

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

陈 文 康丽华

中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料 and 我国 160 站月平均气温资料, 首先采用线性回归的方法分析了从 1958 至 1998 年 40 个冬季北极涛动 (AO) 与东亚气候异常的关系。结果表明, 当 AO 处于正位相时, 东亚地区 200 hPa 的急流明显北跳, 东亚大槽显著减弱, 而在中国的华北、东北到西伯利亚出现大范围的地表南风异常, 使得低空从西伯利亚到我国的东北、华北以及韩国、日本有显著的暖异常; 而当 AO 处于负位相时, 则往往出现相反的情形。进一步的相关和合成分析发现, 准定常行星波活动可以在 AO 与东亚气候之间起到桥梁作用。AO 可以通过影响中高纬平流层下层的西风强弱, 进而影响到准定常行星波的垂直传播, 使得对流层下层中高纬地区的行星波振幅发生变化, 从而导致低层的西伯利亚高压和阿留申低压同时减弱或增强, 最终导致东亚地区异常偏暖或偏冷; 其中低层中高纬地区纬向波数 2 的扰动对西伯利亚高压和阿留申低压的变化起了最主要的作用。作者提出的 AO 通过影响准定常行星波的活动而导致东亚气候异常的机理, 不但强调了西伯利亚高压的贡献, 而且特别从波动的意义上强调了阿留申低压的重要性。文中还讨论了值得进一步研究的有关问题。

关键词 北极涛动 东亚气候 准定常行星波 年际变化

文章编号 1006-9895 (2006) 05-0863-08

中图分类号 P433

文献标识码 A

Linkage Between the Arctic Oscillation and Winter Climate over East Asia on the Interannual Timescale: Roles of Quasi-Stationary Planetary Waves

CHEN Wen and KANG Li-Hua

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract By using the NCEP/NCAR reanalysis data and the monthly temperature data from 160 China stations, the relationship between the Arctic Oscillation and the climate anomalies over East Asia in the wintertime is firstly studied from 1958 to 1998 with linear regression. It is found that, in the winter of positive AO phase, the East Asian westerly jet stream at 200 hPa jumps northward clearly and the East Asian trough becomes weaker. In the meantime, the surface southerly anomalies appear in the area from Northeast China and North China to Siberia, leading to a warming condition over there. The opposite situations tend to occur in the winter of negative AO phase. Further correlation and composite analyses reveal that the quasi-stationary planetary wave activity may play a bridge role in the relationship between the Arctic Oscillation and the climate anomalies over East Asia. First, the AO influences the strength of westerlies in the lower stratosphere over mid-high latitudes. Then the vertical propagation of planetary waves is affected, which leads to the variations in the amplitudes of planetary waves in the lower troposphere over mid-high latitudes. In particular, the wavenumber 2 pattern of planetary waves contributes dominantly to the variability of the Siberian high and the Aleutian low. In the mechanism of AO's influence on the climate anomalies over East Asia via the planetary wave activity, the authors emphasize not only the contribution

of the Siberian high, but also the importance of the Aleutian low in the context of wave activity. Several questions related to the above-mentioned mechanism are discussed and worth to be studied further.

Key words Arctic Oscillation, East Asian climate, quasi-stationary planetary wave, interannual variation

1 引言

北半球中高纬度大气环流年际变率的第一个模态就是北极涛动 (Arctic Oscillation, 简称 AO), Thompson 和 Wallace^[1]通过分析北半球海平面气压场发现在极地和中高纬度之间存在一种反相的“跷跷板”形式的振荡, 并且这种振荡从近地面到平流层下层都是存在的, 接近正压结构。同时, AO 与热带外纬向风的指数循环是联系在一起的, 而中纬度地区南北方向上西风强度的振荡现象也被称为北半球环状模 (Northern Annular Mode, 简称 NAM)^[2]。研究表明, 这种纬向平均流的变化是与涡动强迫作用分不开的^[3]; Limpasuvan 和 Hartmann^[4]则指出定常波动的强迫是影响 AO 变率的重要因子。

