

全球增暖和极端事件对全球温度场关联性的影响^{* 1}

支 蓉^{1,2} 龚志强¹ 王启光² 赵俊虎²
Zhi Rong^{1,2} Gong Zhiqiang¹ Wang Qiguang² Zhao Junhu²

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

1. Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2010-10-22 收稿,2011-04-11 改回.

Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Wang Qiguang, Zhao Junhu. 2012. The influence of global warming and extreme events on the correlation of the global temperature field. Acta Meteorologica Sinica, 70(4): 728-735.

Abstract Based on temperature correlation matrixes constructed by NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis temperature data, this paper discusses the influence of the trends and extreme events on the correlation of the global temperature field. The results show that: on the whole, the trends of temperature series show little impact on the spatial-temporal distribution of correlation of the global temperature field, suggesting that the 30 years quasi-periodic oscillation of the correlation of the global temperature field is the inherent characteristic scale and has nothing to do with global warming. However, in case the trends of temperature series have been removed, the correlation between the regions that present cooling trend is increased, whereas the regions that present warming trend show opposite regularity. The global average correlation coefficient ($R_{T_{\text{global}}}$) decreased slightly after the trends of temperature series have been removed, which support the hypothesis that global warming is advantageous to increase of correlation of the global temperature field, and the significantly decrease of $R_{T_{\text{global}}}$ after 2000 illustrates the new characteristics of global warming in the 21st century. The variation of global temperature is revealed not only in the change of trends, but also in the spatial extension and the intensity of correlation of the global temperature field. In order to study influence of the extreme events on the correlation of global temperature field, three schemes of extreme events substitution were introduced. The results indicate that $R_{T_{\text{global}}}$ get from the three schemes show obvious difference after the 1990s, and this may be because of the change of spatial distribution of correlation coefficient of the Northern and Southern Hemisphere at that time.

Key words Temperature field, Correlation matrix, Trends, Extreme event

摘 要 基于 NCEP/NCAR 和 ERA-40 的逐日平均温度再分析资料构建全球温度场关联矩阵,分别讨论了温度趋势和极端温度事件对全球温度场关联性的影响。结果表明:温度趋势对全球温度场关联性的空间分布型没有太大影响,保持相对稳定,但对其强度有所改变。其中,赤道及低纬度地区关联性明显减弱,中纬度部分区域关联性有所增强;呈降温趋势的地区在去除降温趋势后关联性有所增强,而增温趋势较明显的区域与去除增温趋势后关联性减弱较明显的区域,在区域位置及形状分布上也有较好的对应关系。去除温度趋势后,全球平均关联系数($R_{T_{\text{global}}}$)随时间变化的趋势没有明显改变,尤其是准周期振荡的特征依然存在,说明温度场内部关联作用的 30 a 准周期振荡是不受全球增暖影响的系统固有特征尺度;同时, $R_{T_{\text{global}}}$ 在大部分时段比去除温度趋势前略有减小,充分表明全球增暖总体有利于系统内部关联作用的加强;21 世纪以后 $R_{T_{\text{global}}}$ 的明显减小则从侧面反映了全球增暖在 2000 年以来的新特征。因此,全球温度变化不仅表现为要素值的趋势变化,在温度场内部相互作用的空间范围和强度变化上也有清晰的体现,后者在以往的研究中较少被提及。此外,进一步讨论了极端温度值对全球

* 资助课题:国家自然科学基金(40930952、40875040)、国家科技支撑计划(2007BAC29B01)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106016)。

作者简介:支蓉,主要从事汛期降水预测和极端事件等方面的研究。E-mail: z_rongphy@126.com

温度场关联性的影响:不同极端温度值替代方案的采用对 20 世纪 90 年代初期之前 $R_{T_{\text{global}}}$ 随时间变化的趋势没有明显影响,但 20 世纪 90 年代初期之后 $R_{T_{\text{global}}}$ 与不替代极端温度值的情况相比差异明显增大。这可能与不同方案下温度场关联系数的南、北半球空间分布在 90 年代前后发生较大改变有关。

