

陈文, 魏科, 王林, 等. 2013. 东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响 [J]. 大气科学, 37 (2): 425–438, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12309.
Chen Wen, Wei Ke, Wang Lin, et al. 2013. Climate variability and mechanisms of the East Asian winter monsoon and the impact from the stratosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 425–438.

东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响

陈文 魏科 王林 周群

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 本文综述了近几年来关于东亚冬季风变异特征和机理方面的研究, 特别对平流层过程对东亚冬季风和气候异常的可能影响作了回顾和进一步分析。东亚冬季风的变异除了季风强弱变化外, 还有东亚冬季风的路径变化; 研究表明, 前者往往对应全国气温一致的变化, 而后者可以引起我国气温的南北反相振荡, 并导致东亚冬季风变异存在南北两个子系统。此外, 进入本世纪后, 东亚冬季风的建立推迟, 并且东亚冬季风在盛期明显减弱, 但冬季风活动在早春比以往要更为活跃, 这些变化与冬季气温南北反相变化也有密切的联系。进一步的分析揭示出东亚气温的南北反相变化是东亚冬季风变异的主要模态之一, 而且它与平流层极涡强度密切相关。当异常的平流层极涡向下传播时, 可以引起对流层低层北极涛动 (AO) 的异常以及西伯利亚高压的异常, 并在东亚地区出现南北反相的温度变化。

有关东亚冬季风变异的成因研究表明, 上世纪 70 年代中后期以后, 热带厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO) 的影响变弱, 而中高纬的北太平洋涛动 (NPO) 和乌拉尔地区阻塞强度的影响显著增强, 相关研究还揭示了这些变化的原因。此外, 东亚冬季风在 1987 年以后的持续减弱主要与准定常行星波活动年代际变化有关, 行星波活动通过波流相互作用可以影响 AO 以及西伯利亚高压和阿留申低压, 从而导致冬季风异常。最后, 本文还讨论了太阳活动 11 年周期变化对东亚冬季气候异常的可能影响和过程。

关键词 东亚冬季风 ENSO AO 平流层过程 太阳活动

文章编号 1006-9895(2013)02-0425-14

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12309

Climate Variability and Mechanisms of the East Asian Winter Monsoon and the Impact from the Stratosphere

CHEN Wen, WEI Ke, WANG Lin, and ZHOU Qun

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

Abstract Recent advances in studies on the characteristics and mechanisms of the East Asian winter monsoon (EAWM) variability are reviewed in the paper. In particular, the possible effect of the stratospheric process on the EAWM and the climate anomalies are documented and investigated. It was found that the path of the EAWM, as well as the variation in its intensity, is important. The EAWM intensity is usually associated with uniform changes in wintertime temperature throughout China, whereas the EAWM path tends to induce a north–south temperature dipole pattern which is associated with two sub-systems that develop in the north and the south of China. Moreover, since the beginning of this century the forming of the EAWM was delayed while its intensity tended to decrease during the mature phase of the monsoon and

收稿日期 2012-10-10, 2012-10-16 收修定稿

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428603, 国家自然科学基金资助项目 41025017、41230527, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-QN204

作者简介 陈文, 男, 1966 年出生, 研究员、博士生导师, 主要从事东亚季风和气候动力学研究。E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

intensify in early spring compared to earlier records. All these variations are shown to be closely related to the north-south temperature dipole pattern. Further analysis indicates that the north-south dipole pattern is one of the major modes of the EAWM variability and is closely associated with the intensity of the stratospheric Polar Vortex. When an anomalous polar vortex propagates downward, this may induce anomalous Arctic Oscillation (AO) and Siberian High in the lower troposphere, leading to the emergence of a north-south temperature dipole pattern in East Asia.

Studies on the causes of EAWM variability suggest that the impact of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) has weakened since the mid-late 1970s. In contrast, the impacts from the circulation anomalies in the mid-high latitudes such as the North Pacific Oscillation (NPO) and the Ural blocking have increased significantly. The mechanisms involved have also been investigated. In addition, the persistent weakening of the EAWM since 1987 may be related to the interdecadal change of the quasi-stationary planetary wave activity. Through wave-flow interaction the planetary wave activity may induce variations in the AO, the Siberian High, and the Aleutian Low, and result in anomalous EAWM. Finally, the possible effects of the 11-year solar cycle on the East Asian climate anomalies during the boreal winter and the associated processes are also discussed.

Keywords East Asian winter monsoon, ENSO, AO, Stratospheric process, Solar activity

1 引言

东亚冬季风一般认为是与来自西伯利亚高压向东、向南移动的冷空气相关联的东亚大气环流 (Chan and Li, 2004)。早期有关东亚冬季风的研究主要集中在天气尺度特征上, 特别是东亚冬季寒潮活动及有关的东亚大气环流变化过程 (陶诗言, 1959; Boyle and Chen, 1987), 后来的一系列研究则对东亚寒潮的变化特征以及与西伯利亚高压的关系有了比较系统的认识 (丁一汇, 1990; Zhang et al., 1997a; 王遵亲 and 丁一汇, 2006)。由于东亚冬季风是行星尺度的环流系统, 因而它还有更长时间尺度的变化, 比如季节内、年际和年代际变化。从上个世纪末开始, 关于东亚冬季风气候变异及其机理研究逐渐兴起。通过定义若干描述东亚冬季风强度的指数, 这些研究揭示出东亚冬季风与热带的厄尔尼诺—南方涛动事件 (ENSO) 和中高纬地区北極涛动 (AO) 的密切联系 (Chen et al., 2000; Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002; Jhun and Lee, 2004; Wang and Chen, 2010b)。

关于东亚冬季风气候变异的研究表明, 从上个世纪 80 年代中期开始东亚冬季风明显减弱, 我国出现持续的暖冬 (康丽华等, 2006)。然而, 2005/2006 冬季北半球从西欧经乌拉尔地区到西伯利亚以及东亚地区出现异常低温, 并在日本和我国部分地区出现严重雪灾; 2008 年 1 月份我国又遭受 50 年来最严重的暴雪、持续低温和冰冻灾害, 引起交通运输中断、输电设备大量被毁以及越冬作物被冻死, 造成重大经济损失和人员伤亡 (黄荣辉等, 2007)。这些都使得人们对东亚冬季风变异

更加关注, 并从东亚冬季风变异的动力过程出发, 揭示出若干冬季风变异与气候灾害的成因和动力机理, 陈文等 (2008) 对此作了比较系统的回顾和总结。

众所周知, 北半球冬季由于大气行星波的垂直传播使得对流层与平流层动力耦合在一起。过去的传统观点认为, 平流层仅仅是被动地接受下面对流层天气系统的能量和波动, 平流层大气的动力、热力和化学成分受到对流层的强烈影响 (Andrews et al., 1987)。但是从 20 世纪末期以来, 大气科学界逐渐认识到平流层可能会影响对流层气候, 尤其在 Thompson and Wallace (1998; 2000) 发现 AO 以后, 观测和模拟研究都表明发生在平流层的环流异常可以伴随着 AO 信号向下传播, 而与对流层甚至地面的极端天气气候事件联系在一起 (Kodera and Kuroda, 2000; Baldwin et al., 2003; Christiansen, 2005)。然而, 上述研究主要集中在大西洋和西欧地区。事实上, 东亚冬季风与 AO 有密切的关系, AO 具有准正压的结构并向上一一直延伸到平流层 (Thompson and Wallace, 2000)。因此, 平流层是否会影响东亚冬季风变异就成为一个十分重要的科学问题, 特别是由于平流层异常的持续时间长, 它可能对对流层气候预测的改进有重要应用价值。此外, 诸如全球增暖背景下, 最近几年北半球冬季为什么常常出现严重的极端寒冷事件, 这些问题也是关于季风研究的前沿问题。

最近几年, 在“国家重点基础研究发展规划”和国家自然科学基金相关项目的资助下, 关于东亚冬季风变异的成因和机理方面, 特别是平流层过程对东亚冬季风的影响上取得了一些新的研究成果。

因此, 本文将主要回顾和综述我国最近几年来对东亚冬季风的研究, 特别是回顾我们研究组在有关东亚冬季风变异的机理以及平流层的影响方面所取得的最新进展, 并进一步从东亚冬季风变异的基本模态上探讨与平流层环流异常的关系。

