

季飞, 支蓉, 龚志强, 等. 2011. 北太平洋高度场异常关联中心的空间结构特征的研究 [J]. 大气科学, 35 (4): 721-728. Ji Fei, Zhi Rong, Gong Zhiqiang, et al. 2011. Analysis of spatial characteristics of anomalous correlation centers in height fields of the North Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 721-728.

北太平洋高度场异常关联中心的空间结构特征的研究

季飞¹ 支蓉² 龚志强² 黄建平¹ 冯爱霞¹

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 国家气候中心, 中国气象局气候预测室, 北京 100081

摘 要 采用 NCEP/NCAR 全球高度场和地面气压资料, 研究了北太平洋负关联中心由低层到高层的空间分布, 以及与其有较强关联的异常关联中心的特征。结果表明, 各高度场中与北太平洋关联比较显著的中心比较一致, 主要分布在三个区域: 赤道中太平洋和白令海峡的负关联中心, 以及北美大陆东南部的正关联中心。三个区域内格点对北太平洋的综合作用表现为: 北太平洋区域在各层次高度场都存在明显的负关联中心, 体现出了一定正压结构特征, 并且中心的位置随着高度的增高在经向上有东移的特征, 在纬向上的移动则并不规则。就三个异常关联中心而言, 对北太平洋区域影响最显著的区域在 700 hPa、500 hPa 和 200 hPa 高度场都是位于赤道中太平洋的负关联中心, 在地面气压场中则是位于白令海峡的负关联中心。最先影响北太平洋区域的在地面气压和 700 hPa 高度场是位于北美大陆东南部的正关联中心, 在 500 hPa 和 200 hPa 高度场是位于赤道中太平洋的负关联中心, 因此, 在不同高度场, 对于北太平洋首要关注的影响区域应区别对待。

关键词 北太平洋 异常关联中心 超前关联

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0721-08

中图分类号 P434

文献标识码 A

Analysis of Spatial Characteristics of Anomalous Correlation Centers in Height Fields of the North Pacific Ocean

JI Fei¹, ZHI Rong^{2, 3}, GONG Zhiqiang², HUANG Jianping¹, and FENG Aixia¹

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Laboratory for Climate Prediction, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The distribution of negative correlation center in the North Pacific Ocean from the low level to high level and characteristics of other anomalous centers which have strong correlations with the North Pacific Ocean are analyzed using the NCEP/NCAR global height field data and surface pressure data. Research results show that the distributions of the centers which have remarkable correlations with the North Pacific Ocean are always the same in each height field, and the three correlation centers are: negative centers in the central equatorial Pacific and the Bering Strait, positive center in the southeast of the North America continent. The correlations between grid points in the North Pacific Ocean and grid points in these three centers show that there is an obvious negative correlation center in the North Pacific Ocean at each height which reflects a character of barotropic structure, and the negative center moves eastward with the height increasing in the meridional direction while the ambulation in the zonal one is irregular; in these anomalous centers, the most remarkable center at 700 hPa, 500 hPa, and 200 hPa which influences

收稿日期 2010-08-10, 2011-01-27 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40905034、40930952、40875040 和 40775048, 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2010CB950504, 科技支撑项目 2007BAC29B01

作者简介 季飞, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候系统关联性研究。E-mail: 7532095@163.com

通讯作者 龚志强, E-mail: gzq0929@126.com

the the North Pacific Ocean is the negative center in the central equatorial Pacific while that in the surface pressure field is the negative center in the Bering Strait. The correlation center first influencing the North Pacific Ocean is the positive one in the southeast of the North America continent for surface pressure and 700 hPa, and is the negative one in the central equatorial Pacific at 500 hPa and 200 hPa.

Key words North Pacific Ocean, anomalous correlation centers, proactive correlation

1 引言

全球和区域的气候变化与大气环流异常有着密切的联系, 想要更好地理解气候变化的特点, 首先就必须了解大气环流的演变特征。在太阳辐射和大气环流作用下, 气候系统内部产生一系列复杂的物理过程和非线性相互作用, 各组成部分之间通过物质和能量交换等构成一个复杂系统(李建平和丑纪范, 1997; 侯威等, 2005; 龚志强等, 2006)。封国林等(2006, 2008)、龚志强等(2008)和支蓉等(2009)分别从时间和空间两个角度分析气候要素之间的关联性, 构建了温度、气压、相对湿度和纬向风四种要素的关联网, 比较分析了四种要素内部关联的时空演变特征, 以此来研究气候系统内部结构的复杂性。已有的结果表明, 北太平洋区域, 在低层至高层大气全球温度场中均存在一个较强的负异常关联中心(支蓉等, 2009), 体现出了一定的正压结构特征。

