

北半球冬季风暴轴与 ENSO 循环的关系 及其能量平衡特征^{* 1}

何 花 聂 绩 谭本旭

HE Hua NIE Ji TAN Benkui

北京大学物理学院大气科学系,北京,100871

Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2008-04-14 收稿,2008-05-16 改回.

He Hua, Nie Ji, Tan Benkui. 2009. Northern Hemisphere storm tracks in winter seasons and their energy budgets during the ENSO events. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(2):210–217

Abstract The relationship between Northern Hemisphere storm tracks at 300 hPa and the ENSO cycle, and the energetics of the storm tracks in winter seasons have been analyzed using ECMWF data. It is shown that during the El Niño events, the local Hadley circulation over the eastern Pacific is strengthened, and the Pacific jet extends equator ward and eastward, which causes the Pacific storm track to extend equator ward and eastward, while the La Nina events mark the opposite shifts. In the Atlantic region, during the El Niño events, the maximum wind of the Atlantic westerly jet decreases as the jet extends westward and equator ward, correspondingly, the Atlantic storm track also extends westward and equator ward, and weakens. The reverse is true for the La Nina events.

The energy budget analysis shows that the baroclinic conversions are positive over the storm tracks and their upstream regions. During the El Niño events, the positive center of baroclinic conversion over the Pacific extends downstream and equator ward, whereas the positive center over the Atlantic extends westward and equator ward, which are in agreement with the shifts of the Pacific and Atlantic storm tracks. The baroclinic conversion due to the planetary-scale eddies is smaller than that due to the synoptic-scale eddies, and the baroclinic conversion due to the interaction of planetary-scale and synoptic-scale eddies is the smallest. It is also shown that the positive barotropic conversion centers are located upstream of the storm tracks while the negative centers are located in the storm track regions. During the El Niño events, the Pacific negative barotropic conversion center shifts poleward, the North American positive center shifts southward, and the Atlantic negative center weakens and becomes smaller. These are in agreement with the changes of the Pacific and Atlantic storm tracks. The barotropic conversion due to the synoptic-scale eddies is larger than that due to the planetary-scale eddies, and the contribution from the interaction between the planetary-scale and synoptic-scale eddies is very small.

Key words Northern Hemisphere storm tracks, ENSO cycle, Energy conversion, Planetary-scale eddies, Synoptic-scale eddies

摘 要 利用欧洲中期天气预报中心的再分析资料,分析了北半球冬季对流层上层 300 hPa 面上风暴轴与 ENSO 循环的关系以及风暴轴的能量平衡特征。研究表明,由于 El Niño 年北太平洋的哈德莱环流增强,导致北太平洋西风急流向赤道和向东伸展,进而引起了北太平洋风暴轴的增强并向赤道和向东伸展;而 La Nina 年事件期间情形正好相反。在北大西洋,El Niño 年其西风急流中心最大值有所减小,但整个西风急流区域有所扩大并向西和向赤道伸展,相应北大西洋风暴轴强度在 El Niño 年也有所减弱并向西和向赤道方向伸展;La Nina 事件的情形正好相反。

能量分析表明,斜压转换的正值中心位于风暴轴及其上游区域。在 El Niño 年,北太平洋斜压转换的正值中心向赤道和向下游伸展,而北大西洋斜压转换的正值中心向赤道和向西伸展,这与北太平洋风暴轴和北大西洋风暴的变化趋势是一致

^{*} 资助课题:国家自然科学基金重点项目(40533016)。

作者简介:何花,主要从事非线性动力研究。E-mail:huahe@pku.edu.cn

的。行星尺度扰动对斜压转换的贡献比天气尺度扰动的贡献要小,而行星尺度-天气尺度扰动的相互作用项对斜压转换的贡献更小。研究还表明,能量正压转换的正中心位于风暴轴的上游,负中心位于风暴轴区域。相对于 La Nina 年,El Niño 年北太平洋东部的正压转换负值中心偏北,北美的正值中心位置偏南,而北大西洋的负值中心强度减弱范围变小。这些变化与从 La Nina 年到 El Niño 年北太平洋和北大西洋风暴轴的变化是一致的。在能量的正压转换过程中,天气尺度扰动的贡献要大于行星尺度扰动,而行星尺度-天气尺度扰动的相互作用项的贡献更小。

