEP/NCAR reanalysis data^[28]

南方发生暴雪低温冰冻灾害的一个原因。图 15a 和 15b 是沿 60°N 结向平均结向风距平和沿 70°N~ 90°N 结向平均的高度距平的时间-高度剖面图。从 图 15a 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, 从图 15b 可以看到一个负的纬向平均高度场距平从 2007 年 12 月中旬开始也向高纬度对流层下传,于 2008 年 1月下旬传到对流层下层。这些都表明平流层极涡 从 2007 年 12 月中旬下沉, 于 2008 年 1 月下旬到 达高纬度对流层下层。相比于 2007 年 1 月份极涡, 2008年1月份极涡不仅强度要强得多,而且下沉的 高度要低得多,这种极涡下沉到高纬度对流层下 层对于2008年1月份东亚大槽的维持起到重要 作用。

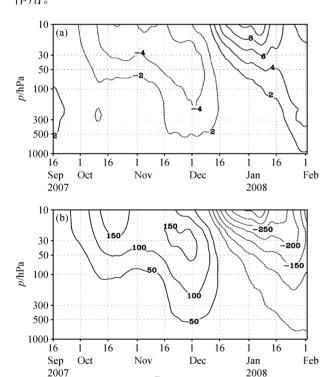


图 15 北半球沿 60°N 纬向平均纬向风距平 (a, 单位: m/s) 和 沿 70°N~90°N 纬向平均高度距平 (b, 单位: gpm) 的时间-高 度剖面图。取 1971~2000 年气候平均风场和高度场为正常值; 资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料[28]

Date

Fig. 15 The time - altitude cross sections of (a) the zonal mean zonal wind anomaly (m/s) along 60°N and (b) the zonal mean geopotential height anomaly (gpm) along 70°N - 90°N over the Northern Hemisphere. The climatological mean wind field and geopotential height field for 1971 - 2000 are taken as the normals, and data are from the NCEP/NCAR reanalysis data^[28]

总结和讨论

本文综述了最近几年关于东亚季风系统的内动 力过程及其与准定常行星波活动关系的研究成果。 最近几年,许多研究利用东亚/太平洋型(即 EAP 型) 遥相关理论不仅揭示了东亚夏季风系统各成员 之间内在联系的机理, 也揭示了热带西太平洋热力 和菲律宾周围对流活动对东亚夏季风系统季节内变 化以及准两年周期振荡及其经向三极子结构的动力 过程。研究还表明北半球夏季从北非到东亚的对流 层上层沿急流存在经向风异常的遥相关型,它可能 是由于行星波沿西风急流传播的结果,并对东亚夏 季风系统异常经向三极子型分布也有重要影响。最 近关于东亚冬季风变异及其与准定常行星波活动之 间关系的研究取得很大进展。这些研究结果表明: 北半球冬季准定常行星波传播波导在年际和年代际 变化上存在反相振荡特征,若"极地波导"加强, 则"低纬波导"将减弱,反之若"极地波导"减弱, 则"低纬波导"将加强。进一步从动力理论的诊断 分析的研究结果不仅揭示正是由于准定常行星波两 支波导的反相振荡,导致北半球环状模 (NAM) 的 年际和年代际振荡,并导致东亚冬季风的年际和年 代际变化,而且也揭示了准定常行星波活动的年际 变化及其与东亚冬季风异常之间的关系显著地受热 带平流层纬向风的准两年周期振荡影响的物理机 制。此外,本文还针对2005~2007年冬季东亚气 候的异常分析这三年冬季东亚冬季风的变异及其与 准定常行星波活动的关系,特别是初步分析了2008 年1月份造成严重经济损失的我国南方暴雪冰冻灾 害的成因。

963

虽然上述研究表明在关于东亚季风系统的动力 过程及其与准定常行星波活动方面的研究取得了一 些成果,但是应该看到,关于季风系统内动力学的 研究还只是刚刚开始,关于东亚季风系统的季内、 年际和年代际变化的动力过程也还有许多科学问题 没有得到很好的研究,因此,关于东亚季风系统的 动力过程仍然是今后亟需研究的一个重要科学问 题。

参考文献 (References)

[1] Webster P J. The elementary monsoon. Monsoons, Fein J S, Stephens P L, Eds. John Wiley, 1987. 3~32