北半球由于有大尺度的海陆分布, 因而强迫出的行星尺度的扰动也比较强。这种行星波由于其空间尺度大, 演变周期长, 具有准定常性, 因此它的形成和演变对于大气环流的演变和短期气候的变动有十分重要的影响。比如, 准定常行星波在大气中的异常和传播会引起大气环流异常的遥相关现象, 造成短期气候的异常。另外, 冬季的准定常行星波还可以从对流层传播到平流层, 使得平流层与对流层在动力上耦合在一起。因此, 准定常行星波动力学一直是气候动力学中一个重要的前沿研究方向。20 世纪 80 年代初, Huang 和 Gambo^[5~8]从波在非均匀缓变媒层的传播理论、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, 提出在北半球冬季, 准定常行星波通过两支波导分别传播到高纬度平流层和低纬度对流层上层, 可分别被称之为极地波导和低纬度波导。近几年来, 陈文等^[9~12]的一系列工作基于行星波 EP 通量散度的遥相关分析, 揭示出北半球冬季准定常行星波活动的年际变化主要表现为两支波导的反向振荡; 当低纬度波导向赤道的传播增强时, 极地波导折射向平流层的传播同时会减弱; 反之亦然。并且, 行星波活动的年际变化主要与 AO 有关。由此可见, AO 的变化是与行星波的活动紧密联系在一起的。

我们知道, 准定常行星波的形成主要是由大尺度

地形的动力强迫作用和海陆分布所引起的纬向不均匀热力强迫作用所产生的^[13]; 而季风是气候系统中一种行星尺度的盛行气流, 它形成的最根本、最直接的原因就是海陆热力差异^[14], 特别是东亚地区存在着大尺度的海陆热力差异。因此, 东亚季风的异常应该不仅与大气下垫面海-陆热力强迫有关, 而且与大气内部准定常行星波的活动密切相关。研究表明^[15], 对应于北半球冬季行星波活动的高指数年, 行星波更多的在对流层传播, 因而极涡相对稳定、偏冷; 这使得东亚地区的高空西风急流、东亚大槽偏弱, 同时低空的西伯利亚高压、阿留申低压均减弱, 从而东北亚地区的西北风减弱, 气温偏高。连接行星波活动和东亚冬季风异常则主要是行星波的 2 波异常, 正是这种异常使得大陆上的西伯利亚高压和海洋上的阿留申低压同时增强或减弱, 从而引起东亚冬季风的异常。

我国地处东亚, 东亚冬季风是全球最强的冬季风。研究表明, 影响东亚季风的因子很多, 既有外界强迫因子, 又有内部动力过程的作用^[16~18]。最近的一些研究^[19~23]均表明, 在冬季 AO 和东亚冬季风的变化有密切的联系。既然在冬季 AO 与准定常行星波的活动关系密切, 而行星波的活动又与冬季风有联系, 因此, 有必要研究北半球冬季准定常行星波活动在 AO 和东亚冬季风之间关系的作用, 并探讨 AO 影响东亚冬季风的机理。

2 资料和方法

本文使用的资料包括美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析资料^[24], 资料时段从 1958~1999 年, 以及中国气象局提供的全国 160 站月平均气温资料, 从 1951 年开始。AO 指数由 David Thompson 提供, 根据 NCEP/NCAR 再分析海平面气压资料计算而得到^[25], 从 1958 年开始。文中冬季平均是指 12 月至次年 2 月的平均。

对冬季平均的资料进行纬向谐波分析, 用纬向波数 1 至 3 的和代表准定常行星波。行星波活动的传播用 Eliassen-Palm 通量 (EP 通量) 来描述。EP 通量及其散度的计算公式参见文献[9]。本文主要采用了相关分析、线性回归和合成分析等常用的研究方法。

3 北极涛动与东亚冬季气候异常的关系

图 1 给出的是我国 160 站冬季平均气温与同期 AO 指数的相关分布。除青藏高原东南部分地区为弱的负相关外，我国绝大部分地区的气温都与 AO 变化存在正的相关。相关最显著的区域主要在东北、华北以及山东等地区，这些地区的相关系数都达到了 95% 的信度水平，特别是东北地区已超过了 99% 的信度水平。由此可见，当 AO 处于正位相时，我国东北、华北以及山东的冬季气温会偏暖，说明影响该地区的寒潮很可能偏弱。为了清楚地解释这种关系，下面我们先来看看北极涛动与东亚大气环流的联系。

东亚冬季大气环流的显著特征包括高空的东亚急流和深厚的东亚大槽^[26]。伴随 AO 的年际变化，200 hPa 的急流明显北跳，从而西风在 60°N~70°N 显著增强，在 30°N~40°N 相对变弱（图 2a）。在 500 hPa 高度场的异常（图 2b）上，东亚地区有显著的正异常，表明东亚大槽明显减弱。由此可见，对应于 AO 的正位相，东亚地区高空的东亚急流和东亚大槽均变弱，说明东亚冬季风偏弱。低空的