关键词 北半球风暴轴, ENSO 循环, 能量转换, 天气尺度波, 行星尺度波

中图法分类号 P432

1 引言

风暴轴是影响北半球中高纬度地区的重要大气系统,最近 20 多年来,北半球风暴轴研究得到了人们的极大重视并取得了许多研究成果。有关这些研究成果可参看 Chang 等(2002b)的最新综述及他们所引的参考文献。过去的研究表明,北半球风暴的结构和强度存在不同时间尺度的变率,包括季节变化、年际变化和年代际变化。北半球风暴轴季节变化的一个著名特征就是所谓的“隆冬的抑制现象”:在每年的 2 月,北大西洋风暴轴的强度最大,但北太平洋风暴轴最强的季节却是春季和秋季,在每年的 2 月它却反而是最弱的,尽管 2 月北太平洋西风急流是最强的,相应的斜压性也是最强的(Nakamura, 1992; Christophy, et al, 1997; 张祖强等, 2000)。在年际变化方面,北半球风暴轴与 ENSO 循环有着密切的关系。在 El Niño 年,由于赤道东太平洋哈德莱环流的增强,北太平洋风暴轴向赤道和向西伸展(Trenberth, et al, 1994; Strause, et al, 1997; Zhang, et al, 1999; Chang, et al, 2002b)。北半球风暴轴的年代际变化特征是,20 世纪 90 年代北半球风暴轴比 60 年代要强(Nakamura, et al, 1999; Ebisuzaki, et al, 1998; Geng, et al, 2001; Chang, et al, 2002a; 朱伟军等, 2000)。

在北半球风暴轴年际变化方面,最近, Nie 等(2008)研究了冬季北半球风暴轴与北极涛动的关系。发现,当北极涛动位相从负位相转变为正位相,北太平洋风暴轴强度变化不大,只是向西扩展;而北大西洋风暴轴强度增强并向北和向下游扩展。能量分析表明,北大西洋风暴轴在强的北极涛动正位相异常阶段的增强和向北向下游扩展主要是因为天气尺度波的斜压能量转换和天气尺度与行星尺度波的相互作用的斜压能量转换。

本文则是对北半球风暴轴与 ENSO 循环的关系作进一步研究。如上面指出,Chang 等(2002b)的研究发现,在 El Niño 年,北太平洋风暴轴向赤道和向西伸展。但他们没有进一步对此现象作深入分析。本文将系统深入研究北太平洋和北大西洋风暴轴对 ENSO 循环的影响,并从能量学特征探讨引起北半球风暴轴变换的机理。

2 资料和方法

本文研究的是北半球冬季 300 hPa 高度上的风暴轴,即 300 hPa 高度上的斜压波活动。冬季的定义是前一年的 12 月和当年 1 月和 2 月。使用的资料序列为 300 hPa 日平均的欧洲中心再分析资料(ECWMF),分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。时间是从 1957 年 12 月到 2001 年 2 月的 45 a 冬季。根据欧洲中心对 El Niño 和 La Nina 事件的定义,从 1957 年 12 月到 2001 年 2 月中取出 15 个 El Niño 年,15 个 La Nina 年,其余年份定义为中性年。

El Niño 年: 1957/1958、1963/1964、1965/1966、1968/1969、1969/1970、1972/1973、1976/1977、1977/1978、1982/1983、1986/1987、1987/1988、1990/1991、1991/1992、1994/1995、1997/1998。

La Nina 年: 1961/1962、1964/1965、1967/1968、1970/1971、1971/1972、1973/1974、1974/1975、1975/1976、1983/1984、1984/1985、1988/1989、1995/1996、1998/1999、1999/2000、2000/2001。

与 Chang 等(2002b)的综述类似,我们先对数据进行了 2—6 d 的高通滤波,从而得到研究所需的各项物理量。在研究风暴轴和风暴轴的能量平衡分析时,使用的是物理量的扰动,其定义为该物理量的瞬时值减去该物理量当年的冬季平均值。使用的扰动动能方程在 p 坐标系中的表达式为(方程推导方法与 Orlandi 等(1991)类似)

$$\frac{\partial K_e}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{V}K_e + \mathbf{v}\varphi) - \frac{\partial \omega K_e}{\partial p} - \frac{\partial \omega \varphi}{\partial p} - \alpha \omega - \mathbf{v} \cdot [(\mathbf{v}_3 \cdot \nabla_3) \mathbf{V}_m] + \mathbf{v} \cdot [(\mathbf{v}_3 \cdot \nabla_3) \mathbf{v}] + R_{es} \quad (1)$$

这里, K_e 是扰动的动能, \mathbf{V}_m 是季节平均的水平风, \mathbf{v} 是水平扰动风, $\mathbf{V} = \mathbf{V}_m + \mathbf{v}$ 是瞬时水平风, φ 扰动位势高度, ω 是 p 坐标系中垂直速度, α 是扰动比容, $\mathbf{v}_3 \cdot \nabla_3 = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}$ 是三维平流算子。带有横线的物理量表示是该物理量的季节平均。上式左边是扰动动能的时间变化项, 等式右边第 1、2、3 项为动能通量的三维散度, 第 4 项是能量的斜压转换项, 第 5、6 项为能量的正压转换项, R_{es} 是与摩擦有关的耗散项。因为能量的正压转换项和斜压转换项是扰动发展的主要能量源汇项, 因此下面将只介绍它们对扰动动能变化的贡献。我们分析风暴轴的能量平衡特征采用的是从 1957 年至 2001 年 45 个冬季的合成, 这样, 能量的正压转换项主要是由季节平均水平风贡献的, 水平扰动风对能量正压转换的贡献多年平均接于零。