基于气候系统内部的复杂性和关联性, 对遥相关的研究一直是气象界所关注的一个热点。Wal-lace and Gutzler (1981) 利用 15 年的资料研究了北半球冬季海平面气压场以及 500 hPa 高度场的遥相关型, 确定了北半球冬季 500 hPa 高度场存在 5 种遥相关型。施能(1996)研究发现, 太平洋北美型(PNA)有明显趋势变化和年际变化, 而这种变化是中国冬季气候变化的一个重要原因; 李勇等(2007)研究发现, 北半球冬季 WP 遥相关型变化具有明显的年际和年代际特征, 并且与我国冬季气温和降水有明显关系。另外对北太平洋涛动(NPO)的研究发现, NPO 异常不仅直接影响北太平洋及北美附近地区气候变化(Latif and Barnett, 1994), 还影响着东亚(Li and Li, 2000)乃至整个北半球的气候变化(李崇银和李桂龙, 1999)。郭冬和孙照渤(2004, 2005)研究发现, 北太平洋涛动异常变化与我国冬季天气气候关系密切, 还指出北太平洋涛动在 1976 年左右存在着一次明显的气

候突变; Yan et al. (2005) 研究表明, NPO 是影响中国降水年代际变化最显著的原因之一。

上述研究表明, 太平洋涛动区作为一个关键区域, 其纬向风异常变化维系着两个半球的相互联系(Wang, 2005), 并且该区域是 PNA、NPO、WP(西太平洋型)等多种遥相关型共同作用的区域, 在环流系统中发挥着比较重要的作用, 同时该区域的环流异常对我国气候的变化也能产生比较大的影响, 凸显出该区域大气环流的重要性 and 对其研究的必要性。但以往的研究多是局限在一种模态(如 NPO 型), 并没有从整体的角度来研究该区域与全球其他区域之间的相互作用, 也没有从全球范围内来分析其他区域对北太平洋作用的空间分布及时间先后特征。

因此, 本文采用 NCEP/NCAR 全球高度场和地面气压资料, 运用矩阵理论, 研究了全球高度场和地面气压场在北太平洋区域的关联特征, 讨论其主要的关联区域, 分析不同关键区域对北太平洋影响的强弱及时滞关系, 进而对北太平洋区域在全球气候系统中的作用有更全面的认识。

2 资料和方法

2.1 资料

资料来源(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)于美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)对全球 1948~2005 年逐日再分析的平均高度场和地面气压资料, 分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$, 沿纬向有 72 个格点, 沿经向有 36 个格点, 总计 2592 个格点, $H_i(j)$, $i=1, 2, \dots, 2592$; $j=1, 2, \dots, 21170$ 。为滤除资料中包含的季节振荡信号, 对数据作距平处理得到距平序列 $H'_i(j)$ 。

2.2 关联性研究方法

关联矩阵理论的主要思想如下: 首先对 M 维多变量数据集 $H_i(t)$, $i=1, 2, \dots, M$, $t=1, 2, \dots, N$, M 为格点总数, N 为样本量, 进行标准化处理:

其中, $\langle H_i \rangle$ 为平均值, $\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_i(t) - \langle H_i \rangle)^2 / N}$ 为标准差。

选择北太平洋区域 (27.5°N~47.5°N, 157.5°E~132.5°W), 将区域内共 75 个格点拟合成一条序列 $Q(t)$:

$$Q(t) = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} H_i(t), \quad t = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

N 为样本量, 由 $Q(t)$ 及 $H'_i(t)$ 构建得到的关联矩阵, 关联矩阵的矩阵元为 C_i :

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N H'_i(t) Q'(t), \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

其中, $-1 \leq C_i \leq 1$, $C_i = 1$ 表示完全正关联, $C_i = -1$ 表示完全负关联, $C_i = 0$ 表示不存在关联。

3 结果分析

3.1 北太平洋的异常关联中心及空间分布

从北太平洋区域与全球其他格点平均关联值的全球分布图 (图 1) 中可以看出, 除地面气压外, 其

他三个高度场均存在明显的异常关联中心, 且异常关联中心在三个高度场上的位置基本保持一致: 赤道中太平洋 (区域 A) 和白令海峡 (区域 C) 的负关联中心, 以及北美大陆东南部 (区域 B) 的正关联中心, 这三个异常关联中心在垂直方向上也体现出了一定的正压结构特征。