850 hPa 温度场的异常（图 3a）也表明从西伯利亚到我国的东北、华北以及韩国、日本有显著的暖异常，这与中国 160 站的温度的异常也是一致的；东

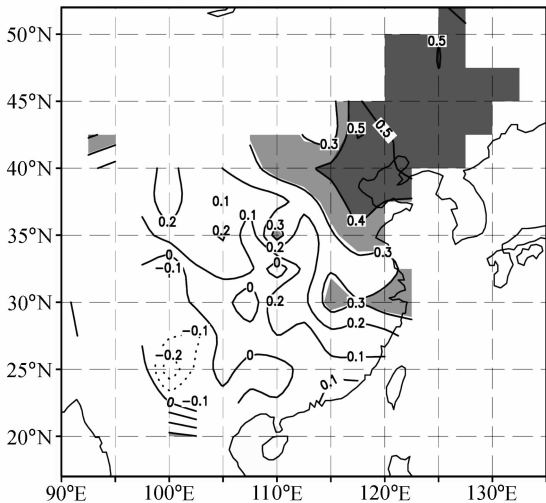


图 1 AO 指数与我国 160 站冬季气温的相关系数分布（1958/1959~1998/1999）。深、浅色阴影表示通过 99%、95% 信度水平的地区

Fig. 1 Correlation between AO index and the surface temperature of 160 China stations. Heavy and light shadings indicate the correlations exceeding the 99% and 95% confidence levels, respectively

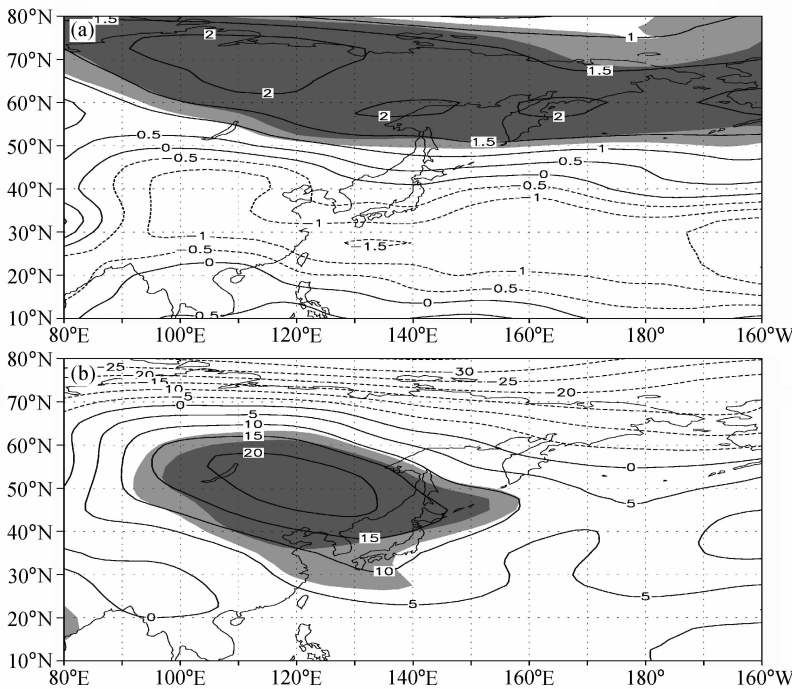


图 2 北半球冬季东亚地区 200 hPa 上纬向风场 (a, 单位: m/s) 和 500 hPa 高度场 (b, 单位: gpm) 对 AO 指数的线性回归分布。深色和浅色阴影区分别表示回归的异常达到了 99% 和 95% 信度水平

Fig. 2 Regression maps for (a) the zonal wind (m/s) at 200 hPa and (b) the geopotential height (gpm) at 500 hPa on the normalized AO index in the Northern Hemispheric winter. The shading indicates that the correlation is significant above the 95% level (light) and 99% level (dark), respectively

亚冬季大气环流的显著特征还包括低层的强北风^[26]，在地面经向风对 AO 指数的回归图（图 3b）上，从中国的华北、东北到北半球的高纬度地区都是南风异常，说明冬季冷空气活动明显偏弱。

4 准定常行星波的作用

上述分析表明在冬季 AO 和东亚气候异常有密切的联系。AO 是一个纬向接近对称的变化模式，为什么会在东亚出现相联系的气候异常？很显然，这应该从纬向不对称的部分（即扰动）来研究两者联系的机理。研究已经揭示出北半球冬季准定常行

