

全球环流系统关联性的时空演化特征研究^{* 1}

季 飞¹ 支 蓉^{2,3} 龚志强² 封国林^{2,3}
JI Fei¹ ZHI Rong^{2,3} GONG Zhiqiang² FENG Guolin^{2,3}

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

3. 北京师范大学全球变化与全球科学系统研究院, 北京, 100875

1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

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

3. *College of Global Change and Earth System Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

2009-10-12 收稿, 2010-03-01 改回.

Ji Fei, Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Feng Guolin. 2011. Analysis of temporal and spatial characteristics of correlations between the global circulation systems. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(6):1038-1045

Abstract The correlation matrixes are constructed based on the NCEP/NCAR global height field data and the surface pressure data and the characteristics of these two matrixes are analyzed. The results show that the correlations in all levels of height field are better in the middle-low latitudes regions and descend to the middle-high latitudes regions, presenting the characteristics of quasi-zonal distribution; in the vertical direction, the correlations in the low levels are weaker and become more and more stronger with the increase in height; and there is always a negative correlation center in all levels of height field in the north Pacific region, reflecting a certain degree of particularity. The results of the delayed correlation show that the correlation is decreased with the increasing in the delayed days, the change of correlation gradually flats when the delayed time is 15 days and there is an obvious turning point at the time of 60 days. The fact that the correlation decreased with the increasing in delayed days and existence of the decay critical point provide a theory reference for the numerical prediction of 2 weeks or longer time scale. The decay rate of correlation in the circulation system reflects the feature that the higher the latitude is and/or the lower the level is the stronger the correlation is. Changes over time in the global average correlations for the three height fields and the surface pressure field are almost the same with abrupt changes occurred during 1978–1982 and 1996–1998.

Key words Correlation matrixes, Spatial-temporal evolution, Delayed correlation, Abrupt change

摘 要 利用 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序列关联性的时空演变特征。结果表明, 各层次高度场的关联性在中低纬度区域较好, 并向中高纬度地区逐步递减, 呈准带状分布; 垂直方向上, 低层的关联性较弱, 随着高度升高关联性逐渐增强; 北太平洋区域从低层至高层大气中均存在一个较强的负关联中心, 体现出了一定的特殊性。延迟关联的结果表明, 随着延迟天数的增加关联性逐渐衰减, 在延迟天数为 15 d 时关联系数的变化趋于平缓, 在延迟天数约为 60 d 时存在显著的转折。环流系统关联性随时间衰减及临界点的存在为 2 周以上尺度的数值预报提供了理论参考。环流系统内部关联的衰减速度表现出低纬度地区向中高纬度地区加快, 高层向低层加快的特征。地面气压和 3 个高度场全球平均关联系数随时间的变化基本保持一致, 并且在 1978—1982 和 1996—1998 年发生了明显的跃变。

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金项目(40930952、41105055 和 41175067)、国家科技支撑计划(2009BAC51B04、2007BAC29B01)。

作者简介: 季飞, 主要从事全球气候变化研究。E-mail: 7532095@163.com

通讯作者: 龚志强, 主要从事气候系统关联结构复杂性研究、气候突变及极端气候事件监测技术研究。E-mail: gzq0929@126.com

关键词 关联矩阵, 时空演变, 延迟关联, 跃变

中图法分类号 P46

1 引言

气候系统是一个高度非线性、多层次、强耗散的复杂系统(杨培才等, 2005; 封国林等, 2003)。在太阳辐射和大气环流作用下, 气候系统内部发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(李建平等, 1997; 侯威等, 2005; 龚志强等, 2006)。如何衡量气候系统内部结构的复杂性, 是当前气候系统复杂性研究的一个新的科学问题。Tsonis 等(2006, 2008)构建了气压关联网, 并分析其长程和短程相关的变化, 通过分析网络结构特征量实现对环流系统结构复杂性的度量。封国林等(2006, 2008)、龚志强等(2008)、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 4 种要素的关联网, 比较分析了 4 种要素内部关联的时空演变特征。