由于在不同高度场中各异常关联中心的形状并不规则, 且位置和面积也不完全相同, 因此针对图 1 中每个关联中心, 我们选取的具体范围如表 1 所示。由 (4) 式可计算北太平洋区域内格点与三个异常关联中心区域内所有格点之间的关联, 得到北太平洋区域内格点的平均关联值 \bar{C}_i :

$$\bar{C}_i = \frac{1}{N_a + N_b + N_c} \left(\sum_{j_a=1}^{N_a} C_{ij_a} + \sum_{j_b=1}^{N_b} C_{ij_b} + \sum_{j_c=1}^{N_c} C_{ij_c} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, 75), \quad (4)$$

式中, N_a 、 N_b 、 N_c 分别为各异常关联中心区域内的格点个数, 通过格点之间的平均关联, 可以表征三个异常关联中心对北太平洋区域的综合作用情

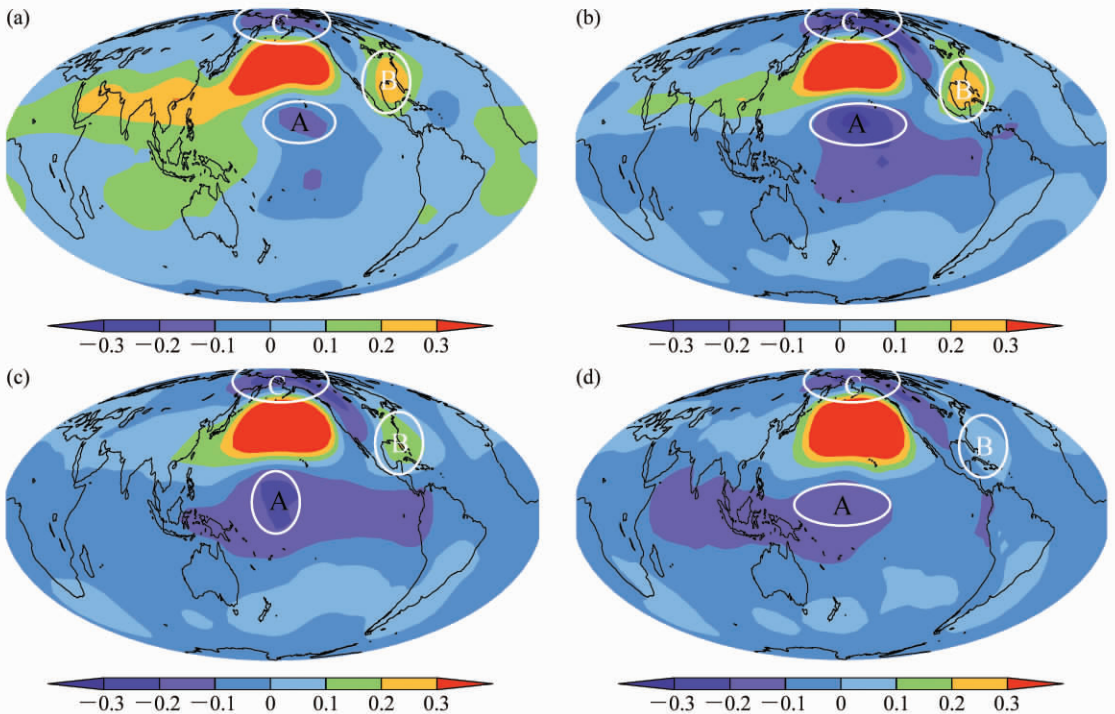


图 1 北太平洋海域与全球其他格点平均关联值在各高度场的全球分布图: (a) 200 hPa 高度场; (b) 500 hPa 高度场; (c) 700 hPa 高度场; (d) 地面气压场

Fig. 1 Distributions of mean correlations between the North Pacific Ocean and other grids for height fields of (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) surface pressure field

表 1 各高度场关联中心范围

Table 1 Regions of correlation centers for each height field and surface pressure field

高度场	中心 A (赤道中太平洋)	中心 B (北美大陆东南部)	中心 C (白令海峡)
200 hPa	(12.5°N~17.5°N, 172.5°W~142.5°W)	(22.5°N~32.5°N, 97.5°W~82.5°W)	(62.5°N~77.5°N, 137.5°E~112.5°W)
500 hPa	(12.5°N, 177.5°W~162.5°W)	(22.5°N~32.5°N, 87.5°W~77.5°W)	(67.5°N, 147.5°E~127.5°W)
700 hPa	(2.5°N~12.5°N, 172.5°E~172.5°W)	(22.5°N~42.5°N, 82.5°W~67.5°W)	(47.5°N~62.5°N, 117.5°W~107.5°W)
地面气压	(2.5°N~7.5°N, 152.5°E~137.5°W)	(22.5°N~42.5°N, 132.5°W~57.5°W)	(67.5°N, 167.5°E~172.5°W)

