

GEFA海气相互作用估计方法研究进展

温娜¹ 刘征宇^{2,1} 江志红¹

(1 教育部省部共建气象灾害重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 气候研究中心, 威斯康辛大学, 美国)

摘要: 回顾了近十年海气相互作用统计估计方法研究的最新进展, 重点介绍广义平衡反馈分析方法 (GEFA)。该方法用于系统分离不同海区对气候异常的独立贡献。它的优越性在简单模式中得到了验证。在实际观测应用中, GEFA结果不仅验证了前人的一些研究成果, 例如热带太平洋ENSO模对北美降水的影响等, 还揭示了一些新的物理现象, 像热带印度洋对热带太平洋海温异常强迫的干扰等。这些研究结果表明GEFA已成为海气相互作用研究中一种新的有效统计工具。

关键词: 统计估计方法, 广义平衡反馈分析方法, 海气相互作用

An Introduction to GEFA for the Assessment of Ocean-Atmosphere Feedback

Wen Na¹, Liu Zhengyu^{2,1}, Jiang Zhihong¹

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 2 Center for Climatic Research, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin)

Abstract: The latest progress of the statistical study method of assessing the ocean/atmosphere feedback is reviewed in the paper. This method is called the generalized equilibrium feedback assessment (GEFA). The new method GEFA could be used to separate the atmospheric response to the individual ocean forcing automatically. Its validity is preliminarily proved in a simple thermal model. And its application in the observation not only confirms some previous research results, e.g., the North America precipitation anomaly influenced by Pacific ENSO, but also reveals some new features of ocean/atmosphere feedback, such as the atmospheric response to the tropical ENSO mode severely interfered by the tropical Indian Ocean. Therefore, GEFA provides a useful tool for assessing the oceanic feedback to the atmosphere.

Key words: statistical method, GEFA, ocean-atmosphere feedback

1 引言

海气相互作用是气候研究中的一个重要课题。它包括两方面内容: 一方面, 大气对海洋的强迫; 另一方面, 海洋对大气的反馈。大量研究已论证了大气对海洋的强迫作用^[1-5]。相对而言, 海洋对大气的反馈作用更为复杂, 特别是热带以外的海洋。

20世纪80年代以来, 人们较为深入和全面地研究了热带海气相互作用, 特别是ENSO的研究^[6]。当ENSO事件发生时, 赤道东太平洋大气的局地响应是一种线性斜压结构响应, 而中纬度则出现相当正压结构PNA型遥相关响应。相对于热带, 人们对中纬度海洋反馈作用的认识尚浅。中纬度大气内变化较强, 在观测中人们往往看到大气对海洋的强迫作用, 而海洋对大气的反馈作用却难以分辨。许多学者用数值模式动力方法来直接研究中纬度大气对给定异常海温强迫的响应, 但所得模式结果差异很大^[7]。例如, 对于一个暖海温异常, 有的模式是暖高压响应, 有的暖低

压响应, 有的是正压结构响应, 有的是线性斜压响应等^[8-16]。模式结果的不确定性促使人们重新回到观测上寻找证据。但是, 在实际观测中, 海洋与大气总是相互作用的。怎样将海洋对大气的反馈与大气对海洋的强迫分开是观测研究亟待解决的关键问题。

1998年, Frankignoul等^[17]提出一种简单的统计方法将海洋对大气的反馈作用与大气对海洋的强迫作用分离, 称这种方法为平衡反馈分析方法 (EFA, Equilibrium Feedback Assessment)。他假设在气候时间尺度上大气异常变化 x 可用两部分线性表示: 一部分是海洋温度 y 的反馈作用, 另一部分是大气内变化 n , 即

$$x(t) = by(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, b 为海洋反馈系数。由于超前海洋不受随后大气内变化的影响, 我们可利用超前海洋与大气方程做协方差分离海洋对大气的反馈信息, 得到海洋反馈系数

$$b = \langle x(t), y(t-\tau) \rangle / \langle y(t), y(t-\tau) \rangle \quad (2)$$

其中, $\langle p, q \rangle$ 表示 p 和 q 的协方差, τ 为海洋超前时间。该方法被广泛用于研究单一下垫面对大气的反馈作用^[18,19]。

然而, 在真实气候系统里, 某区域的气候异常并

收稿日期: 2011年9月12日; 修回日期: 2011年9月30日
第一作者: 温娜 (1979—), Email: wenna@nuist.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目 (41005048); 国家公益性行业 (气象) 专项 (GYHY20090616)