已有的研究表明, 当某种特定的持续性“天气流型”或大气环流持续性异常信号出现时, 某种异常天气会持续性发生, 而正是这种持续性, 使得超过逐日天气预报时效理论上限的延伸期(10—30 d)预报变得具有潜在可能(丁一汇, 1989, 1997)。目前欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)和中国国家气候中心(NCC)等在业务上均设法改进 10—30 d 的数值天气预报。目前面临的一个共同问题是, 10—30 d 时间尺度内, 其可预测性随着时间尺度的延长而减弱, 减弱的时空分布特征等问题还没有解决。解决这些问题能够为当前 10—30 d 尺度的数值天气预报提供一些理论基础。气候系统可预测性的变化必然和系统内部的时空关联紧密联系(廉毅等, 1998; 廉毅, 2007)。鉴于上述原因, 支蓉等(2009)研究了地表温度场关联性的空间分布特征及其与时间延迟的关系, 发现温度场关联性存在约 60 d 和 365 d 两个转折尺度。但目前这方面的研究没有能够很好地揭示 10—30 d 高度场关联性变化与延迟时间的关系, 更未能从三维空间和时间演变的角度给出四位一体的关联性与延迟时间的关系图像。

基于此, 本文采用 NCEP/NCAR 全球高度场

和地面气压资料, 运用矩阵理论, 从全局角度来讨论全球高度场和地面气压序列的关联性及其时空演变的多尺度特征, 尝试从实际资料中挖掘与气候系统关联性较强的特征时间尺度, 旨在更好的理解气候系统的关联结构特征, 为认识 10—30 d 无间隙预报提供思路。

2 资料和方法

2.1 资料

资料来源于 NCEP/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(Kalnay, et al, 1996; Kistler, et al, 2001), 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, $H_i(j)$, $i = 1, 2, \dots, 2592$; $j = 1, 2, \dots, 21170$ (每年按 365 d, 剔除闰年的 2 月 29 日)。为滤除资料中包含的季节振荡信号, 对数据做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 $H_i(t)$, $i = 1, 2 \dots M$, $t = 1, 2 \dots N$, N 为样本量, 进行标准化处理:

$$H'_i(t) = \frac{H_i(t) - \langle H_i \rangle}{\sigma_i} \quad (1)$$

式中, $\langle H_i \rangle$ 为平均值, $\sigma_i = \sqrt{\sum_{t=1}^N (H_i(t) - \langle H_i \rangle)^2 / N}$ 为标准差。关联矩阵的矩阵元为 C_{ij} :

$$C_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N H'_i(t) H'_j(t) \quad (2)$$

$$i = 1, 2 \dots M, j = 1, 2 \dots M$$

由此构建得到关联矩阵, 其中 $-1 < C_{ij} < 1$, $C_{ij} = C_{ji}$, $C_{ij} = 1 (i = j)$, $C_{ij} = 1$ 表示完全正关联, $C_{ij} = -1$ 表示完全负关联, $C_{ij} = 0$ 表示不存在关联。

在此基础上计算得到关联矩阵, 由此计算全球 2592 个格点各自的平均关联系数:

$$\bar{C}_i = \frac{1}{2591} \sum_j C_{ij} \quad (3)$$

$$i = 1, 2 \dots 2592, j = 1, 2 \dots 2592, i \neq j$$

由 $\bar{C}_i$ 可以得到格点平均关联系数的全球平均关联系数 $\bar{C}_{\text{global}}$:

$$\bar{C}_{\text{global}} = \frac{1}{2592} \sum_{i=1}^{2592} \bar{C}_i \quad (4)$$

根据已有研究(支蓉等, 2009; Wallace, et al, 1981), 格点间既存在有实际意义的正、负关联, 也存在大量的虚假关联。平均关联系数 $\bar{C}_i$ 综合考虑了显著正、负关联和关联系数近似为 0 的虚假关联的影响, 是格点间关联作用的综合体现。因此, 如果格点间存在显著正关联(如邻近格点间的关联等), 平均关联系数值就为正且异常偏大; 如果格点间存在显著的负关联(如太平洋北美遥相关等), 则平均关联系数为负且异常偏小。全球平均关联系数 $\bar{C}_{\text{global}}$ 是各个格点平均关联系数累加后的平均值, 反映了全球格点关联系数的平均状况。

3 结果和分析

3.1 高度场关联性的空间分布

从 200、500、700 hPa 和地面气压关联系数的全球分布(图 1)可以看出, 200 hPa 高度场格点间的关联性最好、地面气压格点间的关联性最差, 即格点平均关联系数值随高度的增大而变大。随着高度场的变化, 低纬度区域关联系数值的变化比其他区域更显著。格点平均关联系数在中低纬度地区以外的区域变化不显著, 但高度场和地面气压格点平均关联系数的分布在北太平洋区域(27.5°—47.5°N, 157.5°E—132.5°W)均存在明显的负值中心。因此, 北太平洋和赤道中低纬度是高度场内部两个比

