

时间滞后对全球温度场关联性的影响*

支蓉^{1)2)†} 龚志强¹⁾ 王启光²⁾ 熊开国²⁾

1) (中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

2) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

(2010年11月3日收到; 2011年2月28日收到修改稿)

基于美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心以及欧洲中期天气预报中心发布的再分析资料, 构建了考虑时间滞后情况下的全球温度场关联矩阵, 分析了时间滞后对全球温度场关联性时空特征的影响. 结果表明: 随着滞后时间的增加, 全球温度场的关联性总体呈逐渐减弱的趋势, 但对应不同的滞后时间其规律也不同, 在滞后 1—30 d 的情况下, 可根据全球平均关联系数 \bar{C}_{gh} 的下降快慢大体将其划分为滞后 1—7 d, 8—20 d 和 21—30 d 三个阶段. 在滞后 8—20 d 的情况下, \bar{C}_{gh} 表现出明显的不稳定特征, 这从另一角度解释了 10—30 d 延伸期预报困难的可能原因. 温度场关联系数的空间分布没有随滞后时间的增加发生明显变化, 合成分析表明其差值的空间分布总体呈沿纬向的带状分布, 北半球中纬度的亚洲大陆大部以及赤道中东太平洋地区的关联系数随滞后时间的变化趋势分别与同纬度的其他地区相反.

关键词: 温度场, 关联矩阵, 时间滞后

PACS: 92.60.Wc

1. 引言

大气是一个复杂的非线性系统, 由于其内在的随机性^[1-4], 它的预报时效有一定的范围, 超出这个范围则预报将完全失去技巧. 大气系统存在可预报性是其固有的属性, 是客观存在的. 确定和估计这种预报时效的大小、探索造成可预报时限的物理原因、研究误差增长和传播的规律、寻找延长模式可预报时效的途径等构成了可预报性理论研究的主要内容. 半个世纪以来, 通过大气科学家们的探索和分析研究^[5-7], 人们对大气运动可预报性问题的认识有了显著的提高. 然而由于问题本身的难度和复杂性, 关于气候系统可预报性仍有许多重要问题没有解决. 目前在定量估计大气可预报时效研究中使用最多的方法主要有以下两种^[8-13]: 一种是利用数值模式进行数值实验的方法, 另一种是利用非线性动力系统理论的方法. 一般认为逐日天气可预报时效的理论上限是两周, 但必须明确指出的是, 逐日天气预报的时效超过了理论的上限(如两周), 并

不意味着超过理论上限以后的大气运动没有可预报的分量. 对 30 d 以上的月季气候预测而言, 初值的信息逐渐衰减, 可预报信号主要来自于气候系统中的一些缓慢变化的外界强迫(如海温、海冰、土壤湿度、雪盖范围等). 而对于 10—30 d 的延伸期预报, 初值信息和外界强迫均有很重要的影响, 也正是因此 10—30 d 的延伸期预报显得尤为困难. 就国际气象科学发展而言, 10—30 d 延伸期预报的科学基础还处于探索研究阶段.

在大气环流及气候研究中, 经常计算序列之间的相关系数并用相关场来揭示大气波动^[14]. 在短期气候变化及其预测研究领域, 由于研究对象间关系的复杂性, 大量分析工作仍以线性相关为依托来进行^[15-18]. 近年来, 随机关联矩阵在复杂系统关联性研究中的应用越来越受到科学工作者的关注, 被广泛应用于量子混沌、经济、交通、因特网等领域^[19, 20]. 此外, 在气候领域也逐渐引入了关联矩阵分析方法. 例如, Santhanam 等^[21]应用该方法研究了月平均海表气压场的关联信息, 并与传统的经验正交函数分解、长程相关指数、Levy 指数等进行比较,

* 国家自然科学基金(批准号: 40930952, 40875040)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB950504)和国家科技支撑计划(批准号: 2007BAC29B01)资助的课题.

