

柴晶品, 刁一娜. 2011. 北大西洋涛动指数变化与北半球冬季阻塞活动 [J]. 大气科学, 35 (2): 326 - 338. Chai Jingpin, Diao Yina. 2011. The effect of the variation of the North Atlantic Oscillation on winter blocking activities in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 326 - 338.

北大西洋涛动指数变化与北半球冬季阻塞活动

柴晶品¹ 刁一娜²

1 天津市滨海新区气象局, 天津 300457

2 中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100

摘要 线性回归分析表明北大西洋涛动 (NAO) 主要与大西洋、欧洲及乌拉尔山地区阻塞的频率和强度的变化存在显著相关关系。在 NAO 负位相时期阻塞活动在大西洋地区较为频繁且强度较强, 正位相时期大西洋地区阻塞活动减少, 强度减弱, 而欧洲阻塞加强, 频率增加, 同时乌拉尔山地区的阻塞活动也显著减少。NAO 正指数的增强和减弱对应于大西洋和欧洲阻塞活动的不同变化。局地阻塞活动频率分布显示: 在 NAO 正指数增强的阶段, 大西洋的阻塞活动受到明显抑制而欧洲大陆阻塞活动明显增加, 活动中心向欧洲大陆偏移; 但在 NAO 正指数减弱的阶段, 阻塞活动中心向大西洋一侧移动。区域性阻塞的逐年变化表现为: 大西洋和乌拉尔地区阻塞在 NAO 指数增强的阶段呈下降趋势, 欧洲阻塞呈增加的趋势; 在 NAO 指数减弱的阶段大西洋阻塞为弱的上升趋势, 欧洲和乌拉尔地区阻塞呈下降趋势。中纬度涡旋活动的强弱和位置对 NAO 位相的变化起到重要作用。大西洋风暴活动向东加强有利于 NAO 趋于正位相, 对应于欧洲大陆阻塞发生频率增加; 但其进一步加强可使大西洋阻塞活动增加。

关键词 北大西洋涛动指数 阻塞活动特征 变化趋势

文章编号 1006 - 9895 (2011) 02 - 0326 - 13

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Effect of the Variation of the North Atlantic Oscillation on Winter Blocking Activities in the Northern Hemisphere

CHAI Jingpin¹ and DIAO Yina²

1 Meteorological Administration of Tianjin Binhai New Area, Tianjin 300457

2 College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100

Abstract The linear regression analysis shows that there is a significant correlation between the North Atlantic Oscillation (NAO) and the variation of blocking frequency and intensity in the Atlantic Ocean, Europe, and the Ural Mountains. During the negative NAO phase, the blocking activities are more frequent and stronger in the Atlantic region. In the positive NAO phase, the blocking activities in the Atlantic region and their frequency diminish, which enhance in Continental Europe, and at the same time the blocking activities reduce markedly in the Ural Mountains.

The increase and decrease of positive NAO index correspond to different variations of the blocking activities in the Atlantic Ocean and Europe. The local distribution of blocking activities' frequency demonstrates that during the increasing phase of the positive NAO index the blocking activities in the Atlantic Ocean are significantly restrained, which enhance evidently in Continental Europe, and their center shifts to the Continent. But in the weakening stage

收稿日期 2010 - 03 - 12, 2010 - 09 - 30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40905030、10735030

作者简介 柴晶品, 女, 硕士研究生, 研究方向: 气候动力学阻塞活动。E-mail: achu-85@163.com; chajingpin@ouc.edu.cn

of the positive NAO index, the center of blocking activities shifts westward to the Atlantic Ocean. The annual changes in the regional blocking events show that the blocking situations in the Atlantic and the Urals region have a downward trend during the enhancing phase of the NAO index, which increase in Europe; in the weakening phase of the NAO index, the Atlantic blocking cases present a weak uptrend, which trend downwards in Europe and the Ural region.

The strength and position of mid-latitude eddy play an important role in the NAO phase variations. The eastward strengthening of the Atlantic storm track is beneficial to NAO tending to positive phase, corresponding to increasing in blocking frequency in Continental Europe, but further strengthening can increase blocking activities in the Atlantic Ocean.

Key words North Atlantic Oscillation index, blocking activities, variation and trend

1 引言

大气阻塞是西风带中一个重要的低频变化过程 (Namias, 1947; Rex, 1950a, 1950b)。统计研究工作揭示了阻塞活动的地理分布、季节变化、长期变化等气候学特征 (仪清菊, 1982; Lejenäs and Økland, 1983; Dole and Gordon, 1983; Tibaldi and Molteni, 1990; Pelly and Hoskins, 2003)。北大西洋涛动 (NAO) 是北大西洋乃至整个北半球地区大气环流的重要模态 (Hurrell, 1995; Zhou et al., 2000; 宋洁和李崇银, 2009), 其变化包含多重时间尺度, 其中年际和年代际尺度的变化较为显著 (Hurrell et al., 2003)。作为我国天气系统的上游环流——北大西洋涛动 (简称 NAO) 活动, 及其下游地区的阻塞事件对我国天气和气候有重要的影响。冬季 NAO 与东亚冬季风 (武炳义和黄荣辉, 1999) 以及我国冬季气温 (龚道溢等, 2004; 谭桂容等, 2010) 存在较为密切的联系。乌拉尔地区夏季大气环流的异常及阻塞形势与东亚地区降水有着密切的关系 (黄菲和姜洽娜, 2002), 北半球冬季阻塞高压活动与我国北方大部分地区的低温有关 (季明霞等, 2008)。中高纬环流调整还可通过影响副高 (任荣彩等, 2004) 进而影响我国天气和气候。

已有的理论工作从天气扰动的激发、非线性孤立波理论 (McWilliams, 1980; 罗德海和纪立人, 1989; 陆日宇和黄荣辉, 1996) 等方面探讨了阻塞形成的动力学机制。Luo (2005a, 2005b, 2005c, 2005d)、Luo et al. (2007a, 2007b, 2007c) 建立了基于天气尺度波与行星尺度波非线性相互作用的阻塞和北大西洋涛动的新理论模型, 深化了人们对阻塞和 NAO 形成机制的认识。Luo et al. (2007a) 通过理论分析和观测资料证明, NAO 正位相有利于

欧洲大陆的阻塞生成。另有研究指出, 大西洋欧洲及乌拉尔区域的阻塞活动与 NAO 有着密切的关系, 北大西洋区域阻塞事件频率与持续时间受 NAO 位相变化的影响 (Shabbar et al., 2001; Luo et al., 2007a)。此外, 阻塞的生命循环特征也影响 NAO/PNA (北大西洋涛动/太平洋北美型遥相关) 位相的变化, 长生命阻塞有助于 NAO 负位相的建立 (Crocì-Maspoli et al., 2007)。

上述研究从观测资料证实 NAO 对欧洲大西洋阻塞在年代际尺度上的影响, 分析了阻塞对 NAO 位相转换的可能影响, 并从理论上预示了 NAO 与阻塞的内在联系和相互影响。然而, 大西洋欧洲地区局地的阻塞活动与 NAO 指数变化的关系如何, NAO 和阻塞活动变化的上下游关系如何? 阻塞的强度是否受到 NAO 指数变化的影响? 这些问题仍需进一步研究。本文将利用一个二维的阻塞指数 (Diao et al., 2006) 分析 NAO 与大西洋欧洲及乌拉尔地区局地阻塞活动的相关关系, 以及各个区域阻塞活动变化的可能联系。讨论 NAO 位相转换阶段和指数不同位相时期大西洋和欧洲阻塞活动特征的变化, 进而探讨 NAO 位相转换与阻塞活动变化的内在联系及可能原因。

2 资料与方法

本文资料有美国国家环境预报中心和美国大气科学研究中心 (NCAR/ NCEP) 提供的 1958 年 12 月 1 日~2003 年 2 月 28 日逐日再分析高度场、温度场、经向风场和纬向风场资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 有 NCAR 用来指示 NAO 变化的指数, 即冬季标准化主成分值 (The normalized DJF PC based NAO index values, 见图 2); 还有“20 世纪气候模拟国际比较计划 (C20C—climate of the 20th cen-

ture)”模式结果,具体来说它是挪威皮耶克尼斯气候研究中心(Bjerknes Centre for Climate Research, Norway)提供的模式 BCM(Bergen Climate Model)版本 2 (Version 2) 模拟 20 世纪气候实验所得结果中的 1961 年 12 月 1 日~1999 年 2 月 28 日逐日高度场、经向风场和纬向风场资料。