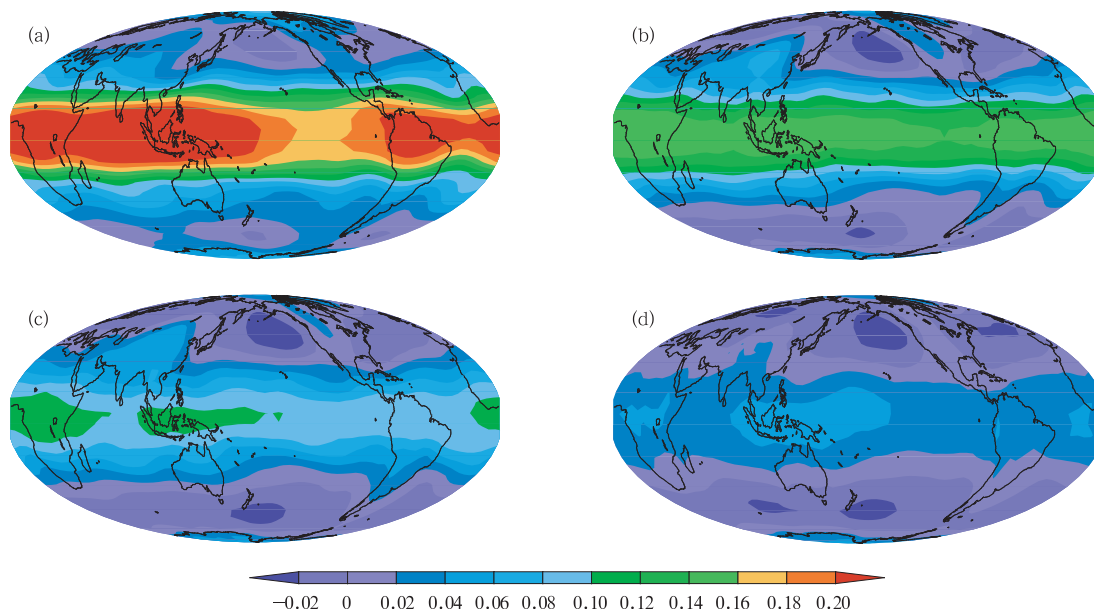


图 1 高度场格点平均关联系数全球分布

(a. 200 hPa, b. 500 hPa, c. 700 hPa, d. 地面气压)

Fig. 1 Global distributions of the mean correlations between the grids for the height fields of

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) the surface pressure field

较特殊的区域, 这两块区域对高度场整体关联性的影响较显著。此外, 高度场关联系数的分布沿着纬圈呈准带状分布, 中纬度系统和低纬度系统分界线在南北纬 27.5°附近。结合丁瑞强等(2008)的工作, 中高纬度和低纬度系统的分界为南北纬的 27.5°附近。

3.2 关联系数与延迟天数的关系

在分析高度场同步关联的基础上, 进一步讨论高度场的延迟关联特征。若延迟天数为 d , 则对 M

维多变量数据集 $H_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$, $t = 1, 2, \dots, N-d$, 得到关联矩阵元 C_{ij}^d

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

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, M$$

由式(5)进一步得到全球平均关联系数 $\bar{C}_{\text{global}}^d$ 。

关联系数减弱程度与延迟天数的关系, 体现了格点间关联作用的稳定性强弱。显然, 关联性随时间延迟减弱越慢则表明关联越稳定(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,这些信息则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。

本文以 500 hPa 高度场为例,给出其格点延迟关联系数平均值的全球分布(图 2)。格点延迟关联系数平均值的空间分布与图 1 中同步关联的全球分

布类似。中低纬度区域的格点延迟关联系数均值随延迟天数的变化比其他区域要显著,北太平洋海域依然存在一个负值中心,其平均值的大小和空间作用范围随延迟天数的增大而不断变小。因此,随着延迟天数的增加,格点间的关联作用逐渐减弱,但格点关联的空间分布型变化较小。