在本文中, 还分析了不同空间尺度的扰动对风暴轴的能量平衡的贡献。本文将任一物理量的扰动分成了天气尺度扰动和行星尺度扰动。定义纬向波数小于等于 3 的扰动为行星尺度扰动, 纬向波数大于等于 4 的扰动为天气尺度扰动。这样, 式(1)中每一项均由行星波项、天气波项和行星波-天气波相互作用项构成。例如, 对于能量的斜压转换项, 可以写成

$$\alpha \omega = (\alpha_p + \alpha_s)(\omega_p + \omega_s) = \alpha_p \omega_p + \alpha_s \omega_s + (\alpha_p \omega_s + \alpha_s \omega_p) \quad (2)$$

上式右边第 1 项为行星波斜压转换项, 第 2 项为天气波斜压转换项, 第 3 项是行星波-天气波相互作用项。式(1)中其余各项可做类似的分解。

3 结 果

图 1 给出了北半球 300 hPa 面上 El Niño 年和 La Nina 年冬季季节平均的纬向风分布。从图可以看到在北太平洋和北大西洋西部及美洲大陆东岸各有一个西风急流。北太平洋急流 El Niño 年相比于 La Nina 年明显向下游扩展, 30 m/s 的等值线向东伸展了 10 余个经度, 使得 150°W 附近的区域风速

增大了 10 m/s 以上。而北大西洋急流在 El Niño 年的中心强度比 La Nina 年要小, 但 30 m/s 的区域 El Niño 年大于 La Nina 年, 同时它向西和向南伸展, 使得以墨西哥为中心的区域西风增长, 风速增长在 6 m/s 以上。

从北半球 300 hPa El Niño 年和 La Nina 年冬季扰动经向风的方差分布(图 2a—2c)可以看出, 北太平洋风暴轴和北大西洋风暴轴位于两大洋的急流的下游, 且大西洋的风暴轴要比太平洋风暴轴要强。相对于 La Nina 年, 在 El Niño 年北太平洋风暴轴得到了增强, 均方差为 180 个单位的等值线区域向西和向南扩展, 均方差最大增长超过 60 个单位。此结果与 Chang 等(2002)得到的结果一致。而大西洋风暴轴在 El Niño 年比 La Nina 年要弱, 并向西和向南移动。这与 Chang 等(2002)的结果不一致, 他们得到在 El Niño 年和 La Nina 年大西洋风暴轴强度变化不大。产生这种差异的原因可能是他们的合成分析选用的例子偏少所致: 他们分别选取了 9 个 El Niño 年和 9 个 La Nina 年, 而这里分别选用 15 个 El Niño 年和 15 个 La Nina 年。

为了进一步弄清楚不同空间尺度的扰动对风暴轴动力学的贡献, 计算了行星尺度扰动和天气尺度扰动的动能空间分布。天气尺度波的动能分布与风暴轴的分布是一致的(图略)。从 300 hPa 面上 El Niño 年和 La Nina 年行星波的动能分布(图 2d—2f)可以看出, 行星波主要活动区域在以格陵兰东部和邻近海洋为中心的广大高纬和极地区域, 除此之外, 在北太平洋中部的中纬度区域, 还有一个次极大活动中心。高纬和极地地区的行星波活动, 在 La Nina 年比 El Niño 年要强, 包括东北太平洋和北美洲地区。但在太平洋和大西洋的中低纬度地区, 行星波活动 El Niño 年比 La Nina 年的要强, 特别是在北太平洋和北大西洋风暴轴的南侧, 行星波在 El Niño 年比较活跃。

为了进一步分析斜压能量转换和正压能量转换对 300 hPa 面上的风暴轴形成与维持的贡献, 图 3 给出了 300 hPa 面上 El Niño 年和 La Nina 年从基本气流的位能向扰动的动能的斜压转换过程。在北太平洋的中纬度地区和北大西洋中部向西一直到北美东海岸的中纬度地区, 斜压转换都是正的转换, 即