关键词 温度场, 关联矩阵, 温度趋势, 极端事件

中图法分类号 P468

1 引言

近年来,全球变暖及其对世界经济的影响已经引起了社会各界的关注和重视,判断当前全球的温度变化趋势已经成为研究气候变化的一个至关重要的问题。在全球变暖的大背景下,有一个问题不容忽视,那就是温度变化趋势的区域性差异问题。江志红等(2001,2003)对近 150 年来南北半球平均温度变率分析表明,由于北半球年平均温度的变暖背景上叠加着显著的 40、60—70 a 的准周期振荡,导致其线性增暖的显著性、稳定性都较南半球低。Zeng 等(2001)通过相关、趋势检验等分析认为,20 世纪增暖最稳定显著的区域是印度洋、西太平洋地区;北大西洋区域则在 20 年代出现了增温而 80 年代出现了降温。此外,研究(戴晓苏,2008)表明,在这种全球变暖的背景下,20 世纪 60 年代以后全球大部分陆地地区极端冷事件发生频率逐渐减少,而极端暖事件发生频率明显增加,其中,极端冷事件频率的减少比极端暖事件的增加更为明显。

占全球表面积 70% 以上的海洋比大气具有更长的记忆性,因而其海表温度的分布在很大程度上影响着全球温度场的分布,其热力状况的改变对大气环流及气候变化的作用也是非常明显的。因此,目前对温度场空间关联性的研究大多集中于对海温场的研究(肖栋等,2007;Xiao, et al, 2007),尤其是几个关键海区海温场的研究,如对发生于赤道东太平洋海区的厄尔尼诺/拉尼娜事件的研究(Rasmusson, et al, 1982, 1983; Fu, et al, 1986);对位于热带西太平洋及印度洋东部的大洋暖池的研究(Kurihara, et al, 1986; Kurihara, 1989; 黄荣辉等, 1994,2002;张启龙等,2001;周春平等,1998;Webster, et al, 1992; Wang, et al, 2001; White, et al, 1985; 龙宝森等,1990);以及对太平洋年代际振荡的研究(Mantua, et al, 1997; Tourre, et al, 2001; Minobe, 1997)等。值得提出的是,已有研究在讨论全球增暖的趋势变化及极端事件的发生强度

和频次等的变化同时,却很少涉及此类调整对于气候系统内部的关联作用等有何影响,从全球要素场整体关联性的角度进行探讨的研究少之又少。龚志强等(2008)、支蓉等(2009)以及 Zhi 等(2010)讨论了全球温度场的内在关联性,发现格点温度序列之间既存在真实关联,又存在关联“噪声”;指出了全球温度场的关联作用在时间尺度上存在 1—15、15—90 d 以及 365—730 d 等特征尺度,在空间上表现为沿纬向的准带状分布,并存在赤道太平洋、北太平洋、赤道大西洋和赤道印度洋等关键海域。因此,本研究在上述工作的基础上进一步从全球温度场整体关联性的角度出发,讨论温度趋势和极端温度事件对其产生的影响,进而为全面理解全球温度场系统与全球增暖及极端事件的相互作用提供了一个新的视角和有效的研究途径。

2 资料和方法

所用资料为 NCEP/NCAR 发布的 1948—2005 年逐日平均温度再分析资料(地面资料),分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。首先对资料进行预处理,滤除日温度资料中包含的季节变化,得到距平序列 $T'_i(t) (i = 1, \dots, 2592; t = 1, \dots, 21170)$ 。

以序列 $T'_i(t) (i = 1, \dots, 2592; t = 1, \dots, 21170)$ 为例,关联矩阵理论简要介绍如下(Murirhead, 1982),首先对序列进行标准化处理

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

其中, $\langle T'_i \rangle$ 为 $T'_i(t)$ 的平均值, $\sigma_i = \sqrt{\langle T'^2_i \rangle - \langle T'_i \rangle^2}$ 。

关联矩阵的矩阵元为

$$R_{T_{ij}} = \frac{1}{21170} \sum_{t=1}^{21170} T''_i(t) T''_j(t) \quad (i = 1, \dots, 2592; j = 1, \dots, 2592) \quad (2)$$

格点平均关联系数为

$$\bar{R}_{T_i} = \frac{1}{2591} \left(\sum_j R_{T_{ij}} - 1 \right) \quad (i = 1, \dots, 2592; j = 1, \dots, 2592) \quad (3)$$