本文用到的阻塞指数(Blocking Index)定义(Diao et al., 2006)为:

$$BI = h(\lambda, \varphi_s) - h(\lambda, \varphi),$$

$$\varphi_s \leq \varphi \leq 90^\circ\text{N}, 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ$$

其中, $h(\lambda, \varphi)$ 是 500 hPa 等压面高度, φ_s 是发生经向环流等压面下降最大时 $30^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ 之间的某特定纬度,也代表经向环流向南伸出的低压槽或切断低压的位置。指数定义为这个特定纬度的等压面高度和所有这个纬度以北的等压面高度的差。在冬季,本文指数选取的纬度值 φ_s 分别为,北大西洋欧洲区域与乌拉尔山脉区域 ($35^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$), 东亚、鄂霍次克海与北太平洋北美洲区域 ($32.5^\circ\text{N} \sim 37.5^\circ\text{N}$), 选取以上纬度区域中算得的最小值的绝对值大小,作为阻塞指数。

根据阻塞指数挑选阻塞事件做统计工作时,当 T 时刻出现阻塞指数不低于 50 gpm 时,作为阻塞事件发生的开始,在 $T+1$ 时刻的该地点要求也出现阻塞指数不低于 50 gpm 或者在 $T+1$ 时刻距离上一时刻发生阻塞事件地点的相对距离少于 10 个经距,这样, T 与 $T+1$ 时刻的阻塞事件称为时间上有持续性,当这样的持续事件在某个 $T+N$ 时刻的阻塞指数小于 50 gpm,则该阻塞事件结束,阻塞事件持续时间要求不少于 5 天。发生整个阻塞过程的累计持续天数即为一次阻塞事件的持续时间。这样既保证了阻塞事件的发生在时间上的延续性条件,又考虑了其空间上区域性的特点。

根据阻塞指数做全球分布图示时,按照每个格点上发生阻塞负指数低于 30 gpm,持续时间不少于 5 天来挑选阻塞事件。阻塞过程中最大的阻塞指数称作该次阻塞事件的阻塞振幅。北半球冬季阻塞事件的平均强度通过阻塞振幅总和与阻塞个数总和的比值来表示。

在研究阻塞事件过程时,我们发现某些区域频繁的出现阻塞事件,而有些区域则只有少数日子出现。阻塞事件出现频繁的区域也是阻塞高压中心活动的区域,称之为阻塞活动的关键区,根据阻塞事

件覆盖的区域不同,阻塞事件的特征也相应有某些异同点,为便于阻塞特征的统计以及后文的讨论对比,文中将它们分别划为:北大西洋区 ($60^\circ\text{W} \sim 0^\circ$)、欧洲大陆区 ($5^\circ\text{W} \sim 45^\circ\text{E}$)、乌拉尔山脉区 ($45^\circ\text{E} \sim 90^\circ\text{E}$)、西北太平洋区 ($150^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{W}$)、北太平洋中东部区 ($180^\circ \sim 110^\circ\text{W}$)。

3 结果和分析

3.1 北半球冬季阻塞活动的平均特征

图 1 给出了 1958 年以来北半球冬季阻塞的平均强度和活动频度(阻塞日数)的分布。北半球冬季阻塞活动主要集中在大西洋、欧洲地区、乌拉尔山地区和中部太平洋地区,大西洋欧洲地区阻塞活动比太平洋要频繁,这与大多数的研究结果一致。平均地看,冬季大西洋欧洲地区阻塞活动在从欧洲西岸/东大西洋 (15°W) 到西部欧洲地区 (15°E) 最为活跃,北太平洋阻塞的平均强度比北大西洋阻塞更大。

3.2 局地阻塞活动关于北大西洋涛动指数变化的线性回归

NAO 指数在 1970 年代中期以前以负指数为主,而在 1970 年代中期以后到 21 世纪初时期以正指数为主。在 NAO 正指数时期,指数又呈现先加强后减弱的过程(图 2)。根据图 2,本文将 NAO 指数年际变化时间序列进行如下分段:定义 1958/1959~1977/1978 年为负指数时期,1978/1979~2002/2003 年为正指数时期;其中 1978/1979~1990/1991 年为正指数上升阶段 P1,1991/1992~2002/2003 年为正指数下降阶段 P2。

阻塞活动对 NAO 指数的线性回归显示(图 3a),NAO 指数变化主要影响大西洋欧洲以及乌拉尔山地区阻塞活动。大西洋和乌拉尔山地区阻塞活动随 NAO 指数增强而减少,欧洲地区阻塞随 NAO 指数增加而增加。NAO 指数变化对太平洋区域阻塞活动的影响不明显。

NAO 活动不仅对大西洋欧洲地区的阻塞频率产生影响,也导致该地区阻塞的强度发生变化。局地阻塞强度关于 NAO 指数的线性回归表明,指数变化主要对大西洋和欧洲地区的阻塞强度产生影响(图 3b)。在中西大西洋区域呈负相关,在欧洲地区呈正相关。这表明,随着 NAO 指数趋于正值,大西洋中西部的阻塞活动频率减少的同时强度也减

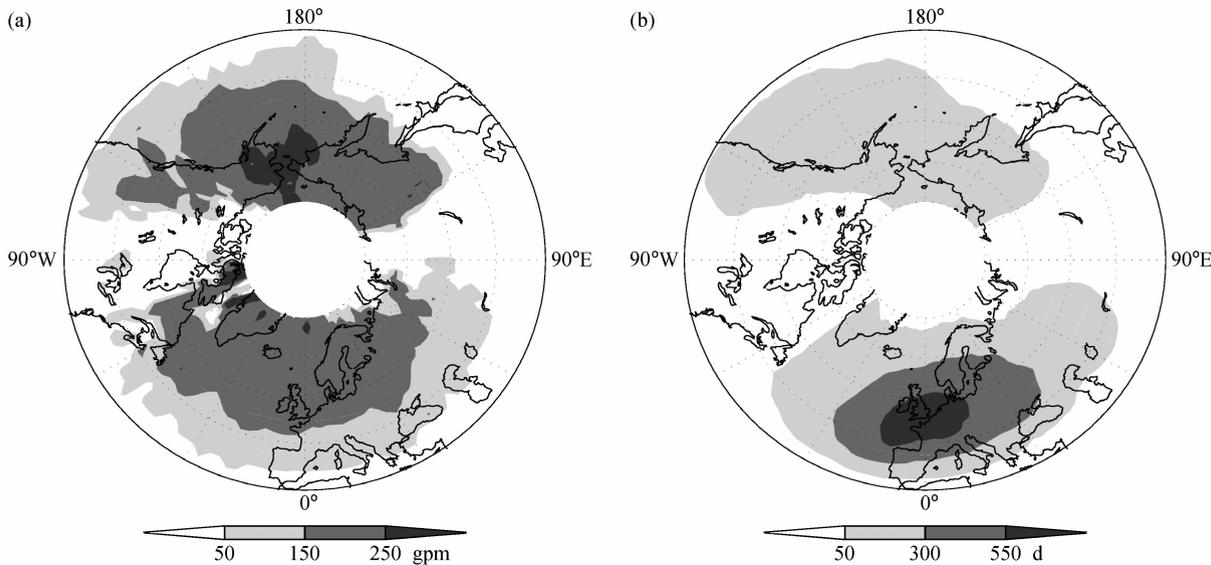


图 1 北半球冬季阻塞活动特征的分布：(a) 平均强度 (单位：gpm)；(b) 总天数 (单位：d)

Fig. 1 The distribution of blocking activities characteristics in winter over the Northern Hemisphere, respectively: (a) Mean intensity (units: gpm), (b) total days (units: d)