星波活动与东亚冬季风有密切的关系^[15]，因此，我们进一步分析了行星波活动在 AO 和东亚冬季风之间关系的作用。

最近的研究认为 AO 与对流层和平流层低层有很强的耦合^[27]，而且与 AO 相关的一些研究表明平流层的异常在一定条件下会向下传播影响对流层^[28]。准定常行星波垂直传播进入平流层主要受中高纬平流层下层西风风速的影响^[29]，因此我们给出了 AO 指数和在 65°N 上空 50 hPa 的纬向平均西风在 1958/1959 至 1997/1998 年冬季的标准化时间序列（图 4）。可以看到它们的年际变化非常一

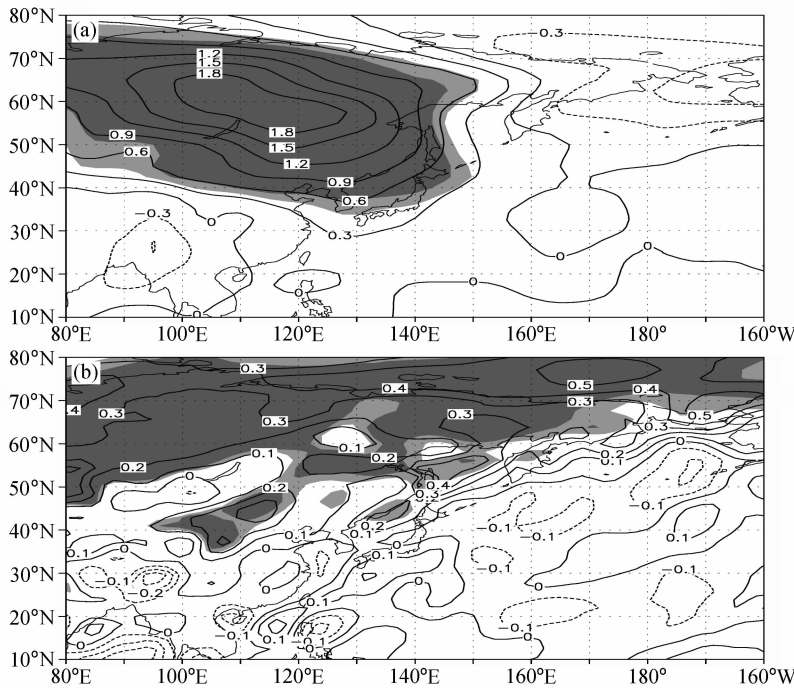


图 3 同图 2，但为 850 hPa 上温度场 (a, 单位: °C) 和地面风的经向风场 (b, 单位: m/s)
Fig. 3 Same as Fig. 2, except for (a) the temperature (°C) at 850 hPa and (b) the surface meridional wind (m/s)

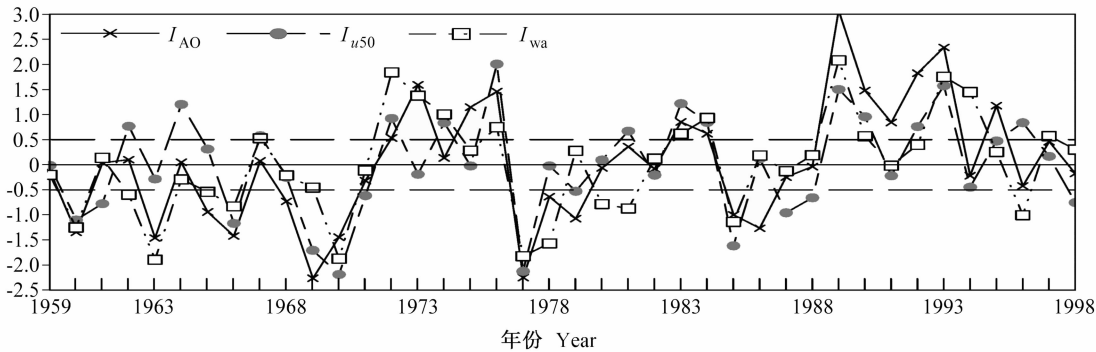


图 4 AO 指数 (I_{AO})、在 65°N 上空 50 hPa 的纬向平均西风 (I_{u50}) 以及准定常行星波活动指数 (I_{wa}) 从 1958/1959 至 1997/1998 年冬季的标准化时间序列
Fig. 4 The winter time series of normalized indices for AO (I_{AO}), the zonal mean zonal wind at 50 hPa over 65°N (I_{u50}) and the planetary wave activity (I_{wa}) from 1958/59 to 1997/98