不局限于单一海区的强迫作用，可能是不同海区、不同下垫面共同作用的结果^[20]。例如，在研究中纬度海气相互作用时，人们会考虑热带太平洋ENSO的影响。一般通过回归或偏相关方法扣除ENSO影响，再研究中纬度海洋对大气的反馈作用，这样所得结果才不至于偏离真实情况太多^[21-23]。实际上，除了我们熟知的ENSO遥相关影响外，其他海区也可以通过大气/海洋平流作用或动力过程产生类似的非局地效应。这样，在研究某区域气候异常时，若仅考虑事先已知海区的影响，例如ENSO影响（对该地区影响可能很小），而忽略其他未知海区的干扰作用（对该地区干扰可能很大），所得结果就不能客观反映关注海区的真实反馈情况。

针对该问题，Liu等^[24]推广了EFA，提出了广义平衡反馈分析方法（GEFA，Generalized Equilibrium Feedback Assessment），用于系统分离不同海区、不同下垫面对气候异常的贡献。该方法避免了传统方法可能受未知海区影响的困扰，自动把各海区对大气异常的单独贡献给分离出来。它的优越性在简单模式和观测分析中得到了初步验证。下面重点介绍广义平衡反馈分析方法GEFA及其在观测分析中的应用。

2 广义平衡反馈分析方法GEFA

Liu等把Frankignoul的海洋对大气的一元（单海区）反馈拓展到多元（多个海区）反馈上来，对公式（1）和（2）加以推广。也就是说，某区域气候异常来自下垫面海洋的强迫信号可以更广泛地理解为是不同海区共同作用的结果，即

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^J b_{ij} y_j(t) + n_i(t) \quad (3)$$

其中 x_i 代表大气变量， n_i 代表大气内变化， y_j 代表海洋变量及 b_{ij} 为第 j 点海洋对第 i 点大气强迫的独立反馈系数。它的矢量表达式为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{B}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (t=1, 2, \dots, T) \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_i(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_j(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_i(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1J} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & \dots & \dots & b_{iJ} \end{bmatrix}$$

这里，海洋反馈矩阵 \mathbf{B} 包含了海洋强迫场 \mathbf{Y} 对大气响应场 \mathbf{X} 的所有反馈信息——局地和非局地反馈信息。

同EFA，在气候时间尺度上大气内变化可以看做白噪音，它与海洋SST的关系表现为：同期或海洋滞后时，它们是相关的，代表大气对海洋的强迫；而海洋超前时，它们的相关为零，表明后期大气不能作用于前期海洋，即 $\langle n(t), y(t-\tau) \rangle = 0$ 。于是，利用超前海洋与大气方程（4）两边做协方差得海洋反馈矩阵

$$\mathbf{B}(\tau) = \mathbf{C}_{xy}(\tau) \mathbf{C}_{yy}^{-1}(\tau) \quad (\tau > \tau_n) \quad (5)$$

其样本误差为

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\tau) = \mathbf{C}_{my}(\tau) \mathbf{C}_{yy}^{-1}(\tau) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{C}_{mm}(\tau) = \mathbf{U}(t) \mathbf{V}'(t-\tau) / T$ ， τ_n 为大气内变化持续时间。该方法被称为广义平衡反馈分析方法GEFA。GEFA避免了EFA反馈中可能来自不同海区的影响，把各个海区对气候异常的单独贡献给分离出来。它的优越性在简单热平流耦合模式得到验证，能很好估算模式设定的海洋局地、非局地反馈系数^[24]。

GEFA是一种线性统计方法，需满足一些假设，例如线性假设。此外，在给定样本情况下，GEFA会产生样本误差。特别是随着强迫场空间分辨率的提高，海洋强迫因子间的相关性增大，GEFA样本误差迅速增大。因此，如何选取最佳海洋强迫因子成为问题的关键。原则上，各强迫因子间相关性越小越好。一种较为简便的方法是用EOF空间场的主要海洋模态，这可以有效减少强迫场噪音，提高GEFA估算效果^[25]。这里，值得一提的是GEFA这一统计方法可以与数值模式的动力方法相结合，形成一种有效的统计—动力方法。直接应用GEFA到复杂气候模式中，通过分析一个现有的实验，估计模式中的海洋反馈系数，并与观测的相比较。另外，在模式中，还可以利用敏感性实验来确定海洋的反馈系数（这称为动力方法）。这样，在一个复杂气候模式中用模式动力方法得到的海洋反馈系数与GEFA估计结果进行比较，对GEFA统计方法进行独立验证。例如，Zhong和Liu^[26]利用GCM环流模式对统计估计方法GEFA和模式动力方法进行比较，所得结果可以相互验证。模式结果的有效性增强了GEFA在实际观测应用中的信心。

