

张冬斌, 金飞飞, 李建平, 等. 2011. 瞬变天气涡旋对北大西洋涛动的增强效应 [J]. 大气科学, 35 (5): 927–937. Zhang Dongbin, Jin Feifei, Li Jianping, et al. 2011. Enhancement of North Atlantic Oscillation by transient eddies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 927–937.

瞬变天气涡旋对北大西洋涛动的增强效应

张冬斌^{1,2,3} 金飞飞⁴ 李建平¹ 丁瑞强¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 夏威夷大学气象系, Honolulu, HI 96822, USA

摘 要 使用 NCEP/NCAR 再分析资料计算了冬季北大西洋瞬变涡旋活动强度与北大西洋涛动 (NAO) 逐日指数的时间序列, 结果发现: 当涡旋活动强度出现峰值后会伴随 NAO 模态增强现象; 而随着 NAO 的增强, 涡旋能量回落。为了判断是否涡流相互作用将天气尺度的能量转换为低频尺度的能量, 使用瞬变涡度通量来研究涡度与能量的传输。通过分析瞬变涡旋与低频环流随时间的演变, 发现瞬变涡旋可以激发出低频异常, 其对涡度的输送可以加强低频异常, 使得 NAO 指数增强。由于涡旋与低频流以及涡度通量均随时间变化, 不一定总能达到平衡, 因此从方程稳定性解的角度来分析在足够长的时段各种随机涡旋对于激发类似 NAO 模态的响应所起到的综合作用, 结果显示瞬变涡旋使得稳定性解更接近于 NAO 模态。

关键词 瞬变天气涡旋 北大西洋涛动 瞬变涡度通量

文章编号 1006–9895 (2011) 05–0927–11

中图分类号 P461

文献标识码 A

Enhancement of North Atlantic Oscillation by Transient Eddies

ZHANG Dongbin^{1,2,3}, JIN Feifei⁴, LI Jianping¹, and DING Ruiqiang¹

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Meteorological Information Center, Beijing 100081*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4 *Department of Meteorology, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, USA*

Abstract Time series of the intensity of North Atlantic transient eddy activity and a daily index of the North Atlantic Oscillation (NAO) are calculated by using the NCEP/NCAR reanalysis data. The results suggest that peaks in the intensity of eddy activity are followed by strengthening of the NAO mode, accompanied by a collapse in eddy energy. To determine whether the interaction between eddies and low-frequency flow results in the transformation of synoptic-scale energy to low-frequency-scale energy, the eddy vorticity flux is used to investigate the transfer of vorticity and energy. The results show that transient eddies can induce low-frequency anomalies and that vorticity transfer can enhance the anomaly, resulting in an increase in the NAO index. However, eddies, low-frequency flow, and the vorticity flux show continuous variations, meaning that they cannot attain equilibrium all the time. Accordingly, the authors analyze the total contribution of stochastic eddies to the process that induces an NAO-like response to

收稿日期 2010–10–10, 2011–01–24 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950400, 国家自然科学基金资助项目 41030961、40805022

作者简介 张冬斌, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: zdb@mail.iap.ac.cn

external forcing. The steady solution suggests that eddy forcing can induce a response more similar to the NAO mode.

Key words transient eddy, NAO, eddy vorticity flux

1 引言

北大西洋涛动 (NAO) 是北半球大气环流的一种显著模态 (Walker and Bliss, 1932; Wallace and Gutzler, 1981), 可以视作北半球环状模 (NAM) 的一部分 (Thompson and Wallace, 1998, 2000; Gong and Wang, 1999; Li and Wang, 2003a, 2003b)。它反映出大气环流低频变率的重要特征, 对于北大西洋地区及欧洲的降水、生态、渔业均有较大影响 (Hurrell et al., 2003), 并能影响到东亚地区的季风和降水 (武炳义和黄荣辉, 1999; 符淙斌和曾昭美, 2005; 杨莲梅和张庆云, 2008; Wu et al., 2009)。

在北半球整个冬季都可能出现 NAO 事件, 一次典型事件可以持续 1~2 周 (Benedict et al., 2004; 李晓峰和李建平, 2009, 2010), 是什么原因导致 NAO 的出现? 过去的研究表明低频流型的出现与大气对外源强迫的响应过程有关。地形强迫、持续性的热力强迫以及海陆分布可以造成低频异常的出现 (Hoskins and Karoly, 1981; Jin and Hoskins, 1995)。而诸如北大西洋三极子型 SST 异常、北极地区的海冰、雪盖等外强迫源对于激发 NAO 有重要作用 (Watanabe and Nitta, 1998, 1999; 武炳义等, 2000)。此外, 大气与海洋间的相互作用, 对流层与平流层间的作用也是激发 NAO 的因素 (Hurrell et al., 2003)。而时间平均流和其扰动 (天气涡旋) 之间的相互作用也被认为是导致 NAO 等低频流型增长的原因 (Lau, 1988; Cai and Mak, 1990; Branstator, 1995)。

近年来, 一些研究表明大气内部动力过程对于 NAO 的产生和维持起重要作用, 从天气涡旋与低频流相互作用的角度来探讨 NAO 的形成机制是一个有意义的研究方向 (Benedict et al., 2004; Kug and Jin, 2009; Kug et al., 2009)。一些研究者还使用了波破碎的概念来解释天气波所促使的 NAO 增长 (Franzke et al., 2004; Riviere and Orlanski, 2007; Woollings et al., 2008); 然而, 这些研究大多关注于 10 天以上尺度的 Rossby 波破碎与 NAO

的关系。那么, 对于 10 天以下尺度的高频瞬变涡旋, 这种既具有某种“随机性”, 同时又被低频流所组织的扰动, 它们对于 NAO 的发展变化做了怎样的贡献? 本文主要研究瞬变涡旋所引起的 NAO 增强现象, 分析瞬变涡旋活动强度与 NAO 指数随时间的变化, 看两者是否存在关联; 并分析涡旋与低频流之间的涡度传输及其所导致的环流变化; 最后从稳定性解的角度来研究随机涡旋在激发类似于 NAO 模态的响应过程中所起到的作用。