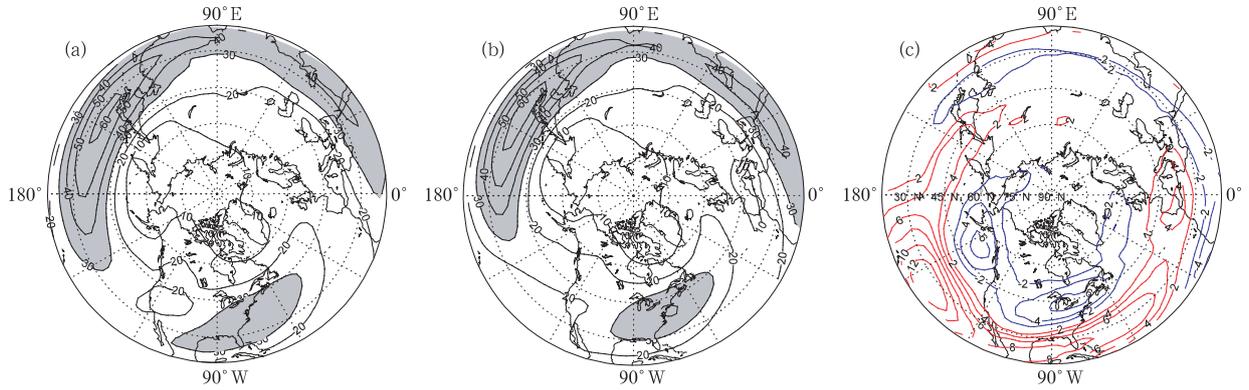


图 1 北半球冬季 300 hPa 平均纬向风 U 的空间分布

(a. El Niño 年, b. La Nina 年(等值线间隔:10,阴影部分大于 30 m/s),c. El Niño 年与 La Nina 年的差值;
红色实线代表正值,蓝色虚线代表负值;等值线间隔,2 m/s)

Fig. 1 Composites of 300 hPa zonal winds in the Northern Hemisphere winters for 15 El Niño winters (a); for 15 La Nina winters (b); and the difference between El Niño years and La Nina years (c)

(In (a) and (b), contour intervals are 10 m/s, and shading denotes regions where the zonal winds are above 30 m/s. In (c), the red lines are for positive value and blue dashed lines for negative value, and the contour intervals are 2 m/s)