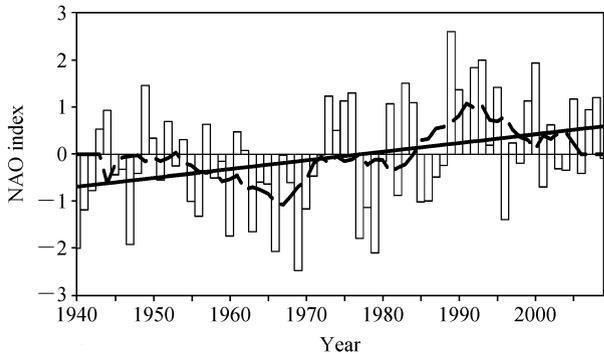


图 2 1939/1940 ~ 2008/2009 年冬季北大西洋涛动指数的年变化曲线 (http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html [2009-12-01])。柱：原始值；虚线：九点平滑值；实线：线性趋势

Fig. 2 The annual variation of the North Atlantic Oscillation (NAO) index during 1939/1940 - 2008/2009 winters (from http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html [2009-12-01]). Bar: original value; dashed line: nine-point smoothing value; solid line: linear trend

弱。东大西洋及欧洲西部沿岸 (0°附近) 阻塞活动频率由于 NAO 指数趋向正值而增加但强度变化不显著。阻塞强度的增加在欧洲大陆内部表现得较为显著。乌拉尔山地区阻塞强度的变化与 NAO 指数变化的线性关系不明显。

3.3 北大西洋涛动指数不同位相时期阻塞活动的变化

3.3.1 局地阻塞频度的变化

在 NAO 指数演变的过程中，大西洋欧洲和乌

拉尔地区的阻塞活动经历了显著的变化。在 NAO 负指数时期阻塞活动在大西洋区域较为频繁 (图 4a)，大西洋欧洲区的活动中心明显偏于大西洋，同时乌拉尔山地区阻塞也很活跃；而在 NAO 正指数时期 (图 4b)，阻塞活动中心偏于欧洲大陆地区，乌拉尔山地区的阻塞活动频率明显减少。对气候平均的距平进一步显示，在 NAO 负指数时期，大西洋及沿岸区域和乌拉尔山地区阻塞活动呈现正距平，阻塞日数明显多于气候平均，而欧洲大陆内部 (30°E 附近) 阻塞日数偏少。在正指数时期，发生在欧洲大陆内部的阻塞频率高于气候平均值，其它区域阻塞频率均受到抑制，少于气候平均 (图 4c、d)。

NAO 正指数时期，除欧洲大陆外大西洋欧洲其他区域阻塞活动平均较少，但在正指数的上升和下降阶段大西洋和欧洲阻塞活动的变化是不一致的：NAO 正指数上升阶段 (图 5a) 大西洋欧洲区域阻塞的活动中心偏于欧洲大陆内部；而在正指数减弱阶段 (图 5b)，阻塞活动能够中心向大西洋一侧偏移，乌拉尔山地区的阻塞在这个阶段极不活跃。与气候平均值比较，NAO 正指数时期的上升阶段阻塞活动在大西洋显著减少，而在欧洲大陆内部增加 (图 5c)；在下降阶段大西洋中西部阻塞仍然偏少，但大西洋沿岸欧洲地区阻塞活动明显增加，此阶段乌拉尔山地区的阻塞显著减少 (图 5d)。

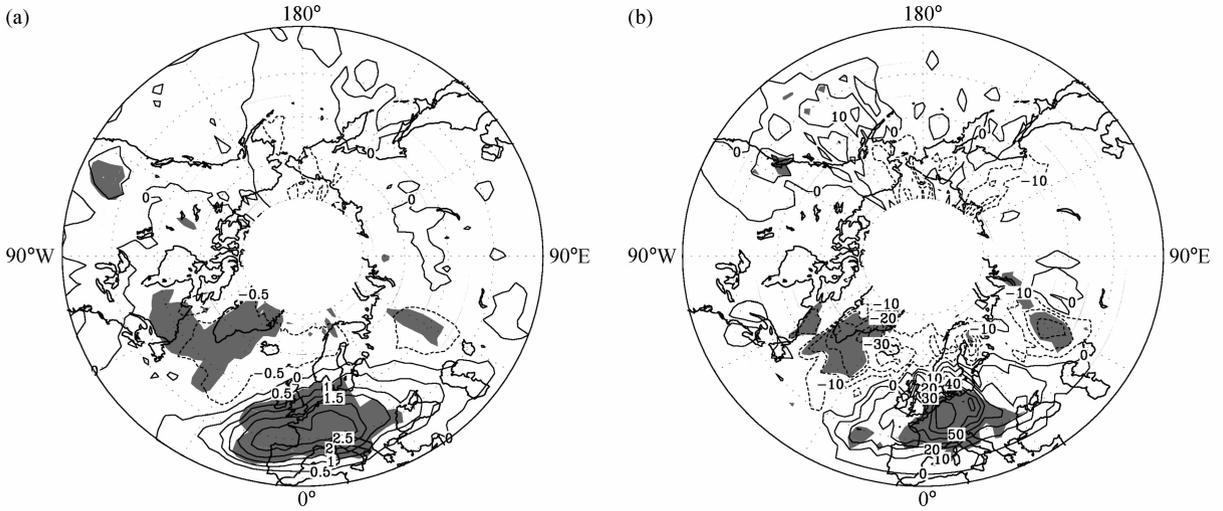


图3 北半球冬季阻塞活动特征对NAO指数的回归系数分布:(a) 1958/1959~2002/2003年天数(阴影区通过90%的信度检验);(b) 1958/1959~2002/2003年平均强度(阴影区通过95%的信度检验)

Fig. 3 The regression coefficient distribution of winter blocking activities characteristics over the Northern Hemisphere and NAO index: (a) Days during 1958/1959–2002/2003 (shaded areas pass the test at 90% confidence level); (b) mean intensity during 1958/1959–2002/2003 (shaded areas pass the test at 95% confidence level)

比较图5c和图5d可知,NAO正指数时期大西洋和乌拉尔地区阻塞活动的减少并不是同步的,乌拉尔山阻塞的减少落后于大西洋地区。回归分析的结果也表明(图3a),乌拉尔山地区阻塞活动的变化与NAO指数变化的线性关系并不好,可能是因为乌拉尔山地区阻塞活动的变化滞后于NAO指数的变化。

3.3.2 区域阻塞个例数逐年变化

本文使用阻塞个例追踪指标(Diao et al., 2006),分别对大西洋、欧洲、乌拉尔山三个区域阻塞日数的逐年变化进行分析(图6),九年滑动平均结果显示阻塞活动的变化包含显著的年代际尺度,并且三个区域阻塞频率变化存在较明显的差异。NAO正、负指数时期三个地区冬季平均阻塞日数显示,NAO负指数时期大西洋和乌拉尔地区阻塞明显较正指数时期活跃。

对正指数时期的两个阶段对应的阻塞日数的变化趋势(图7)进一步分析表明:正指数时期大西洋阻塞日数经历了先下降后上升的过程;欧洲冬季阻塞日数经历了先上升后下降的过程,这与大西洋阻塞活动在正指数时期的变化相反。这意味着,NAO正指数的增强有利于欧洲大陆地区的阻塞发生,不利于大西洋阻塞的生成,因此,当正指数减弱时大西洋地区阻塞重新变得活跃,而欧洲大陆阻

塞活动受到抑制。乌拉尔山地区阻塞在NAO指数转为正位相后持续减少。

3.3.3 阻塞强度的变化

阻塞强度在NAO指数变化的不同阶段其平均值的差异如图8所示。NAO正指数时期与负指数时期相比(图8a),大西洋和欧洲地区的阻塞强度均有所减弱,但差异不显著。P1、P2平均值的差异(图8b)显示NAO正值减弱有利于东大西洋阻塞加强。

使用个例追踪指标得到的各个区域阻塞个例的强度在NAO指数变化各个阶段的概率分布显示,大西洋地区阻塞在NAO负指数时期比正指数时期强(图9a),NAO正指数的加强和减弱对该地区阻塞强度影响不大。欧洲阻塞在NAO正指数时期稍强,乌拉尔山阻塞在NAO负指数时期较强,正指数时期较弱,NAO正指数上升阶段和下降阶段对乌拉尔山阻塞强度的影响不明显。