况,是有别于以往单一考虑负相关或正相关的新的研究思路(封国林等,2006,2008;龚志强等,2008;支蓉等,2009)。图2是北太平洋区域内格点与三个异常关联中心区域内所有格点的平均关联值在北太平洋区域内的分布,从中可以看出,三个异常关联中心(赤道中太平洋和白令海峡的负关联中心以及北美大陆东南部的正关联中心)内的格点对北太平洋区域内格点的综合作用表现为在各高度场和地面气压场都能得到一个明显的负关联中心,同时也可以看出三个异常关联区域北太平洋的作用从低层至高层均稳定存在,并且在垂直方向上体现出一定的正压结构特征。

表2中,北太平洋区域关联中心面积百分比是关联中心内的格点个数与北太平洋区域内格点总数的比值。可以看出,随着高度的增加,负关联中心面积不断减小。结合北太平洋区域内格点平均关联值的纬圈平均和经圈平均分布图(图3)来看,从低层到中层,北太平洋区域内的负关联中心均稳定存在,体现出了一定的正压结构特征,与支蓉等(2009)的研究在北太平洋区域低层至高层大气全球温度场中均存在一个较强的负异常关联中心相吻合。关联中心的位置在经向上(图3b)随着高度的增高有一个明显东移的过程;而在纬向上(图3a)则没有体现出比较规则的移动特征,至于中心位置在经向和纬向上的移动,则有可能是由于不同高度场本身的特征所导致的。

表 2 各高度场负关联中心的特征

Table 2 Characters of negative correlation centers for each height field and surface pressure field

高度场	中心关联值	中心位置	中心面积百分比
200 hPa	-0.1205	(37.5°N, 162.5°W)	12%
500 hPa	-0.1219	(32.5°N, 167.5°W)	13.3%
700 hPa	-0.0963	(42.5°N, 157.5°W)	13.3%
地面气压	-0.0995	(42.5°N, 157.5°W)	24%

3.2 重要异常关联中心的确定

通过对高度场同步关联的分析,我们确立了与北太平洋关联作用最为显著的三个关键区域,以及北太平洋与这三个关键区域的关联中心的空间分布特征。对于已经确立的三个关键区域,哪一个区域对北太平洋的影响比较重要?我们从两个方面进行了分析:首先从时间角度考虑,通过分别计算各高度场三个关键区域与北太平洋的超前关联,揭示不同关键区域对北太平洋影响的超前时间,就能确立三个关键区域对北太平洋影响的先后次序,即能更好地确立影响北太平洋的前期信号区的主次关系。通过计算各关键区域对北太平洋影响的强度,从影响强弱的角度,确立各关键区域对北太平洋影响的主次关系。

我们首先讨论高度场的超前关联特征。以中心A超前北太平洋区域*d*天为例,*i*表示北太平洋区域内的格点,*j_a*表示中心A内的格点,则两区域内格点之间的超前关联系数为

$$C_{j_a i}^d = \frac{1}{N-d} \sum_{t=d+1}^N H'_i(t) H'_{j_a}(t-d) \quad (5)$$

北太平洋区域内格点的平均关联系数为

$$\bar{C}_{i a}^d = \frac{1}{N_a} \sum_{j_a=1}^{N_a} C_{j_a i}^d \quad (6)$$

中心A与北太平洋区域之间的平均超前关联系数为

$$\bar{C}_a^d = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} \bar{C}_{i a}^d \quad (7)$$

本文以500 hPa高度场为例,作出北太平洋区域内格点与各异常关联中心内格点的平均超前关联系数随超前天数的变化图。从图4中可以看出,北太平洋与北美大陆东南部正关联中心内格点的平均超前关联系数随着超前天数的增大而不断减小,至90天后,平均关联系数基本都趋于0。与白令海峡负关联中心内格点的平均超前关联系数整体趋势也