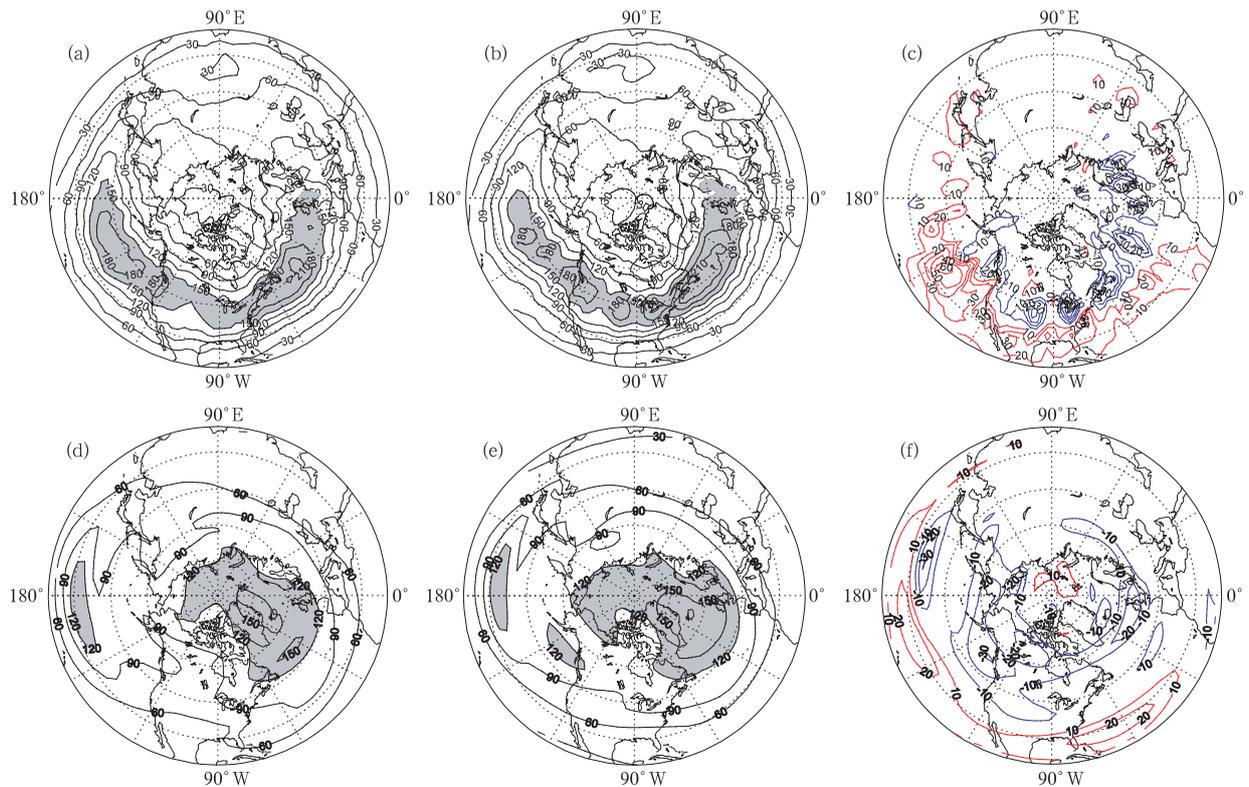


图 2 北半球冬季 300 hPa 高通滤波的经向风扰动 v 的方差分布(a—c)和行星尺度扰动动能分布(d—f)

(a,d. 15 个厄尔尼诺年冬季的合成, b,e. 15 个拉尼娜年冬季合成, c,f. 厄尔尼诺年与拉尼娜年的差值(红色实线代表正值,蓝色虚线代表负值))

Fig. 2 Composite variance distributions of the high-pass 300 hPa meridional perturbation wind v (a—c) and the kinetic energy of the planetary-scale eddies (e—f) in the Northern Hemisphere for (a,d) 15 El Niño winters;

(b,e) 15 La Nina winters; and (c,f) the differences between (a) and (b)

(In (c,f), the red lines are for positive value and blue dashed lines for negative value)

从基本气流的位能转换扰动的动能。在北太平洋和北大西洋风暴轴的偏赤道区域,斜压转换都是 El Niño 年大于 La Nina 年,这使得在这些区域 El Niño 年的扰动要强于 La Nina 年(图 3a—3c)。进一步分析与风暴轴形成密切相关的天气尺度扰动的斜压转换(图 3d—3f),可以看到,天气尺度扰动的

斜压转换的分布与总扰动的空间分布是类似的,而且天气尺度扰动的斜压转换占总扰动斜压转换的大部分。特别是,在北太平洋的中部至东部和北大西洋的西部,天气尺度扰动斜压转换 El Niño 年要比 La Nina 年强,正是这种天气尺度扰动正的斜压转换导致北太平洋风暴轴在 El Niño 年的增强并向赤