3 GEFA在观测中的应用

3.1 大气环流异常对全球海温主模态的GEFA响应

作为对经典观测的应用，Wen等^[27]利用GEFA研究大气位势高度场对全球不同海区海温主模态的响应特征。所得结果验证了人们所熟悉的观测大气对热带太平洋El Niño模（图1a）的响应特征（图2a），而且还分离出大气对北太平洋PDO型海温异常（图1b）的响应特征（图2b）。该结果与Honda等^[28, 29]系列工作相呼应。另外，利用GEFA还分离出热带太平洋和热带印度洋之间的相互影响。人们所熟悉的观测大气对El Niño的响应特征（相当于总响应）（图2a），实际上主要是热带太平洋自身El Niño模和热带印度洋海盆一致模（IO）（图1d）两海区海温异常共同作用的结果（图3a, b），与Kumar等^[30]的研究结果相互印证。此外，根据GEFA识别的关注海区主要影响因子（例如热带印度洋海温异常对大气的强迫主要受热带太平洋的干扰，而热带太平洋海温异常对大气异常的

独立贡献又主要受热带印度洋的影响)，还可以利用传统方法即先扣除主要影响因子再研究关注海区的反馈情况对GEFA结果进行验证。如图4所示，事先扣除热带印度洋海盆一致模（IO）的影响，所得大气对热带太平洋El Niño模的EFA响应（图4a）和与之对应的

GEFA结果（图3a）相一致。同样，扣除关键影响因子——热带太平洋ENSO的作用，所得大气对热带印度洋海盆一致模（IO）的EFA响应（图4b）与自动分离海区间相互影响的GEFA结果（图3b）相类似。他们的研究表明GEFA在实际观测应用中的有效性。

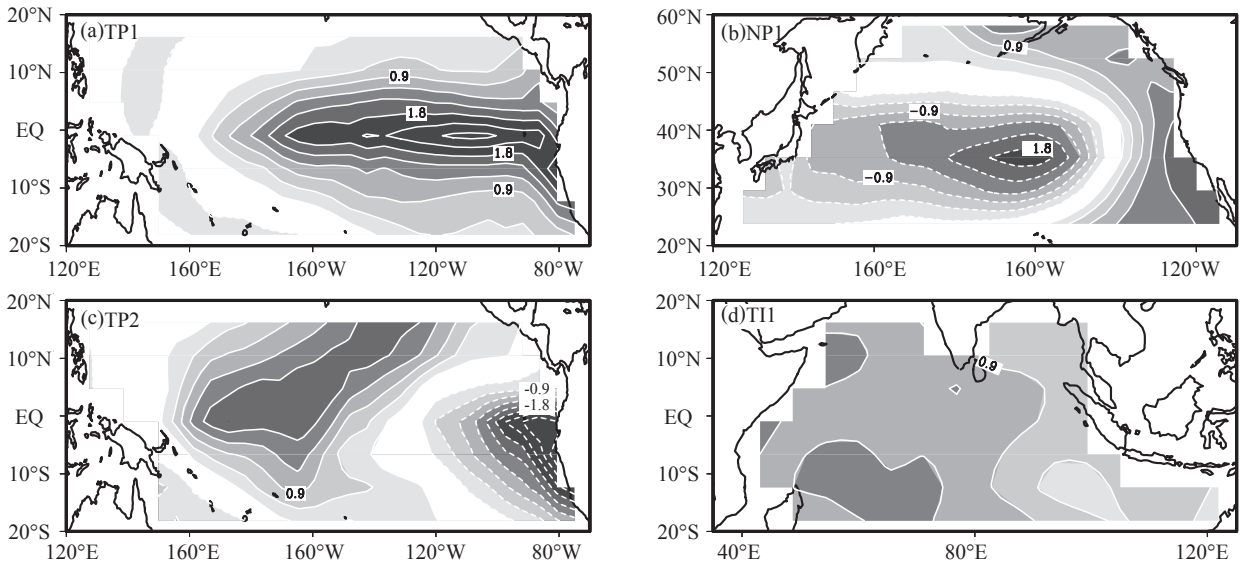


图1 (a) 热带太平洋海温EOF第一模(TP1)——El Niño型海温异常；(b) 北太平洋海温EOF第一模(NP1)——PDO型海温异常；(c) 热带太平洋海温EOF第二模(TP2)——经向型TPM海温异常；(d) 热带印度洋海温EOF第一模(TI1)——海盆一致型(IO)海温异常^[27]