全球平均关联系数为

$$R_{T_{\text{global}}} = \frac{1}{2592} \sum_i \bar{R}_{T_i} \quad (4)$$

$(i = 1, \dots, 2592)$

需要指出的是,本文求取格点平均关联系数时,采用与支蓉等(2009)相同的处理方式,即选取通过信度为 0.01 的统计检验的关联矩阵元进行累加求平均,格点平均关联系数代表了单个格点与全球其他格点关联系数的平均值,全球平均关联系数则代表了全球所有格点间的平均关联强度。

此外,采用了 ERA-40 再分析资料(1958—2001 年)对由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的研究结论进行验证。由于篇幅限制,未列出两套资料的所有计算结果。

3 结果和分析

3.1 温度趋势对全球温度场关联性的影响

为了研究温度趋势对全球温度场关联性的影响,对每个格点的温度距平序列分别进行线性拟合,

得到格点温度变化的趋势,然后用格点温度序列减去其对应的趋势项,经过这样处理得到的新序列,可以基本消除温度趋势的影响。

图 1a 和 b 分别是未去除温度趋势情况下(以下简称基准情况)和去除温度趋势情况下关联系数的全球分布。对比可以看出,去除温度趋势没有使温度场关联系数的空间分布型发生明显变化。图 1c 是图 1b 减去图 1a 的差值图,可以清楚地看出,去除温度趋势使得全球温度场关联性普遍减弱,其中,减弱最明显的是赤道及低纬度地区;南北半球中纬度的部分区域关联性有所增强,与全球其他大部分地区的变化相反。

为了探究这种局地关联性增强的可能原因,计算每个格点温度距平序列的趋势系数(施能等, 1995),并绘出了其空间分布(图 1d),由图 1c 和 d 的对比可以看出,全球大部分地区在 1948—2005 年呈现增温趋势(趋势系数为正值),但局部地区在同一时期却呈现降温趋势(趋势系数为负值),且图 1d 中呈现降温趋势的地区与图 1c 中关联性增强的区

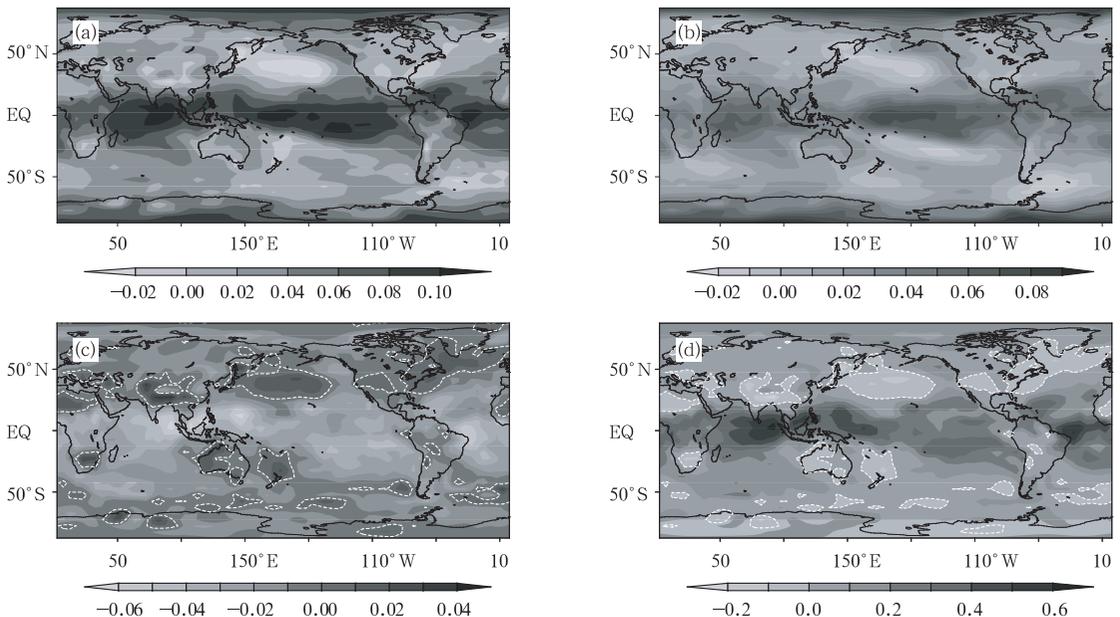


图 1 温度趋势对全球温度场关联性的影响

(a. 基准情况下关联系数的空间分布, b. 去除温度趋势的情况下关联系数的空间分布, c. 图 b 减去图 a 的差值(白色虚线为 0 值线), d. 格点温度序列趋势系数的空间分布(白色虚线为 0 值线))