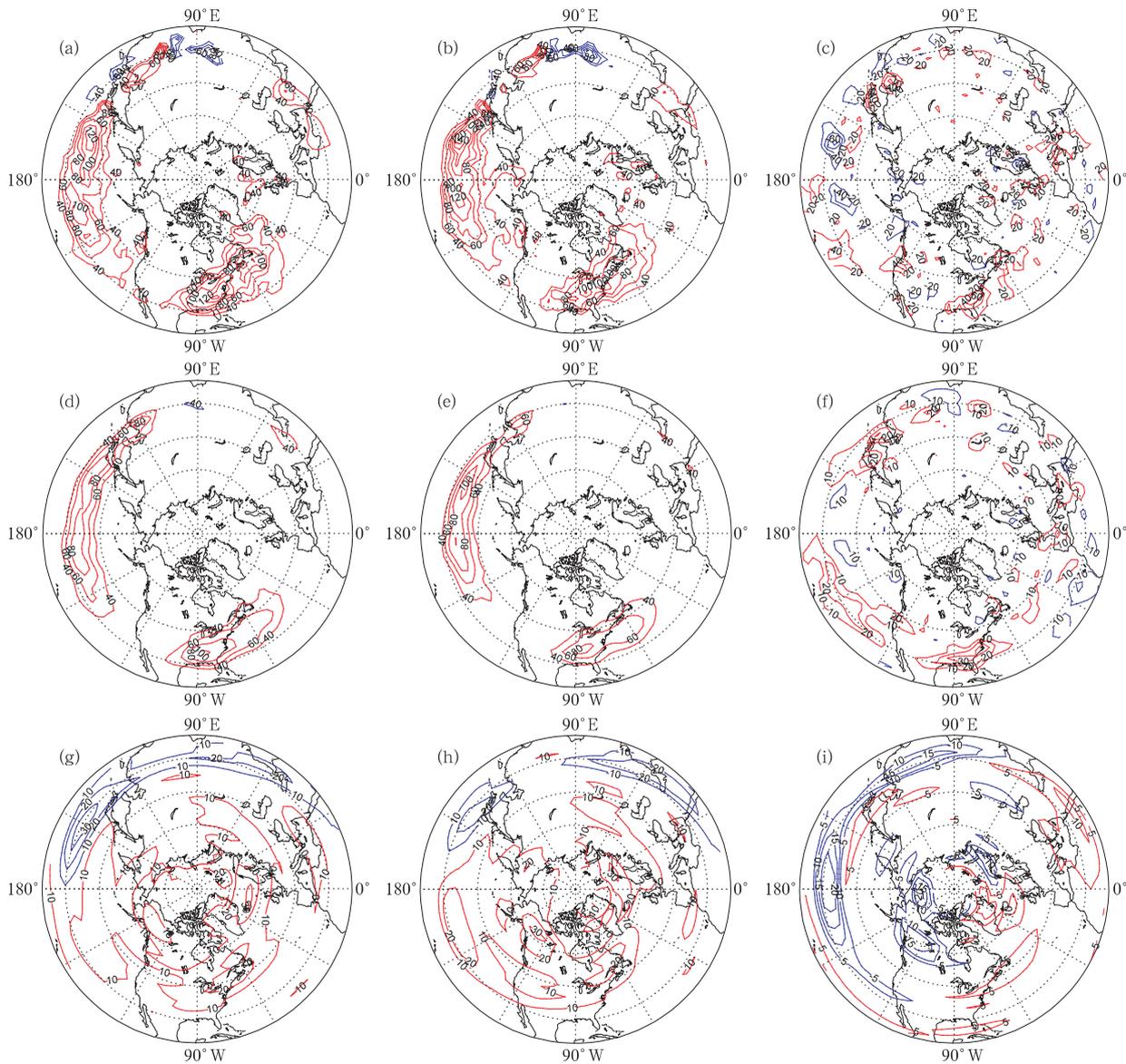


图 3 北半球冬季 300 hPa 能量斜压转换空间分布

(a. 15 个 El Niño 年冬季总扰动的斜压转换, b. 15 个 La Niña 年冬季总扰动的斜压转换, c. El Niño 年与 La Niña 年总扰动斜压转换的差值, (d—f) 与 (a—c) 相同, 只是它们是天气尺度扰动的斜压转换; (g—i) 与 (a—c) 相同, 只是它们是行星尺度扰动的斜压转换)

Fig. 3 Distributions of the baroclinic conversion of energy at 300 hPa for Northern Hemisphere winter seasons due to, (a) total perturbations for 15 El Niño winters; (b) total perturbations for 15 La Niña winters; and (c) the differences between (a) and (b); (d—f) are the same as (a—c) except for synoptic-scale eddies; (g—i) are the same as (a—c) except for planetary-scale eddies

道和向东移动和北大西洋的风暴轴在 El Niño 年向西向南移动。对应于行星尺度扰动的斜压能量转换,在中高纬度区域都是正的转换,这种能量转换为行星波在这些区域活动提供能量。但行星波的斜压能量转换量级比天气尺度扰动要小一些(图 3g—3i)。计算表明,行星波与天气波相互作用项对斜压能量转换的贡献比较小,这里不再给出图。

图 4 是 300 hPa 面上 El Niño 年和 La Nina 年能量的正压转换的空间分布。图 4a—4c 是全波数扰动的正压转换。在北太平洋的西风急流区是正的能量转换区,即能量是从基本气流向扰动转换;而在

北太平洋风暴轴的区域均是负的能量转换区,在这些地区,能量是从扰动向基本流转换。在北美洲大部分地区,能量的正压转换都是正的,而在北大西洋风暴轴的区域均是负的正压转换。相对于 La Nina 年,在 El Niño 年北太平洋东北区域的负的中心向北移动,北美的正值中心向南移动,北大西洋的负值中心强度减弱范围变小,与北太平洋和北大西洋风暴轴的变化是一致的。从天气尺度扰动和行星尺度扰动的贡献来看,天气尺度扰动的能量正压转换与总扰动的正压能量转换在大部分区域是一致的;在亚洲大陆东岸及其附近海域和北美大陆为正