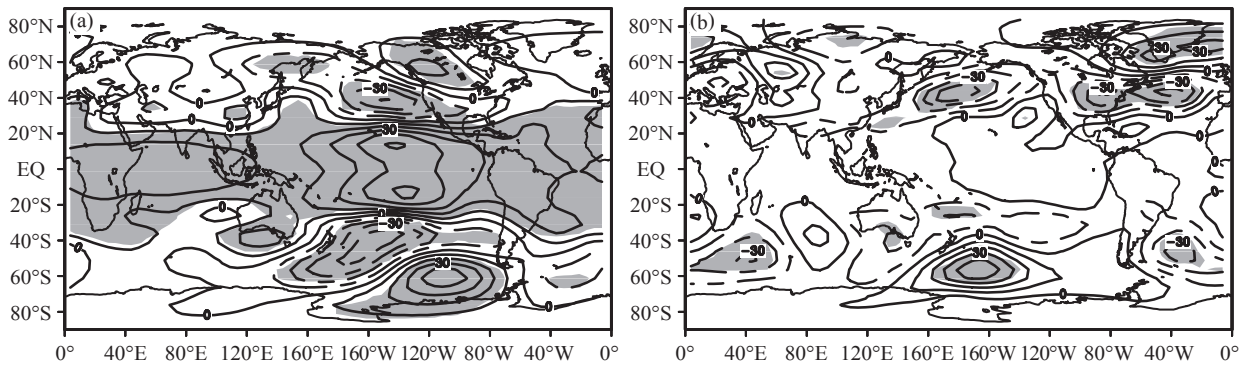


图2 (a) 分离了北太平洋海温影响，所得大气250hPa位势高度场对热带太平洋El Niño模的GEFA响应；(b) 分离了热带太平洋ENSO影响，所得大气250hPa位势高度场对北太平洋PDO模的GEFA响应（图中实线表示正值，虚线表示负值，等值线间隔为 $10\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$ ，灰色阴影表示过90%显著性检验）^[27]

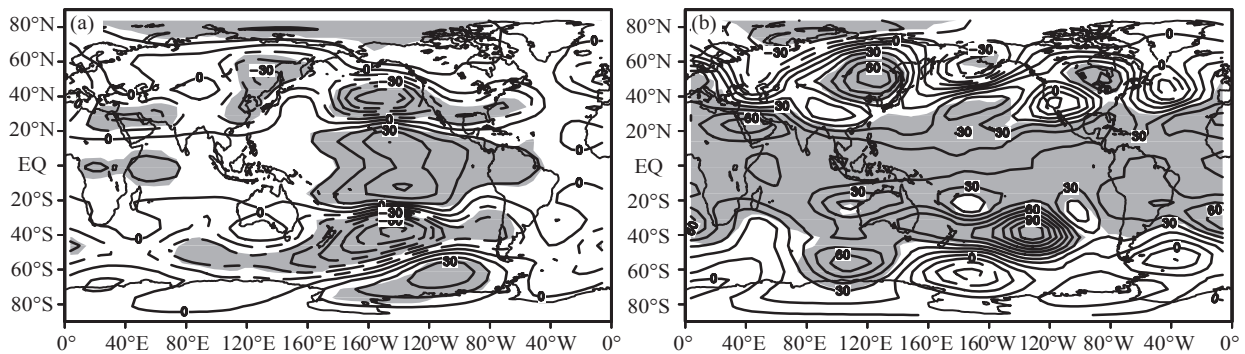


图3 (a) 分离了热带印度洋海温影响，所得大气250hPa位势高度场对热带太平洋El Niño模的GEFA响应；(b) 分离了热带太平洋ENSO影响，所得大气250hPa位势高度场对热带印度洋IO模的GEFA响应（图中实线表示正值，虚线表示负值，等值线间隔为 $10\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$ ，灰色阴影表示过90%显著性检验）^[27]