2 东亚冬季风变异的新特征及机理

长期以来季风强弱一直是东亚冬季风研究中关注的重要问题, 为此所定义的冬季风强度指数也多达十几个 (Gao, 2007; Wang and Chen, 2010b), 并且新的指数还在不断出现 (如: Li and Yang, 2010)。然而, 正如东亚夏季风的变化具有多时空模态一样 (Huang et al., 2012), 东亚冬季风的变化同样具有多时空特征, 因而仅用强度一个指标难以全面刻画冬季风变异。康丽华等 (2006; 2009) 较早用 EOF 的方法分析了我国 160 站冬季气温的时空变化, 指出我国冬季气温主要表现为全国一致变化型 (EOF1) 和南北反向变化型 (EOF2) 两种空间模态, 这两种模态不论在年际还是年代际时间尺度上都非常显著, 其中 EOF1 反映了东亚冬季风的强度, 而 EOF2 的成因不是很清楚。Wu et al. (2006) 通过对 850 hPa 矢量风进行 Hermite 矩阵分解也发现冬季风存在强度变化以外的新模态。

2.1 东亚冬季风路径年际变化和冬季风南北子系统

Wang et al. (2009a) 通过 EOF 方法分析了 500 hPa 东亚大槽年际变化的主要模态, 指出第一模态反映了大槽的强弱, 它可以描述东亚冬季风整体强度的年际变化; 而第二模态则反映了大槽轴线的倾斜和东亚—太平洋地区极锋急流的斜压性, 它描述了冬季风强度以外的另一年际变化特征, 即东亚冬季风路径的变化。在气候平均意义上, 东亚冬季风的低层西北风在朝鲜半岛附近分为两支, 一支沿南支路径到达赤道, 一支沿东支路径进入北太平洋。当东亚大槽偏竖时, 整个对流层以 45°N 左右为界在东亚至北太平洋地区呈现北高南低的位势高度异常, 从而 45°N 附近的纬向西风减弱, 此时沿东支路径进入北太平洋的冷空气减少, 从东亚北部到西北太平洋地区有异常暖平流, 引起该地区温度升高, 降水增加; 同时, 更多的冷空气沿东亚冬季风的南支路径进入低纬地区, 这一方面使赤道强对流区南移, 赤道至中南半岛范围的降水减少, 另一方面使低纬度温度降低, 从而在整个东亚呈现北高南低的温度异常分布。当东亚大槽

偏横时, 气候异常状况与上述基本相反。该研究表明, 东亚冬季风路径的年际变化可以引起东亚气温的南北反位相振荡, 这可以很好地解释中国冬季气温南北反相变化 (康丽华等, 2006, 2009) 的成因。

此外, 康丽华 (2006) 还认为东亚冬季风可能存在南北两个子系统, 它们对应的环流形势具有一定相似性, 却又不尽相同。其中北部系统更多地受 AO 等中高纬大气环流系统变异的影响, 而南部系统则主要受 ENSO 等低纬度因子的影响。Wang et al. (2010) 所得到的东亚冬季风的北方模态和南方模态事实上就分别反映了冬季风这两个子系统的变化。冬季风存在子系统的观点也得到了最近的一些研究的认同 (如: 刘觐等, 2012), 但很显然这仍需更多的工作来论证和完善。

2.2 东亚冬季风演变的新特征

Wei et al. (2011) 研究了东亚冬季风的月际演变并揭示出 2000 年后新的变化特征。一般而言, 东亚冬季风在早冬强度开始增强, 大约在 1 月份达到峰值并开始减弱。因此, Wei et al. (2011) 利用月平均的冬季风强度指数的隔月差定义了季风变化的倾向指数 (MTI), MTI 可以很好地描述季风的演变过程, 并表现为 1 月前为正而 1 月后为负。这对应着中国地面气温的倾向在早冬为一致变冷, 在后冬则为一致变暖。有趣的是 MTI 的长期变化趋势表明, 东亚冬季风的建立推迟, 这应该与全球增暖有关, 而冬季风出现峰值的时间提前, 这就使得冬季风的建立阶段缩短, 即建立过程更加快速。特别是 2000 年后, 东亚冬季风在盛期明显减弱, 但冬季风活动在早春比以往要更为活跃, 并对应着中国负的地面温度倾向。这种变异特征可能与大气环流的调整以及寒潮在我国活动的变化有关 (Wei et al., 2011)。

2.3 影响东亚冬季风变异的因子及其变化

(1) 热带太平洋 ENSO 的作用

海陆热力差异是季风形成的一个重要原因, 因此海洋或陆地热力状况的改变往往会引起季风的异常。在年际时间尺度上, ENSO 通常被认为是影响东亚冬季风最重要的因子 (Zhang et al., 1997a; Chen et al., 2000), 在 El Niño (La Niña) 盛期的冬季东亚冬季风往往偏弱 (偏强), 这一影响主要是通过 ENSO 在对流层低层激发西太平洋异常反气旋 (气旋) 和南风 (北风) 异常 (Zhang et al., 1996;

Wang et al., 2000) 来实现的。然而, Wang et al. (2008) 的研究表明, ENSO 对东亚冬季风的这种影响并不是稳定的, 而是受到北太平洋年代际振荡 (PDO) (Zhang et al., 1997b) 的调制。如果以 El Niño 年减去 La Niña 年的合成代表 ENSO 的影响, 当 PDO 处于暖位相时, 在年际变化时间尺度上 ENSO 和东亚冬季风异常之间并没有显著的联系; 而当 PDO 处于冷位相时, ENSO 则对东亚冬季风产生显著的影响, 在东亚地区对流层低层导致明显的温度变化。他们进一步指出, PDO 调制作用的机理主要在于低纬度太平洋—东亚遥相关型的变化以及中纬度东亚—西北太平洋地区位势高度对 ENSO 响应的改变。当 PDO 处于冷位相时, ENSO 激发的西太平洋异常反气旋位置偏北, 强度较强, 能够在东亚沿岸产生显著的南风异常, 同时西伯利亚地区的海平面气压有明显的减弱, 因此 ENSO 对东亚冬季风的影响非常显著; 当 PDO 处于暖位相时, 西太平洋反气旋的响应较弱, 位置偏南, 西伯利亚地区的海平面气压也没有明显响应, 因此 ENSO 对东亚冬季风的影响不明显。由于 20 世纪 70 年代以来 PDO 基本处于年代际暖位相, 因此近几十年来 ENSO 和东亚冬季风的关系经历了显著的年代际减弱。

最近的研究还表明, ENSO 对东亚冬季风影响的减弱可能与中太平洋型增暖型事件的增多有关 (Feng et al., 2010)。传统的东太平洋型增暖型事件可以导致显著的西太平洋反气旋异常, 而中太平洋型增暖型事件的冬季, 西太平洋异常反气旋明显减弱, 这样中太平洋型增暖型事件对东亚以及东南亚冬季气候异常的影响相对较小。至于中太平洋增暖型事件的增多是自然变化, 还是全球增暖下海洋变化的响应结果, 则是目前国际上的热点研究课题。

(2) 中高纬大气环流模态以及大气准定常行星波活动的作用

自从 AO 与东亚冬季风的关系被揭示以来 (Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002), AO 影响东亚冬季风的过程和机理日益受到重视。海陆热力差异是季风形成的一个重要原因, 也是大气准定常行星波产生的原因之一。因此, Chen et al. (2005)、陈文和康丽华 (2006) 从经圈平面上大气准定常行星波的活动异常出发, 提出年际变化尺度上行星波两支波导间反位相的振荡是 AO 影响东亚冬季风变异的重要环节。近几年来, 我们进一步分析了在年代际时间尺度上行星波活动对东亚冬季风的影响。

在年代际时间尺度上东亚冬季风一个显著的变化是 1987 年以后的持续减弱 (Jhun and Lee, 2004; Huang and Wang, 2006; 康丽华等, 2006; Wang et al., 2009b; Huang et al., 2012)。伴随着冬季风的减弱, 影响我国的寒潮和强寒潮频次均显著减少, 分别从 1987 年之前的年均 16 次和 3.8 次降为之后的 13.2 次和 2.5 次, 东亚也经历了连续十几年的暖冬 (Wang et al., 2009b)。Wang et al. (2009b) 将 Chen et al. (2002; 2003) 定义行星波活动遥相关的方法应用于高分辨率的 ERA40 资料 (Uppala et al., 2005), 计算了 1957~2001 年冬季平均的准定常行星波活动指数, 发现准定常行星波的活动在 1987 年前后也有一个明显的年代际转变, 从之前的低位相转为之后的高位相。相应的纬向平均的行星波传播表现为, 在 1987 年之前, 沿极地波导向平流层的传播较强, 同时沿低纬波导向低纬度对流层顶附近的传播较弱; 而在 1987 年之后则呈现出相反的变化。与行星波沿低纬波导传播增强的年代际异常相伴随, 1987 年后行星波的 EP (Eliassen-Palm) 通量在 35°N 附近产生辐合异常 (图 1a), 根据波流相互作用原理, 这会引起 35°N 附近纬向西风的减速, 从而使得副热带急流减弱, 导致东亚冬季风减弱。值得注意的是, 尽管行星波年代际传播异常所引起的风场变化依然表现出类似 AO 的副热带—高纬度反位相振荡形势, 但通过显著性检验的风场异常只出现在对流层 (图 1b), 这与显著延伸到平流层的 AO 引起的风场异常 (Thompson and Wallace, 2000) 和行星波年际振荡引起的风场异常 (Chen et al., 2003, 2005) 有明显不同。这种差异产生的原因尚不清楚, 但可能意味着下边界强迫和对流层中的反馈过程在这次行星波和冬季风年代际变化中起着很重要的作用。