† E-mail: z_rongphy@126.com

进而分析了海表气压场真实关联的差异性;龚志强等^[22]基于该方法构建温度关联网络并对其动力学统计性质进行了研究;文献[23—25]应用随机关联矩阵分析了全球温度场关联的时空演化特征等.

本文基于美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的逐日平均温度再分析资料(地面资料)和关联矩阵分析方法研究时间滞后情况下全球温度场关联性的时空变化规律,尝试从温度场资料本身寻找气象要素在时间尺度上的相关方面是否存在较明显的分界线,从而深入了解10—30 d延伸期预报有关问题,并希望能为针对不同气象要素、不同时效的预报采用的方法和策略提供参考.

2. 资料和方法

2.1. 资料

温度资料来源于NCEP/NCAR对全球1948年—2005年的气象资料进行再分析形成的逐日平均温度资料(地面资料),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,观测序列长度为21170,温度序列为 $T_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 2592; t = 1, 2, \dots, 21170$). 由其中的1971年—2000年(共30 a,序列长度为1950)逐日平均温度资料计算得到格点温度基准序列 $\bar{T}_i(l)$,

$$\bar{T}_i(l) = \frac{1}{30} \sum_{\text{mod}(k, 365) = l} T_i(k) \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; k = 1, 2, \dots, 1950; l = 1, 2, \dots, 365). \quad (1)$$

为滤除日温度资料中包含的季节变化,对数据做距平处理得到距平序列 $T'_i(t)$,

$$T'_i(t) = T_i(\text{mod}(t, 365)) - \bar{T}_i(l) \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; t = 1, 2, \dots, 21170; l = 1, 2, \dots, 365). \quad (2)$$

本文以下研究均基于 $T'_i(t)$ 进行.

目前应用比较广泛的全球再分析资料除了NCEP/NCAR联合发布的再分析资料外,还有ECMWF发布的ERA40再分析资料.近几年有许多研究从各种不同的角度对这两套资料进行了比较^[26—28].鉴于这两种再分析资料存在着明显的差异,各有优缺点,因此本文采用ERA40再分析资料对由NCEP/NCAR再分析资料得到的研究结论进行

了验证.本文所用ERA40再分析资料长度为1958年—2001年,处理方法与NCEP/NCAR再分析资料相同.本文的研究发现,两套资料的结果具有较强的一致性,同时也说明了本文结论的可信度.由于篇幅限制,文中只列出两套资料计算的部分结果.

2.2. 研究方法

首先对 $T'_i(t)$ 进行标准化处理^[29],

$$T''_i(t) = \frac{T'_i(t) - \langle T'_i \rangle}{\sigma_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; t = 1, 2, \dots, 21170), \quad (3)$$

其中 $\langle T'_i \rangle$ 为 $T'_i(t)$ 的时间平均值, σ_i 为标准差,

$$\sigma_i = \sqrt{\langle T'^2_i \rangle - \langle T'_i \rangle^2}.$$

设滞后天数为 t_d ,考虑时间滞后的关联矩阵元 C_{ij} 表示为

$$C_{ij} = \frac{1}{21170 - t_d} \sum_{t_i=1}^{21170-x} \sum_{t_j=x+1}^{21170} T''_i(t_i) T''_j(t_j) \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; j = 1, 2, \dots, 2592). \quad (4)$$

格点 i 的平均关联系数 \bar{C}_i 表示为

$$\bar{C}_i = \frac{1}{2592} \sum_j C_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, 2592; j = 1, 2, \dots, 2592). \quad (5)$$

全球平均关联系数 \bar{C}_{glob} 表示为

$$\bar{C}_{\text{glob}} = \frac{1}{2592} \sum_i \bar{C}_i \quad (i = 1, 2, \dots, 2592). \quad (6)$$

3. 结果及分析

图1是 \bar{C}_{glob} 随滞后时间的变化情况.由图1(a)可以看出,随着滞后时间的增加,全球温度场的关联性总体逐渐减弱.将图1(a)中的方框区域放大得到图1(b),图1(b)中的方框区域放大得到图1(c),图1(c)中的方框区域放大得到图1(d).由此可以清楚地看出, \bar{C}_{glob} 随滞后时间的增加其变化规律不断发生改变.滞后1—30 d, \bar{C}_{glob} 由迅速下降的逐步过渡到保持相对平稳;滞后30 d以上, \bar{C}_{glob} 的下降速率又有明显增大.