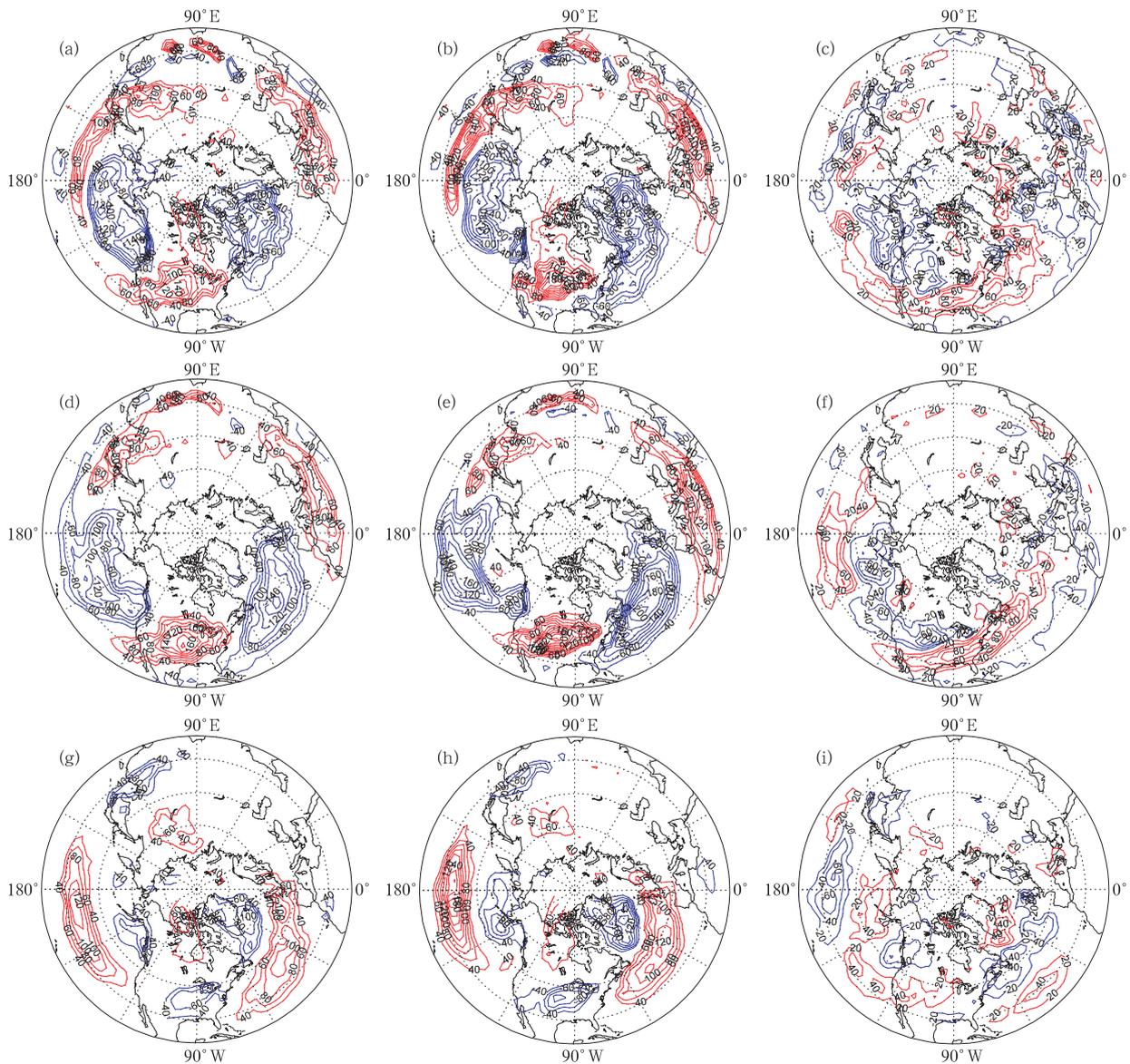


图 4 同图 3,只是能量正压转换的空间分布

Fig. 4 As in Fig. 3 except for distributions of the barotropic conversion of energy

的能量转换,在北太平洋风暴轴和北大西洋风暴轴区域,均是负的能量转换(图 4d—4f)。而行星尺度扰动的能量转换与天气尺度扰动的能量转换方向基本相反:在东亚大陆海岸附近和北美大陆行星尺度能量转换是负的,在太平洋和大西洋上行星尺度能量转换是正的(图 4g—4i)。由于行星尺度扰动的能量正压转换与天气尺度扰动的空间分布类型正好相反,即在天气尺度扰动的正的转换区域,行星尺度扰动是负的转换,而在天气尺度扰动的负的转换区,行星尺度扰动的转换是正的。但行星尺度扰动能量正压转换的量级比天气尺度扰动的要小,因此总扰动的正压能量的空间分布主要是由天气尺度扰动决定的。计算还表明,天气尺度扰动与行星尺度扰动的相互作用项对正压转换过程的贡献很小(图略)。

4 结论和讨论

本文利用欧洲中期天气预报中心的再分析资料,研究了北半球风暴轴与 ENSO 循环的关系。发现,北半球冬季 300 hPa 高度的风暴轴在 El Niño 年和 La Niña 年的强度和空间结构是不同的。在北太平洋的 El Niño 年,由于赤道东太平洋的哈德莱环流的增强,导致北太平洋西风急流向赤道方向和向东扩展。伴随西风急流的这种变化,北太平洋风暴轴得到加强并向下游和向赤道移动;而在 La Niña 年北太平洋风暴轴的变化呈相反趋势。而北大西洋急流,在 El Niño 年其中心强度有所减弱,但 30 m/s 的等值线区域有所扩大并向赤道和向西移动。伴随北大西洋急流的这种变化,北大西洋的风暴轴在 El Niño 年强度比 La Niña 年要弱一些,并向赤道和向西移动。