此外, 我们还对欧亚大陆上空的欧亚遥相关型 (EU)、乌拉尔地区阻塞强度以及北太平洋涛动 (NPO) 等中高纬大气环流异常对东亚冬季风和冬季气候异常的影响作了比较全面的分析研究。刘毓赟和陈文 (2012) 针对冬季 EU 的研究表明, 在欧亚大陆上空存在与 EU 相关联的波列从北大西洋传播到乌拉尔山以东的东亚地区。当冬季 EU 处于正位相时, 东亚上空急流增强、东亚大槽加深, 使得东亚冬季风偏强, 我国东部降温、降水减少; 反之, 当冬季 EU 处于负位相时, 我国东部增温、降水增加。

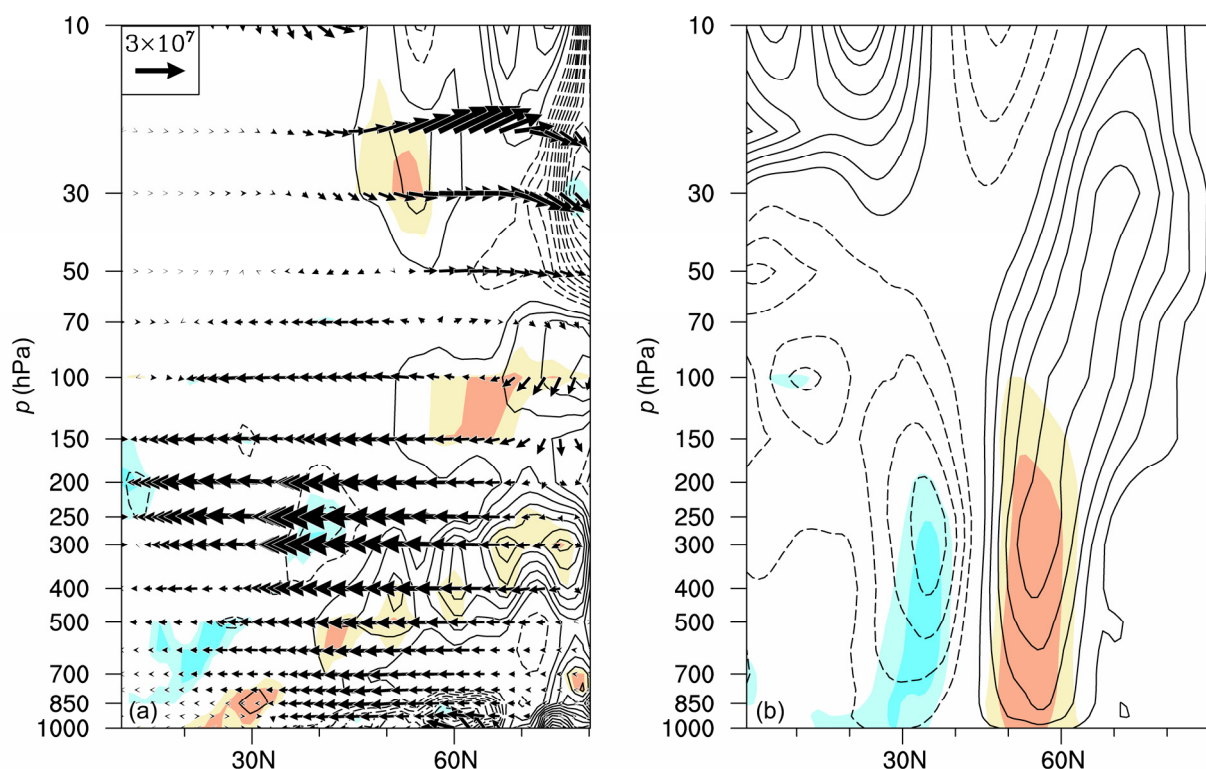


图 1 (a) 1988~2001 年平均和 1976~1987 年平均的冬季大气准定常行星波的 EP 通量 (箭头) 及其散度 (等值线) 的差值; (b) 1988~2001 和 1976~1987 年冬季纬向平均纬向风的差值。深、浅阴影表示通过 99% 和 95% 信度检验

Fig. 1 Composite differences of (a) the EP flux (vector) and its divergence (contour) for the stationary planetary waves (sum of zonal wavenumbers 1 to 3) and (b) the zonal-mean zonal wind between 1988–2001 and 1976–1987 winters. Contour intervals are $5 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ in (a) and 0.5 m s^{-1} in (b). Light and dark shading indicate the 95% and 99% confidence levels, respectively

东亚上游特别是乌拉尔地区和欧洲的阻塞高压活动一直被认为是影响东亚寒潮和冬季风的关键因子, 这些地区阻塞高压的崩溃往往是东亚寒潮发生的前兆 (陶诗言, 1959)。在季节内时间尺度上, 当上游阻塞所伴随的对流层高层 Rossby 波列与西伯利亚地区的地面冷异常发生耦合时, 会引起西伯利亚高压和东亚冬季风的显著加强 (Takaya and Nakamura, 2005), 2008 年 1 月我国南方的雨雪冰冻灾害就与乌拉尔地区的阻塞持续异常有关 (Zhou et al., 2009; 李崇银和顾薇, 2010)。之前的很多研究主要侧重天气和季节内时间尺度上的变化, 而没有在气候意义上研究阻塞高压对影响东亚冬季风的影响。最近, Wang et al. (2010) 利用一个客观定义的阻塞强度指数研究了乌拉尔地区冬季阻塞的年际变化及其对东亚冬季风的影响, 指出这种影响是通过一个穿越欧亚大陆的准正压 Rossby 波列来实现的。当乌拉尔地区的阻塞异常偏强时, 这一波列在向平流层上传的同时还能明显地向东传播, 这会在东亚地区产生负的位势高度异常, 从而加强东亚大槽并使东亚冬季风增强。对阻

塞指数时间变化的分析表明, 乌拉尔地区的冬季阻塞活动在近几十年有明显的减弱趋势, 主要表现为阻塞事件频次的减少。然而有趣的是, 虽然乌拉尔阻塞的活动减弱了, 但它与东亚冬季风之间的联系却增强了。尤其是 1976 年气候突变之后, 由于平流层极夜急流显著加强, 这一准定常波列向平流层的传播受到抑制, 因此更倾向于沿急流顺欧亚大陆上空纬向传播到东亚地区。这使得乌拉尔阻塞对东亚冬季风的影响显著增强, 其能够解释的东亚冬季风的年际变化方差从之前的 36% 增加到 55%, 影响的范围也明显扩大。

NPO 是北太平洋阿留申群岛和夏威夷群岛间南北气压反相变化的大气遥相关模态 (Wallace and Gutzler, 1981), 在各个季节都非常显著 (王林等, 2011)。冬季的 NPO 不仅能够影响到下游北美的气候 (Linkin and Nigam, 2008), 而且还能影响到东亚冬季风的强弱 (郭冬和孙照渤, 2004; 王林等, 2011)。当 NPO 处于正位相时, 海平面气压场在白令海附近为气旋性异常, 在整个副热带太平洋为反气旋性异常, 这一南北偶极子结构在对流层中呈现