文中采用的 1979~2009 年 500 hPa 逐日流函数 ψ 得自美国国家环境预报中心和大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析数据集 (Kalnay et al., 1996)。将其剔除月平均分量后做 2.5~8.0 天滤波 (Murakami, 1979), 得到 ψ 的高频分量 ψ' , 用以表征瞬变天气涡旋。文中采用 Li and Wang (2003a, 2003b) 定义的 NAO 指数, 指数时段为 1948 年 1 月 1 日至 2010 年 2 月 28 日。NAO 模态是将冬季月平均异常流函数回归至 NAO 指数而得。

2 北大西洋瞬变天气涡旋活动和 NAO 指数

冬季气候平均 (1979/1980 至 2008/2009 三十年冬季三个月) 的瞬变涡旋方差场 $\overline{\psi'^2}$ 可以反映涡旋活动的强度及空间分布 (图 1)。由图 1 可见北半球冬季涡旋活动主要分布在北大西洋和北太平洋, 即两个所谓的风暴轴区域。从数值上看, 大西洋地区的涡旋活动 ($3.5 \times 10^{13} \text{ m}^4/\text{s}^2$) 比太平洋地区 ($2.5 \times 10^{13} \text{ m}^4/\text{s}^2$) 更为强烈。在空间位置上, 北大西洋的涡旋活动集中在 ($30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $90^\circ\text{W} \sim 0^\circ$) 区域, 正好与 NAO 的高低压中心区相对应, 涡旋活动和 NAO 可能存在关联。为了判断它们间是否存在关系, 我们从时间序列上分析北大西洋瞬变涡旋活动的发生情况与 NAO 事件的位相变化。参考图 1 中 $\overline{\psi'^2}$ 的空间分布, 可选用 ($20^\circ\text{N} \sim 70^\circ\text{N}$, $90^\circ\text{W} \sim 0^\circ$) 区域 ψ'^2 的平均值作为衡量指标来表征北大西洋地区瞬变涡旋活动的强度。1979/1980 至 2008/2009 三十年冬季三个月的 NAO 指数 (图 2)

显示了各年份冬季 NAO 事件的强弱及其月尺度变化，因此，可从中挑出 NAO 事件较典型的年份。具体做法如下：如果某冬季至少有 1 个月 NAO 指

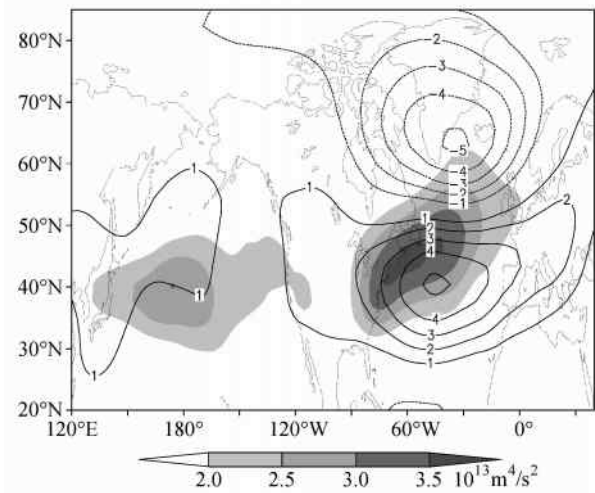


图 1 回归得到的 NAO 模态（等值线间隔为 1，单位： $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ ）与 1979/1980 至 2008/2009 三十年冬季 3 个月气候平均的瞬变涡旋方差场（阴影，单位： $10^{13} \text{ m}^4/\text{s}^2$ ）

Fig.1 Regressed North Atlantic Oscillation mode (contours with interval 1 and units $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) and climatologic variance field (shading) for transient eddies averaged from Dec to Feb (1979/1980 - 2008/2009)

数的绝对值较大，说明该冬季出现了强 NAO 事件，可将该冬季挑出。参照图 2，以指数的绝对值为标准，可挑出具有较强的指数的冬季。本文以这些冬季的北大西洋涡旋活动强度与 NAO 逐日指数的时间序列为例来分析涡旋活动与 NAO 之间的潜在联系（图 3）。为简单计，图 3 仅显示了其中的 8 个代表性年份，未显示年份的时间序列具有相似的特点，不影响结论。

在 1988/1989 年冬季，逐日 NAO 指数表现为显著的正位相。该时段的涡旋活动强度和 NAO 逐日指数呈现出如下现象：每当出现一次强涡旋活动（强度达到峰值），其后几天 NAO 指数会随之增强。例如：第 18~20 天的涡旋活动较强，其后第 19~23 天的 NAO 指数增加；第 25~27 天的涡旋活动较强，相应的第 26~28 天的 NAO 指数增加。第 36~39 天出现强烈的涡旋活动，则第 38~42 天 NAO 指数出现了很强的增长，随后 NAO 指数一直保持较高，持续到第 60 天，而在此期间，出现一系列的涡旋活动，NAO 指数随之有小幅增加。第 76~84 天是强正位相期，此间出现 2 次较强的涡旋活动过程，其后相应的 1~2 天内 NAO 指数出现小幅增长。

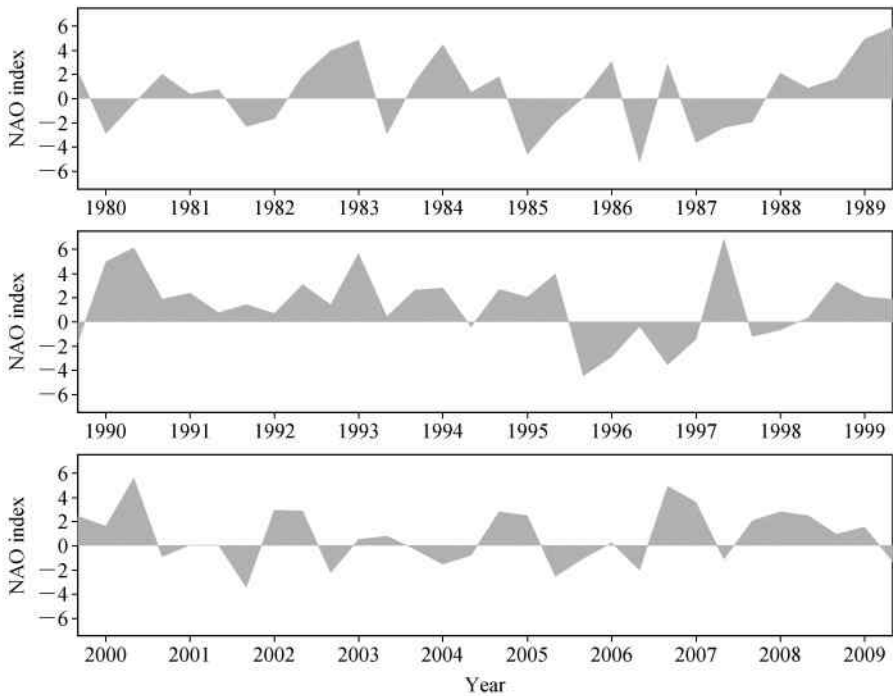


图 2 1979/1980 至 2008/2009 三十年冬季（12 月~2 月）NAO 指数

Fig. 2 Time series of the North Atlantic Oscillation (NAO) index averaged from Dec to Feb (1979/1980 - 2008/2009)