- [2] Young J A. Physics of monsoon: The current view. Monsoons, Fein J S, Stephens P L, Eds. John Wiley, 1987. 211 ~243
- [3] Smagorinsky J. The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1953, 79: 342 ~366
- [4] Staff Members, Academia Sinica. On the general circulation over eastern Asia. *Tellus*, 1958, **10**: 299~312
- [5] Sankar-Rao M. Continental elevation influence on the stationary harmonics of the atmospheric motion. Pure Appl. Geophys., 1965, 60: 141~159
- [6] Charney J G, Drazin P G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. J. Geo-phys. Res., 1961, 66: 83~109
- [7] Dickinson R E. Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wind wave guides. J. Atmos. Sci., 1968, 25: 984~1002
- [8] Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. J. Atmos. Sci., 1970, 27: 871~883
- [9] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon. Wea. Rev., 1981, 109: 784~812
- [10] 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
- [11] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere. J. Meteor. , 1949, 6: $1{\sim}16$
- [12] Huang R H, Gambo K. The response of a model atmosphere in middle latitude to forcing by topography and stationary heat sources. J. Meteor. Soc. Japan, 1981, 59: 220~237
- [13] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multilevel model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Parts I, II. J. Meteor. Soc. Japan, 1982, 60: 78~108
- [14] Huang R H, Gambo K. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in the winter Northern Hemisphere. *Science in China*, 1983, **26**: 940~950
- [15] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progress of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. Adv. Atmos. Sci., 2003, 20: 55~69
- [16] Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007. **24**: 993~1023
- [17] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1983, **61**: 495~509

- [18] Nitta Ts. Convective activities in the tropical western Pacific and their impacts on the Northern Hemisphere summer circulation. J. Meteor. Soc. Japan, 1987, 64: 373~390
- [19] Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source a-nomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia. Proc. Internal. Conf. on the General Circulation of East Asia, Chengdu, 10 15 April 1987. 40~51
- [20] 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): 107~116

 Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1988, 14 (Special Issue): 107~116
- [21] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. Monsoon Meteorology, Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [22] 陆日宇,黄荣辉. 夏季东亚/太平洋型遥相关对东北亚阻塞 高压年际变化的影响. 大气科学, 1998, **22**: 727~735 Lu Riyu, Huang Ronghui. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the North Eastern Asia in summer. *Chi*nese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)(in Chinese), 1998, **22**: 727~735
- [23] Lu Riyu. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. J. Meteor. Soc. Japan, 2004, 82: 155~165
- [24] 叶笃正,陶诗言,李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报,1958, **29**: 249~263 Yeh Tu-Cheng, Dao Shih-Yen, Li Mei-Tsun. The abrupt change of the atmospheric circulation during June and October. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1958, **29**: 249~263
- [25] Huang Ronghu, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. J. Meteor. Soc. Japan, 1992, 70(1B): 243~256
- [26] Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. Climate variations of the summer monsoon over China. *East Asian monsoon*, Chang C P, Ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004, 213~270
- [27] 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系. 大气科学, 2005, **29**: 20~36 Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. Characteristics

of the inerannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 20~36

- [28] Kalnay E M, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77: 437~471
- [29] 曹杰,黄荣辉,谢应齐,等. 西太平洋副热带高压演变物理机制的研究. 中国科学(B辑), 2002, **32**: 659~666 Cao Jie, Huang Ronghui, Xie Yingqi, et al. Research on the evolution mechanism of the western Pacific subtropical high. *Science in China* (Series B)(in Chinese), 2002, **32**: 659~666
- [30] Charney J G, Devore J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. J. Atmos. Sci., 1979, 36: 1205~ 1216
- [31] 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因. 大气科学, 2006, **30**: 545~560 Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 545~560
- [32] 黄刚. 东亚夏季风环流异常指数与夏季气候变化关系的研究. 应用气象学报, 1999, **10**: 61~69 Huang Gang. Study on the relationship between summer monsoon circulation anomaly index and the climatic variations in East Asia. *J. Applied Meteor*. (in Chinese), 1999, **10**: 61~69
- [33] Lu R Y, Oh J H, Kim B J. A teleconection pattern in upperlevel meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer. *Tellus*, 2002, **54**A: 44~55
- [34] Lin Z D, Lu R Y. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22**: 199~201
- [35] Lu R Y, Kim B J. The climatological Rossby wave source over the STCZs in the summer Northern Hemisphere. J. Meteor. Soc. Japan, 2004, 82: 657~669
- [36] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15**: 306~325
- [37] 陶诗言,卫捷. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸和北 跳. 应用气象学报,2006, **17**: 513~525 Tao Shiyan, Wei Jie. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer. *J. Ap*plied Meteor. (in Chinese), 2006, **17**: 513~525
- [38] Hsu H H, Lin S M. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the East Asian summer. J. Climate. 2007, 20: 4443~4458
- [39] Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2005, **131**: 2961~3012
- [40] 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
- [41] Thompson DWJ, Wallace JM. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J.