准正压结构, 在 500 hPa 高度上与西太平洋型遥相关 (Wallace and Gutzler, 1981) 非常相似 (王林等, 2011)。NPO 的太平洋副热带反气旋可以向西伸展到东亚沿岸, 减弱东亚冬季风的西北气流, 从而使东亚冬季风偏弱, 东亚冬季气温偏高, 我国黄河以南地区降水偏多。Wang et al. (2007) 的研究进一步指出, NPO 对东亚冬季风的影响在 1976 年前后发生了年代际转变, 1976 年之前 NPO 主要影响东亚沿岸的气温, 对 40°N 以北的东亚内陆气温基本没有影响, 但 1976 年之后 NPO 主要影响 40°N 以北东亚内陆的气温, 而对东亚沿岸的气温影响很小。NPO 与东亚冬季风关系的这种年代际变化与 1976 年后 ENSO 对 NPO 的强迫发生年代际减弱有关系。

2.4 东亚冬季风对降水的影响

由于冬季风盛行期间东亚一般干燥少雨, 因此很多研究在考虑冬季风对东亚地区的影响时主要关注气温。然而, 2008 年初我国南方受到雨雪冰冻灾害的影响 (顾雷等, 2008; Zhou et al., 2009), 2009~2010 年我国西南遭遇严重的秋冬春连旱 (Barriopedro et al., 2012; Yang et al., 2012; 黄荣辉等, 2012), 这些灾害的发生促使冬季风与降水关系的研究逐渐开展。王林和冯娟 (2011) 的研究表明, 我国冬季 (12~2 月) 降水的第一模态反映了长江以南地区降水量的强度, 并可以代表全国冬季降水总量的变化。当东亚冬季风偏强 (弱) 时, 自南海北部到华北有偏强的北风 (南风), 这导致水汽在该区域异常辐散 (辐合), 我国总体降水偏少 (多), 而热带海洋大陆地区降水偏多 (少); 伴随着 1987 年东亚冬季风的年代际减弱, 近年来我国冬季降水总体处于年代际偏多的时期。Zhou (2011) 指出冬季风的减弱可以导致急流南移, 从而增加华南地区的大气不稳定性进而有利于华南后冬 (1~3 月) 降水增加。他进一步分析了冬季风和 ENSO 对于我国东部降水的个别影响, 指出对黄淮地区冬季降水的年际变化而言, 东亚冬季风的作用要比 ENSO 更大。

3 平流层过程对东亚冬季风异常的影响和过程

如前言所述, 近十几年来的许多研究揭示出平流层环流的异常在一定条件下会向上传播, 并影响到对流层大气, 这种自上而下的影响与传统的观点

明显不同, 因此引起大气科学界的广泛关注。Baldwin et al. (2003) 就指出 “当平流层影响达到最大的时候, 其影响可以达到和 ENSO 的影响相当的量级和空间尺度 (At its maximum, the magnitude and geographic scale of this influence (stratosphere) may be comparable to that of El Niño–Southern Oscillation.)”。平流层环流在北半球冬季主要表现为强大的绕极西风环流, 这一强大的环流系统与极区的冷低压中心相对应, 被称为平流层极涡。因此平流层环流异常主要表现为平流层极涡强度和范围的变化 (Chen and Wei, 2009; Li et al., 2011)。平流层极涡除了与行星波存在相互作用外 (谭本旭, 2008; 魏科等, 2008), 还受到海温 (Wei et al., 2007; Li, 2009; Jadin et al., 2010; Lan et al., 2012)、热带平流层准两年周期振荡和太阳活动 (Chen and Li, 2007) 等外强迫的影响。

3.1 季节内时间尺度上平流层极涡异常下传对东亚冬季大气环流的影响

魏科 (2007)、陈文和魏科 (2009) 分析了强、弱平流层极涡所对应的东亚地区大气环流变化情况, 他们首先定义了强、弱极涡事件, 以极区 (70°N~90°N) 位势高度负异常表示强极涡, 而以极区位势高度正异常表示弱极涡, 然后对平流层极区异常的下传事件进行合成分析。在所用的 45 年 ERA-40 资料中总共有 62 个弱极涡和 71 个强极涡的异常值超过了 1 个标准差, 以上这些个例中有 55 个弱极涡和 46 个强极涡可以从 1 hPa 下传到 10 hPa, 从 10 hPa 可以下传到 100 hPa 的总共有 43 个弱极涡和 42 个强极涡, 其中从 1 hPa 一直连续下传到 100 hPa 的总共有 41 个弱极涡下传事件和 35 个强极涡下传事件, 比例分别为 66% 和 49%。这说明在平流层极涡发生异常变化的时候, 并不是所有事件都可以从高层向对流层顶附近传播, 还有部分异常事件的传播特征不明显。比较而言, 弱的极涡更容易从平流层高层一直向下传至对流层, 因此当平流层冬季爆发性增温发生的时候, 容易出现下传而对低层的环流发生明显影响。

对挑选的 41 个弱极涡下传事件和 35 个强极涡下传事件分别进行下传前 (−40~−10 d) 和下传后 (10~40 d) 各 1 个月的异常合成分析, 结果表明, 在弱极涡下传之前 1 个月的异常场上, 北半球 1000 hPa 表现为极区位势高度负异常和中纬度位势高度正异常的分布, 这种异常的位势高度分布对应

着 AO 的正位相, 特别是亚欧大陆整个位势高度为正异常, 对应有冬季异常强大的西伯利亚高压。而在弱极涡下传之后一个月, 1000 hPa 位势高度表现为极区正位势高度和中纬度负的位势高度, 这种位势高度分布对应为 AO 的负位相, 西伯利亚高压强度也有所减弱。也就是说, 在弱极涡下传过程中, 海平面气压场的分布由 AO 的正位相转变为 AO 的负位相, 同时西伯利亚高压由异常偏强转变为异常偏弱。与弱极涡下传相反的是, 在强极涡下传过程中, 低层大气环流由 AO 的负位相转变为 AO 的正位相, 这种前后的转变在中纬度地区最为显著的区域即为大西洋的亚苏尔高压和亚洲大陆的蒙古高压, 前者的变化对应着大西洋地区的北大西洋涛动 (NAO) 的变化, 而后者则明显会影响到东亚的季风环流。

与此对应的平流层弱极涡事件下传前后对流层低层 (850 hPa) 的温度异常变化表现为, 下传之前在东亚地区为整体的温度偏低, 这种低温异常一直向东延伸到太平洋北部的白令海峡和阿拉斯加附近, 向西一直到欧洲南部; 而正的温度异常主要出现在欧洲北部、俄罗斯中西部和北美大部分地区。在平流层弱极涡事件下传之后, 对流层低层的温度分布与下传前几乎相反。强极涡下传前后, 大西洋地区东西向的温度梯度发生逆转, 后 1 个月减去前 1 个月在北美地区出现东西向的“一十”的温度异常分布, 这和 NAO 的位相变化相一致。东亚地区的变化表现为我国东北地区温度的增温和我国东部大部分地区温度降低, 亚洲北部大部分地区温度增加, 这与 AO 的变化也是一致的 (Thompson and Wallace, 2000)。

这里我们进一步给出了弱极涡下传前后东亚地区的低层风场变化 (图 2)。在弱极涡下传之前, 对流层低层 850 hPa 上亚洲北部 60°N 整体有北风异常, 东亚沿岸有异常强的北风 (图 2a), 这对应着气温的降低; 在弱极涡下传之后 (图 2b), 亚洲北部 60°N 整体为南风异常, 我国东北地区表现为一个气旋型环流异常。后 1 个月减去前 1 个月的差值场 (图 2c) 上从我国华北到东北有异常强的西南风异常, 这种强的西南风异常对应着上述从亚洲中部到我国东北以及白令海峡的正温度异常分布。图 3 给出的是强极涡下传前后 850 hPa 的异常风场变化。强极涡下传之前我国南部地区为弱的偏南风异常, 华北地区为西风、西北风异常, 东北地区为气