图 3a 中全球关联系数平均值随延迟天数变化

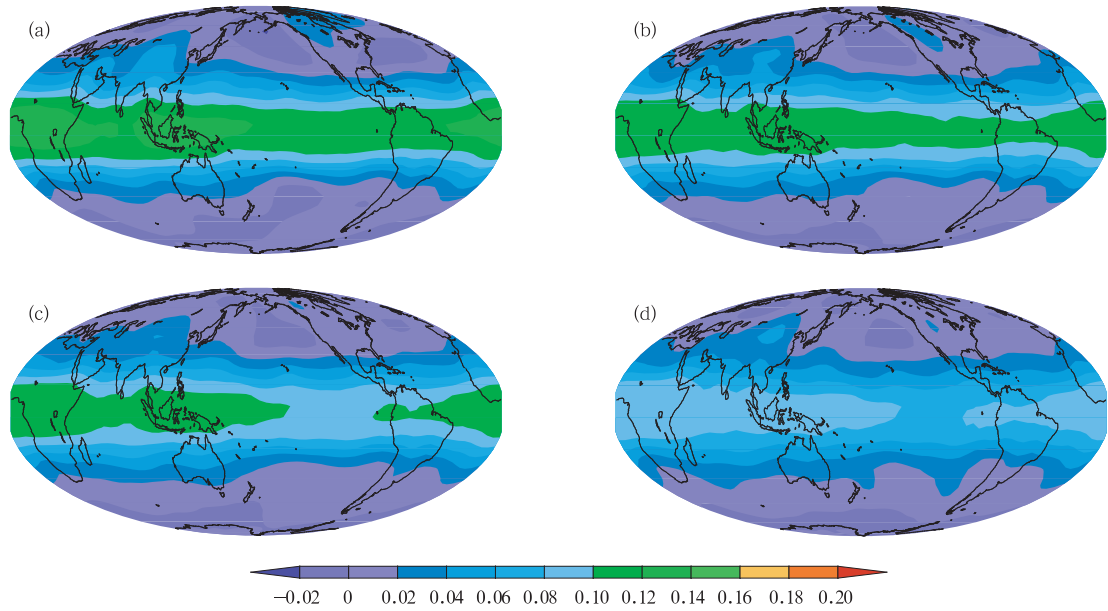


图 2 500 hPa 高度场格点平均关联系数随延迟天数变化的全球分布
(a. 10 d, b. 60 d, c. 90 d, d. 180 d)

Fig.2 Global distributions of the mean correlations between the grids in the 500 hPa height field for the delayed days of (a) 10 d, (b) 60 d, (c) 90 d, and (d) 180 d

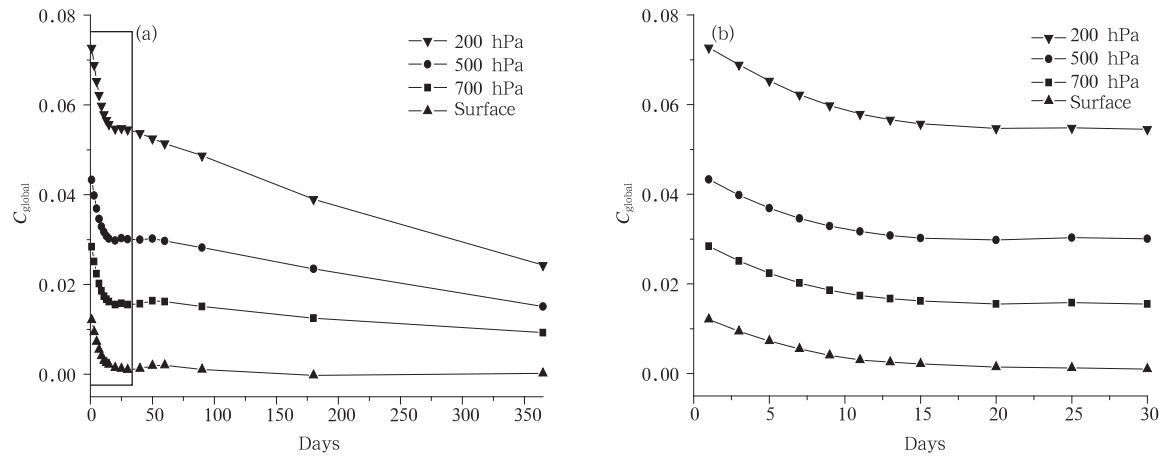


图 3 全球平均关联系数随延迟天数的变化
(a. 1—365 d 的变化, b. (a) 中方框的局部放大)

Fig.3 Changes of the global mean correlations with the delayed days for the various height fields
(a) the days are for 1—365, (b) the days are for 1—30