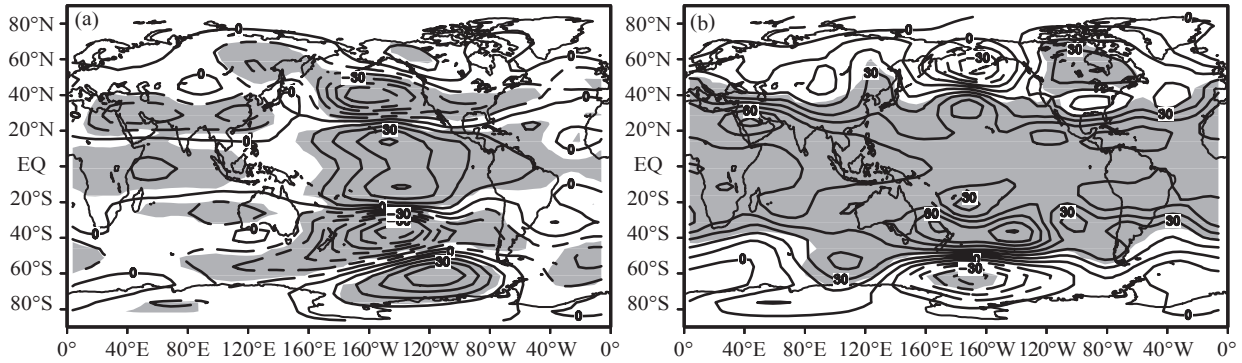


图4 (a) 扣除热带印度洋海盆一致模影响, 所得大气250hPa位势高度场对热带太平洋El Niño模的EFA响应;
(b) 扣除热带太平洋ENSO影响, 所得大气250hPa位势高度场对热带印度洋海盆一致模 (IO) 的EFA响应^[27]

3.2 GEFA 中国区域气候典型个例分析

作为第一个对中国气候的应用, 江志红等^[31]利用GEFA诊断对2009/2010中国冬季气温异常型 (图5a) 产生显著影响的关键海区。发现2009/2010冬季赤道中东太平洋的ENSO型 (图1a) 和热带大西洋海温异常的“正—负—正”三极型模态 (图6a), 对该年冬季我国东北冷西南暖型气温有显著的强迫作用 (图5b)。GEFA结果显示两海区对该年冬季我国气温异常产生显著影响的性质不同。冬季我国这种东北冷西南暖型气温对热带太平洋ENSO型海温异常强迫不是特别敏感, 但热带太平洋海温异常强迫振幅大, 最终导致该年冬季

我国气温对ENSO型海温异常的显著响应。意外的是热带大西洋“正—负—正”三级型海温异常对这类分布型气温异常敏感。故虽然热带大西洋海温异常不大, 但还可以对该年冬季我国气温产生显著响应, 成为该年气温异常的另一个主要原因。这些海区主要通过大气遥相关 (波列) 对我国冬季气温产生影响。从大气环流异常对海温模态的GEFA响应结果看到, 中高纬度大气环流场明显受2009/2010冬季关键海区海温异常模态的强迫, 使得极地冷空气被输送到华北东北地区, 却无法进一步南下影响我国西南地区 (图6b), 致使该年冬季我国出现显著东北冷西南暖异常型气温。

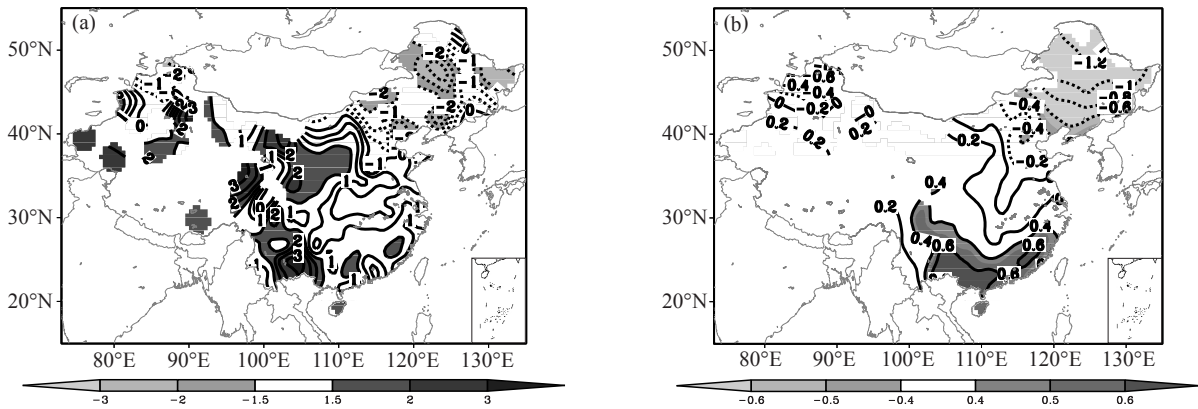


图5 (a) 2009/2010冬季气温距平场; (b) 赤道中东太平洋ENSO型和热带大西洋海温异常的“正—负—正”三极型海温异常共同作用下, 我国2009/2010冬季东北冷西南暖型气温的GEFA响应振幅^[31]