在 1996/1997 年冬季 NAO 指数从负位相转变为正位相, 大体上第 10~50 天呈现为负位相, 第 65~90 天呈现为正位相。在负位相阶段, 亦有伴随着涡旋活动强度的峰值出现负位相加强(负指数减少)的现象。在第 9~11 天有一次涡旋活动过

程, NAO 负位相加强。第 39~41 天出现涡旋活动, NAO 呈现出强负位相。在持续的正位相期, 出现一系列涡旋活动, 每一次涡旋活动后都伴随着其后 1~2 天内 NAO 指数的小幅增长。

其它年份也呈现出涡旋活动强度与 NAO 指数

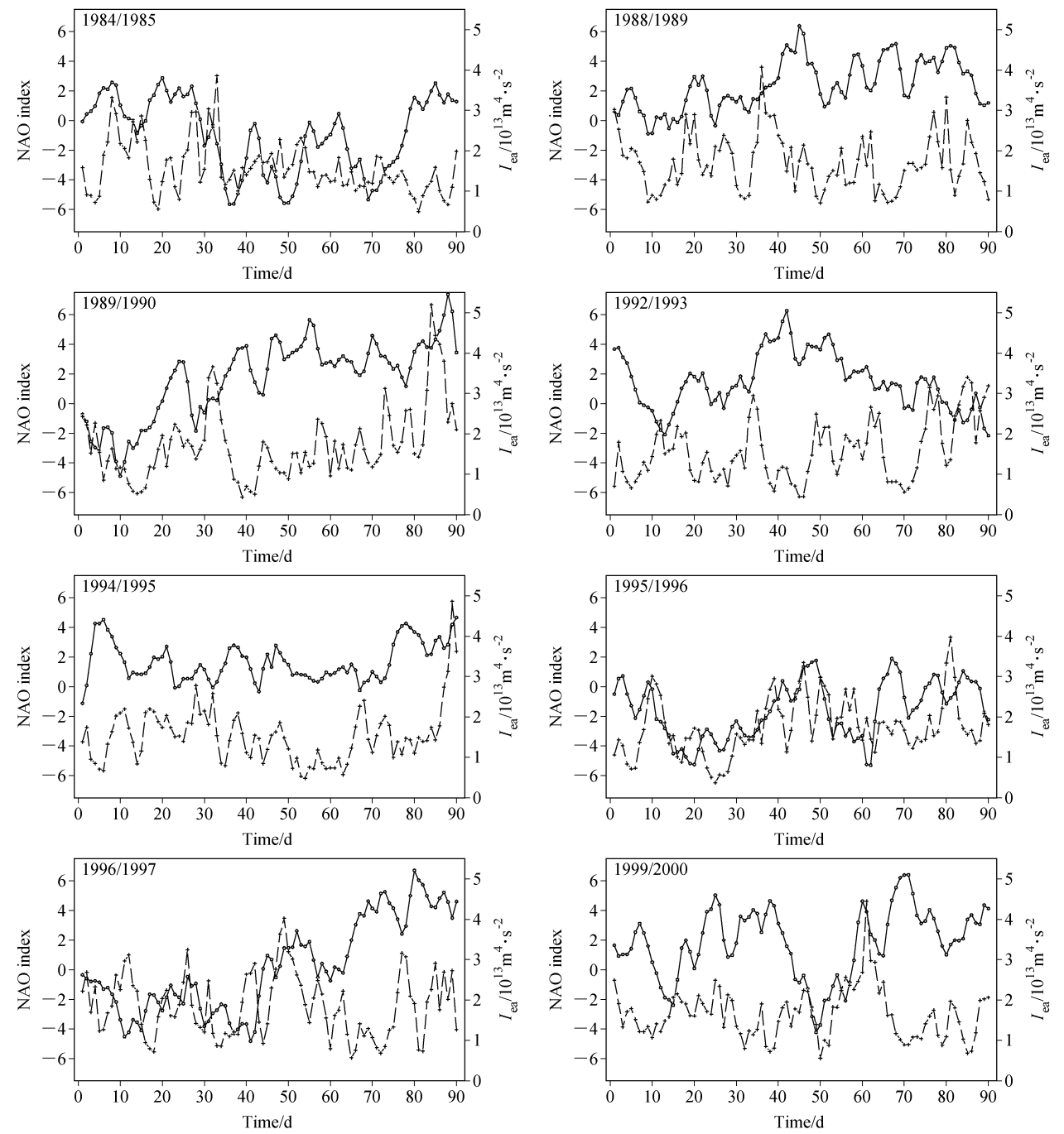


图 3 八个代表性年份冬季 NAO 逐日指数(实线)与北大西洋涡旋活动强度 (I_{ea} , 虚线)。横坐标表示冬季 90 天(12 月 1 日~2 月 28 日)
Fig. 3 Time series of the daily NAO index (solid line) and intensity of North Atlantic eddy activity (I_{ea} , dashed line) for eight typical winters. The x axis shows the 90 days of winter (1 Dec to 28 Feb)

变化相关联的现象。涡旋活动能够引起其后 NAO 位相的加强, 在图 3 中表现为: 当涡旋活动强度出现峰值后, 若为 NAO 正位相阶段, 则正指数增加, 即正位相增强; 若为 NAO 负位相阶段, 则负指数减少, 即负位相增强。这似乎暗示 NAO 的发展增强和涡旋活动的发生存在某种因果关系。