为了更直观地表现 \bar{C}_{glob} 随滞后时间变化的特征,将图1(d)中的曲线改用相应的斜率绝对值 s_c 表示.计算方法如下:计算图1(d)中第一点与第二个点之间的斜率(为了看图方便,取其绝对值),赋值给图1(d)中第一个点的横坐标,依次类推,就得

到图 1(e). 由图 1(e)可以看出,滞后 1—30 d 的情况下,可根据 \bar{C}_{glb} 的下降快慢大体将其划分为以下三段:滞后 1—7 d 左右 \bar{C}_{glb} 下降非常迅速;滞后 8—20 d 左右是一个过渡阶段, \bar{C}_{glb} 下降趋势逐渐变缓,同时存在不稳定的振荡现象;滞后 21—30 d, \bar{C}_{glb} 处

于相对稳定阶段,没有明显的变化. 滞后 1—7 d 和 21—30 d 的情况下 \bar{C}_{glb} 的变化规律清晰且较为规则,滞后 8—20 d 的情况下 \bar{C}_{glb} 表现出较明显的不稳定特征,这可能从某一角度解释了对 10—30 d 延期预报存在困难的原因.

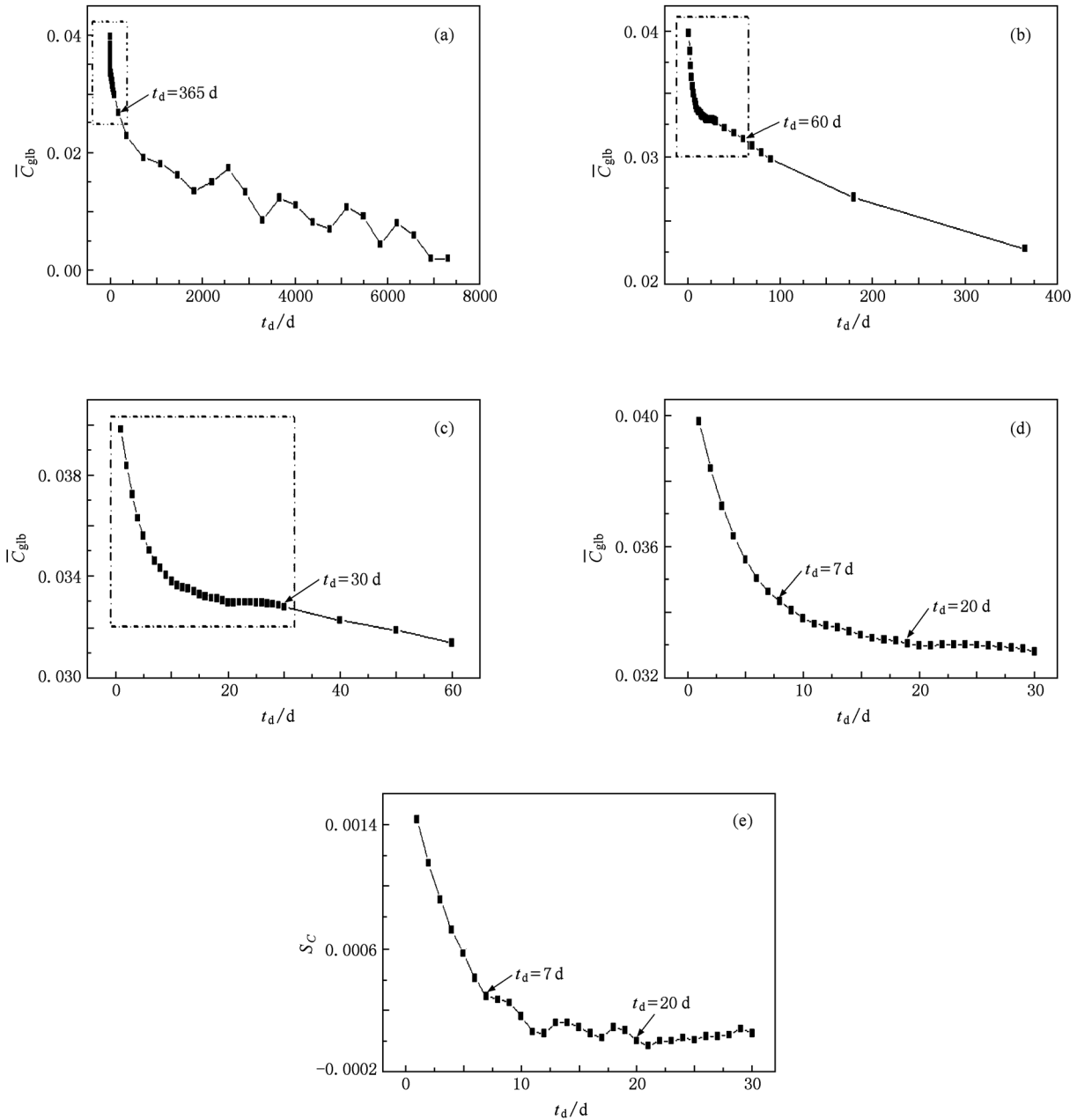


图 1 \bar{C}_{glb} 随滞后时间的变化 (a) 滞后时间为 1—7300 d 情况下 \bar{C}_{glb} 的变化, (b) 为 (a) 图中方框区域的放大, (c) 为 (b) 图中方框区域的放大, (d) 为 (c) 图中方框区域的放大, (e) 为 (d) 图中的曲线改为用相邻两点间斜率的绝对值 S_c 表示

由 ERA40 再分析资料得到的 \bar{C}_{glb} 随滞后时间的变化如图 2 所示,为了节省篇幅,图中只给出了滞后 1—30 d 情况下的结果. 从图 2 可以看出,由 ERA40 再分析资料得到的结论与由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结论是一致的,即在滞后 1—30 d

的情况下,仍然可根据 \bar{C}_{glb} 的下降快慢大体将其划分为三个阶段,且分界点同样出现在 7 和 20 d.