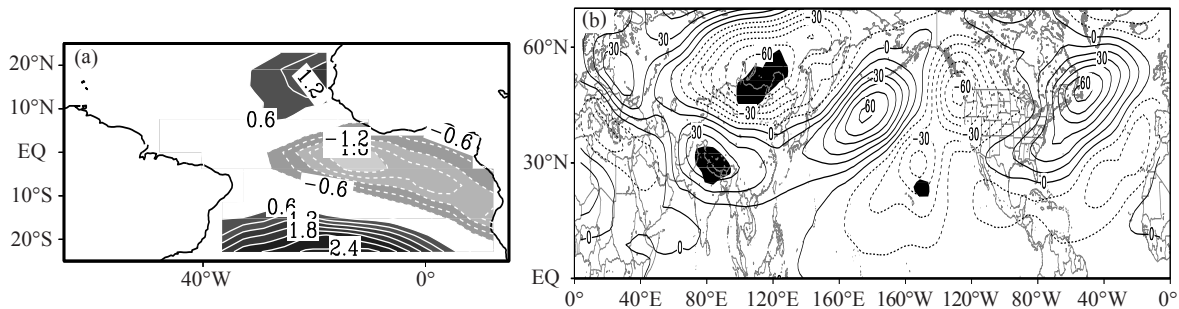


图6 (a) 热带大西洋海温EOF第三模——“正—负—正”三极型海温模态; (b) 冬季大气500hPa位势高度场对热带大西洋“正—负—正”三极型海温异常的GEFA响应^[31]

3.3 美国区域降水 GEFA 分析

Zhong等^[32]利用GEFA研究了全球不同海温主模态对美国区域降水的影响。结果表明,在ENSO盛期,热带太平洋呈La Niña型海温异常分布(图1a,反位相),美国西南地区异常干旱(图7b)。这与北美上空大气异常响应有关(图7a),这种相当正压结构的低压异常响应不利于西南地区的气旋活动和水汽输送,结果导致该地区冬季降雨偏少。这与前人的研究成果一致^[33-36]。而作为ENSO的次级影响,热带印度洋海盆一致模(图1d,反位相)的异常强迫维持了该地区冬春季的降水异常(图8a)。GEFA结果不仅验证了前人的一些研究成果,而且还揭示了一些新的物理

现象。例如,夏季热带太平洋海温经向模(图1c)对美国北部中东地区的显著影响(图8b);北太平洋海温异常对春季美国区域降水的影响与热带印-太海温异常反向作用的竞争关系;北大西洋三极型海温异常和热带大西洋偶极型海温异常对美国不同季节降水的显著影响等。最后,他们还根据GEFA确定的显著影响因子重构关注区域降水的时间变化序列,通过与实际观测序列的对比分析定量评估关注区域降水受下垫面海洋影响的程度。结果显示全球海洋对美国区域降水的影响主要在冬季,美国西南和东北地区受到的影响最大,解释方差可达20%。