3 瞬变涡旋与低频流之间的涡度传输

上节的分析指出 NAO 的发展增强与瞬变涡旋活动可能有关。而北大西洋地区的瞬变涡旋活动强度能反映该区域平均的天气尺度能量, 涡旋强度的变化即反映了天气尺度能量的变化。那么, 是否在涡旋与低频流之间存在能量转移, 从而当涡旋能量达到峰值后, 随着 NAO 的增强出现涡旋能量回落这种现象? 因为涡度的辐合(辐散)可以使得气旋(反气旋)环流异常得到加强, 因而可以从涡度输送所导致的 NAO 气旋(反气旋)异常的变化来分析外界对于 NAO 的能量传递。现在通过瞬变涡旋引起的涡度通量来考察涡旋活动对低频环流的影响, 分析涡旋将能量传递给低频环流的过程。

瞬变涡度通量表示为

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y) = (u'\zeta', v'\zeta'),$$

此处 u' 、 v' 、 ζ' 是与 ψ' 相对应的纬向风、经向风、涡度。该通量可以清晰地表现出瞬变涡旋输送高频涡度的方向与量值。

参考图 3, 选取 1996/1997 年冬季一次过程(第 75~81 天), 该时段出现了较强的涡旋活动, 随之 NAO 指数显著加强。图 4 描述了此期间低频环流 $\bar{\psi}^a$ (彩色等值线)、瞬变涡旋 ψ' (黑色等值线)以及瞬变涡度通量 $\mathbf{F}$ (绿色矢量)随时间的变化, 并展示了各系统在基本流的引导下向东传播及演变的过程, 反映了瞬变涡旋对涡度的输送及其对低频环流的影响。

第 75 天, 有一些瞬变扰动, 但不是很强; 低频流型虽然存在正负值异常区域, 但瞬变涡旋导致的涡度输送与低频异常的主要正负值区域并不一致, 因而该区域的异常(A 和 B)不会被加强(从以后几天的演变可以看到, 该区域异常会逐渐消散, 低频流型主要由新激发出的异常来体现)。第 76 天, 在(30°N~60°N, 85°W~60°E)发展出较强的反气旋天气系统, 并在该区域激发出较强的正异常流场(C), 在其西北部, 则出现涡度辐合。第 77 天, 天

气涡旋进一步发展, 对涡度的输送导致在(60°N~75°N, 95°W~80°E)出现明显的涡度辐合区, 而(30°N~50°N, 70°W~50°E)则是辐散区; 由于正负涡度的输送, 反气旋异常 C 得到加强, 其西北亦出现气旋性异常(D), 以后几天的低频流型主要由这两个异常的发展来决定。第 78 天, 在 50°N 以北, 有明显的涡度辐合带; 气旋性异常 D 因为正涡度输送而加强; 而反气旋异常 C, 却由于其西部有涡度辐合, 而有所减弱, 但其东部仍为涡度辐散。第 79 天, 涡旋能量有所减弱, 但此时该次天气过程还未结束; 50°N 以北仍有明显的涡度辐合带, 南部(30°N~50°N, 55°W~20°E)为辐散区; 气旋性异常 D 得到显著加强, 低频流呈现出明显的正 NAO 型态。第 80 天, 由于之前持续的涡度输送, D 达到最强的形态, NAO 指数达到峰值。第 81 天, 此次天气过程趋于结束, 之前起到主要作用的涡旋由于能量释放而趋于消亡; 由于不再有较强的涡度输送, NAO 模态减弱, 指数减少。第 82 天, 本次涡旋活动及其导致的 NAO 加强过程结束; 之后又开始了新一轮涡流作用过程, 起主要作用的是新发展起来的涡旋与低频异常(图略)。

本次过程中瞬变涡旋 ψ' 与低频流场 $\bar{\psi}^a$ 随时间的演变与涡旋活动强度及 NAO 逐日指数的时间序列是一致的。而对图 4 的分析显示: 瞬变涡旋的发展可以激发出低频异常; 涡旋对涡度的输送, 可以影响低频流型的变化; 当输送的正(负)涡度与气旋(反气旋)异常配置合适时, 低频异常加强, 从而天气尺度的能量转化为低频尺度的能量。

对其它时段涡流相互作用过程的分析也能得到类似的结果。这说明, 北大西洋瞬变涡旋通过对涡度(能量)的传输而导致低频环流变化, 确实可以起到加强 NAO 模态的作用。

上述针对具体个例分析得到的结果是否具有普遍性? 图 5 展示了北大西洋瞬变涡旋的气候模态和与 NAO 相关联的瞬变涡度通量, 图中彩色等值线为 NAO 模态。黑色等值线是将 ψ' 作 CEOF 分析得到的空间模态, 反映了北大西洋地区涡旋传播的气候特征。与 NAO 相关联的涡度通量是将逐日通量 $\mathbf{F} = (F_x, F_y) = (u'\zeta', v'\zeta')$ 的月平均异常回归至 NAO 指数而得。由图 5 可见, 涡旋的流场和涡度通量很好地对应起来。在低频流的作用下, 瞬变涡