下面对时间滞后情况下全球温度场关联性做合成分析. 图 3(a) 是滞后 1—7 d 情况下的温度场关联系数全球分布合成,即对每个格点滞后 1—7 d

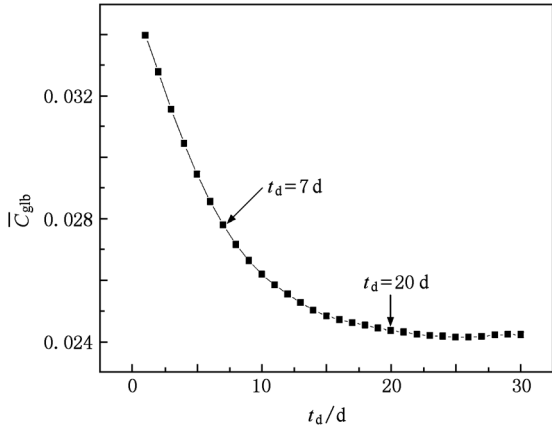


图2 由ERA40再分析资料得到的滞后时间为1—30 d情况下 \bar{C}_{glb} 的变化

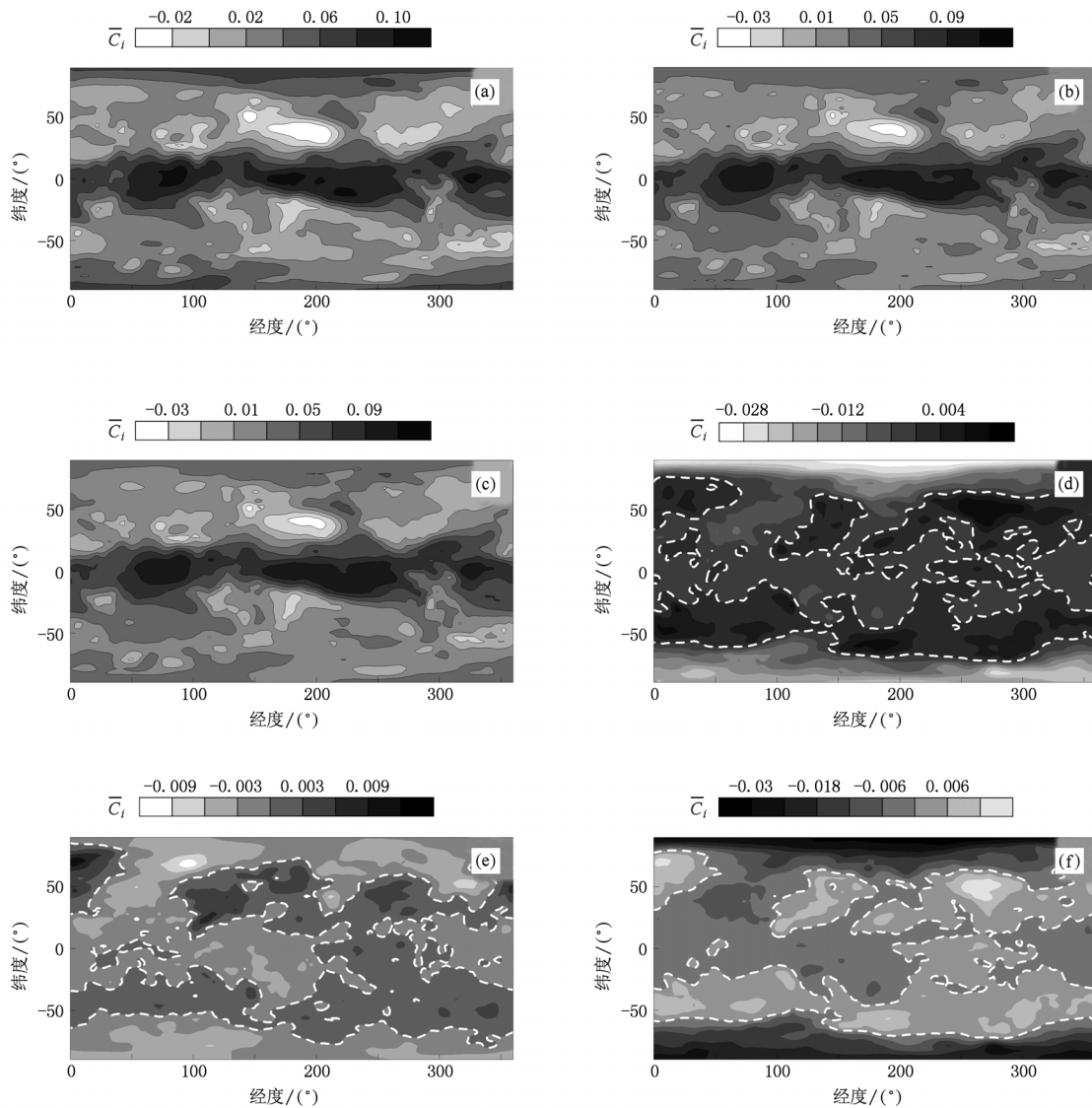


图3 全球温度场关联系数分布 (a) 滞后1—7 d全球温度场关联系数分布合成, (b) 滞后8—20 d全球温度场关联系数分布合成, (c) 滞后21—30 d全球温度场关联系数分布合成, (d) 为(b)图中格点的关联系数减去(a)图中相应格点的关联系数的差值分布, (e) 为(c)图中格点的关联系数减去(b)图中相应格点的关联系数的差值分布, (f) 为(c)图中格点的关联系数减去(a)图中相应格点的关联系数的差值分布