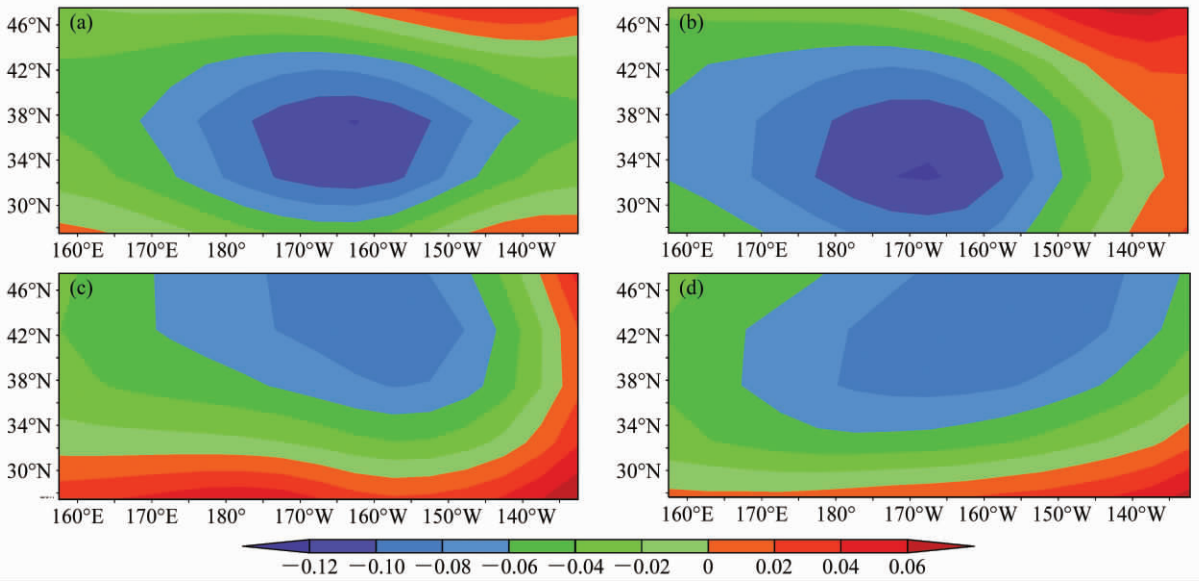


图 2 各高度场北太平洋区域内格点平均关联值分布图，其余同图 1

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for mean correlations of grids in the North Pacific Ocean

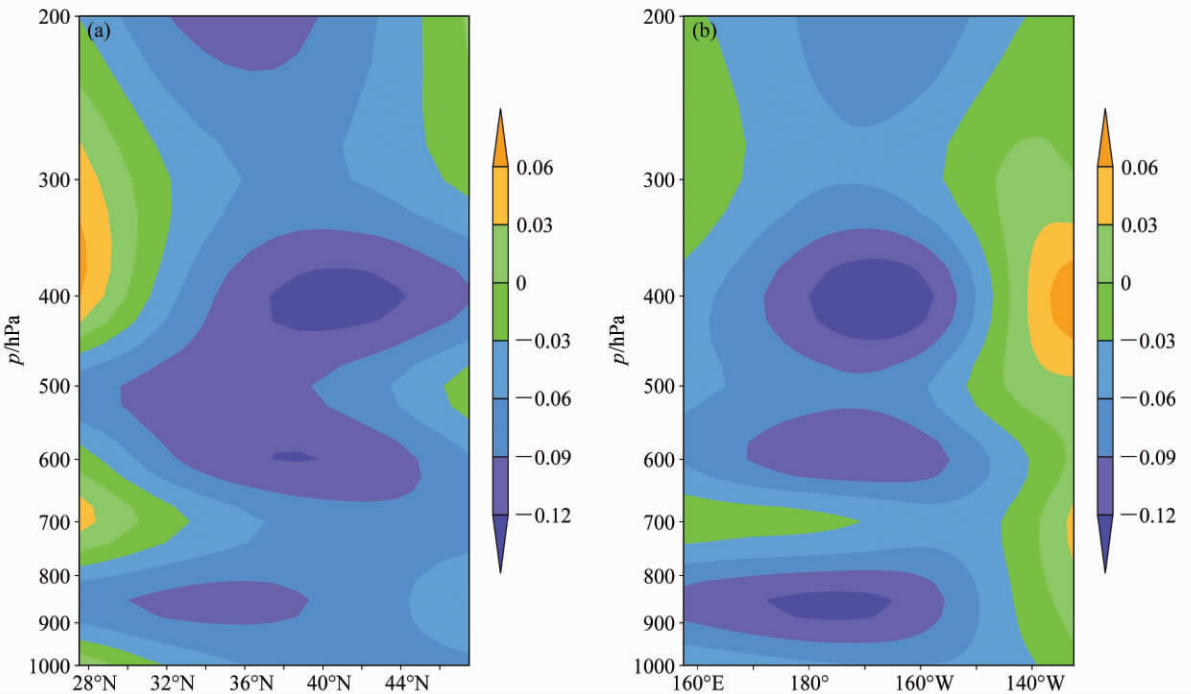


图 3 北太平洋区域内格点平均关联值在 (a) 纬圈平均、(b) 经圈平均的剖面图

Fig. 3 Cross sections of mean correlations of grids in the North Pacific Ocean: (a) Zonal mean; (b) meridional mean

是随着超前天数的增大而减小，但当超前天数为 15 天左右时，负关联随超前天数的增加而增强，至 30 天后，平均关联系数又逐渐减弱至 0。赤道中太平洋的变化趋势与白令海峡比较相似，仅当超前天数达到 90 天左右的时候，北太平洋与赤道中太平洋关联中心内格点的平均超前关联系数变为正值，这