致，计算两者的相关发现其相关系数达到了 0.75，这已经远远超过了 99% 的统计信度检验。由此可见，当 AO 处于正位相时，中高纬平流层下层西风风速明显偏强。按照 Charney 和 Drazin^[29] 的理论研究，弱西风有助于行星波的上传，而强西风则不利于行星波的上传。利用对标准化的 65°N 上空 50 hPa 的纬向平均西风时间序列线性回归的 EP 通量矢量 (图 5) 表明，行星波沿极地波导向平流层的传播减弱，这与 Charney 和 Drazin 的理论是一致的；同时，行星波在对流层的波导明显加强，行星波的这种变化型式正好对应于北半球冬季准定常行星波活动的高指数情形^[9]。也就是说，对应于 AO 的正位相，中高纬平流层下层西风风速偏强，准定常行星波活动通过极地波导折射进入平流层的传播会减弱，而通过低纬度波导向赤道的传播会增强。

陈文等^[9, 10] 利用经圈上的 EP 通量散度场的遥相关定义了准定常行星波活动指数，我们将计算的 1958 年~1998 年各年冬季平均的标准化行星波活动指数变化画在图 4 中。很显然，行星波活动的年际变化与中高纬平流层下层西风风速和 AO 的变化都有很好的一致性，计算行星波活动指数变化与 65°N 上空 50 hPa 的纬向平均西风时间序列的相关，发现其相关系数达到了 0.58，也已经远远超过了 99% 的统计信度检验。利用上述行星波传播异常的年际变化，以 ±0.5 为门槛值，可分别挑选出 12 个行星波活动的高指数冬季和 12 个低指数冬

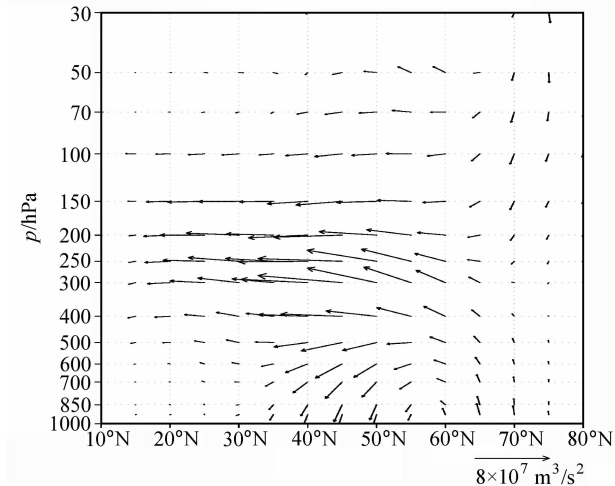


图 5 对 65°N 上空 50 hPa 的纬向平均西风指数线性回归的 EP 通量分量的系数矢量分布

Fig. 5 EP flux cross sections regressed on the normalized index for the zonal mean zonal wind at 50 hPa over 65°N

季。合成的纬向平均环流 (见文献[11]中的图 7、9) 表明，对应于高的行星波活动指数，有明显的偏冷极涡出现，同时也有偏强的绕极西风。这是因为，当行星波活动处于高指数时，极地波导偏弱，从而影响平流层极涡的扰动也偏弱，使得平流层极涡比较稳定，这导致绕极西风就强，同时涡动输送的热量也少，这样极涡就偏冷。稳定的极涡说明有较少的冷空气南下，从而导致冬季偏暖。

为了看到行星波活动对东亚地面气温异常的贡献，我们先来看一下海平面气压场上的西伯利亚高压和阿留申低压，它们也是东亚冬季大气环流在低空的显著特征。图 6 是合成的冬季行星波活动高指数年和低指数年海平面气压的分布以及它们的差。