能量分析表明,北半球冬季能量的斜压转换不管是北太平洋还是北大西洋,其能量转换的中心都是位于其相应的急流的出口处,这与 Chang 等(1999)的分析结果是一致的。但在 El Niño 年,北太平洋的斜压能量转换中心向赤道和向东移动,北大西洋的斜压能量转换中心向赤道和向西移动。北太平洋和北大西洋斜压能量转换中心的变化导致了相应的风暴轴的变化。在斜压转换过程中,行星尺度扰动的斜压能量转换的量级比天气尺度扰动要

小,因此,天气尺度扰动的斜压转换起主导作用。分析还表明,行星尺度扰动-天气尺度扰动相互作用在斜压转换过程中起的作用很小,这与北极涛动的强正负位相异常事件中能量平衡特征不一样,在那里行星尺度扰动-天气尺度扰动的相互作用比较明显,且对风暴轴的维持起有重要作用^①。

北半球冬季能量的正压转换特征是,在北太平洋急流区是正压转换的正转换中心,在北太平洋的风暴轴区域是负转换中心;北美洲大陆是正压转换的正值中心,在北大西洋风暴轴区域是正压转换的负值中心,与 Chang 等(1999)的结果一致。相对于 La Niña 年,在 El Niño 年,北太平洋东部的正压转换的负值中心向高纬度移动,北美的正值中心向低纬度移动,北大西洋的负值中心强度减弱范围变小。能量正压转换的这种变化与北半球两个风暴轴的变化是一致的。进一步分析表明,天气波与行星波相互作用对正压转换的符号是相反的,而且是天气波的正压转换的量级大于行星波,在能量的正压转换过程中起主导作用。在正压转换过程中,行星波-天气波相互作用对正压转换的贡献很小。

这里需要指出的是,这里给出的是对流层上层 300 hPa 风暴轴及其能量平衡分析。显然,300 hPa 面上能量正压转换的值大于对流层中低层的值,而 300 hPa 面上能量的斜压转换的值低于对流层低层的斜压能量转换的值。即本文给出的正压转换值被高估了,限于篇幅,不再给出这些结果。

References

- Chang E K M, Yu D B. 1999. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part 1: Northern Hemisphere winter. *J Atmos Sci*, 56: 1708-1728
- Chang E K M, Fu Y. 2002a. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity. *J Climate*, 15: 642-658
- Chang E K M, Lee S, Swanson K L. 2002b. Storm track dynamics. *J Climate*, 15: 2163-2183
- Christophy M, Ulbrich U, Speth P. 1997. Midwinter suppression of Northern Hemisphere storm track activity in the real atmosphere and in GCM experiments. *J Atmos Sci*, 54: 1589-1599
- Ebisuzaki W, Chelliah M. 1998. ENSO and inter-decadal variability in storm tracks over North America and vicinity. *Proc. 23d Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop*, Miami, FL, NOAA: 243-246

① Nie J, Wang P, Yang W C, et al. 2008. Northern hemisphere storm tracks in strong AO anomaly winters. Submitted to *Atmos Sci Lett*.

- Geng Q, Sugi M. 2001. Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NECP-NCAR reanalysis data. *J Climate*, 14:3863-3873
- Nakamura H. 1992. Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. *J Atmos Sci*, 49:1629-1642
- Nakamura H, Izumi T. 1999. Out-of-phase relationship between the interannual fluctuations in poleward heat transport by the east Asian winter monsoon and Pacific stormtrack. Preprints, 12th Conf. on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, New York: Amer Meteor Soc, 139-142
- Orlanski I, Katzfey J. 1991. The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part I: Eady energy budget. *J Atmos Sci*, 48:1972-1998
- Straus D M, Shukla J. 1997. Variations of midlatitude transient dynamics associated with ENSO. *J Atmos Sci*, 54:777-790
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. the Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 25:1297-1300
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dyn*, 9:303-319
- Zhang Y Q, Held I M. 1999. A linear stochastic model of a GCM's midlatitude storm tracks. *J Atmos Sci*, 56: 3416-3435
- Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2000. On the westerly wind outbursts in western equatorial Pacific during the onset and development phases of ENSO and before. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 58(1):11-25
- Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2000. Interannual variability of northern winter Pacific storm track and its association with 500 hPa height and tropical and Northern Pacific sea surface temperature. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 58(3): 309-320

附中文参考文献

- 张祖强, 丁一汇, 赵宗慈. 2000. ENSO 发生前与发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题. *气象学报*, 58(1):11-25
- 朱伟军, 孙照渤. 2000. 冬季北太平洋风暴轴的年际变化及其与 500 hPa 高度以及热带和北太平洋海温的联系. *气象学报*, 58(3):309-320