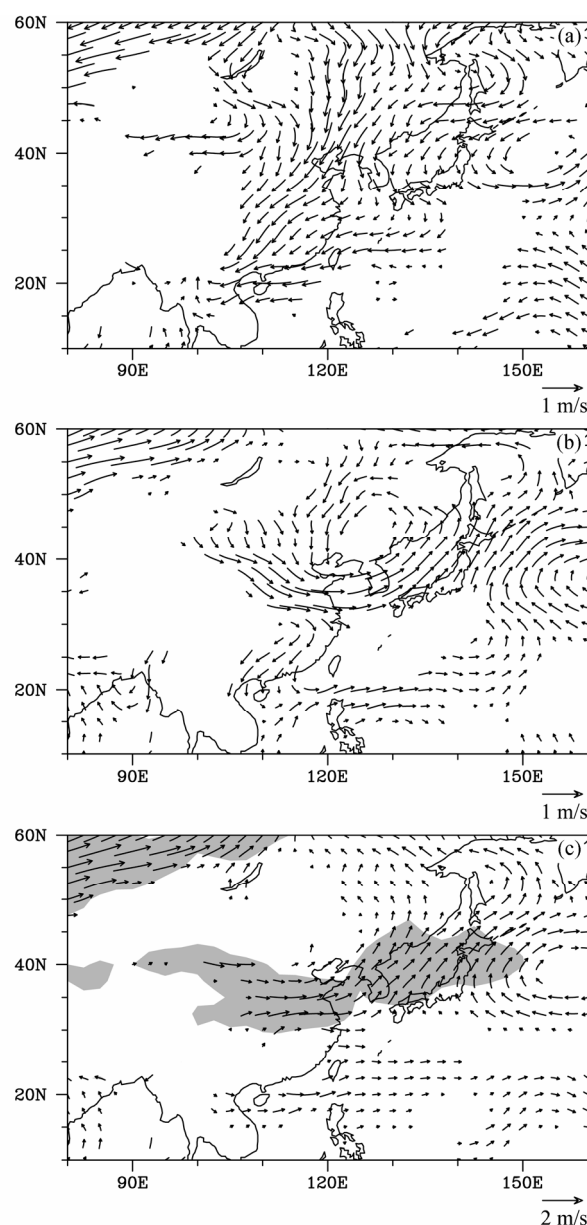


图2 平流层弱极涡事件下传前后1个月平均的850 hPa风场分布:(a)下传前-40~-10 d平均;(b)下传后10~40 d平均;(c)下传后与下传前的差。单位: m s^{-1} , 阴影表示通过95%信度检验的区域

Fig. 2 Composite distributions of the wind at 850 hPa with respect to the downward propagation of weak polar vortex events for (a) the period of -40 to -10 days and (b) the period of 10 to 40 days, and (c) their difference (the latter minus the former). Units: m s^{-1} ; shadings indicate the areas above the 95% confidence level using a two-sided Student's test

旋型环流异常控制; 当强极涡下传影响到地面以后, 我国东部地区为异常强的东北风异常。因此当平流层强极涡下传影响到对流层低层以后, 我国南部地区温度降低, 而北部的温度增加则来自于对流层亚洲大陆北部异常的西风环流异常。

在季节内时间尺度上, 平流层环流异常下传影

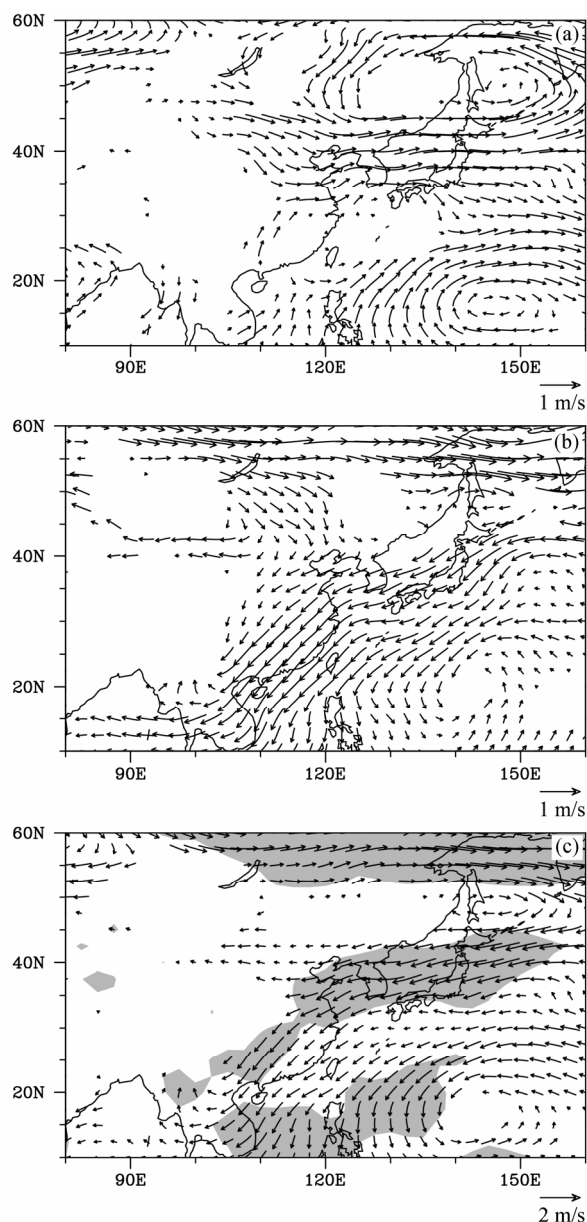


图3 与图2相同,但表示的是平流层强极涡事件下传对应的850 hPa风场分布

Fig. 3 The same as in Fig. 2 except for the downward propagation of strong polar vortex events

响对流层气候还可以通过个例分析更加清楚地表现出来 (Wang and Chen, 2010a; Li et al., 2012)。Wang and Chen (2010a) 通过 2009 年 12 月的典型个例分析指出, 当年 11 月准定常行星波沿极地波导向上的垂直传播偏强, EP 通量在平流层的辐合导致极夜急流减弱, 从而引起平流层负 AO 事件和中等强度的平流层极区增温。尽管这一增温未能达到平流层爆发性增温的量级, 但随后 12 月行星波沿极地波导传播的减弱却使得平流层的负 AO 信号向对流层传播, 在对流层产生了近 30 年来最强的负 AO

事件, 从而使得 12 月的东亚冬季风异常偏强, 北美和欧洲等多地也经历了破记录的降雪和低温。因此在分析东亚冬季风的季节内变化过程中, 平流层极涡的异常变化是一个很重要的影响因子。

3.2 东亚冬季风基本模态与平流层环流异常

由于东亚冬季风受多种因子的影响, 既包括外部影响因子, 比如 ENSO (Li, 1990; Zhang et al., 1996; Feng et al., 2010)、西北太平洋暖池海温异常 (Huang and Sun, 1992; Chen et al., 2000)、青藏高原的热力状况以及欧亚大陆积雪 (Wu and Zhang, 1998; Jhun and Lee, 2004) 等, 也包括大气内部过程, 如上述的 AO、大气准定常行星波。因此有必要区分出与平流层环流相联系的东亚冬季风的变化模态。

利用 1970/1971~1999/2000 年共 30 年的 NCEP-NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 通过对东亚地区 ($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 冬季地面气温的经验正交函数分解 (EOF), 我们得到了东亚冬季地面气温的主要变化模态, EOF 分析前两个模态分别解释了总方差的 49% 和 18.5%, 按照 North et al. (1982) 的标准, 这两个主分量是统计显著的。为了便于比较, 将 EOF 分析的各主成分 (PC) 先进行标准化, 然后把环流场各物理量对其做回归分析, 得到各模态的空间型。图 4a 是 EOF 分析第一模态的空间分布。EOF1 的空间分布特征表现为东亚地区一致的正异常信号, 表明此地区的主要变化是一致的增温或者降温, 其中在中高纬地区有最大值。EOF2 (图 4b) 的空间分布特征主要表现为南北振荡的形势, 即大约 40°N 以北包括我国东北和新疆北部的中高纬度基本为正信号区, 而 40°N 以南基本为负信号区, 这表明东亚冬季气温的异常变化还存在一种南北反相的基本模态, 即当东亚北部地区温度升高时, 对应南部温度降低; 反之, 当东亚北部温度降低的时候, 则南部的温度则会升高。

进一步分析表明, 东亚冬季风的第一模态与 AO 密切相关, PC1 和 AO 指数之间的相关系数达到了 0.78, 因此当 AO 处于正位相的时候, 东亚地区, 尤其是北部地区, 往往较正常偏暖, 反之, 当 AO 处于负位相的时候, 东亚地区北部往往要比正常偏冷。然而, 东亚冬季风第二模态却与平流层极涡强度密切相关, PC2 和平流层绕极西风急流指数 (以平流层 30 hPa, 65°N 的纬向平均西风来表示) 的相关系数达到了 0.57。考虑到 AO 和平流层急流

之间具有一定的相关(相关指数为 0.47), 为了排除二者之间的高相关性, 进一步计算了偏相关系数, PC1 和 AO 之间的偏相关系数为 0.76, PC2 和平流层急流之间的偏相关系数为 0.61, 这依然是统计显著的。