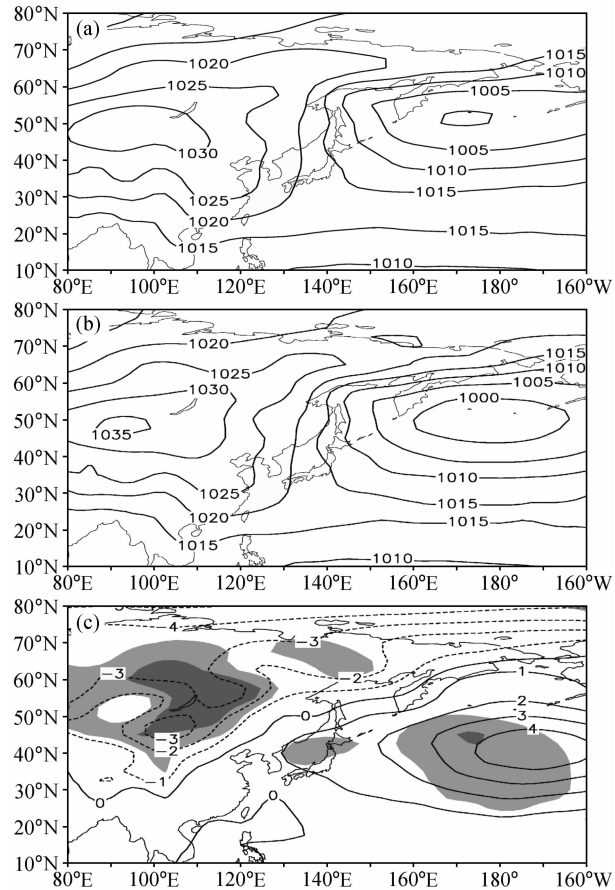


图 6 合成的冬季行星波活动高指数年 (a) 和低指数年 (b) 海平面气压 (单位: hPa) 的分布以及它们的差 (c, 深、浅阴影表示异常达 99%、95% 信度水平)

Fig. 6 Composite patterns of sea level pressure (hPa) for (a) high and (b) low planetary wave activity winters and (c) the difference between high and low indices (high minus low). Heavy and light shadings in (c) indicate the differences exceeding the 99% and 95% confidence levels, respectively

从合成后的海平面气压分布(图 6a、b),可以明显看到大陆上的西伯利亚高压和海洋上的阿留申低压。用高指数减去低指数的差(图 6c)则说明,伴随着行星波活动的异常,西伯利亚高压和阿留申低压的强度会同时增强或减弱。而对不同波数的行星波的分析发现,2 波起了最主要的贡献。图 7 给出了合成的冬季行星波活动高指数年和低指数年纬向

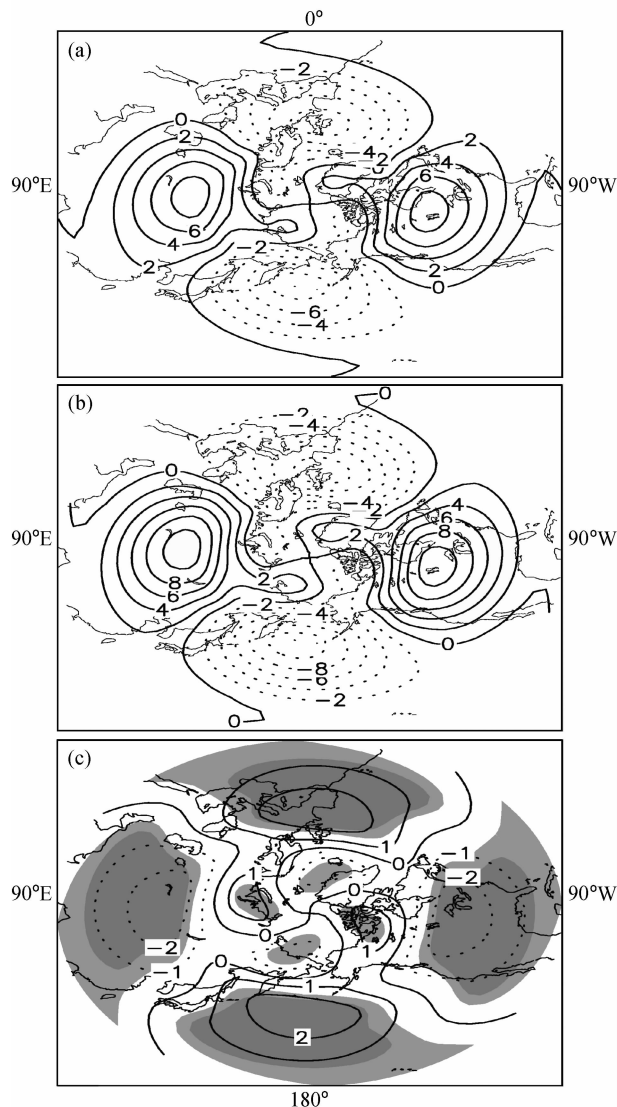


图 7 合成的冬季行星波活动高指数年(a)和低指数年(b)纬向波数为 2 的海平面气压分布以及它们的差(c, 深、浅阴影表示异常达 99%、95% 信度水平)