可能是由于海洋的热容性比较大，对存储的热量等信息的释放有一个过程，从而导致一段时间以后平均超前关联系数变为正值。由以上的分析我们初步判定，三个异常关联中心与北太平洋区域之间的关联作用大致可以分为以下几种时间尺度：1~15 天，天气尺度；15~30 天，月尺度；30~90 天，季

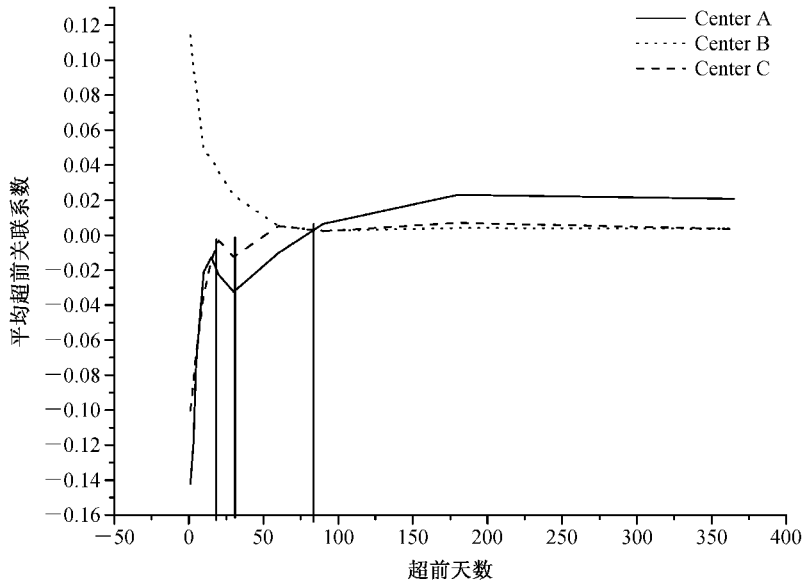


图4 500 hPa 高度场北太平洋区域内格点与各异常关联中心内格点的平均超前关联系数随超前天数的变化图

Fig. 4 Changes of proactive correlations with proactive days between grids in the North Pacific Ocean and grids in each center for 500-hPa height field

节内尺度；90~365 天，年际时间尺度。前三种尺度对应有重要的关联信息，值得我们进行深入的探讨和仔细的研究，而最后一种年际时间尺度则多体现出虚假的关联，是关联噪声的主导。因此，表 3 在计算各个格点所需的最大超前天数 d_i 的时候，超前天数的上限我们取为 90 天，即如果格点所需的实际最大超前天数超过 90 天，我们把该格点的 d_i 用 90 天来代替。

下面我们分析超前关联系数的变化与超前天数之间的关系，计算格点 i 的超前关联系数百分率 P_i 的公式为

$$P_i = \frac{\overline{C}_i^d}{\overline{C}_i} \times 100\%, \quad (8)$$

其中， \overline{C}_i^d 为当超前天数为 d 时格点 i 的平均超前关联系数， \overline{C}_i 为同步关联时的格点平均关联系数。因此 P_i 反映了各格点在超前天数为 d 的情况下的超前关联所占原来同步关联系数的百分比。当 P_i 为一定值的时候，各个格点 i 均能得到一个所需的最大超前天数 d_i (此处 d_i 是 \overline{C}_i^d 占同步关联的百分比最后一次达到 P_i 时的天数)，即当最多超前 d_i 天时，该格点的超前关联占同步关联的百分比仍能达到 P_i 以上，因此对于任一异常关联中心而言，北太平洋区域内格点所需的平均超前天数为

$$\bar{d} = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} d_i \quad (9)$$

在 P_i 一定的时候，异常关联中心所需的平均超前天数 \bar{d} 越大，说明该异常关联中心越早和北太平洋区域建立联系。关联系数的百分率与超前天数的关系，体现了格点间关联作用的稳定性强弱。显然，超前时间越长则表明关联越稳定（即格点要素在某一时刻的信息能够在要素序列中保持的时间尺度越长，这些信息能够应用于气象预测的时间尺度也越长，因此格点要素的可预测性越好），反之则相反。

本文选择了多个阈值进行检验，由表 3 可以看出，对地面气压和 700 hPa 高度场，都是位于北美大陆东南部的正关联中心所需的 \bar{d} 最大；在 500 hPa 和 200 hPa 高度场都是位于赤道中太平洋的负关联中心所需的 \bar{d} 最大，由此则可以确定在各高度场最先影响北太平洋区域的异常中心。超前时间越长说明关联越稳定，即格点要素的可预测性也越好（支蓉，2009），表 3 中从 700 hPa 高度场开始除中心 B 外的其他关联中心所需的超前天数随高度场的增高而增大，也能体现出环流系统的可预测性由低层向高层递增的特点（李建平和丁瑞强，2008；丁瑞强和李建平，2009）。中心 B 产生这一异常的原因主要是由于各格点的超前关联并不是完全随时间而减小，期间会存在一定的波动，而我们选择 d_i 的时候