图 5 分别给出了东亚冬季大气环流与 AO、平流层急流指数的偏回归场。当 AO 正位相时, 在亚洲大陆, 尤其是中高纬度地区有较强的增温(图 5a), 同时伴随有这一地区的西风异常, 在北太平洋中纬度地区有正 SLP 距平, 导致在 SLP 异常中心西侧的东亚沿海地区有南风异常, 这种温压场的分布几乎与东亚冬季风的第一模态(图 4a)相同。东亚冬季大气环流与平流层急流强度指数之间的偏回归场的特点表现为东亚南部温度负异常和北风异常, 最大温度负异常中心在中国南部, 这与东

亚冬季风的第二模态非常相似, 因此可以认为 AO 和平流层极涡强度在东亚冬季风前两个模态中分别起到重要作用。

有研究揭示, 尽管平流层的环状模态和对流层低层 AO 有密切联系, 但是二者还是有很大区别的(Kodera and Kuroda, 2000; Kuroda, 2002; Cholaw, 2011), 考虑到 EOF 模态之间的正交性, 以上分析表明二者影响东亚冬季风的范围和模态有根本差别。2008 年初在我国南方发生严重低温雨雪和冰冻灾害, 与此同时, 我国东北等地却有温度正异常, 这是典型的 EOF2 模态, 与此相对应, 有平流层强极涡异常维持, 并自上而下传播(顾雷等, 2008; 陈月娟等, 2009), 这也印证了极涡和东亚冬季风第二模态之间的密切关系。Wei et al. (2011) 揭示的近来冬季风演变的变化同样与东亚冬季风第二模态有

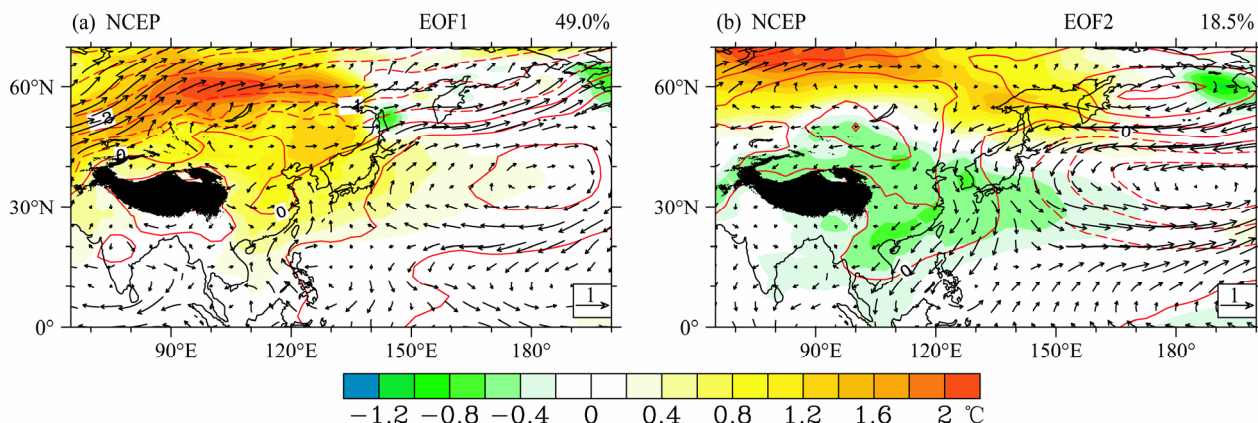


图 4 东亚地区冬季地面气温的前两个主模态: (a) 第一模态; (b) 第二模态。EOF 选取区域为 (0~60°N, 100°E~120°E)。阴影表示冬季地面温度; 矢量箭头表示 925 hPa 风速; 等值线表示海平面气压

Fig. 4 The spatial patterns of the first two EOF modes of surface temperature over the domain of (0–60°N, 100°E–120°E): (a) EOF1; (b) EOF2. Both panels include 925-hPa winds (vectors, units: m s^{-1}), surface temperature (color shading, units: $^{\circ}\text{C}$), and sea-level pressure (contours, units: hPa).

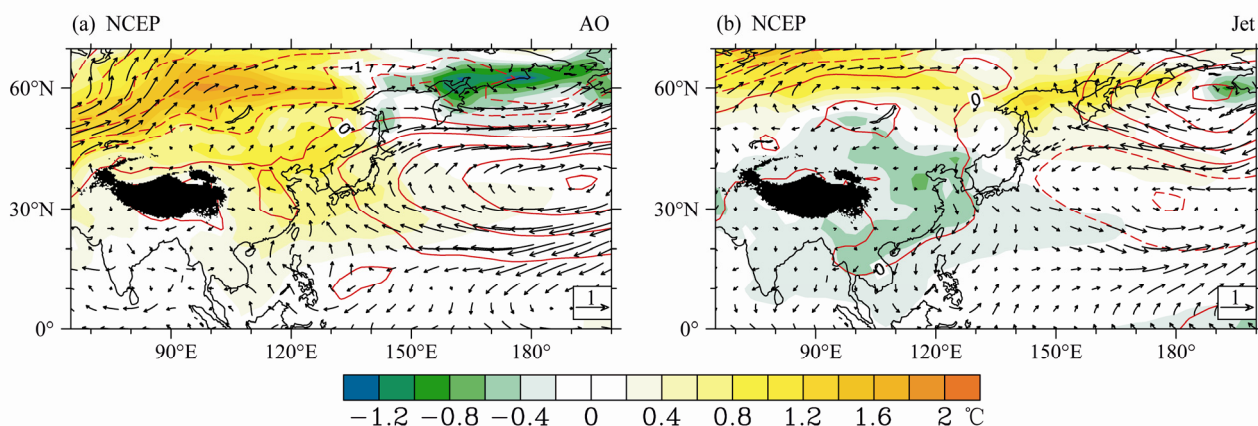


图 5 东亚地区环流场对 AO 指数和平流层急流指数的偏回归型: (a) AO; (b) 平流层急流。阴影表示冬季表面温度; 矢量箭头表示 925 hPa 风速; 等值线表示海平面气压

Fig. 5 The partial regression patterns of the surface temperature (color shading, units: $^{\circ}\text{C}$), sea-level pressure (contour, units: hPa), and 925-hPa winds (vectors, units: m s^{-1}) with (a) AO index and (b) stratospheric jet strength

关,并且与平流层极涡在前冬和后冬的变化联系在一起。

利用大气物理研究所最新发展的气候系统模式 IAP_FGOALS2-s, Wei and Bao (2012) 分析了东亚冬季风前两个模态,模式能够很好地模拟冬季风前两个模态,并且同样揭示出 AO 和平流层极涡强度与两个模态之间的密切联系。他们进一步对未来情形下冬季风模态进行分析,分析表明第二模态所占方差有所增强, AO 与第一模态的相关系数降低,与第二模态的相关系数增强,这表明未来平流层的影响可能会增强,然而其变化情况也更为复杂,这可能给今后的气候预测带来复杂性和困难性。

3.3 太阳活动 11 年周期变化对东亚冬季气候的影响

太阳辐射是地气系统的基本能量来源,太阳活动引起的辐射强度的任何微小变化都会对地表天气、气候产生重要影响 (Rind et al., 2008)。尽管卫星观测的太阳总辐射的变化在太阳活动高、低年的变化范围在 0.1% 以内,但是 UV 辐射的变化范围可以达到大约 10%,并在平流层顶引起温度和臭氧的变化 (Lean and Rind, 2001)。特别是近十年来,一系列研究结果 (Kodera, 2003; Meehl et al., 2003; van Loon and Meehl, 2008) 表明,太阳活动的影响可以通过热带地区海—气耦合作用得到强化 (周群和陈文, 2012) 或通过影响大气的低频变化模态如 AO 进而影响对流层气候 (Chen and Zhou, 2012)。

前面我们已经分析过 AO 对东亚冬季气候的影响, AO 正位相的冬季东北亚地区往往偏暖,反之负位相时东北亚地区则偏冷。Chen and Zhou (2012) 的研究揭示出这种关系显著地依赖于太阳活动的 11 年周期,即在太阳活动高峰年时,上述关系更加显著,而在太阳活动低谷年时,上述关系明显减弱。他们进一步的分析揭示出太阳活动可以影响到 AO 的空间结构,在太阳活动高峰年时, AO 在海平面气压场上表现为更强的信号,并伸展到包括东亚地区的更广的范围,相反在太阳活动低谷年时, AO 的信号主要表现在大西洋地区,因此,前者比后者对东亚气候有更显著的影响。另外,他们还揭示出在太阳活动高峰年时,与 AO 相联系的平流层—对流层耦合更强,这样前面讲到的平流层异常 (与太阳活动有关的) 有可能更容易出现下传而影响东亚冬季气候异常。有意思的是冬季 AO 与随后春季东亚气候异常的关系同样受到太阳活动 11 年周期的