3.4 可能原因

3.4.1 北大西洋涛动不同位相时期的风暴路径变化

图10给出了NAO负、正位相及正位相上升和下降阶段中纬度风暴路径涡动动能(简称EKE)分布。NAO负位相时期风暴路径较弱且中心位置偏西(图10a),正位相时期平均涡动动能向下游加强

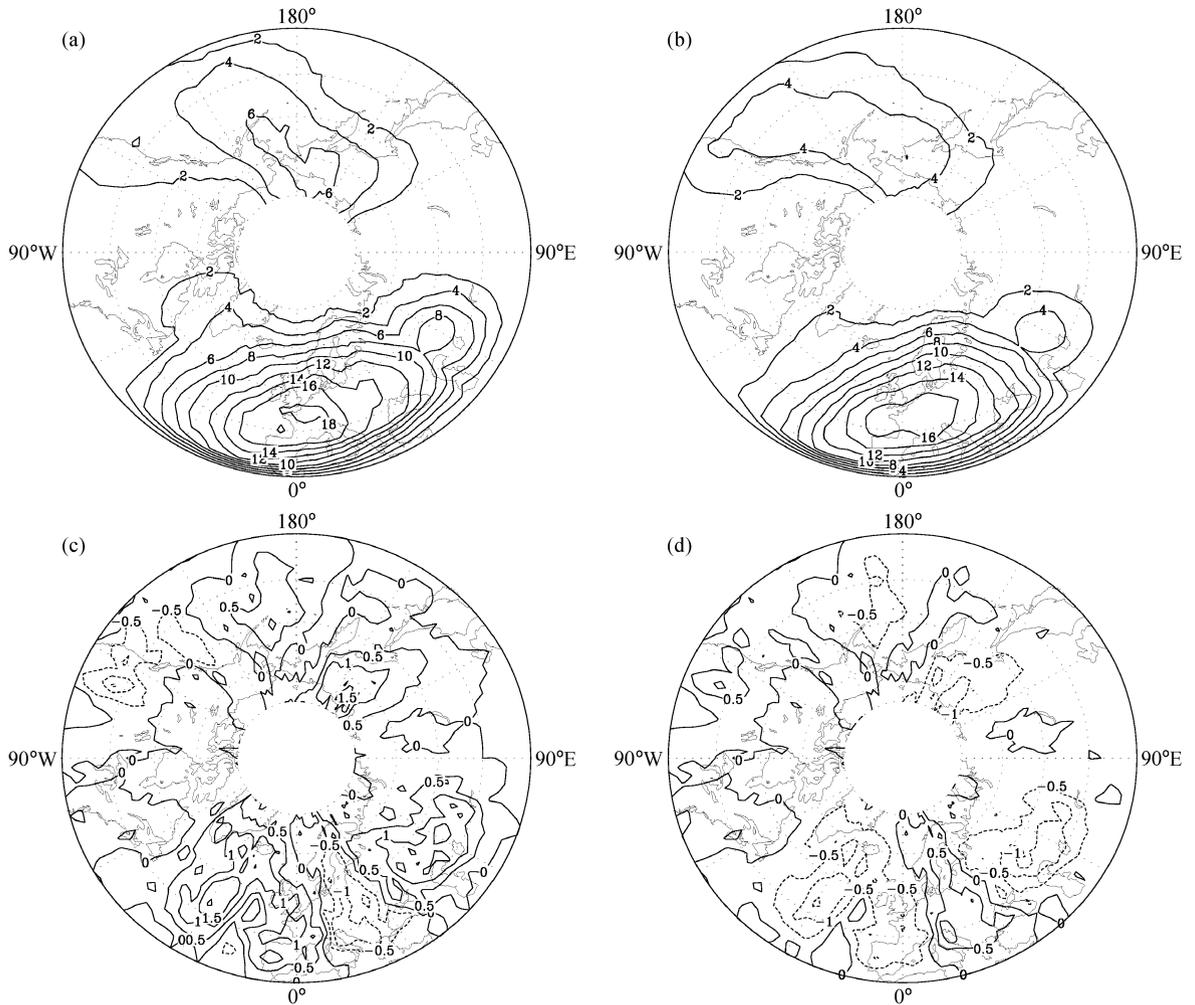


图 4 北半球冬季阻塞活动 (a, b) 平均天数和 (c, d) 平均天数距平在 NAO(a, c) 负指数、(b, d) 正指数时期的分布

Fig. 4 The distribution of (a, b) mean days and (c, d) mean days anomaly of winter blocking activities over the Northern Hemisphere during the period of NAO (a, c) negative index and (b, d) positive index

(图 10b)。在正位相加强阶段风暴涡动动能比其在负位相时期强，且中心位置东移 (图 10c)，而在 NAO 正位相减弱阶段风暴涡动动能比增强阶段更强 (图 10d)。比较图 10a、b 及图 5a、b，可推测涡旋活动向下游加强有利于欧洲大陆阻塞的发生，也即 NAO 正位相有利于欧洲大陆阻塞活跃 (Luo et al., 2007a)。但比较图 10c、d 及图 5c、d 可知，涡旋活动的进一步加强并没有使 NAO 正指数更强，而是相反，且阻塞活动在大西洋一侧逐渐加强而欧洲大陆地区阻塞活动并没有加强。这说明涡旋强度增加到一定程度会抑制 NAO 的正位相，从而大西洋一侧阻塞重新变得活跃。所以 NAO 正位相有利于欧洲大陆阻塞发生和加强，负位相有利于大西洋地区阻塞活动。涡旋活动的强弱及位置变化对

NAO 和阻塞活动的影响较为复杂，需要进一步探讨。从图 10 和图 5 以及图 3 线性回归的结果可见，涡旋强度及位置的变化对大西洋欧洲地区阻塞及 NAO 活动产生较为直接的影响，对更远的乌拉尔山地区阻塞的也存在影响，但不是很直接，可能包含更多因素，也需要进一步深入讨论。

3.4.2 C20C 模式模拟的全球变暖背景下风暴路径及阻塞活动的变化

为进一步探讨全球变暖背景下 EKE 以及阻塞活动的变化。本文使用一个 C20C 模式 [Model: bccr_bcm2_0, Experiment: Climate of the 20th Century experiment (20c3m/Run_1), Bjerknes Centre for Climate Research, Norway] 的输出资料，分析了在 CO₂ 持续增加的背景下北半球 EKE