表 3 各高度场每个异常关联中心平均超前天数随 P_i 的变化Table 3 Changes of mean proactive days with P_i in each center for each height field and surface pressure field

高度场	$P_i=90\%$			$P_i=80\%$			$P_i=70\%$			$P_i=60\%$		
	\bar{d}_a/d	\bar{d}_b/d	\bar{d}_c/d	\bar{d}_a/d	\bar{d}_b/d	\bar{d}_c/d	\bar{d}_a/d	\bar{d}_b/d	\bar{d}_c/d	\bar{d}_a/d	\bar{d}_b/d	\bar{d}_c/d
200 hPa	25	21	17	29	24	19	32	28	22	37	32	28
500 hPa	11	5	9	13	6	11	15	7	13	18	10	18
700 hPa	4	11	5	6	13	6	8	14	9	10	19	11
地面气压	7	35	18	8	40	19	12	44	24	20	49	27

注： \bar{d}_a ：赤道中太平洋负值中心平均超前天数； \bar{d}_b ：北美大陆东南部正值中心平均超前天数； \bar{d}_c ：白令海峡负值中心平均超前天数。

是选择 \bar{C}_i^d 占同步关联的百分比最后一次达到 P_i 时的天数，由波动带来的关联噪声会导致 \bar{d} 异常偏大的情况。

上文分析了三个异常关联中心影响北太平洋区域的时间上的先后关系，下面我们进一步确定三个异常关联中心对北太平洋区域影响强弱的主次关系：由 (7) 式可得到中心 A 与北太平洋区域之间的平均超前关联系数，若令超前天数 d 为 0，即可得到中心 A 和北太平洋之间的平均同步关联系数为：

$$\bar{C}_a = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} \bar{C}_{ia} \quad (10)$$

通过类似的计算相应也可以得到中心 B、C 与北太平洋之间的平均同步关联系数： \bar{C}_b 、 \bar{C}_c 。通过比较 \bar{C}_a 、 \bar{C}_b 和 \bar{C}_c 与 $(\bar{C}_a + \bar{C}_b + \bar{C}_c)$ 的比值大小来确定三个中心对北太平洋区域影响的强弱，结果如表 4 所示。

表 4 各高度场各中心影响强度的百分比

Table 4 Percentage of influencing intensity in each center for each height field and surface pressure field

高度场	赤道中太平洋	北美大陆东南部	白令海峡的
	负值中心	正值中心	负值中心
200 hPa	45%	32%	23%
500 hPa	44%	29%	27%
700 hPa	42%	21%	37%
地面气压	42%	10%	48%

由表 4 可知，在 700 hPa、500 hPa 和 200 hPa 高度场，都是位于赤道中太平洋区域的负关联中心所占比重最大，分别为 42%、44% 和 45%。在 700 hPa 高度场，位于白令海峡的负关联中心所占比重次之，位于北美大陆东南部的正关联中心的影响最弱；而在 500 hPa 和 200 hPa 高度场则比较相似，都是位于北美大陆东南部的正关联中心的影响最

之，位于白令海峡的负关联中心的影响最弱；在地面气压是位于白令海峡的负关联中心比重最大，赤道中太平洋负关联中心和北美大陆东南部正关联中心的影响强度依次减弱。

4 结论与讨论

本文研究了北太平洋区域高度场关联性由低层到高层的空间分布，以及对几个异常关联中心之间主次关系的确立。主要结论有以下几点：

(1) 各高度场与北太平洋区域关联比较显著的中心比较一致，且分布在三个区域：赤道中太平洋和白令海峡的负关联中心，以及北美大陆东南部的正关联中心。

(2) 三个异常关联中心（赤道中太平洋和白令海峡的负关联中心，以及北美大陆东南部的正关联中心）对北太平洋区域的综合作用是在三个高度场都能得到一个明显的负关联中心，体现出一定的正压结构特征；并且中心的位置随着高度的增高在经向上有东移的特征、在纬向上的移动则并不规则。

(3) 就三个异常关联中心而言，对北太平洋区域影响最显著的在 700 hPa、500 hPa 和 200 hPa 高度场都是位于赤道中太平洋的负关联中心，在地面气压则是位于白令海峡的负关联中心；最先影响到北太平洋区域的在地面气压和 700 hPa 高度场是位于北美大陆东南部的正关联中心；在 500 hPa 和 200 hPa 高度场是位于赤道中太平洋的负关联中心。