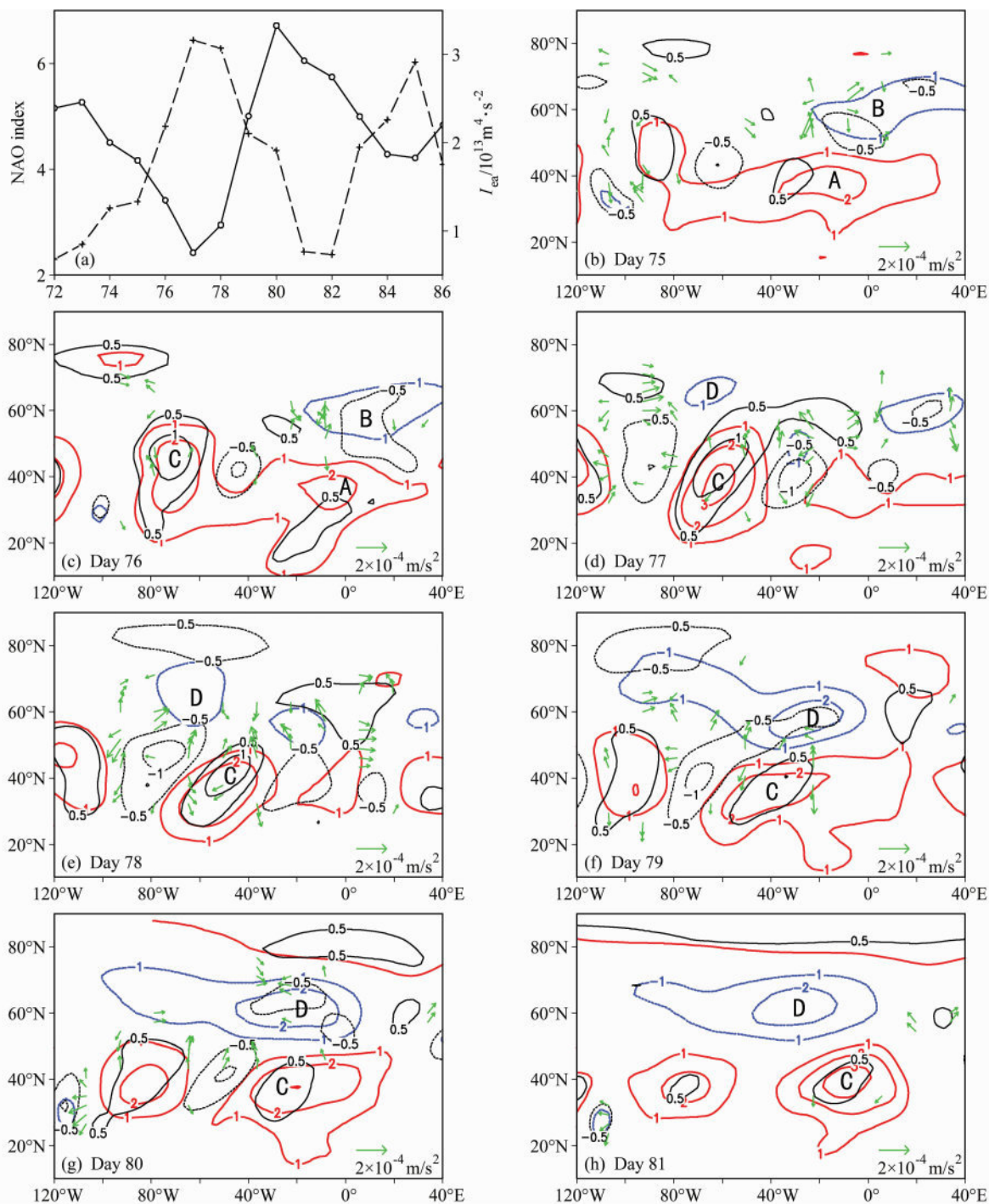


图4 (a) 同图3, 但为1996/1997年冬季第72~86天; (b-h) 第75~81天的低频环流 $\bar{\psi}^a$ (彩色等值线, 单位: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$)、瞬变涡旋 ψ' (黑色等值线, 单位: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$)以及瞬变涡度通量 $\mathbf{F}$ (绿色矢量)。A-D: 低频异常

Fig. 4 (a) Same as Fig. 3, but for days 72 - 86 in 1996/1997 winter; (b) - (h) the low-frequency flow $\bar{\psi}^a$ (color contours, units: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$), transient eddies (black contours, units: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$), and the transient eddy vorticity flux $\mathbf{F}$ (green vectors) for days 75 - 81 in 1996/1997. The letters A - D means the low-frequency anomalies

旋向 NAO 的气旋性环流异常区输送正涡度, 气旋性异常区存在涡度辐合。而在 NAO 的反气旋环流异常区则向外输出涡度, 存在涡度辐散。这种由瞬

变涡旋导致的涡度输送使得 NAO 被加强。可见, 在时间平均场上, 北大西洋涡旋活动对 NAO 也存在加强作用。

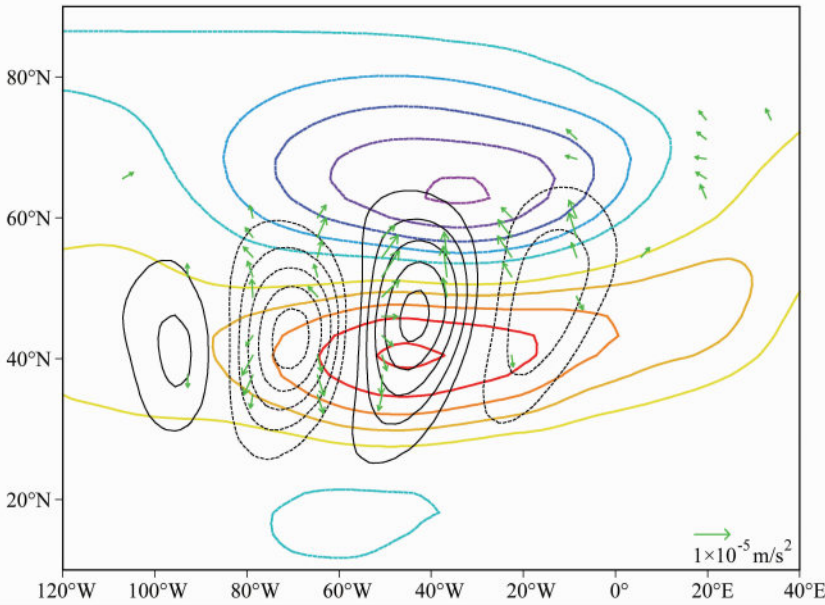


图5 北大西洋瞬变涡旋的气候模态(黑色等值线, 单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) 和与NAO相关联的瞬变涡度通量(绿色矢量)。彩色等值线为回归得到的NAO模态(单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)

Fig. 5 The climatological North Atlantic eddy pattern (black contours, units: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$), transient eddy vorticity flux according to NAO (green vectors), and the regressed NAO mode (color contours, units: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)

4 随机涡旋对激发类似NAO模态的响应所起的作用

既然瞬变涡旋可以通过对涡度(能量)的输送来影响低频环流的发展, 那么在激发出类似于NAO的低频模态时, 瞬变涡旋究竟起了多大的作用? 涡度输送产生的效果具有时间上的累加性, 而在此期间涡旋与低频流均在不断变化, 导致涡度输送也变化, 三者不一定总能达到平衡, 因而从观测资料上难于定量分析它们间的关系, 增加了问题的复杂性。因此下面从数值稳定性解的角度来分析在足够长的时段各种随机涡旋活动对于激发出类似NAO模态的响应所起到的综合作用。

将流函数在时间尺度上分离成 $\psi = \bar{\psi}^c + \bar{\psi}^a + \psi'$, 这里 $\bar{\psi}^c$ 为气候态, $\bar{\psi}^a$ 为低频异常, ψ' 是高频分量, 表示瞬变的涡旋活动。考虑简单的线性正压模型, 关于低频异常 $\bar{\psi}^a$ 的线性正压涡度方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{\psi}^a + J(\bar{\psi}^c, \Delta \bar{\psi}^a) + J(\bar{\psi}^a, \Delta \bar{\psi}^c + f) + r \Delta \bar{\psi}^a + \overline{J(\psi', \Delta \psi')}^a = \bar{Q}^a. \quad (1)$$

方程忽略了非线性项 $J(\bar{\psi}^a, \Delta \bar{\psi}^a)$ 。Jin et al.