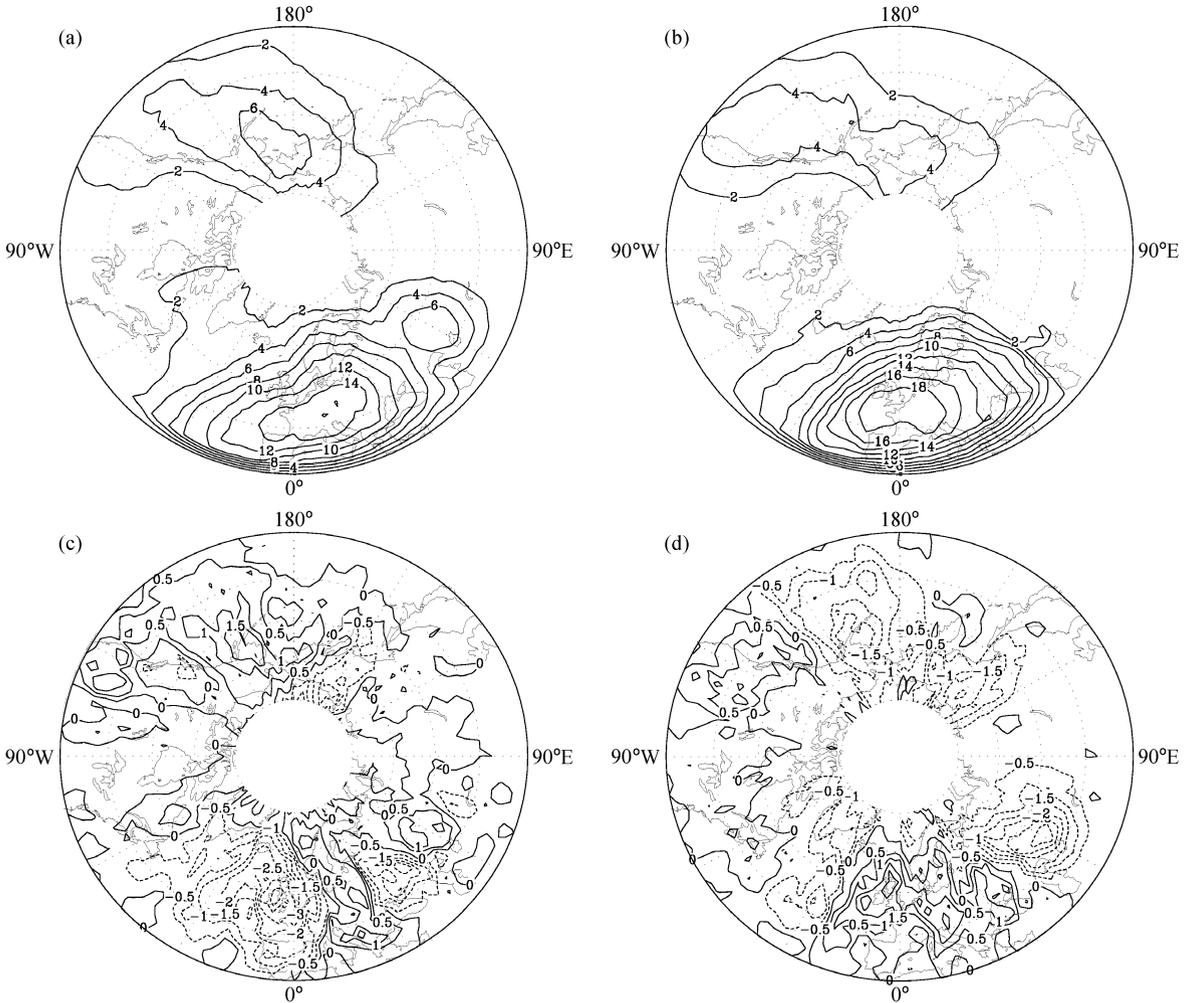


图 5 北半球冬季阻塞活动 (a, b) 平均天数和 (c, d) 平均天数距平在 NAO 正指数不同时期的分布: (a, c) P1; (b, d) P2

Fig. 5 The distribution of (a, b) mean days and (c, d) mean days anomaly of winter blocking activities over the Northern Hemisphere during the different periods of NAO positive index: (a, c) P1; (b, d) P2

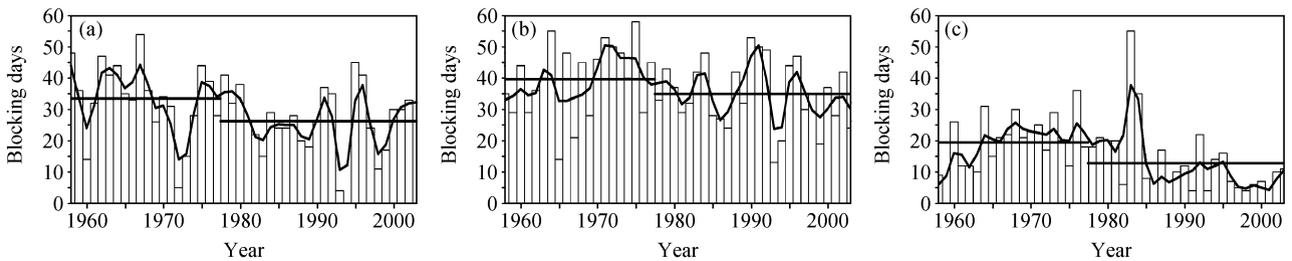


图 6 不同区域冬季阻塞事件总天数 1958/1959~2002/2003 逐年变化: (a) 北大西洋区; (b) 欧洲区; (c) 乌拉尔山区。柱状: 原始值; 实曲线: 九点平滑值; 横线: 平均值

Fig. 6 The annual change of total days of winter blocking events during 1958/1959 - 2002/2003 over different sectors: (a) The North Atlantic sector; (b) the Continental Europe sector; (c) the Ural Mountains sector. Bar; original value; solid curve line; nine-point smoothing value; solid string line; mean value

的变化趋势和阻塞活动的变化。由图 11 可知, 在 CO_2 持续增加的条件 下全球天气尺度涡旋活动

(EKE) 持续增强。这与再分析资料的结果 (图 10) 相似, 但局地强度变化的具体分布存在差异, 例

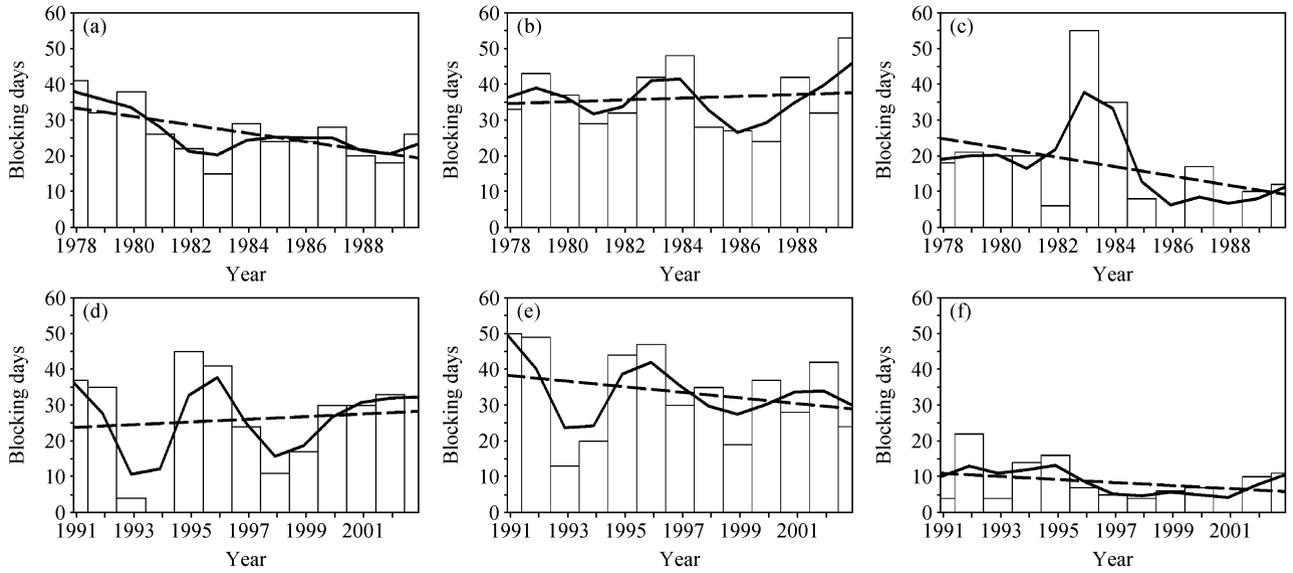


图 7 不同区域冬季阻塞事件总天数 (a-c) P1 和 (d-f) P2 时期的逐年变化; (a, d) 北大西洋区; (b, e) 欧洲区; (c, f) 乌拉尔山区。柱状: 原始值; 实曲线: 九点平滑值; 虚线: 线性趋势

Fig. 7 The annual change of total days of winter blocking events during (a-c) P1 and (d-f) P2 over different sectors; (a, d) The North Atlantic sector; (b, e) the Continental Europe sector; (c, f) the Ural Mountains sector. Bar: original value; solid curve line: nine-point smoothing value; dashed line: linear tendency