的图像很好地对应了图 1 和 2 的内容:全球平均关联系数随着高度的增高而增大,随延迟天数的增大而不断减小。整体而言,60 d 左右是显著的转折点。图 3b 中,1—30 d 尺度关联系数平均值随延迟天数的增大不断减小,并且,延迟 15 d 以后趋于平缓,这一临界点则可能对应了 10—15 d 的低频振荡。15 d 这个转折点,可能对应 10—15 d 准 2 周振荡的下界,换言之,10—15 d 振荡在环流系统内部的关联性中也有所体现。因此,高度场整体关联性的变化进一步解释了当前数值预报的可预报性为 2 周的原因所在。

下面进一步分析关联系数的变化与延迟天数的定量关系。由式(7)计算格点 i 的延迟关联系数的下降百分率 P_i

$$P_i = \frac{\overline{C}_i^d - \overline{C}_i}{\overline{C}_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $\overline{C}_i^d$ 为当延迟天数为 d 时格点 i 的平均延迟关联系数, $\overline{C}_i$ 为没有延迟的情况下的格点平均关联系数。因此, P_i 反映了各格点在延迟天数为 d 的情况下相对于原来没有延迟时关联系数增加或减少的百分比。图 4 给出几种百分率对应的格点的延迟天数的空间分布。图 4a 为 $P_i = 20\%$ 时,各格点对应不同的延迟天数的全球分布。为了压缩篇幅,这里主要

以 500 hPa 高度场为例,并且选择了多个阈值进行试验。

由图 4 可以看出,关联系数衰减百分率为 20% 以内时,全球格点的衰减速度均比较快。欧洲西部和亚洲南部季风区延迟天数为 12—15 d, 30°S 附近的西印度洋海域、澳大利亚西南部、40°S 附近的太平洋海域及南美洲东部地区的延迟天数为 10—12 d, 全球其余大部分区域关联系数迅速下降 20% 对应的延迟天数均不大于 8 d。延迟天数不大于 8 d 时,全球范围内关联系数快速下降,从宏观整体角度体现了全球格点间相互作用的迅速减弱,从而解释了当前数值天气预报在 7 d 内精度相对较高的可能原因。此外,当衰减百分率为 30% 时,赤道中东太平洋区域和赤道大西洋西部对应的延迟天数为 12—15 d,在亚洲南部,菲律宾区域、印度洋东部和非洲北部等地区延迟天数则大于 60 d。衰减百分率为 40% 和 50% 时,低纬度区域的延迟天数大于 90 d,而南北半球中高纬度大部分地区的延迟天数约为 10 d。原因可能在于低纬度地区高度场的一致性相对较好,主要体现同步变化,因此,很难出现大幅度的关联下降现象。而中高纬度地区存在大量遥相关,这些作用会随着延迟时间的增加逐渐减弱。因此,当衰减百分比为 40%、50% 等值时,对应的延