(2006a, 2006b) 给出一种有效的闭合方案用于显式地计算涡旋强迫项 $\overline{J(\psi', \Delta \psi')}^a$, 该方案将对 $\bar{\psi}^a$ 的方程改写为

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{\psi}^a + L \bar{\psi}^a + r \Delta \bar{\psi}^a + L_f \bar{\psi}^a = \bar{Q}^a, \quad (2)$$

其中, $L \bar{\psi}^a = J(\bar{\psi}^c, \Delta \bar{\psi}^a) + J(\bar{\psi}^a, \Delta \bar{\psi}^c + f)$ 。 $L_f \bar{\psi}^a$ 是将 ψ' 视作随机过程后得到的关于 $\overline{J(\psi', \Delta \psi')}^a$ 的重构表达式 [细节见 Jin et al. (2006a)]。该模型可以描述出各种随机涡旋所导致的对低频异常流的“涡旋强迫”, 可运用于对低频模态的产生机制的研究。下面使用该简化模型研究随机涡旋在产生类似NAO模态的响应时起到的作用。

为了得到与NAO相对应的强迫源 $\bar{Q}^a$, 考察方程(1), 当趋势项 $\frac{\partial}{\partial t} \Delta \bar{\psi}^a$ 为0时, $\bar{\psi}^a$ 即为稳定解, 由之可得各诊断强迫项: 取 $\bar{\psi}^c$ 为冬季平均气候态, $\bar{\psi}^a$ 为NAO模态, 将多年冬季涡旋强迫 $J(\psi', \Delta \psi')$ 回归至NAO指数, 得到对应于NAO的涡旋强迫项 $\overline{J(\psi', \Delta \psi')}^a$, 从而对应于NAO的诊断强迫源 $\bar{Q}^a = L \bar{\psi}^a + r \Delta \bar{\psi}^a + \overline{J(\psi', \Delta \psi')}^a$ 。 $L \bar{\psi}^a$ 反映的是平均流和低频异常流之间的相互作用; $r \Delta \bar{\psi}^a$

是在方程中引入的耗散项,反映了耗散作用造成的涡度变化趋势; $\overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}$ 则是瞬变涡旋强迫,反映了涡旋与低频流间的相互作用。

由 NCEP/NCAR 再分析资料 (1979/1980 至 2008/2009 年, 12 月~2 月) 计算的三个强迫项及其总和的流场形式 $-\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a$ 、 $-r \bar{\psi}^a$ 、 $-\Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}$ 、 $-\{\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a + r \bar{\psi}^a + \Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}\}$ 如图 6 所示, 从中可比较各项的相对大小。瞬变涡旋强迫 (最大值为 $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$) 相对于总强迫 (最大值为 $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$) 虽然为小量, 但仍不可忽略。

为了研究涡流相互作用这一大气内部动力过程在激发类似于 NAO 模态时起到的作用, 分别以不包含 (包含) $L_f \bar{\psi}^a$ 项的方程 (2), 求解大气对强迫源 $\bar{Q}^a$ 的稳定性响应。

数值稳定性解显示: 不管方程有没有涡流作用项, 均激发了类似于 NAO 模态的稳定性响应; 但考虑了涡流作用后, 大气响应明显地更接近于 NAO (图 7)。

定义两个场的相对差异

$$R = \frac{\sqrt{\int |A - A_0|^2 dx dy}}{\sqrt{\int |A_0|^2 dx dy}},$$

其中, A_0 为参考场, $A - A_0$ 为差值场, 计算它们在某区域 (本文为北半球) 均方根的相对大小, 即可体现在该区域 A 与 A_0 的相对差异。

两个稳定性解相对于 NAO 模态的差异分别为 0.47 和 0.23。可见在激发类似于 NAO 模态的响应时, 考虑瞬变涡旋作用能使得响应更接近于 NAO。这与前两节的分析结果“瞬变涡旋活动可