Fig. 7 Composite patterns of winter sea level pressure (hPa) of the zonal wavenumber 2 for (a) high and (b) low planetary wave activity winters and (c) the difference between high and low indices (high minus low). Heavy and light shadings in (c) indicate the differences exceeding the 99% and 95% confidence levels, respectively

波数为 2 的海平面气压分布以及它们的差。合成后 2 波的气压分布(图 7a、b)的显著特征表现为,欧亚大陆和北美大陆上的高压以及北太平洋和北大西洋上的低压,2 波的波型分布与气候平均的海平面气压场上的西伯利亚高压、阿留申低压、加拿大高压和冰岛低压的分布十分一致。用高指数减去低指数的差(图 7c)则说明,伴随着行星波活动的异常,大陆上的高压和海洋上的低压的强度会同时增强或减弱,特别是 2 波的异常贡献了西伯利亚高压和阿留申低压 60% 以上的异常。由此可以认为:行星波活动的异常是导致冬季西伯利亚高压和阿留申低压变化的重要原因。

正是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。如图 8 所示,合成的冬季行星波活动高指数年和低指数年地表面风场的差表现为在我国华北、东北以及西伯利亚的一部分地区有明显的南风异常,并且这里经向风的异常都达到了 99% 的信度检验。因此,对应于高的行星波活动指数,低层的纬向波数 2 的波动振幅明显减弱,从而使西伯利亚高压和阿留申低压都减弱,这样在我国华北、东北以及西伯利亚部分地区出现南风异常,导致该地区在冬季出现异常增暖。

5 结论和讨论

本研究利用 NCEP/NCAR 再分析资料 and 我国 160 站月平均气温资料,首先采用线性回归的方法建立了从 1958 至 1998 年 40 个冬季北极涛动与东亚气候异常的关系。结果表明,当 AO 处于正位相时,东亚地区 200 hPa 的急流明显北跳,东亚大槽显著减弱,说明东亚冬季风偏弱,从而在中国的华北、东北到西伯利亚出现大范围的地表南风异常,使得低空从西伯利亚到我国的东北、华北以及韩国、日本有显著的暖异常;而当 AO 处于负位相时,则往往出现相反的情形。进一步采用相关和合成分析对 AO-准定常行星波活动-东亚气候之间关系的研究揭示出,对应于 AO 的正位相,中高纬平流层下层西风风速偏强,准定常行星波通过极地波导向上进入平流层的传播会减弱,从而平流层极涡比较稳定,稳定的极涡说明有较少的冷空气南下;同时,准定常行星波通过低纬度波导向赤道的传播

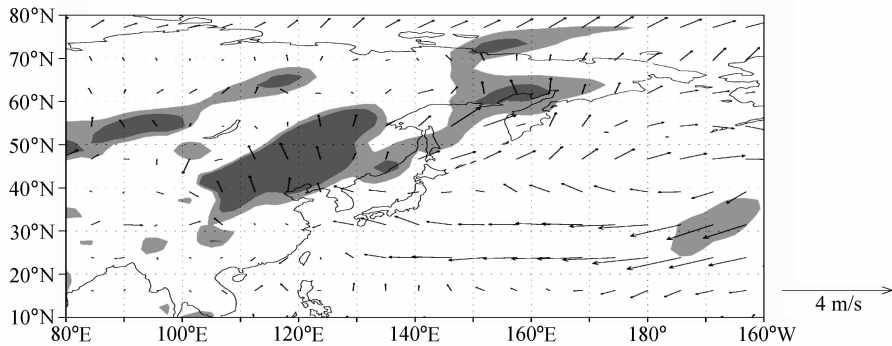


图 8 合成的冬季行星波活动高指数年和低指数年地表面风场的差。浅、深阴影表示经向风差异的显著性达 95%和 99%的信度

Fig. 8 Composite difference of the surface wind between high and low planetary wave activity winters. Light and heavy shadings indicate significant differences at the 95% and 99% levels, respectively

增强,使得低层中高纬地区纬向波数 2 的扰动振幅明显减小,由于行星波 2 波的分布正与大陆上的高压和海洋上的低压一致,从而西伯利亚高压和阿留申低压都减弱,这样在我国华北、东北以及西伯利亚部分地区出现南风异常,导致该地区在冬季出现异常变暖。