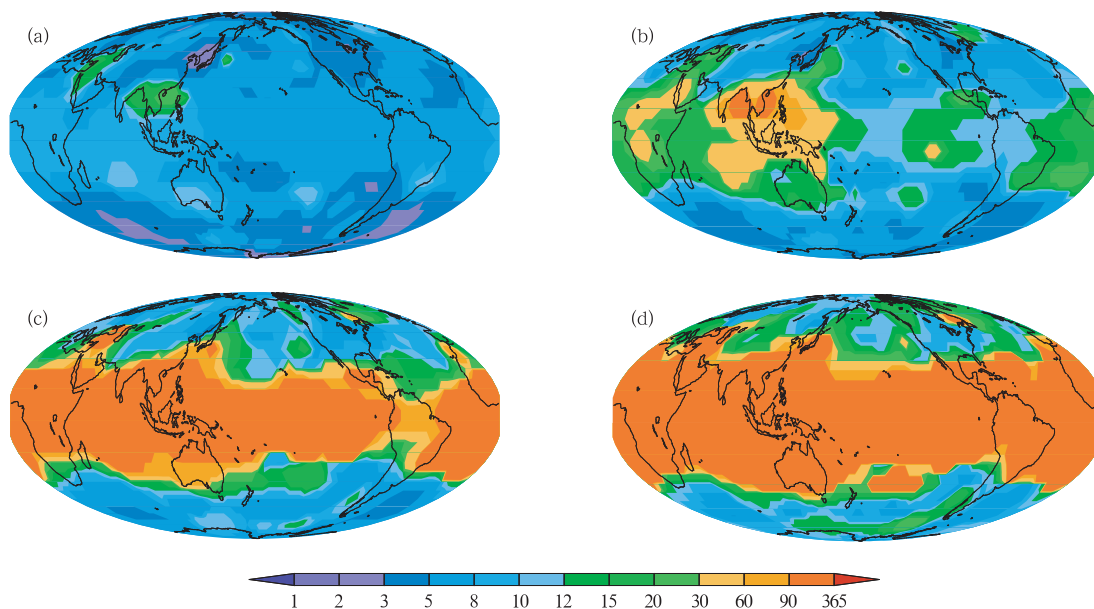


图 4 500 hPa 高度场关联系数衰减百分率对应延迟天数的全球分布
(a—d 分别为衰减百分率为 20%, 30%, 40%, 50% 时的延迟天数全球分布)

Fig. 4 Global distributions of the mean delayed days with the decay rate P_i of (a) 20%, (b) 30%, (c) 40% and (d) 50% for the 500 hPa height field

迟天数均有所增加。由此可知,对于低纬度地区,赤道中东太平洋和亚洲南部及菲律宾等区域是关联变化敏感的区域,而中高纬度区在尺度较大时对应了关联作用的敏感区,因此要结合不同时间尺度有针对性的研究。

图 5 为高度场和地面气压衰减百分率对应延迟天数的纬圈平均。可以看出,对于不同的高度场,相同衰减百分率对应的延迟天数均表现为以赤道为对称轴的准对称分布,并且,从赤道向两侧递减。随着高度的增加,相同延迟天数对应的南北半球的纬度宽度不断增加。结合李建平等(2008)关于环流系统

可预测性的研究工作可知,通过关联系数的宏观整体变化可以进一步验证环流系统的可预测性从低纬度向中高纬度区域递减,由低层向高层递增的结论。值得注意的是,图 5a 地面气压延迟天数的分布特征则不是准对称分布,主要差异体现在北半球相对南半球,延迟天数的值偏低,50°N 附近存在一个谷值,45°S 附近则存在一个峰值,这种差异可能是由于南北半球的海陆差异引起的。因此,关联性的宏观整体变化也体现出来,可预测性与下垫面有重要联系,总体而言,海洋的均一性较好,其可预测性要显著高于陆地。