Fig. 1 Influence of the trends on the correlation of the global temperature field

(a. distribution of correlation coefficients on the reference condition, b. distribution of correlation coefficients in case the trends of temperature series have been removed, c. difference picture obtained by subtracting Fig. 1a from Fig. 1b (the white dotted lines are boundaries of zero), and d. distribution of trend coefficients of global temperature series (the white dotted lines are boundaries of zero))

域有很好的对应关系,如北太平洋地区、北美南部和东部以及北大西洋等。此外,图 1d 中增温趋势相对较明显的区域与图 1c 中关联性减弱较显著的区域也有较好的对应关系,如印度洋北部、太平洋西部以及大西洋中部等。

图 2a 和 b 分别是由 ERA-40 再分析资料得到的基准情况和去除温度趋势情况下关联系数的全球分布。对比可以看出,去除温度趋势使温度场关联系数的空间分布型发生了一定的变化,但几个大的正、负关联中心仍然在图中有清晰的反映。图 2c 是图 2b 减去图 2a 的差值图,由该图可以清楚地看出:

去除温度趋势使得全球大部分温度场关联性普遍减弱,其中,减弱最明显的是赤道及低纬度地区;北半球中纬度的部分区域和南半球高纬度区域关联性有所增强。对比图 2c 和图 1c 可以看出,这一结果与由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结论有相似之处,但在南半球高纬度区域存在一定差异。图 2d 是格点温度距平序列趋势系数的空间分布,对比图 2c 和 d 可以发现,图 2d 中呈现增/降温趋势的地区与图 2c 中关联性减弱/增强的区域也存在一定的对应关系,与由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结论基本相符。