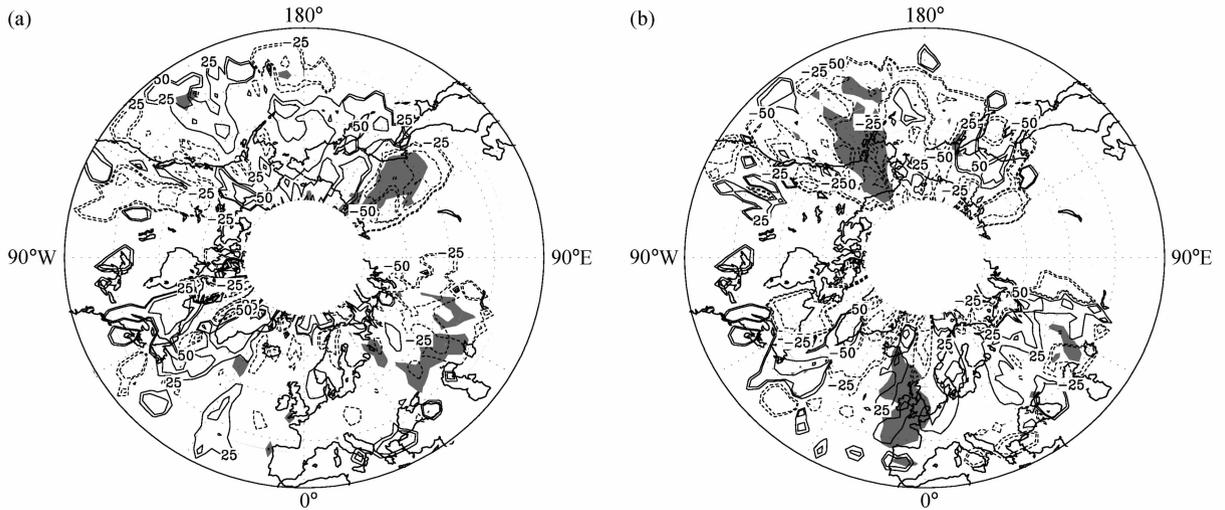


图 8 北半球冬季阻塞活动平均强度变化的分布 (单位: gpm): (a) 正、负指数时期的差值 (正-负); (b) P2、P1 差值 (P2-P1)。阴影: 通过 90% 的信度检验

Fig. 8 The distribution of mean intensity variation of winter blocking activities over the Northern Hemisphere (units: gpm): (a) The difference between the periods of positive and negative indexes (positive-negative); (b) the difference between P2 and P1 (P2-P1). Shaded areas pass the test at 90% confidence level

如, 模式结果显示大西洋风暴路径在下游加强明显, 核心区强度变化很小, 但图 10 的结果表明大西洋涡旋活动不但在下游加强, 而且整体都加强。因此, 全球增暖是导致 EKE 加强的重要原因之一。

在这样的涡旋活动变化的条件下, 大西洋欧洲

区域阻塞活动的变化趋势表现为: 西部大西洋区阻塞活动持续减弱, 欧洲大陆和乌拉尔地区阻塞活动变化的线性趋势不显著, 只存在弱的增长趋势 (图 12)。

每 10 年平均的冬季局地阻塞频率分布显示

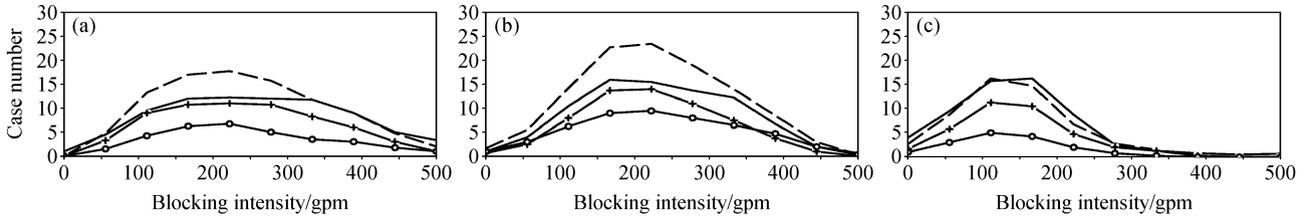


图9 冬季阻塞事件个数随强度的变化: (a) 北大西洋区; (b) 欧洲大陆区; (c) 乌拉尔山脉区。实、虚线: 负、正指数时期; 叉号线: P1; 空心圆线: P2

Fig. 9 Variation of the numbers of winter blocking events with different intensity over different sectors; (a) The North Atlantic sector; (b) the Continental Europe sector; (c) the Ural Mountains sector. Solid (dashed) line: the negative (positive) index period; line with the cross: P1; line with the open circle: P2

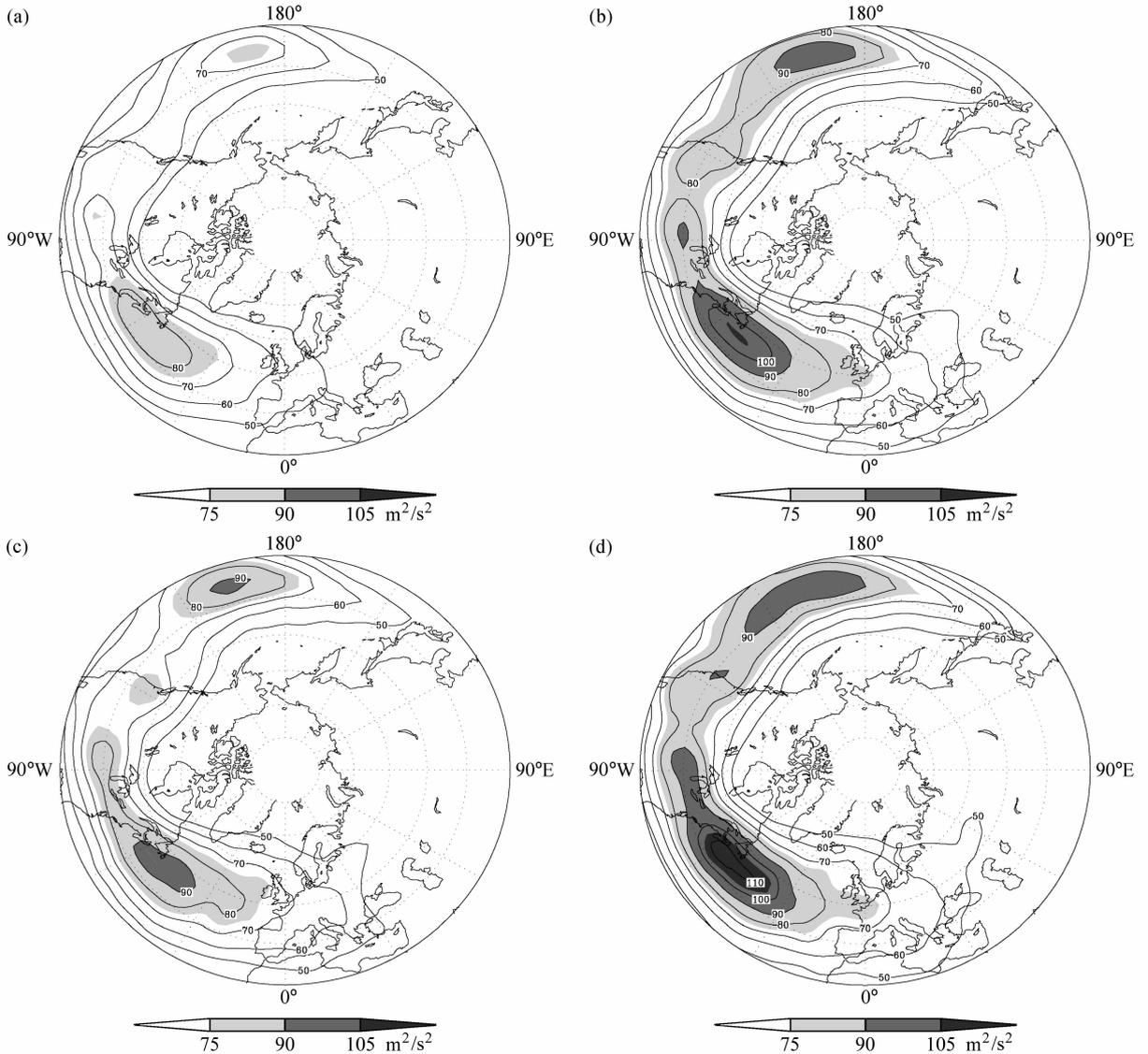


图10 冬季北半球 250 hPa 平均扰动动能的分布 (单位: m^2/s^2): (a) 负位相时期; (b) 正位相时期; (c) P1; (d) P2。阴影: $>75 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Fig. 10 The distribution of mean eddy kinetic energy at 250 hPa over the Northern Hemisphere in winter: (a) The period of negative phase; (b) the period of positive phase; (c) P1; (d) P2. Shading: $>75 \text{ m}^2/\text{s}^2$