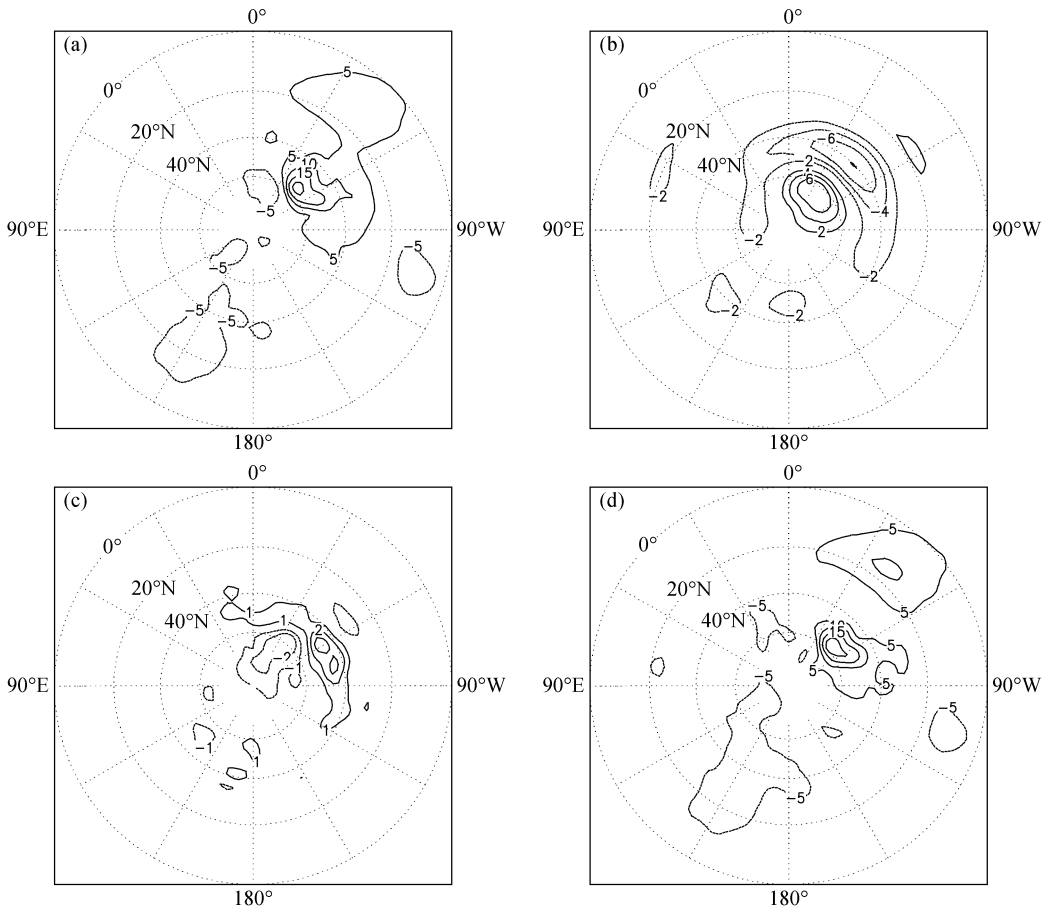


图 6 基于 NCEP/NCAR 再分析资料 (1979/1980 至 2008/2009 三十年冬季) 计算的各项诊断强迫项 (单位: m^2/s^2): (a) $-\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a$; (b) $-r \bar{\psi}^a$; (c) $-\Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}$; (d) $-\{\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a + r \bar{\psi}^a + \Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}\}$

Fig. 6 Diagnostic forcing terms (a) $-\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a$, (b) $-r \bar{\psi}^a$, (c) $-\Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}$, and (d) $-\{\Delta^{-1} L \bar{\psi}^a + r \bar{\psi}^a + \Delta^{-1} \overline{J(\psi', \Delta \psi')^a}\}$ based on NCEP/NCAR reanalysis data for Dec to Feb, 1979/1980–2008/2009 (units: m^2/s^2)

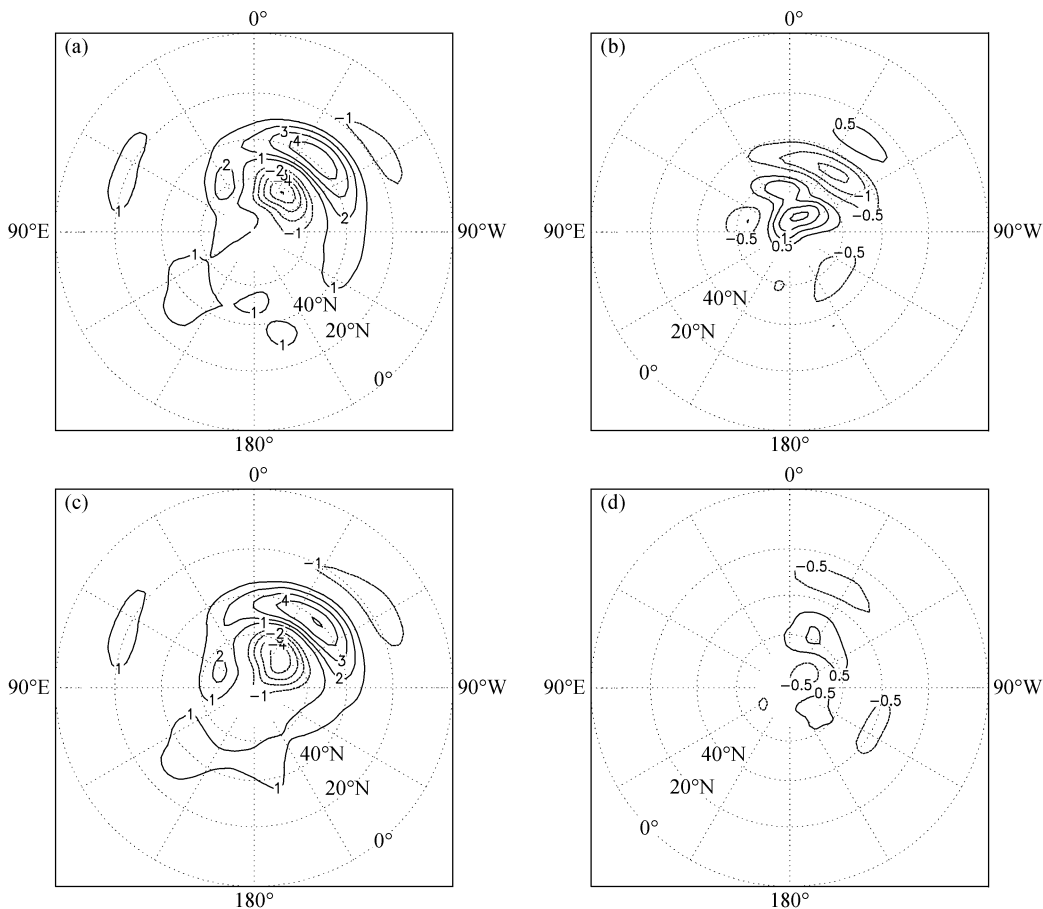


图 7 (a、b) 略去涡旋强迫项和 (c、d) 考虑涡旋强迫项的大气对外源的稳定性响应 (单位: $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$): (a、c) 稳定解; (b、d) 稳定解与 NAO 模态的差值场

Fig. 7 Steady response to external forcing without (a, b) and with (c, d) considering eddy forcing; (a, c) Steady solutions; (b, d) the difference fields between the solutions and NAO mode. The units are $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$

以使低频环流向更接近于 NAO 的形态发展, 使得 NAO 指数增强”是一致的。

5 结论与讨论

本文分析了北大西洋瞬变涡旋和 NAO 指数随时间的变化、瞬变涡旋对涡度的输送及其所导致的低频环流变化、随机涡旋对于产生类似 NAO 模态的稳定性响应的影响, 主要结论如下:

(1) 由观测资料计算所得的北大西洋瞬变涡旋活动强度和 NAO 指数的时间序列呈现出下列现象: 当涡旋活动强度出现峰值, 其后几天通常出现 NAO 正 (负) 位相增强阶段; 而当 NAO 稳定在较强的正 (负) 位相阶段时, 则有利于促发一系列的涡旋活动。