影响。这些结果表明,在用 AO 预测东亚冬、春季气候异常时必须考虑太阳活动的影响。

4 总结和讨论

本文综述了最近几年关于东亚冬季风变异特征和机理方面的研究进展,特别对平流层过程对东亚冬季风和气候异常的可能影响作了回顾和进一步分析。最近几年的一系列研究揭示出东亚冬季风变异的一些新特征。以往研究主要关注东亚冬季风的强度,事实上东亚冬季风的路径变化对东亚和东南亚气候也有重要影响。研究表明,东亚冬季风路径的年际变化可以引起东亚气温的南北反位相振荡,这是中国冬季气温南北反相变化的重要原因。并且东亚冬季风变异存在南北两个子系统,它们的成因和影响值得进一步深入研究。此外,进入本世纪后,东亚冬季风的演变出现明显变化,即东亚冬季风的建立推迟,而冬季风出现峰值的时间提前,这就使得冬季风的建立过程更加快速,并且东亚冬季风在盛期明显减弱,但冬季风活动在早春比以往要更为活跃,这些变化与冬季气温南北反相变化有密切的关系,并可能受平流层极涡在冬季的演变异常的影响。

有关热带和热带外因子影响东亚冬季风变异的研究表明,由于受 PDO 的调制作用,近几十年来 ENSO 和东亚冬季风的关系经历了显著的年代际减弱,并且这种变化可能与中太平洋型增暖型事件的增多有关。与此相反的是,中高纬地区的乌拉尔地区阻塞强度和 NPO 对东亚冬季气候异常的影响显著增强。乌拉尔阻塞对东亚冬季气候异常的影响增强的原因在于平流层极夜急流的加强,导致欧亚大陆上空的准定常波列更倾向于沿急流纬向传播到东亚地区。而 NPO 与东亚冬季风关系的年代际转变与 1976 年后 ENSO 对 NPO 的强迫发生年代际减弱有关。针对东亚冬季风在 1987 年以后的持续减弱的研究揭示出它与准定常行星波活动在 1987 年前后的年代际变化联系在一起。除上述因子外,北大西洋海温异常 (Han et al., 2011)、前期欧亚大陆积雪 (Jhun and Lee, 2004) 以及北极地区的海冰 (Wu et al., 2011) 等也可以影响到东亚冬季风的变异,但这些影响还需要更多的研究以揭示其中的过程和机制。

近几年来有关平流层过程对东亚冬季气候异常的影响取得不少进展。平流层环流异常主要表现

为平流层极涡的增强或者减弱。当异常强的极涡向下传播时, 引起低层 AO 正异常发展, 西伯利亚高压增强, 导致东亚沿岸东西气压梯度增加, 有异常偏强的季风, 我国南部地区温度降低, 而东北和亚洲中高纬度地区温度增加; 反之, 当异常弱的极涡向下传播时, 会引起大致相反的过程。对东亚冬季气温变化模态的分析表明, 存在一种南北反相的变化模态 (EOF2), 它与平流层极涡强度密切相关, 进一步证明了平流层极涡变化对东亚冬季气候的影响。此外, 太阳活动 11 年周期变化也可以影响 AO 与东亚冬季气候异常的联系, 具体表现为在太阳活动高峰年的冬季, AO 与东亚冬季气候异常关系增强, 这可能与平流层和对流层耦合在太阳活动高峰年增强有关。

虽然上述研究表明, 在关于东亚冬季风变异机理以及平流层过程的影响方面取得了一些成果, 但是应该看到关于东亚冬季风变异的成因, 特别是平流层的可能影响, 还有许多科学问题没有得到很好的研究, 因此, 有关东亚冬季风变异的机理仍然是今后亟需研究的一个重要科学问题。事实上, 10d 以上的延伸期预报主要依靠一些缓慢变化的并且可以预报的因子来进行, 目前考虑的主要因子有热带海面温度异常, 以及土壤湿度、植被、冰雪覆盖和陆面温度等等预报因子; 另外预报技能也可以来自于一些大气内部的长记忆现象, 比如热带地区的 Madden-Julian 振荡, 近些年来越来越多的证据表明预报技能还可以来自于平流层环流的缓慢变化 (Baldwin et al., 2003)。Christiansen (2005) 对简单的统计预报进行了检验, 预报量为 60°N 纬向平均的地表西风, 分析表明引入平流层的信息可以提高在 5~60 d 时间尺度上的预报水平, 平流层最好的预报因子在平流层低层, 引进平流层信号做的简单的统计预报可以达到动力集成预报水平。由于平流层极涡异常具有较长的持续性, 并且由于平流层下传在时间上领先于对流层低层, 因此冬季平流层极涡的异常变化对于低层环流变化有很好的指示作用, 这对东亚冬季气候异常有着潜在的应用前景。

参考文献 (References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics [M]. San Diego, Calif: Academic Press, 489 pp.
- Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. 2003. Weather from the Stratosphere? [J]. Science, 301: 317–319.
- Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al. 2012. The 2009/2010 drought in China: Possible causes and impacts on vegetation [J]. Journal of Hydrometeorology, 13 (4): 1251–1267, doi: 10.1175/JHM-D-11-074.1.
- Boyle J S, Chen T J. 1987. Synoptic aspects of the wintertime East Asian monsoon [M] // Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 125–160.
- Chan J C L, Li C. 2004. The East Asia winter monsoon [M] // Chang C P. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific Publishing Company, 54–106.
- 陈文, 康丽华. 2006. 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 [J]. 大气科学, 30 (5): 863–870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870.
- Chen W, Li T. 2007. Modulation of northern hemisphere wintertime stationary planetary wave activity: East Asian climate relationships by the Quasi-Biennial Oscillation [J]. J. Geophys. Res., 112: D20120, doi: 10.1029/2007JD008611.
- Chen W, Wei K. 2009. Interannual variability of the winter stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere and their relations to QBO and ENSO [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (5): 855–863, doi: 10.1007/s00376-009-8168-6.
- Chen W, Zhou Q. 2012. Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian winter climate relationships by the 11-year solar cycle [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (2): 217–226, doi: 10.1007/s00376-011-1095-3.
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (1): 46–60.
- Chen W, Graf H F, Takahashi M. 2002. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (22): 2073, doi: 10.1029/2002GL016062.
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. J. Geophys. Res., 108 (D24): 4797, doi: 10.1029/2003JD003834.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. J. Geophys. Res., 110: D14110, doi: 10.1029/2004JD005669.
- 陈文, 顾雷, 魏科, 等. 2008. 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 [J]. 大气科学, 32 (4): 950–966. Chen Wen, Gu Lei, Wei Ke, et al. 2008. Studies of the dynamical processes of East Asian monsoon system and the quasi-stationary planetary wave activities [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 950–966.
- 陈文, 魏科. 2009. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用 [J]. 地球科学进展, 24: 272–285. Chen Wen, Wei Ke. 2009. Anomalous propagation of the quasi-stationary planetary waves in the atmosphere and its roles in the impact of the stratosphere on the East Asian winter climate [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24: 272–285.
- 陈月娟, 周任君, 邓淑梅, 等. 2009. 2008 年雪灾同平流层环流异常的关系 [J]. 中国科学技术大学学报, 39 (1): 15–22. Chen Yuejuan, Zhou