(图 13), 大西洋中部和西部阻塞活动频率持续减少, 而欧洲阻塞在前 20 年 (图 13a、b) 持续增加, 但在第 30 年 (图 13c) 阻塞活动频率在大西洋一侧加强而在欧洲大陆减弱, 活动中心向大西洋偏移。这意味着涡旋活动的增强和向下游发展有利于欧洲

阻塞的发生, 但当 EKE 继续增强后, 欧洲大陆阻塞活动受到抑制, 活动中心西移。从而大西洋上阻塞活动增加。由于阻塞环流在高纬度和低纬度分别为等压面高度的正异常和负异常, 相当于 NAO 的负位相, 所以 EKE 增强到一定程度将会抑制 NAO 的正位相, 观测资料显示的 NAO 正位相增强 (P1) 和减弱 (P2) 阶段阻塞活动的变化 (图 5a、b) 也可以说明这一点。

此外, 模式结果显示全球持续增暖条件下, 乌拉尔地区阻塞活动表现为增加的趋势, 与资料显示的 NAO 指数上升后该地区阻塞活动的持续减少不一致, 这也表明乌拉尔地区阻塞活动变化的机制与大西洋及欧洲阻塞的不同。

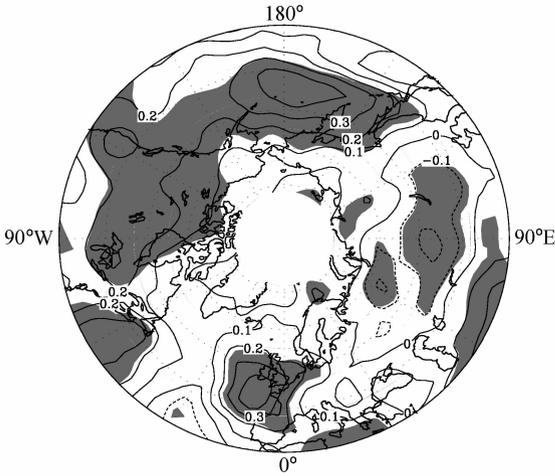


图 11 冬季北半球 250 hPa 平均扰动动能的线性趋势分布 (时间序列: 1961/1962~1998/1999 年, 阴影区通过 90% 的信度检验)

Fig. 11 The distribution of mean eddy kinetic energy linear tendency at 250 hPa over the Northern Hemisphere in winter (time series; 1961/1962 - 1998/1999). Shaded areas pass the test at 90% confidence level

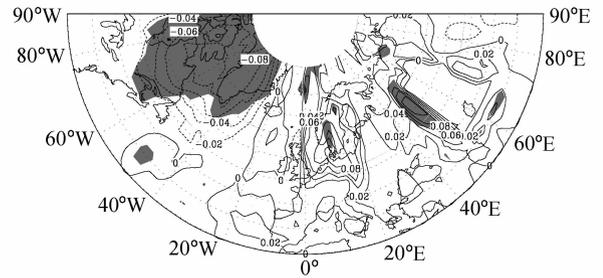


图 12 同图 11, 但为阻塞活动天数的线性趋势分布
Fig. 12 As in Fig. 11, but for the distribution of linear tendency of winter blocking activities days

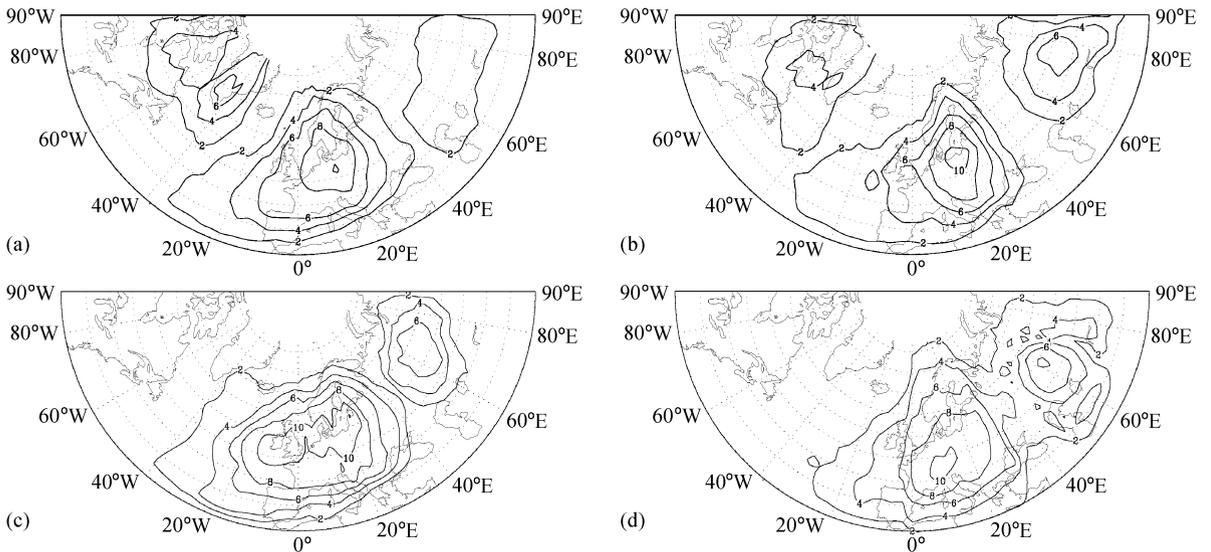


图 13 北半球冬季阻塞活动平均天数的分布: (a) 1961/1962~1969/1970; (b) 1970/1971~1979/1980; (c) 1980/1981~1989/1990; (d) 1990/1991~1998/1999

Fig. 13 The distribution of mean days of winter blocking activities over the Northern Hemisphere; (a) 1961/1962 - 1969/1970; (b) 1970/1971 - 1979/1980; (c) 1980/1981 - 1989/1990; (d) 1990/1991 - 1998/1999

4 结论和讨论

由以上分析可知,大西洋欧洲以及乌拉尔山地区阻塞活动的长期变化与NAO指数变化存在显著的相关关系:大西洋地区阻塞活动频率和强度随NAO指数的增强而受到抑制,欧洲阻塞随NAO指数的减弱而增多,强度也有所增加,乌拉尔山地区阻塞活动也受到NAO活动的影响,但不如欧洲和大西洋地区显著。大西洋欧洲区阻塞在NAO不同位相时期的平均状况是:负位相时期阻塞活动中心偏向大西洋一侧,大洋上阻塞较活跃;正位相时期该地区阻塞活动中心向欧洲大陆偏移,欧洲大陆上阻塞活动更加频繁。Luo et al. (2007a)的理论工作指出,NAO正位相有利于涡动能量向下游频散,因此,在NAO正位相时期欧洲大陆的阻塞活动会增加,本文的结果佐证了Luo et al. (2007a)的理论推断。乌拉尔地区阻塞活动的平均频率在NAO负位相时期明显高于正位相时期。三个区域的阻塞强度在NAO负位相时期强于正位相时期。

NAO正指数时期,指数的增强和减弱阶段对应的大西洋欧洲局地阻塞活动的变化不同:NAO正指数增强阶段整个大西洋阻塞活动受到抑制,活动中心向欧洲大陆显著漂移;而正指数减弱阶段,东大西洋欧洲沿岸的阻塞活动增加且强度增加,但西部大西洋阻塞继续偏少。对三个地区区域阻塞活动的逐年变化分析显示,NAO正指数的增强和减弱导致大西洋和欧洲地区阻塞出现相反的变化趋势,这进一步证明NAO指数增强对应的是欧洲大陆阻塞活动增加,而指数减弱有利于大西洋阻塞活动的发生。乌拉尔山地区阻塞活动在正指数加强和减弱阶段均持续减少。这表明,NAO活动更直接地影响大西洋欧洲地区的阻塞。线性回归的结果也显示这两个区域阻塞活动与NAO相关关系更好。

Luo (2005a)、Luo et al. (2007a)的理论工作表明,阻塞和NAO本质上是中纬度大气内部过程,其周期为2周左右的生命过程是天气尺度涡动强迫的结果。通过计算NAO指数变化各个阶段EKE的分布以及对C20C模式输出资料的分析,可以推测NAO指数与阻塞活动变化的这种相关关系可能与大西洋风暴带活动的强度和位置变化有关:风暴带的增强和向下游发展有利于NAO正位相的发生和欧洲阻塞的活跃,但当EKE继续增强后,