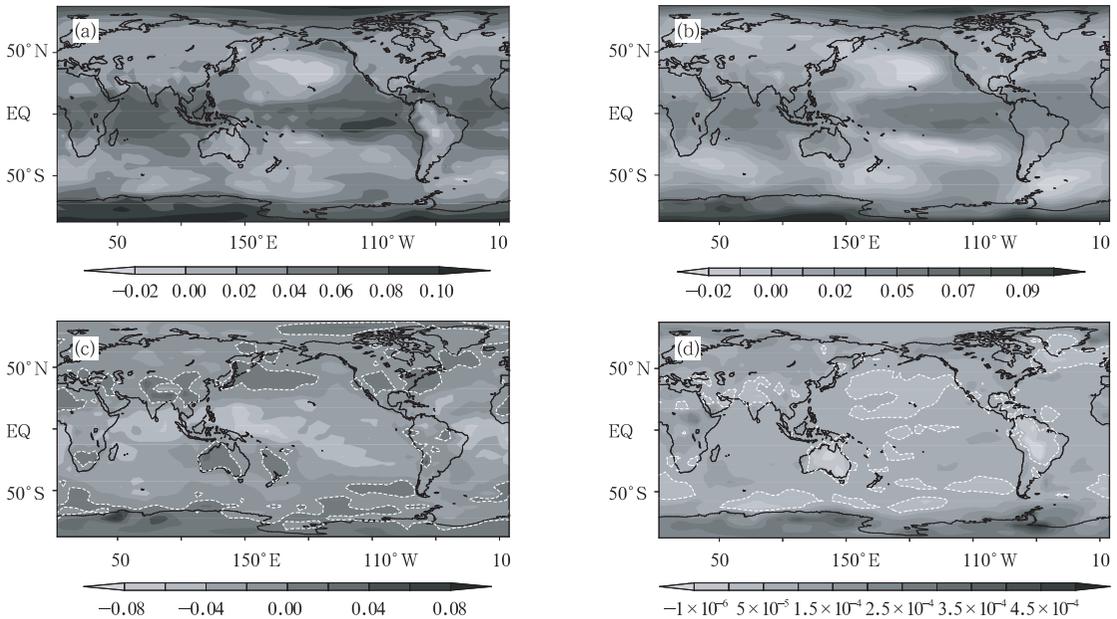


图 2 同图 1,但为基于 ERA-40 再分析资料

Fig. 2 As in Fig. 1 but based on the ERA-40 reanalysis temperature data

取长度为 10 a 滑动窗口(滑动步长 2 a)研究全球温度场关联性随时间演变的特征,如图 3 曲线 A 中的第 1 个点是由 1948—1957 年共 10 a 的数据计算得到,按照惯例将结果赋值给滑动窗口中的末尾年份,即 1957 年;计算第 2 个点时,窗口滑动 1 步(2 a),取 1950—1959 年共 10 a 的数据进行计算,结果仍然赋值给窗口中的末尾年份,即 1959 年;依此类推。结果表明:与基准情况(图 3,曲线 B)相比,去除温度趋势的情况下 $R_{T_{global}}$ 随时间变化的趋势没有明显改变(图 3,曲线 A),但在大部分时段数值略有减小,这与由图 1 和 2 得到的结论是一致的。由全球平均关联系数的物理特性可知,在全球大部

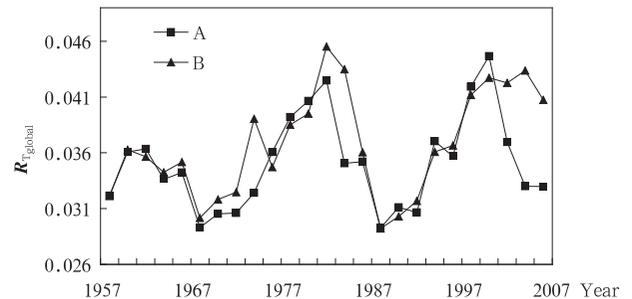


图 3 全球平均关联系数随时间的演变 (A. 去除温度趋势的情况, B. 基准情况)

Fig. 3 Changes in the correlation of the global temperature field with time

(A. for the case of the trends of temperature series removed, and B. for the reference condition)

分地区都呈现增温趋势的情况下,有利于全球温度场内部关联作用的加强;进入 21 世纪以后 $R_{T_{\text{global}}}$ 与基准情况相比减小程度变得比较明显则反映了 2000 年以来全球增暖的新特征。基于 ERA-40 再分析资料得到的结论与上述结论基本一致,验证了计算结果的可靠性(图略)。

3.2 极端温度事件对全球温度场关联性的影响

对极端温度的判定采用了百分位阈值法(翟盘茂等,2003),取第 5/第 95 百分位为极端阈值。在研究极端温度事件对全球温度场关联性的影响过程

中首先采用了两种方案进行比较:一种是将极端温度值用 30 a 气候平均值(1971—2000 年)代替(以下简称方案 I)(图 4a);另一种是将极端温度值用相应的极端阈值代替(以下简称方案 II)(图 4b)。由图 4 可以看出,与未替代极端温度的情况(以下简称基准情况(图 1a))相比,采用方案 I 和 II 替代极端温度事件并没有造成温度场关联系数在空间分布上的明显变化。基于 ERA-40 再分析资料得到的结论也类似(图略)。

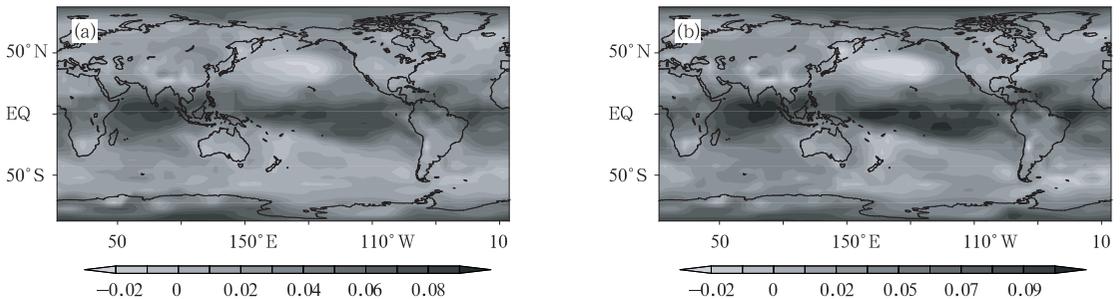


图 4 替代极端事件对全球温度场关联性的影响

(a. 方案 I, b. 方案 II)

Fig. 4 Influence of the substitution of extreme events on the correlation of the global temperature field

(a. Scheme I, and b. Scheme II)