情况下的关联系数分别求平均. 图3(b)和(c)分别是滞后8—20 d和21—30 d情况下的温度场关联系数全球分布合成, 算法同图3(a). 图3(d), (e), (f) (图中白色虚线为零值线) 分别是图3(b)中格点的关联系数减去图3(a)中相应格点的关联系数、图3(c)中格点的关联系数减去图3(b)中相应格点的关联系数、图3(c)中格点的关联系数减去图3(a)中相应格点的关联系数的差值分布. 由图3(a)—(c)可以看出, 温度场关联系数的空间分布没有随滞后时间的增加发生明显变化, 是比较稳定的. 但从图3(d)—(f)可以看出, 随着滞后时间的增加, 温度场关联系数的变化确实存在且

有一定规律,总体沿纬向呈带状分布.其中南北半球的高纬度地区随滞后时间增加关联性明显下降;而中纬度地区基本上相反,略有上升;赤道地区则又呈下降趋势,但下降幅度小于高纬度地区.值得注意的是,北半球中纬度的亚洲大陆大部以及赤道中东太平洋地区分别与同纬度的其他地区变化特征相反.

图4是由ERA40再分析资料得到的全球温度场关联系数分布合成(具体算法同图3(d)—(f)).由ERA40再分析资料得到的结果表明,时间滞后没

有造成温度场关联系数的空间分布发生明显变化(图略),与上述结果一致.从图4(a)—(c)可以看出,随着滞后时间的增加,温度场关联系数的变化与NCEP/NCAR再分析资料得到的结果仅在具体数值和空间范围上略有差异,但仍可清晰地看出正/负值区域总体沿纬向呈带状交错分布,且北半球中纬度的亚洲大陆大部以及赤道中东太平洋地区分别与同纬度的其他地区变化特征相反的现象也仍然存在,从而验证了由NCEP/NCAR再分析资料得到的结果.