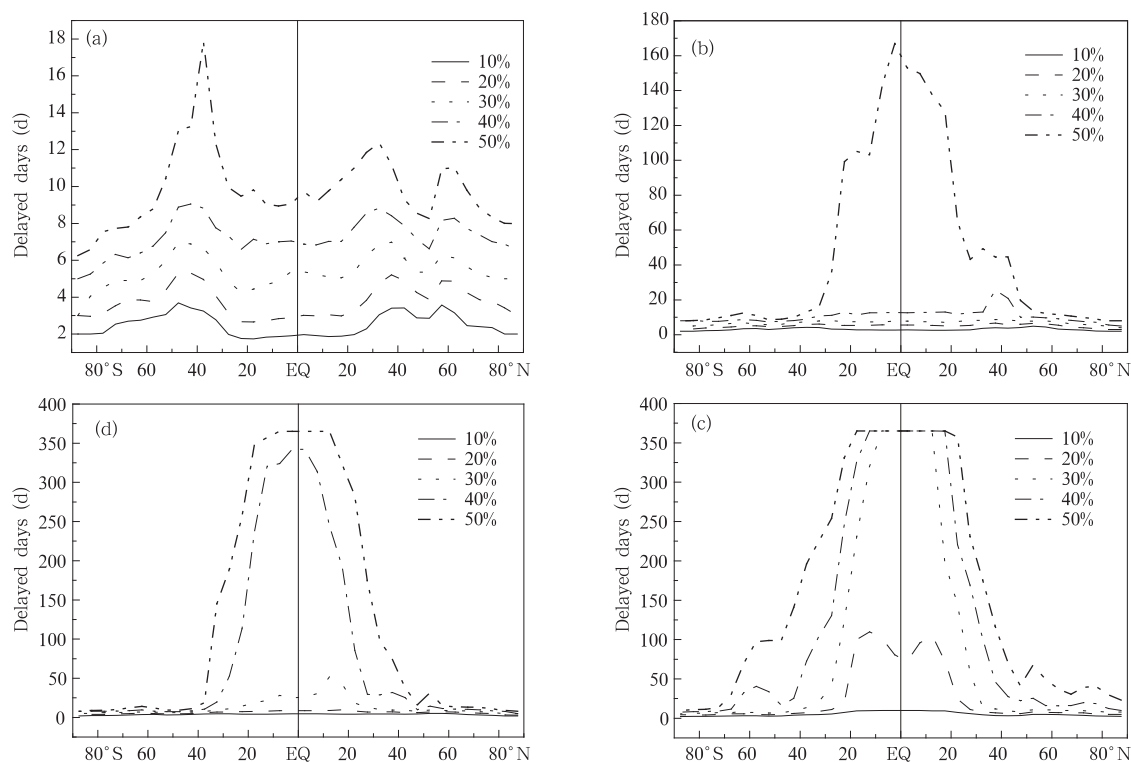


图 5 关联系数衰减百分率对应延迟天数的纬圈平均

(a. 地面气压, b. 700 hPa 高度场, c. 500 hPa 高度场, d. 200 hPa 高度场)

Fig. 5 Latitudes vs. the mean delayed days with the various decay rate P_i for the height fields of

(a) surface pressure field, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, (d) 200 hPa

3.3 关联系数随时间的演变

前面主要讨论了高度场关联性的空间分布,下面分析其时间变化特征。取长度为 5 a 的滑动窗口,滑动步长取为 2 a,研究关联系数随时间的演变。由图 6 可以看出,3 个高度场全球平均关联系数随时间演变的趋势总体比较一致,地面气压平均关联系数的时间演变略有差异。总体而言,关联系数从

低层向高层递增,1978—1982 年有一次快速的下降,1983—1996 年关联系数均比较低,1996—1998 年则有一次快速的上升,这两次跳跃的时间恰好对应了气候系统的两次突变(图 6),因此,高度场内部关联性的调整对气候系统的转折或突变具有一定的响应。下面进一步分析两次转折主要是由哪些区域的关联系数变化导致的。

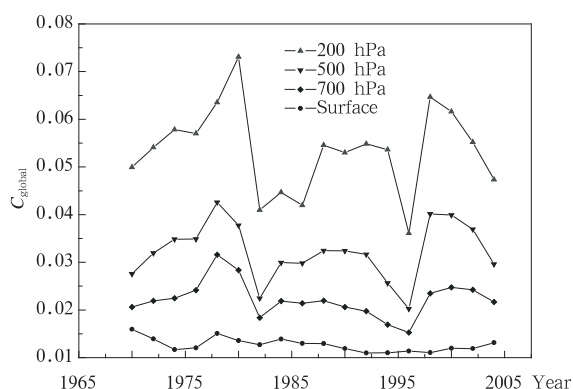


图6 全球平均关联系数随时间的变化

Fig. 6 Changes of the global mean correlations with time for the different pressure layers

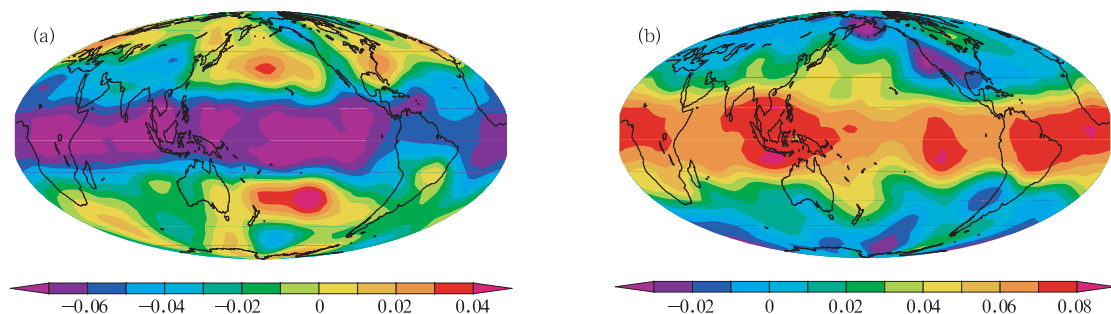


图7 500 hPa 高度场转折前后格点关联系数的差值分布

(a. 1978—1982 年, b. 1996—1998 年)

Fig. 7 Distributions of the difference of the mean correlations between (a) 1978–1982, and (b) 1996–1998 in the 500 hPa height field

层的三维空间分布及多尺度特征,确定不同衰减百分率对应格点延迟天数的分布,最后分析了高度场内部关联性的时间演变。主要结论有以下几点:

(1) 就高空高度场关联系数的空间分布而言,关联性的在中低纬度区域较好,并向中高纬度地区递减,呈准带状分布特征;垂直方向上,关联性随着高度增加逐渐增强,北太平洋区域从低层至高层均存在一个较强的负值中心,体现出一定的特殊性。时间延迟在一定程度上减弱了高度场和地面气压内部的关联性,总体而言,随着延迟天数的增加,关联性逐渐减弱,但关联系数的空间分布型变化不大。当延迟天数为 60 d 时,高度场关联存在转折点;10—30 d 尺度,延迟天数 15 d 时关联系数的变化趋于平缓,这一转折点可能和 10—15 d 的准 2 周振荡相联系。

(2) 从关联衰减百分率对应的延迟天数的空间分布及纬圈平均可以知道,相同衰减百分率对应的

以 500 hPa 高度场为例,分别做出 1978 和 1982 年所对应的格点平均关联系数差值的全球分布(图 7a)。可以看出,全球平均关联系数在 1978—1982 年的跃变主要是由于中低纬度区域的格点平均关联系数值的下降所引起的。值得注意的是,北太平洋和南太平洋各有一块区域呈现出相反的变化,这说明北太平洋和南太平洋与其他区域间的作用在环流系统中具有一定的独立性。同时由图 7b 也可以看出,造成全球平均关联系数在 1996—1998 年跃变的原因与造成 1978—1982 年跃变的原因基本类似。

4 结论和讨论

本文讨论了全球高度场内部关联性由低层到高

延迟天数,低纬度区域较大,高纬度区域较小,低层较小,高层较大。因此,随着时间延迟的增加,环流系统内部关联的衰减速度表现为从低纬度地区向中高纬度地区加强,从高层向低层加强的特征。

(3) 地面气压和 3 个高度场全球平均关联系数随时间的变化基本保持一致,并且在 1978—1982 和 1996—1998 年附近发生了明显的跃变,这种跃变主要和低纬度区域关联性的减弱相联系。因此,环流系统对气候系统的关联性以及对气候系统的突变有一定的响应;此外,在两个转折期北太平洋关联性表现出的相反特征,一定程度说明该区域在环流系统中具有一定的独立性。

通过对高度场和地面气压关联性特征的初步分析,我们对环流系统内部格点间的关联作用有了一个宏观整体的理解,延迟关联的分析为 10—30 d 尺度的延伸期预报和短期气候预测等提供了一定的理论依据。支蓉等(2009)的工作中分析了海表温度场

关联性的空间结构和多尺度特征,本文分析了以高度场为代表的环流系统的关联特征,但气候系统是一个整体,因此,将在下一步工作中分析温度场和高度场间的耦合关联作用的时空演变特征,进而对气候系统内部的关联结构特征有更深入、更全面的理解。

致谢:研究过程中得到了曹鸿兴研究员的指导,在此表示感谢!

参考文献

- 丁瑞强, 李建平. 2008. 混沌系统可预报期限随初始误差变化规律研究. 物理学报, 57(12): 86-91
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析. 北京: 科学出版社, 292pp
- 丁一汇. 1997. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京: 气象出版社, 562pp
- 封国林, 董文杰. 2003. 集合预报物理基础的探讨. 物理学报, 52(9): 243-249
- 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. 北京: 气象出版社, 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. 气象学报, 66(6): 40-53
- 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. 物理学报, 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. 物理学报, 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. 物理学报, 54(5): 477-483
- 李建平, 丑纪范. 1997. 大气吸引子的存在性. 中国科学 D 辑, 27(1): 91-98
- 李建平, 丁瑞强. 2008. 短期气候可预报期限的时空分布. 大气科学, 32(4): 975-986
- 廉毅, 安刚. 1998. 东亚季风、El nino 与中国松辽平原夏季低温关系初探. 气象学报, 56(6): 724-735
- 廉毅. 2007. 北太平洋涛动与东亚季风的相关研究. 地理科学, 27(增刊): 19-26
- 杨培才, 周秀骥. 2005. 气候系统的非平稳行为和预测理论. 气象学报, 63(5): 556-570
- 支蓉, 龚志强, 郑志海等. 2009. 基于矩阵理论的全球温度资料的尺度性研究. 物理学报, 58(3): 751-758
- Kalnay E, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-472
- Kistler R, Kalnay E, Collins W. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. Bull Amer Meteor Soc, 82: 247-268
- Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J. 2006. What do networks have to do with climate? Bull Amer Meteor Soc, 87: 585-595
- Tsonis A A, Kyle L S. 2008. The role tele-connection in atmosphere system. J Climate, 21: 2990-3001
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Tele-connections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 109: 784-812