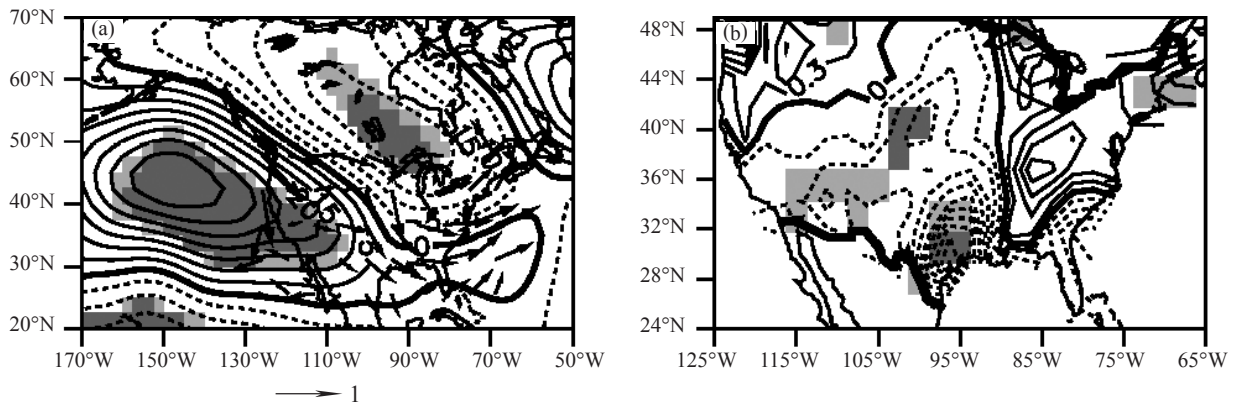


图7 (a) 早冬北美大气250hPa位势高度场和850hPa风场对热带太平洋La Niña海温异常的GEFA响应; (b) 早冬美国区域降水对热带太平洋La Niña海温异常的GEFA响应^[32]

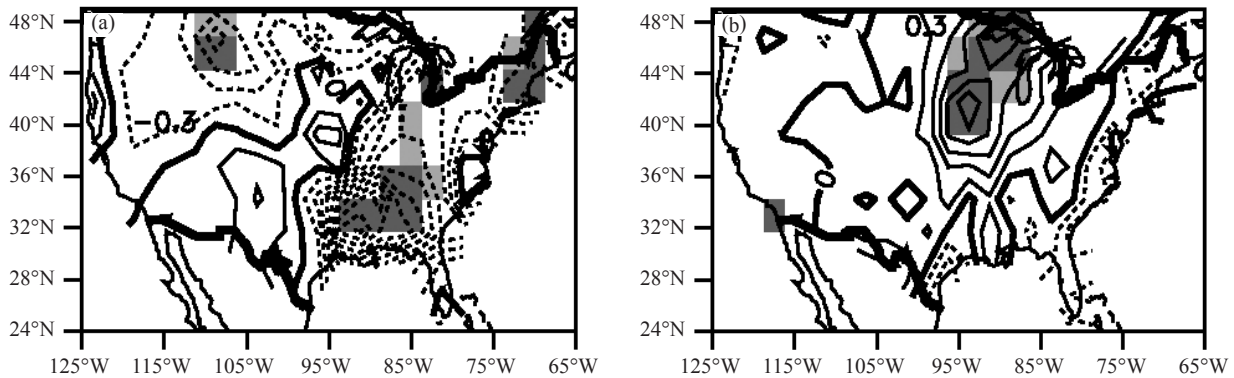


图8 (a) 春季美国区域降水对热带印度洋海盆一致模 (IO) 海温异常的GEFA响应; (b) 夏季美国区域降水对热带太平洋经向模 (TPM) 海温异常的GEFA响应^[32]

4 结论和讨论

通过对广义平衡反馈分析方法介绍及其在观测分析中的应用,看到用GEFA来解决实际海洋反馈问题的有效性。但在观测样本有限情况下,GEFA误差随着强迫场空间分辨率的提高或强迫模态的增多而增大,估算精度受到一定限制^[24]。为了验证GEFA结果的可靠性,我们还利用其他两种统计方法,线性转置方法(LIM, Linear Inverse Modeling)和涨落耗

散定理(FDT, Fluctuation Dissipation Theorem),对其进行独立验证。结果表明这三种统计方法估算结果基本一致,可以相互进行独立验证。这增强了人们对GEFA估算结果的信心,同时也证实利用高分辨率资料所得LIM/FDT海洋反馈系数估算结果的有效性。另外, Frankignoul等^[37]改进最大协方差MCA方法,提出最大响应估算MRE(Maximum Response Estimation)方法来获取海洋—大气最优耦合反馈

模。该反馈模为海气耦合系统中最常出现的一对海洋强迫—大气响应的耦合反馈模。理论上，它也可以用最优GEFA反馈模来重建^[38]，这有待进一步论证。总的来说，GEFA提供了一个估计海洋反馈的简单而有效的统计方法，它可以广泛用于研究不同海区对气候异常的独立贡献，增强人们对海洋反馈作用的认识。原则上，GEFA也可用于其他下垫面对大气的反馈估计，如陆气相互作用^[19, 39]。对每一个具体问题，如何选取最佳强迫因子，提高估计精度，并予以可靠的物理机制，将有待于更多的探讨。