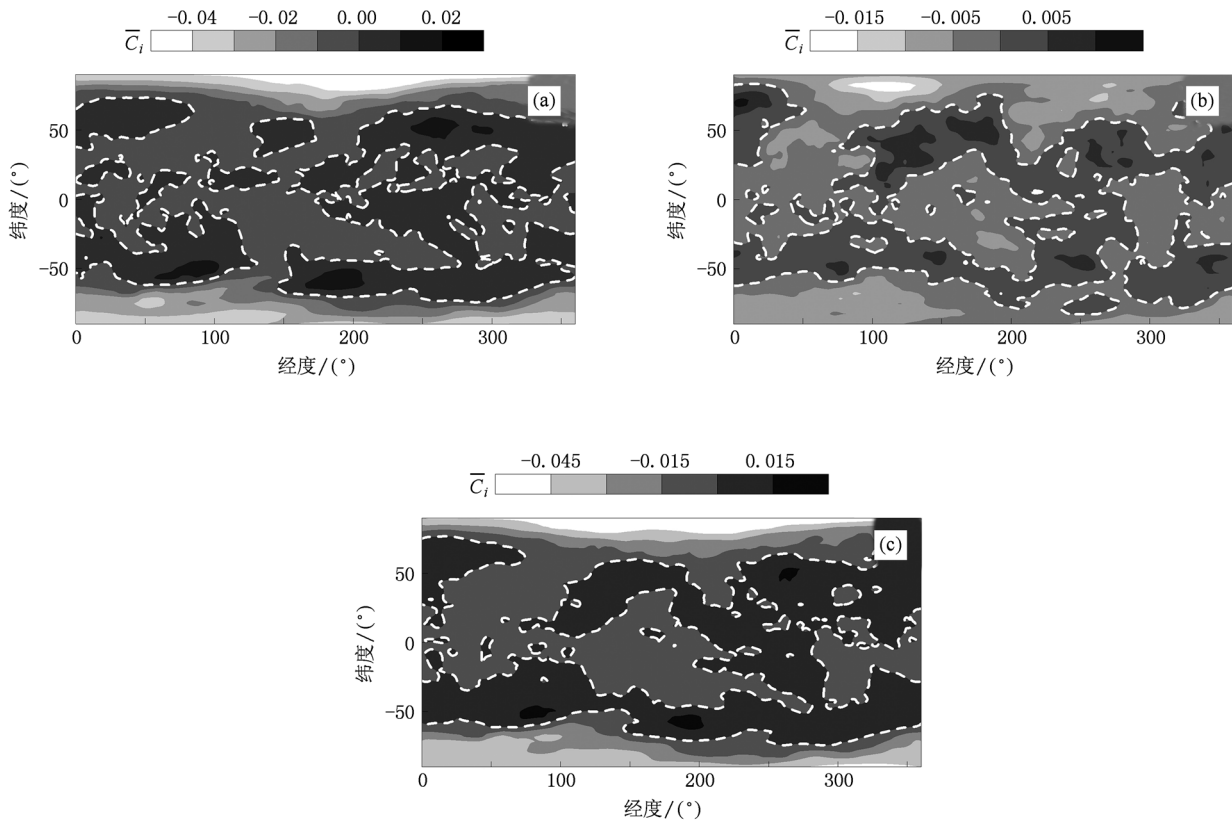


图4 基于ERA40再分析资料得到的全球温度场关联系数分布 (a) 滞后8—20 d 情况下格点的关联系数减去滞后1—7 d 情况下相应格点的关联系数的差值分布, (b) 滞后21—30 d 情况下格点的关联系数减去滞后8—20 d 情况下相应格点的关联系数的差值分布, (c) 滞后21—30 d 情况下格点的关联系数减去滞后1—7 d 情况下相应格点的关联系数的差值分布

4. 结 论

随着滞后时间的增加,全球温度场的关联性总体逐渐减弱.滞后1—30 d 的情况下,可根据 \bar{C}_{glb} 的下降快慢大体将其划分为滞后1—7 d, 8—20 d 以及21—30 d 三个阶段.其中滞后8—20 d 的情况下 \bar{C}_{glb} 表现出较明显的不稳定特征,这可能从一定程度上

解释了10—30 d 延伸期预报之所以困难的原因.

温度场关联系数的空间分布没有随滞后时间的增加发生明显变化,是比较稳定的.但合成分析结果表明,随着滞后时间的增加,温度场关联系数的差值变化总体沿纬向呈带状分布.值得注意的是,北半球中纬度的亚洲大陆大部以及赤道中东太平洋地区的关联系数随滞后时间的变化趋势分别与同纬度的其他地区相反.