- Rrenjun, Deng Shumei, et al. 2009. Relationship between stratospheric circulation anomalies and extended snow storm [J]. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 39 (1): 15–22.
- Cholaw B. 2011. Two types of arctic oscillation and their associated dynamic features [J]. *Atmospheric Oceanic Science Letters*, (05), 287–292.
- Christiansen B. 2005. Downward propagation and statistical forecast of the near-surface weather [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D14), doi: 10.1029/2004jd005431.
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究 [J]. *热带气象学报*, 6: 119–128.
- Ding Yihui. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 6: 119–128.
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D24122, doi: 10.1029/2010jd014761.
- Gao H. 2007. Comparison of East Asian winter monsoon indices [J]. *Advances in Geosciences*, 10, 31–37.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2073–2076.
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 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 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 405–418.
- Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. 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 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 405–418.
- 郭冬, 孙照渤. 2004. 冬季北太平洋涛动异常与东亚冬季风和我国天气气候的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (4): 461–470.
- Guo Dong, Sun Zhaobo. 2004. Relationships of winter North Pacific oscillation anomalies with the East Asian winter monsoon and the weather and climate in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 27(4): 461–470.
- Han Z, Li S L, Mu M. 2011. The role of warm North Atlantic SST in the formation of positive height anomalies over the Ural Mountains during January 2008 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 246–256, doi: 10.1007/s00376-010-0069-1.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East-Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 70 (1B): 243–256.
- Huang R H, Wang L. 2006. Interdecadal variation of Asian winter monsoon and its association with the planetary wave activity [J]. *Winter MONEX: A Quarter-Century and Beyond (WMONEX 25+)*. Kuala Lumpur, Malaysia, Malaysian Meteorological Department, 126.
- 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 等. 2007. 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 [J]. *大气科学*, 31: 1033–1048.
- Huang Ronghui, Wei Ke, Chen Jilong, et al. 2007. 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 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31: 1033–1048.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(5): 910–942, doi: 10.1007/s00376-012-2015-x.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. *大气科学*, 36 (3): 443–457.
- Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- Jadin E A, Wei K, Zyulyaeva Y A, et al. 2010. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72: 1163–1170.
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 711–726.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- 康丽华. 2006. 东亚冬季风年际、年代际变化及其机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 152 pp.
- Kang L H. 2006. Interannual and interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and its mechanism [D]. Ph. D. Thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 152 pp.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339.
- Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (3): 330–339.
- 康丽华, 陈文, 王林, 等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 45–53.
- Kang Lihua, Chen Wen, Wang Lin, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (1): 45–53.
- Kuroda Y. 2002. Relationship between the polar-night jet oscillation and the annular mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(8): 1240, doi: 10.1029/2001gl013933.
- Kodera K. 2003. Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900–1999 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (4): 1175, doi: 10.1029/2002GL016584.
- Kodera K, Kuroda Y. 2000. Tropospheric and stratospheric aspects of the Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (20): 3349–3352.
- Lan X Q, Chen W, Wang L. 2012. Quasi-stationary planetary wave-mean flow interactions in the Northern Hemisphere stratosphere and their responses to ENSO events [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 55: 405–417, doi: 10.1007/s11430-011-4345-4.
- Lean J, Rind D. 2001. Earth's response to a variable Sun [J]. *Science*, 292: 234–236.
- Li C Y. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 7: 36–46.
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. *大气科学*, 34 (5): 865–874.
- Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural mountains in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*

- (in Chinese), 34 (5): 865–874.
- Li L, Li C Y, Song J. 2012. Arctic Oscillation anomaly in winter 2009/2010 and its impacts on weather and climate [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 55: 567–579.
- Li Q, Graf H F, Cui X F. 2011. The role of stationary and transient planetary waves in the maintenance of stratospheric polar vortex regimes in Northern Hemisphere winter [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28: 187–194.
- Li S L. 2009. The influence of tropical Indian Ocean warming on the southern hemispheric stratospheric polar vortex [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52: 323–332.
- Li Y Q, Yang S. 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon [J]. *J. Climate*, 23 (15): 4255–4262.
- Linkin M E, Nigam S. 2008. The North Pacific oscillation–west Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts [J]. *J. Climate*, 21 (9): 1979–1997.
- 刘舸, 纪立人, 孙淑清, 等. 2013. 关于东亚冬季风指数的一个讨论——东亚中、低纬冬季风的差异 [J]. *大气科学*, 待刊. Liu Ge, Ji Liren, Sun Shuqing, et al. 2013. A discussion on the East Asian winter monsoon index—Differences between the East Asian winter monsoon at the mid-high latitudes and that at the low latitudes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)* (in press).
- 刘毓赟, 陈文. 2012. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响 [J]. *大气科学*, 36 (2): 423–432. Liu Yuyun, Chen Wen. 2012. Variability of the Eurasian teleconnection pattern in the Northern Hemisphere winter and its influences on the climate in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 423–432.
- Meehl G A, Washington W M, Wigley T M L, et al. 2003. Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the 20th century [J]. *J. Climate*, 16: 426–444.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699–706.
- Rind D, Lean J, Lerner J, et al. 2008. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D24103, doi:10.1029/2008JD010114.
- Takaya K, Nakamura H. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (12): 4423–4440.
- 谭本旭. 2008. 大气 Rossby 波动力学的研究进展 [J]. *气象学报*, 66 (6): 870–879. Tan Benkui. 2008. Advances of atmospheric Rossby waves dynamics [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (6): 870–879.
- 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究 [J]. *气象学报*, 30 (3): 226–230. Tao Shiyun. 1959. Cold wave studies in China during the past ten years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (3): 226–230.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (9): 1297–1300.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13 (5): 1000–1016.
- Uppala S M, K  llberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- van Loon H, Meehl G A. 2008. The response in the Pacific to the sun's decadal peaks and contrasts to cold events in the Southern Oscillation [J]. *Journal of Atmospheric and Solar -Terrestrial Physics*, 70: 1046–1055.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109 (4): 784–812.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes [J]. *J. Climate*, 23 (6): 1495–1512.
- Wang L, Chen W. 2010a. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L09707; doi: 10.1029/2010GL042659.
- Wang L, Chen W. 2010b. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 27(4): 855–870. doi: 10.1007/s00376-009-9094-3.
- 王林, 冯娟. 2011. 我国冬季降水年际变化的主模态分析 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1105–1116. Wang Lin, Feng Juan. 2011. Two major modes of the wintertime precipitation over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1105–1116.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2007. Changes in the variability of North Pacific Oscillation around 1975/1976 and its relationship with East Asian winter climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D11): doi: 10.1029/2006JD008054.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20702, doi: 10.1029/2008GL035287.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2009a. Interannual variations of East Asian trough axis at 500 hPa and its association with the East Asian winter monsoon pathway [J]. *J. Climate*, 22 (3): 600–614.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009b. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. *J. Climate*, 22 (18): 4860–4872.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate [J]. *International Journal of Climatology*, 30 (1): 153–158.
- 王林, 陈文, 冯瑞权, 等. 2011. 北太平洋涛动的季节演变及其与我国冬春气候异常的联系 [J]. *大气科学*, 35 (3): 393–402. Wang Lin, Chen Wen, Feng Ruiquan, et al. 2011. The seasonal march of the North Pacific Oscillation and its association with the interannual variations of China's climate in boreal winter and spring [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (3): 393–402.
- 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能成因 [J]. *大气科学*, 30: 1068–1076. Wang Zuiya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30: 1068–1076.
- 魏科. 2007. 北半球平流层极涡年际和季内变异及其对东亚冬季风的影响 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Wei Ke. 2007. Interannual and intraseasonal variations of the stratospheric polar vortex

- in Northern Hemisphere and their influence on the East Asian winter monsoon [D]. Ph. D. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Wei K, Bao Q. 2012. Projections of the East Asian winter monsoon under the IPCC AR5 scenarios using a coupled model IAP_FGOALS [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, doi: 10.1007/s00376-012-1226-5.
- Wei K, Chen W, Huang R H. 2007. Association of tropical Pacific sea surface temperatures with the stratospheric Holton-Tan Oscillation in the Northern Hemisphere winter [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L16814, doi: 10.1029/2007GL030478.
- 魏科, 陈文, 黄荣辉. 2008. 涡动在南北半球平流层极涡崩溃过程中作用的比较 [J]. *大气科学*, 32: 206–219. Wei Ke, Chen Wen, Huang Ronghui. 2008. Comparison of the roles of wave activities in the breakup of the stratospheric polar vortex between the Southern and Northern Hemispheres [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32: 206–219.
- Wei K, Chen W, Zhou W. 2011. Changes in the East Asian cold season since 2000 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (1): 69–79, doi: 10.1007/s00376-010-9232-y.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 191897, doi: 10.1029/2002GL015373.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R. 2006. Distinct modes of the East Asian winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (8): 2165–2179.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (30): 3220–3228.
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (4): 913–927.
- Yang J, Gong D Y, Wang W S, et al. 2012. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 115 (3): 173–184.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Nino on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 74 (1): 49–62.
- Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S. 1997a. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979–95 NCEP/NCAR reanalysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (10): 2605–2619.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997b. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J. Climate*, 10 (5): 1004–1020.
- Zhou L T. 2011. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process [J]. *International Journal of Climatology*, 31 (5): 677–686.
- 周群, 陈文. 2012. 太阳活动 11 年周期对 ENSO 事件海温异常演变和东亚降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (4): 851–862. Zhou Qun, Chen Wen. 2012. Influence of the 11-year solar cycle on the evolution of ENSO-related SST anomalies and rainfall anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (4): 851–862.
- Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (11): 3978–3991.