接下来,将探讨极端温度事件对全球温度场关联性影响随时间的演变特征(图 5),与 3.1 节类似,仍然取长度为 10 a 的滑动窗口,滑动步长 2 a。可以看出:在 20 世纪 90 年代初期之前,采用方案 I 和 II(曲线 A、B)对 $R_{T_{\text{global}}}$ 随时间的演变特征影响不大,其总体变化趋势与基准情况(曲线 D)基本相同;但在 20 世纪 90 年代初期之后,三者之间有了明显的差异,方案 I 使得 20 世纪 90 年代初期以后 $R_{T_{\text{global}}}$ 明显小于方案 II 和基准情况。

为了寻找造成以上差异的原因,做了如下尝试:首先,考虑到温度趋势对极端温度值的影响,将方案 I 修订为极端温度值用当前 10 a(即滑动窗口内的 10 a)气候平均值代替(以下简称方案 III)。结果表明,采用方案 III(图 5 中曲线 C)和方案 I(图 5 中曲线 A)结果差异不大,20 世纪 90 年代初期以后采用方案 III 仍然使得 $R_{T_{\text{global}}}$ 明显小于方案 II 和基准情况(图 5 中曲线 B、D),说明差异产生的原因与温度趋势没有太大关联。

根据图 5,选取图中对应的 1965—1973 年、

1997—2005 年两个时段(以下分别简称时段 I 和 II)作为代表时段进行对比分析,尝试寻找造成图 5 中 20 世纪 90 年代以后方案 I 与方案 II 及基准情况之间出现如此大差异的原因。其中时段 I,方案 I 和 II 与基准情况结果接近;时段 II,方案 I 和 II 与基准情况结果差别最大。

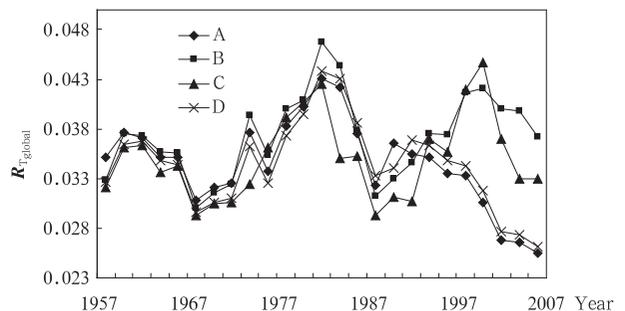


图 5 全球平均关联系数随时间的演变情况

(A. 方案 I, B. 方案 II, C. 方案 III, D. 基准情况)

Fig. 5 Changes in the correlation of the global temperature field with time (A. for the case of Scheme I, B. for the case of Scheme II, C. for the case of Scheme III, and D. for the reference condition)

图 6a 是方案 I 和基准情况在时段 I 的差值(方案 I 减去基准情况),图 6b 是相应的时段 II 的差值。由图 6a 和 b 的对比可知:时段 I,采用方案 I 和基准情况相比温度场关联系数在北半球的中高纬度地区明显大于基准情况;而时段 II 的情况与之恰恰相反,最显著正值的区域变为南半球的中纬度地区。