- Climate, 2000, 13: 1000~1016
- [42] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 2073 ~2076
- [43] Wu B Y, Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**: 1897, doi: 10.1029/2002GL015373
- [44] Chen W, Yang S, Huang R H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D14110, doi: 10. 1029/2004JD005669
- [45] Chen W, Graf H F, Takahashi M. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophy. Res. Lett.*, 2002, 29: 2073, doi: 10.1029/2002GL016062
- [46] Chen W, Takahashi M, Graf H F. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. J. Geophys. Res., 2003, 108 (D24) 4797, doi: 10. 1029/2003JD003834
- [47] 陈文,黄荣辉. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化. 大气科学, 2005, **29**: 137~146 Chen Wen, Huang Ronghui. The three-dimensional propagation of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere winter and its interannual variations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 137~146
- [48] 杨蕾, 陈文, 黄荣辉. 关于北半球准定常行星波年际变化的资料分析和数值模拟. 大气科学, 2005, **29**: 682~696 Yang Lei, Chen Wen, Huang Ronghui. The data analysis and simulation of the interannual variation of quasi-stationary planetary wave in the Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 682~696
- [49] 陈文,康丽华. 北极涛动与东亚冬季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
- [50] Reed R, Cambell W J, Rasmusson L A, et al. Evidence of a downward-propagating, annual wind reversal in the equatorial stratosphere. J. Geophys. Res., 1961, 66: 813~818
- [51] Holton J R, Tan H C. The influence of the equatorial quasibiennial oscillation on the global circulation at 50 mb. J. Atmos. Sci., 1980, 37: 2200~2208
- [52] 陈文,黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 I. 常定流的情况. 大气科学, 1996, **20**:513~523

Chen Wen, Huang Ronghui. The numerical study of seasonal

- and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part I: The case of steady mean flows. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1996, **20**: 513 ~523
- [53] 陈文,黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况. 大气科学, 1996, **20**: 703~712 Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical study of seasonal and interappual variabilities of ozone due to planetary wave
 - Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part II. The case of wave-flow interaction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1996, 20: 703~712
- [54] Chen W, Huang R H. The modulation of planetary wave propagation by the tropical QBO zonal winds and the associated effects in the residual meridional circulation. *Contr. Atmos. Phys.*, 1999, 72(2): 187~204
- [55] Chen Wen, Huang Ronghui. The propagation and transport effect of planetary waves in the Northern Hemisphere winter. *Adv. Atmos.*, *Sci.*, 2002, **19**: 1113~1126
- [56] 陈文,杨蕾,黄荣辉,等. 热带准两年振荡影响北半球冬季 大气环流的诊断分析. 大气科学, 2004, **28**: 161~173 Chen Wen, Yang Lei, Huang Ronghui, et al. Diagnostic analysis of the impact of tropical QBO on the general circula-

- tion in the Northern Hemisphere winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**: 161~173
- [57] Chen W, Li T. Modulation of northern hemisphere wintertime stationary planetary wave activity: East Asian climate relationships by the Quasi-Biennial Oscillation. J. Geophys. Res., 2007, 117, D20120, doi: 10.1029.2007JD008611
- [58] Huang Ronghui, Wang Lin. Interdecadal variation of Asian winter monsoon and its association with the planetary wave activity. *Proc. Symposium on Asian Monsoon*. Kuala Lumpur, Malaysia, 4-7 April 2006. 126pp
- [59] 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 planetary wave activity in the Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**: 1033~1048
- [60] Japan Meteorological Agency. Analysis of momentum budget anomaly at 300 hPa in the Northern Hemisphere in November, 2005 and November, 2006. *Monthly Report on Climate System*, 2007, (2): 2
- [61] Li S L. Influence of the Northwest Atlantic SST anomaly on the circulation over the Ural Mountains. J. Meteor. Soc. Japan, 2004, 82: 971~988