欧洲大陆阻塞活动受到抑制,活动中心西移,从而大西洋上阻塞活动增加。由于阻塞环流在高纬度和低纬度分别为等压面高度的正异常和负异常,相当于NAO的负位相,所以EKE增强到一定程度将会抑制NAO的正位相,使NAO正指数减弱,进而可能向负指数过渡。

综上所述,NAO正位相对应于欧洲大陆阻塞活跃和加强,负位相有利于大西洋地区阻塞活动,且中纬度涡旋活动的强弱和位置对NAO位相的变化起到重要作用,风暴带向东加强有利于NAO趋于正位相,但其进一步加强可使NAO正位相减弱。NAO活动对乌拉尔山地区阻塞的影响也是较为明显的。目前,已有研究发现北大西洋SST可影响NAO及乌拉尔阻塞。Peng et al. (2001, 2003)通过全球大气环流模式(GCM)实验结果表明对北大西洋SST异常信号响应中的对称部分,即被描述为一个大西洋上相当正压结构的NAO偶极子型。NAO型对称响应的维持主要来自于偶极子型的异常涡流强迫,这种强迫来自于热力强迫的异常流场和大西洋风暴路径的相互作用,称为涡流—反馈机制。Li (2004)也通过研究该模式(GCM)下的结果,进而发现乌拉尔山位势高度场正距平可通过一个上层波列——从北大西洋到欧洲海岸,与正的西北大西洋海表温度异常(SSTA)相联系。正位相的SSTA可强迫出一个异常波列,结果导致乌拉尔山位势高度场出现正距平异常,并且乌拉尔山响应的触发和维持大部分来自异常的斜压加热机制。

NAO和阻塞是北半球中纬度环流的重要成员,本文的结果为认识大西洋欧洲阻塞的年际和年代际变化提供线索,为认识NAO位相的转变提供参考。由于阻塞及NAO活动对我国天气、气候有着重要的影响,本文的研究为认识我国天气气候在年际和年代际上的变化提供参考。

致谢 感谢中国海洋大学海洋环境学院罗德海教授对文章思路建立和内容建构的指导帮助,感谢各位审稿专家在初审、复审中对文章的内容修改提出的大量宝贵意见。

参考文献 (References)

Croci-Maspoli M, Schwierz C, Davies H C. 2007. Atmospheric blocking: Space-time links to the NAO and PNA [J]. *Climate*

- Dyn., 29 (7-8): 713-725.
- Diao Y, Li J, Luo D. 2006. A new blocking index and its application; Blocking action in the Northern Hemisphere [J]. *J. Climate*, 19 (19): 4819-4827.
- Dole R M, Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation; Geographical distribution and regional persistence characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (8): 1567-1586.
- 龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 2004. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响 [J]. *科学通报*, 49 (5): 487-492. Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. 2004. Significant impact of Arctic Oscillation on the deviation of wintertime daily temperature in China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 49 (5): 487-492.
- 黄菲, 姜治娜. 2002. 欧亚大陆阻塞高压的统计特征及其与中国东部夏季降水的关系 [J]. *青岛海洋大学学报*, 32 (2): 186-192. Huang Fei, Jiang Zhina. 2002. Study on the statistical characteristics of atmospheric blocking in the Eurasia and its relationship with the summer rainfall over the east of China [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao (in Chinese)*, 32 (2): 186-192.
- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation; Regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 269 (5224): 676-679.
- Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. 2003. The North Atlantic Oscillation; Climatic Significance and Environmental Impact [M]. American Geophysical Union, 279pp.
- 李明霞, 黄建平, 王绍武, 等. 2008. 冬季中高纬地区阻塞高压活动及其气候影响 [J]. *高原气象*, 27 (2): 415-420. Ji Mingxia, Huang Jianping, Wang Shaowu, et al. 2008. Winter blocking episodes and impact on climate over East Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 415-420.
- Lejenäs H, Økland H. 1983. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data [J]. *Tellus*, 35A: 350-362.
- Li S. 2004. Impact of northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (4): 971-988.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1996. 变形的经向环流变化方程及其在诊断阻塞高压形成中的应用 [J]. *大气科学*, 20 (2): 138-148. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1996. The transformed meridional circulation equation and its application to the diagnostic analysis of the blocking high formation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (2): 138-148.
- 罗德海, 纪立人. 1989. 大气中阻塞形成的一个理论 [J]. *中国科学 (B辑)*, 19 (1): 103-112. Luo Dehai, Ji Liren. 1989. A theory of blocking formation in the atmosphere [J]. *Science in China (Series B) (in Chinese)*, 19 (1): 103-112.
- Luo D. 2005a. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part I; Effect of topography [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (1): 5-21.
- Luo D. 2005b. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part II; Role of westward-traveling planetary waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (1): 22-40.
- Luo D. 2005c. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part III; Wavenumber conservation theorems for isolated blocks and deformed eddies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (11): 3839-3859.
- Luo D. 2005d. A barotropic envelope Rossby soliton model for block-eddy interaction. Part IV; Block activity and its linkage with sheared environment [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (11): 3860-3884.
- Luo D, Lupo A R, Wan H. 2007a. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part I; A simple model of North Atlantic Oscillations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (1): 3-28.
- Luo D, Gong T, Lupo A R. 2007b. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part II; Free mode characteristics of NAO and diagnostic study [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (1): 29-51.
- Luo D, Gong T, Diao Y. 2007c. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part III; Meridional displacement of westerly jet anomalies during two phases of NAO [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (9): 3232-3248.
- McWilliams J C. 1980. An application of equivalent modons to atmospheric blocking [J]. *Dyn. Atmos. Oceanic*, 5 (1): 43-66.
- Namias J. 1947. Characteristics of the general circulation over the Northern Hemisphere during the abnormal winter 1946-47 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 75 (8): 145-152.
- Pelly J L, Hoskins B J. 2003. A new perspective on blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (5): 743-755.
- Peng S, Robinson W A, Li S. 2002. North Atlantic SST forcing of the NAO and relationships with intrinsic hemispheric variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 117-121.
- Peng S, Robinson W A, Li S. 2003. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole [J]. *J. Climate*, 16: 1987-2004.
- 任荣彩, 刘屹岷, 吴国雄. 2004. 中高纬环流对 1998 年 7 月西太平洋副热带高压短期变化的影响机制 [J]. *大气科学*, 28 (4): 571-578. Ren Rongcai, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2004. On the short-term variation of subtropical anticyclone over the western Pacific affected by the mid-high latitudes circulation in July 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 571-578.
- Rex D F. 1950a. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action [J]. *Tellus*, 2: 196-211.
- Rex D F. 1950b. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. II. The climatology of blocking action [J]. *Tellus*, 2: 275-301.
- Shabbar A, Huang J, Higuchi K. 2001. The relationship between the wintertime North Atlantic Oscillation and blocking episodes in the North Atlantic [J]. *Int. J. Climatol.*, 21 (3): 355-369.

- 宋洁, 李崇银. 2009. 南极涛动和北半球大气环流异常的联系 [J]. 大气科学, 33 (4): 847 - 858. Song Jie, Li Chongyin. 2009. The linkages between the Antarctic Oscillation and the Northern Hemisphere circulation anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 847 - 858.
- 谭桂容, 陈海山, 孙照渤, 等. 2010. 2008 年 1 月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系 [J]. 大气科学, 34 (1): 175 - 183. Tan Guirong, Chen Haishan, Sun Zhaobo, et al. 2010. Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 175 - 183.
- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. Tellus, 42A (3): 343 - 365.
- 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.
- 仪清菊. 1982. 北半球阻塞高压的某些统计特征 [J]. 气象, 9 (3): 11 - 13. Yi Qingju. 1982. Some statistical characteristics of blocking high in the Northern Hemisphere [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 9 (3): 11 - 13.
- Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, et al. 2000. The North Atlantic Oscillation simulated by versions 2 and 4 of IAP/LASG GOALS model [J]. Adv. Atmos. Sci., 17 (4): 601 - 616.