综上所述,我们可以看到 AO 通过影响中高纬平流层下层的西风强弱,进而影响到准定常行星波的垂直传播,使得对流层下层中高纬地区的行星波振幅发生变化,从而导致低层的西伯利亚高压和阿留申低压同时减弱或增强,最终导致东亚地区异常偏暖或偏冷。武炳义等^[20]的研究认为 AO 可以通过影响纬向环流而导致西伯利亚地区垂直运动的异常,再由西伯利亚高压影响东亚气候。本研究提出的 AO 通过影响准定常行星波的活动而导致东亚气候异常的机理,不但强调了西伯利亚高压的贡献,而且特别从波动的意义上强调了阿留申低压的重要性,并指出行星波活动的异常是冬季西伯利亚高压和阿留申低压变化的重要原因。

最近,杨蕾等^[12]利用大气环流模式模拟了大气准定常行星波活动的年际变化,结果显示,模式在对流层可以很好地模拟行星波年的年际变化以及北极涛动形势,并且二者同样密切相关;相对而言,模式对行星波经极地波导向平流层传播的年际变化的模拟就比较差。因此,有必要进一步利用大气环流模式来模拟 AO 影响东亚气候的过程,并比较 AO 和 ENSO 对东亚冬季气候的不同影响。以前的一些研究^[15, 16, 30]揭示出, ENSO 对我国冬季气候也有显著的影响,异常的信号主要出现在我国东南沿海地区。而 AO 对我国的影响主要在东北、华北

地区。它们对中国冬季气候异常的不同影响的比较也有待于进一步的模拟研究。本研究还表明,东亚冬季气候的异常可能与平流层环流存在一定的联系,近几年的研究已发现平流层环流的异常在一定条件下会向上传播影响到对流层大气^[31, 32],因而从平流层寻找东亚气候变异的因子,也有助于改进东亚冬季气候异常的预报。

参考文献 (References)

[1] 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

[2] Limpasuvan V, Hartmann D L. Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3133~3136

[3] Ting M, Hoerling M P, Xu T, et al. Northern Hemisphere teleconnection patterns during extreme phases of the zonal-mean circulation. *J. Climate*, 1996, **9**: 2615~2633

[4] Limpasuvan V, Hartmann D L. Wave-maintained annular modes of climate variability. *J. Climate*, 2000, **13**: 4414~4429

[5] 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

[6] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. (I) Forcing by topography. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 78~92

[7] Huang R H, Gambo K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. (II) Forcing by stationary heat sources and forcing by topography and stationary heat sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 78~108

[8] 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
- [9] Chen W, Graf H F, Takahashi M. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**: 2073, doi: 10.1029/2002GL016062
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. *Middle Atmospheric Dynamics*. Academic Press, 1987. 489pp
- [14] Young J A. Physics of monsoons: The current view. *Monsoons*, Fein J S and Stephens P L, Eds. Washington, D. C.: John Wiley & Sons, 1987. 211~243
- [15] 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
- [16] Chen W, Graf H F, Huang R H. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**: 48~60
- [17] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, **26**: 595~610
Chen Wen. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 595~610
- [18] Huang R H, Zhou L T, Chen W. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 55~69
- [19] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28** (10): 2073~2076
- [20] Wu B Y, Wang J. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 297~320
- [21] 何春, 何金海. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究. *南京气象学院学报*, 2003, **26**: 1~7
He Chun, He Jinhai. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26**: 1~7
- [22] 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响. *高原气象*, 2004, **23**: 429~434
Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Junmei. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23**: 429~434
- [23] 李建平. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系. 海-气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 2005. 169~176
Li Jianping. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation. *Air - Sea Interaction and Its Impacts on China Climate* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 169~176
- [24] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [25] <http://horizon.atmos.colostate.edu/ao/>
- [26] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp
Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp
- [27] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. *J. Climate*, 2000, **13**: 1000~1016
- [28] Perlwitz J, Harnik N. Downward coupling between the stratosphere and troposphere: The relative roles of wave and zonal mean processes. *J. Climate*, 2004, **17**: 4902~4909
- [29] Charney J G, Drazin G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**: 83~109
- [30] Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **74**: 49~62
- [31] Black R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation. *J. Climate*, 2001, **15**: 268~277
- [32] Christiansen B. Downward propagation of zonal mean zonal wind anomalies from the stratosphere to the troposphere: Model and reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 27307~27322