在研究过程中，我们也遇到一些新问题，有待进一步探索。例如，能否通过高度场要素值本身的变化，即撇开关联性来研究三个异常关联中心对北太平洋区域影响的先后及主次关系？再例如，为什么平均关联系数随超前天数的变化会在 15~30 天之间有一个波动？这些问题都值得我们作进一步的

研究和讨论。

参考文献 (References)

- 丁瑞强, 李建平. 2009. 天气可预报性的时空分布 [J]. 气象学报, 67 (3): 343-354. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2009. The temporal-spatial distributions of weather predictability of different variables [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 343-354.
- 封国林, 董文杰, 龚志强, 等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 230pp. Feng Guolin, Dong Wenjie, Gong Zhiqiang, et al. 2006. Non-linear Space-Time Distribution Theory and Methods of Observational Data (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 230pp.
- 封国林, 龚志强, 支蓉. 2008. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展 [J]. 气象学报, 66 (6): 40-53. Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong. 2008. Latest advances of climate change detecting technologies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (6): 40-53.
- 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.
- 郭冬, 孙照渤. 2005. 冬季 NPO 突变前后大气环流和我国天气气候的变化 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 180-188. Guo Dong, Sun Zhaobo. 2005. Changes of general circulation and weather and climate in China before and after the wintertime North Pacific oscillation jump [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 180-188.
- 龚志强, 封国林, 万仕全, 等. 2006. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征 [J]. 物理学报, 55 (1): 477-484. Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Wan Shiquan, et al. 2006. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (1): 477-484.
- 龚志强, 支蓉, 周磊, 等. 2008. 1-30 d 尺度温度关联网动力学统计性质研究 [J]. 物理学报, 57 (8): 716-725. Gong Zhiqiang, Zhi Rong, Zhou Lei, et al. 2008. Analysis of dynamical statistical characteristics of temperature correlation networks of 1-30 d scales [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (8): 716-725.
- 侯威, 封国林, 高新全. 2005. 基于复杂度分析冰芯和石笋代用资料时间序列的研究 [J]. 物理学报, 54 (5): 477-483. Hou Wei, Feng Guolin, Gao Xinquan. 2005. Investigation on the time series of ice core and stalagmite based on the analysis of complexity [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 54 (5): 477-483.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82: 247-267.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437-471.
- 李建平, 丑纪范. 1997. 大气吸引子的存在性 [J]. 中国科学 (D 辑), 27 (1): 91-98. Li Jianping, Chou Jifan. 1997. Existence of the atmosphere attractor [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 27 (1): 91-98.
- 李建平, 丁瑞强. 2008. 短期气候可预测时限的时空分布 [J]. 大气科学, 32 (4): 975-986. Li Jianping, Ding Ruiqiang. 2008. Temporal-spatial distributions of predictability limit of short-term climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 975-986.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. Science, 266: 634-637.
- Li Chongyin, LI Guilong. 2000. The NPO/NAO and interdecadal climate variation in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 17: 555-561.
- 李崇银, 李桂龙. 1999. 北大西洋涛动和北太平洋涛动的演变与 20 世纪 60 年代的气候突变 [J]. 科学通报, 44 (16): 1765-1769. Li Chongyin, LI Guilong. 1999. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 44 (16): 1765-1769.
- 李勇, 何金海, 姜爱军. 2007. 冬季西太平洋遥相关型的环流结构特征及其与我国冬季气温和降水的关系 [J]. 气象科学, 27 (2): 119-125. Li Yong, He Jinhai, Jiang Aijun. 2007. Circulation structure features of western Pacific teleconnection pattern in winter and their relation with China's temperature and precipitation in winter [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (2): 119-125.
- 施能. 1996. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系 [J]. 气象学报, 54 (6): 675-693. Shi Neng. 1996. Secular variation of winter atmospheric teleconnection pattern in the Northern Hemisphere and its relation with China's climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (6): 675-693.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 784-812.
- Wang H J. 2005. The circum-Pacific teleconnection pattern in meridional wind in the high troposphere [J]. Adv. Atmos. Sci., 22: 463-466.
- Yan H S, Wan Y X, Chen J P. 2005. Interannual and interdecadal variations in atmospheric circulation factors and rainfall in China and their relationship [J]. Acta Meteor. Sinica, 19 (2): 251-261.
- 支蓉, 龚志强, 郑志海, 等. 2009. 基于矩阵理论的全局温度资料的尺度性研究 [J]. 物理学报, 58 (3): 751-758. Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Zheng Zhihai, et al. 2009. Scale analysis of global temperature based on correlation matrix theory [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (3): 751-758.