(2) 瞬变涡旋的发展可以激发出低频异常。涡旋对涡度的输送, 可以导致低频流型的变化。涡旋

可以向气旋性 (反气旋性) 环流异常区域输送正 (负) 涡度, 使得低频异常加强, 天气尺度的能量转化为低频尺度的能量。

(3) 大气对外源的稳定性响应显示: 当外源激发类似于 NAO 模态的响应时, 如果考虑随机涡旋的作用, 方程的稳定性解更接近于 NAO。这与本文第 2、3 节得出的结果“瞬变涡旋活动可以使低频环流向更接近于 NAO 的形态发展”一致。

综合本文的分析, 对北大西洋瞬变涡旋活动强度和 NAO 指数的时间序列呈现的现象可以作如下可能的解释: 当涡旋能量出现峰值, 其后几天通常会出现 NAO 正 (负) 位相增强阶段, 与之相应, 涡旋能量回落, 这是天气尺度的能量转化成为低频尺度的能量使得 NAO 加强; 而当 NAO 稳定在较强的正 (负) 位相阶段时, 则往往出现一系列的涡旋活动, 说明在较强 NAO 背景下, 扰动很容易发展

起来,形成能量较强的涡旋,而这些发展起来的涡旋又影响了其后 NAO 模态的变化。这正是瞬变天气涡旋与 NAO 之间相互促进的反馈现象。

本文仅分析了瞬变涡旋活动和 NAO 之间存在相互促进的现象,而涡旋活动的强度及空间分布也会对低频响应造成影响。这方面的数值实验将在后续文章中讨论。Luo et al. (2008) 曾讨论过行星波破碎、天气波破碎、西风急流的经向位移与 NAO 的正负位相之间的关系,指出:正 NAO 时,急流偏北,负 NAO 时,急流偏南;行星波破碎在 NAO 正位相时比在负位相时要强。本文用瞬变涡旋方差场来表征风暴轴的强度与位置(图 1),通过合成分析,可以将弱 NAO 年和强的正(负) NAO 年的风暴轴与气候平均态作比较。发现在弱 NAO 年北大西洋风暴轴位置比平均态略微偏南;而在强的正 NAO 年风暴轴位置比平均态略微偏北,强度略微偏大;而强的负 NAO 年则强度与范围偏小(图略)。

致谢 感谢审稿专家对本文提出的诸多有益建议!

参考文献 (References)

- Benedict J J, Lee S, Feldstein S B. 2004. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61: 121–144.
- Branstator G. 1995. Organization of storm track anomalies by recurring low-frequency circulation anomalies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 207–226.
- Cai M, Mak M. 1990. Symbolic relation between planetary and synoptic scale waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2953–2968.
- Franzke C, Lee S, Feldstein S B. 2004. Is the North Atlantic Oscillation a breaking wave? [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61: 145–160.
- 符淙斌, 曾昭美. 2005. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系 [J]. *科学通报*, 50: 1512–1522.
- Fu Congbin, Zeng Zhaomei. 2005. Correlations between North Atlantic Oscillation index in winter and eastern China flood/drought index in summer in the last 530 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2505–2516.
- Gong D, Wang S. 1999. Definition of Antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (4): 459–462.
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1179–1196.
- Hurrell J W, Kushnir Y, Ottensen G, et al. 2003. An overview of the North Atlantic oscillation [C]//Hurrell J W. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Washington DC: American Geophysical Union.
- Jin F F, Hoskins B J. 1995. The direct response to tropical heating in a baroclinic atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 307–319.
- Jin F F, Pan L L, Watanabe M. 2006a. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part I: A linear closure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1677–1694.
- Jin F F, Pan L L, Watanabe M. 2006b. Dynamics of synoptic eddy and low-frequency flow interaction. Part II: A theory for low-frequency modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1695–1708.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- Kug J S, Jin F F. 2009. Left-hand rule for synoptic eddy feedback on low-frequency flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi: 10.1029/2008GL036435.
- Kug J S, Jin F F, Park J, et al. 2009. A general rule for synoptic-eddy feedback onto low-frequency flow [J]. *Climate Dyn.*, 31, doi: 10.1007/s00382-009-0606-8.
- Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45: 2718–2743.
- Li J P, Wang J X L. 2003a. A new North Atlantic Oscillation index and its variability [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 661–676.
- Li J P, Wang J X L. 2003b. A modified zonal index and its physical sense [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi: 10.1029/2003GL017441.
- 李晓峰, 李建平. 2009. 南、北半球环状模月内活动的主要时间尺度 [J]. *大气科学*, 33 (2): 215–231.
- Li Xiaofeng, Li Jianping. 2009. Main submonthly timescales of Northern and Southern Hemispheres annual modes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 215–231.
- 李晓峰, 李建平. 2010. 月内尺度南半球环状模对应的大气环流异常传播特征 [J]. *大气科学*, 34 (6): 1099–1113.
- Li Xiaofeng, Li Jianping. 2010. Propagation characteristics of atmospheric circulation anomalies of sub-monthly Southern Hemisphere annular mode [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 1099–1113.
- Luo D H, Gong T T, Diao Y N. 2008. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part IV: Planetary and synoptic wave-breaking processes during the NAO life cycle [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 737–765.
- Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 107: 994–1013.
- Rivière G, Orlanski I. 2007. Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64: 241–266.
- 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: 1297–1300.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extrat-

- ropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13: 1000–1016.
- Walker G T, Bliss E W. 1932. World weather V [J]. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, 44: 53–84.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnection in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 784–812.
- Watanabe M, Nitta T. 1998. Relative impact of snow and sea surface temperature anomalies on an extreme phase in the winter atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 11: 2837–2857.
- Watanabe M, Nitta T. 1999. Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter [J]. *J. Climate*, 12: 494–510.
- Woollings T, Hoskins B, Blackburn M, et al. 2008. A new Rossby wave – breaking interpretation of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 609–626.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. *大气科学*, 23 (6): 641–651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (6): 641–651.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 2000. 与北大西洋接壤的北极海冰和年际气候变化 [J]. *科学通报*, 45: 1993–1998. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 2000. Arctic sea ice bordering on the North Atlantic and inter-annual climate variations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46: 162–165.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, doi: 10.1029/2009JD011733.
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 北大西洋涛动对新疆夏季降水异常的影响 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1187–1196. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Effects of the North Atlantic Oscillation on the summer rainfall anomalies in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1187–1196.