图 6c 和 d 分别是方案 I 和基准情况下时段 II

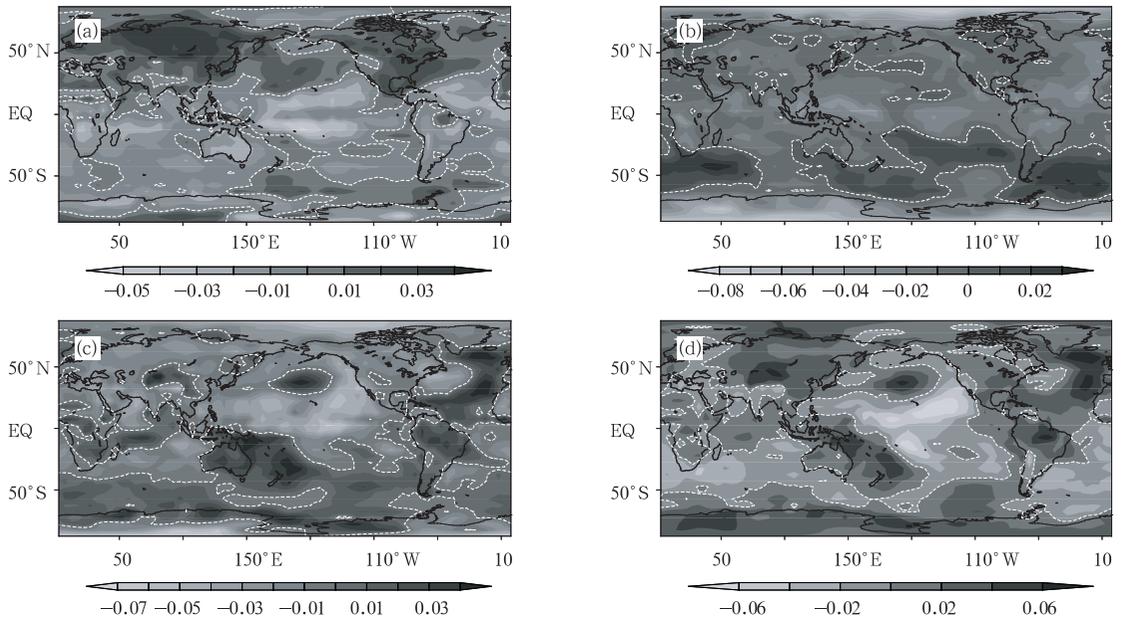


图 6 合成分析结果

(a. 时段 I, 方案 I 和基准情况的差值, b. 时段 II, 方案 I 和基准情况的差值, c. 方案 I, 时段 II 减去时段 I 的差值, d. 基准情况, 时段 II 减去时段 I 的差值; 白色虚线为 0 值线)

Fig. 6 Composite pictures

(a) for Period I, the picture is obtained by subtracting the correlation coefficients for the reference condition from the correlation coefficients for the case of Scheme I, (b) as in Fig. 6a but for period II, (c) with Scheme I, the picture is obtained by subtracting the correlation coefficients for Period I from the correlation coefficients for Period II, and (d) as in Fig. 6c but with Scheme II

(the white dotted lines are boundaries of zero)

基于 ERA-40 再分析资料得到的结论与由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结论类似(图略),证明了上述结论的可靠性。

4 结论与讨论

基于 NCEP/NCAR 和 ERA-40 的逐日平均温度再分析资料构建全球温度场关联矩阵,分别讨论了温度趋势和极端温度事件对全球温度场关联性的影响。与基准情况相比,去除温度趋势的情况下关

减去时段 I 的差值。由图 6c 可以看出,采用方案 I,温度场关联系数的空间分布随时间不断变化,其中南半球大部分地区的关联性明显增强,而北半球除了北太平洋等部分区域外,关联性均有所减弱;而基准情况下(图 6d),温度场关联系数空间分布随时间的变化没有表现出显著的南北差异。

联系数的空间分布型没有明显的变化,但关联强度略有减弱,其中,减弱最明显的是赤道及低纬度地区;南北半球中纬度的部分区域关联性有所增强,与全球其他大部分地区的变化相反。格点温度序列趋势系数的空间分布表明:全球大部分地区在 1948—2005 年呈现增温趋势,但局部地区在同一时期却呈现降温趋势;呈现降温趋势的地区与上述关联性增强的区域恰好对应,而增温趋势相对较明显的区域与上述关联性减弱较明显的区域也有较好的对应关

系。

取长度为 10 a 滑动窗口研究全球温度场关联性随时间演变的特征对去除温度趋势的响应发现： $R_{T_{\text{global}}}$ 在 1980 年前后和 2000 年前后均出现了峰值，总体表现为 30 a 的准周期振荡。去除温度趋势后， $R_{T_{\text{global}}}$ 随时间的变化趋势没有明显改变，尤其是准周期振荡的特征依然存在，这充分说明 30 a 准周期振荡有可能是温度场内部关联作用固有的特征尺度，受全球增暖的影响较小；同时， $R_{T_{\text{global}}}$ 在大部分时段数值略有减小则表明全球增暖总体有利于系统内部关联作用的加强；进入 21 世纪后的明显减小从侧面反应了全球增暖另一个新的特征。

对极端温度的判定采用了百分位阈值法，取第 5/第 95 百分位为极端阈值。为了研究极端温度事件对全球温度场关联性的影响，采用 3 种方案替代极端温度值，结果表明：在 20 世纪 90 年代初期之前，采用方案 I、II 和 III 的情况下 $R_{T_{\text{global}}}$ 随时间演变的总体趋势与基准情况基本相同；但在 20 世纪 90 年代初期之后，方案 I、III 的结果明显小于方案 II 和基准情况。进一步分析表明，采用方案 I、III 的情况下温度场关联系数的空间分布随时间演变在 20 世纪 90 年代初期前后发生较大改变可能是造成上述差异的原因。