- [1] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [2] Lorenz E N 1993 *The Essence of Chaos* (Washington: University of Washington Press) p227
- [3] Chou J F 2002 *Nonlinear and Complexity in Atmosphere Science* (Beijing: China Meteorological Press) p131 (in Chinese) [丑纪范 2002 大气科学中的非线性与复杂性 (北京: 气象出版社) 第 131 页]
- [4] Zhou X J 2005 *Acta Meteor. Sin.* **63** 806 (in Chinese) [周秀骥 2005 气象学报 **63** 806]
- [5] Lorenz E N 1969 *J. Atmos. Sci.* **26** 636
- [6] Lorenz E N 1969 *Tellus* **21** 289
- [7] Smagorinsky J 1969 *Bull. Am. Meteor. Soc.* **50** 286
- [8] Chen M X, Ji L R 1989 *Acta Meteor. Sin.* **47** 147 (in Chinese) [陈明行、纪立人 1989 气象学报 **47** 147]
- [9] Simmons A J, Mureau R, Petroliaqis T 1995 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **121** 1739
- [10] Wang H J, Chen L J, Li W J, Zhang P Q, Liu L L 2007 *Acta Meteor. Sin.* **65** 725 (in Chinese) [王会军、陈丽娟、李维京、张培群、刘绿柳 2007 气象学报 **65** 725]
- [11] Fraedrich K 1986 *J. Atmos. Sci.* **43** 419
- [12] Fraedrich K 1987 *J. Atmos. Sci.* **44** 722
- [13] Keppen C L, Nicolis C 1989 *J. Atmos. Sci.* **46** 2356
- [14] Wallace J M, Gutzler D S 1981 *Mon. Wea. Rev.* **109** 784
- [15] Li C Y, Zhou W, Jia X L, Wang X 2006 *Adv. Atmos. Sci.* **23** 964
- [16] Yu J H, Rong S Y, Ren J 2005 *Sci. Meteor. Sin.* **25** 579 (in Chinese) [余锦华、荣淑艳、任健 2005 气象科学 **25** 579]
- [17] Yan H M, Xiao Z N 2001 *Sci. Meteor. Sin.* **21** 54 (in Chinese) [晏红明、肖子牛 2001 气象科学 **21** 54]
- [18] Xie F Y, He J H 2003 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **26** 308 (in Chinese) [谢付莹、何金海 2003 南京气象学院学报 **26** 308]
- [19] Guhr T, Muller-Groeling A, Weidenmuller H A 1998 *Phys. Rep.* **299** 189
- [20] Efetov K B 1997 *Supersymmetry in Disorder and Chaos* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [21] Santhanam M S, Patra P K 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016102
- [22] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强、周磊、支蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [23] Zhi R, Gong Z Q, Zheng Z H, Zhou L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2113 (in Chinese) [支蓉、龚志强、郑志海、周磊 2009 物理学报 **58** 2113]
- [24] Wang X J, Gong Z Q, Zhou L, Zhi R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6651 (in Chinese) [王晓娟、龚志强、周磊、支蓉 2009 物理学报 **58** 6651]
- [25] Zhou L, Zhi R, Feng A X, Gong Z Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6689 (in Chinese) [周磊、支蓉、冯爱霞、龚志强 2010 物理学报 **59** 6689]
- [26] Huang G 2006 *Clim. Envir. Res.* **11** 310 (in Chinese) [黄刚 2006 气候与环境研究 **11** 310]
- [27] Inoue T, Matsumoto J 2004 *J. Meteor. Soc. Jpn.* **82** 951
- [28] Josey S A 2001 *J. Climate* **14** 1780
- [29] Murirhead R J 1982 *Aspects of Multivariate Statistical Theory* (New York: Wiley) p308

Influence of time delay on global temperature correlation ^{*}

Zhi Rong^{1)2)†} Gong Zhi-Qiang¹⁾ Wang Qi-Guang²⁾ Xiong Kai-Guo²⁾

1) (*Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

2) (*College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

(Received 3 November 2010; revised manuscript received 28 February 2011)

Abstract

With time delay under consideration, temperature correlation matrixes are constructed based on the reanalysis of temperature data provided by National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Results indicate that the correlation of global temperature decreases with lag time, and the rate is dependent on time lag. We divide the lag time (1—30 d) into three segments, i. e., 1—7 d, 8—20 d and 21—30 d according to the decrease rate of global average correlation coefficient \bar{C}_{glb} . When the lag time is in a specific interval (8—20 d), \bar{C}_{glb} is unstable, which may explain the difficulty in long range weather forecast of 10—30 d. The spatial distribution of the global temperature correlation keeps stable for different lag times, while the numerical change shows zonal distribution on the whole, and that the most of Asia and the equatorial central and eastern Pacific show countertrend to other parts of similar latitudes.

Keywords: temperature, correlation matrix, time delay

PACS: 92.60.Wc

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 40875040), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB950504) and the State Key Program of Science and Technology of China (Grant No. 2007BAC29B01).

[†] E-mail: z_rongphy@126.com