因此，全球温度变化不仅表现为要素值的趋势变化，温度场内部相互作用的空间范围和强度变化也对此有所反映，后者在以往的研究中少有提及。ERA-40 再分析资料得到的结论进一步验证了趋势变化和极端事件对全球温度场内部关联性影响的可能性。极端事件作为小概率事件是气候系统的极端表现形式，虽然所占比重相对较小，但对气候系统的反馈作用却是不容忽视的。从本研究结果来看，这种反馈作用自 20 世纪 90 年代初期以来变得尤为明显。这是否意味着 20 世纪 90 年代初期全球温度场发生了与极端温度密切相关的内部关联性的调整，有待于今后工作中进行深入探讨。

参考文献

戴晓苏. 2008. IPCC 第一工作组第四次评估报告的基本结论. 气象软科学, (1): 150-154

龚志强, 周磊, 支蓉等. 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): 5351-5360

黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 18(2): 141-

151

黄荣辉, 周连童. 2002. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究. 自然灾害学报, 11(1): 1-9

江志红, 屠其璞, 施能. 2001. 多窗谱分析方法及其在全球变暖研究中的应用. 气象学报, 59(4): 480-490

江志红, 张强, 屠其璞等. 2003. 南北半球平均温度年代际振荡的非均衡性及其对变暖显著性的影响. 热带气象学报, 19(2): 122-136

龙宝森, 李伯成, 邹娥梅. 1990. 热带西太平洋暖池异常东伸与热带东太平洋增温. 海洋学报, 20(2): 35-42

施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征. 气象学报, 53(4): 431-439

肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态. 大气科学, 31(5): 839-854

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 58(增刊): 1-10

张启龙, 翁学传, 颜廷壮. 2001. 西太平洋暖池海域 SST 场的时空特征. 海洋与湖沼, 32(4): 349-354

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): 2113-2120

周春平, 李万彪. 1998. 大洋暖池特征变化和成因的研究. 北京大学学报(自然科学版), 34(1): 40-49

Fu C B, Diaz H, Fletcher J O. 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation. Mon Wea Rev, 114(9): 1716-1739

Kurihara K, Kawahara M. 1986. Extremes of East Asian weather during the post ENSO years of 1983/84 severe cold winter and hot dry summer. J Meteor Soc Japan, 64: 494-503

Kurihara K. 1989. A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western North Pacific. Geophys Mag, 43: 45-104

Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull Amer Meteor Soc, 78(6): 1069-1079

Minobe S. 1997. A 50 - 70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. Geophys Res Lett, 24(6): 683-686

Muirhead R J. 1982. Aspects of Multivariate Statistical Theory. New York: Wiley, 308pp

Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. Mon Wea Rev, 110(5): 354-384

Rasmusson E M, Wallace J M. 1983. Meteorological aspects of the El Niño/Southern oscillation. Science, 222(4629): 1195-1202

Tourre Y M, Rajagopalan B, Kushnir Y, et al. 2001. Patterns of coherent decadal and interdecadal climate signals in the Pacific Basin during the 20th century. Geophys Res Lett, 28(10): 2069-2072

Wang C Z, Enfield D B. 2001. The tropical Western Hemisphere warm pool. Geophys Res Lett, 28(8): 1635-1638

- Webster P J, Lucas R. 1992. Toga Coare: The coupled ocean-atmosphere response experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 73(9): 1377-1416
- White W B, Meyes G A, Donguy J R, et al. 1985. Short-term climatic variability in the thermal structure of the Pacific Ocean during 1979 - 1982. *J Phys Oceanogr*, 15(7): 917-935
- Xiao D, Li J P. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere-ocean system in the 1970s. *J Geophys Res*, 112: D24S22, doi: 10.1029/2007JD008956
- Zeng Z M, Yan Z W, Ye D Z. 2001. The regions with the most significant temperature trends during the last century. *Adv Atmos Sci*, 18(4): 481-496
- Zhi R, Feng G L, Zhou L, et al. 2010. Spatio-temporal correlation analysis of global temperature based on the correlation matrix theory. *Acta Meteor Sinica*, 24(2): 150-162