参考文献

- [1] Kraus E B, Turner J S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline II. The general theory and its consequences. *Tellus*, 1967, 19: 98-106.
- [2] Gill A E, Niiler P P. The theory of the seasonal variability in the ocean. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1973, 20: 141-177.
- [3] Frankignoul C, Hasselmann K. Stochastic climate models. 2. Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability. *Tellus*, 1977, 29: 289-305.
- [4] Frankignoul C. Sea surface temperature anomalies, planetary waves and air-sea feedback in the middle latitudes. *Rev Geophys*, 1985, 23: 357-390.
- [5] Junge M M, Haine T W N. Mechanisms of North Atlantic wintertime sea surface temperature anomalies. *J Climate*, 2001, 14: 4560-4572.
- [6] Trenberth K, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14291-14324.
- [7] Kushnir Y, Robinson W A, Blade I, et al. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *J Climate*, 2002, 15: 2233-2256.
- [8] Palmer T N, Sun Z. A modeling and observational study of the relationship between sea-surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general-circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1985, 111: 947-975.
- [9] Pitcher E J, Blackmon M L, Bates G T, et al. The effect of North Pacific sea surface temperature anomalies on the January climate of a general circulation model. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 172-188.
- [10] Kushnir Y, Lau N C. The general circulation model response to a North Pacific SST anomaly: Dependence on timescale and pattern polarity. *J Climate*, 1992, 5: 271-283.
- [11] Ferranti L, Molteni F, Palmer T N. Impact of localized tropical and extratropical SST anomalies in ensembles of seasonal GCM integrations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 120: 1613-1645.
- [12] Peng S, Mysak A, Ritchie H, et al. The difference between early and middle winter atmospheric response to sea surface temperature anomalies in the northwest Atlantic. *J Climate*, 1995, 8: 137-157.
- [13] Peng S, Robinson W A, Hoerling M P. The modeled atmospheric response to midlatitude SST anomalies and its dependence on background circulation states. *J Climate*, 1997, 10: 971-987.
- [14] Kushnir Y, Held I M. Equilibrium atmospheric response to North Atlantic SST anomalies. *J Climate*, 1996, 9: 1208-1220.
- [15] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, 266: 634-637.
- [16] Latif M, Barnett T P. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J Climate*, 1996, 9: 2407-2423.
- [17] Frankignoul C, Czaja C A, L' Heveder B. Air-sea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models. *J Climate*, 1998, 11: 2310-2324.
- [18] Liu Z, Wu L. Atmospheric response to North Pacific SST: The role of ocean-atmosphere coupling. *J Climate*, 2004, 17: 1859-1882.
- [19] Notaro M., Liu Z, Williams J. Assessing climate-vegetation feedback in the United States. *J Climate*, 2006, 19: 763-786.
- [20] Lau N C, Leetman A, Nath M J. Attribution of Atmospheric variations in the same as 1997-2003 period to SST anomalies in the Pacific and Indian Ocean basins. *J Climate*, 2006, 19: 3607-3628.
- [21] Chiang J C H, Vimont D J. Analogous meridional modes of atmosphere-ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. *J Climate*, 2004, 17: 4143-4158.
- [22] Liu Q, Wen N, Liu Z. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L18611, doi:10.1029/2006GL026082.
- [23] Frankignoul C, Sennechal N. Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation. *J Climate*, 2007, 19: 592-606.
- [24] Liu Z, Wen N, Liu Y. On the Assessment of Non-Local Climate Feedback, Part I: The Generalized Equilibrium Feedback Assessment. *J Climate*, 2008, 21: 134-148.
- [25] Fan L, Liu Z, Liu Q. Robust GEFA Assessment of Climate Feedback to SST EOF modes. *Adv Atmos Sci*, 2010, doi:10.1007/s00376-010-0081-5.
- [26] Zhong Y, Liu Z. A joint statistical and dynamical assessment of atmospheric response to North Pacific Oceanic variability in CCSM3. *J Climate*, 2010, 21: 6044-6051.
- [27] Wen N, Liu Z, Liu Q, et al. Observed atmospheric responses to global SST variability modes: A unified assessment using GEFA. *J Climate*, 2010, 23: 1739-1759.
- [28] Honda M, Nakamura H. Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows. Part II: Its significance in the interannual variability over the wintertime Northern Hemisphere. *J Climate*, 2001, 14: 4512-4529.
- [29] Honda M, Yamane S, Nakamura H. Impacts of the Aleutian-Icelandic seesaw on surface climate during the Twentieth century. *J Climate*, 2005, 18: 2793-2802.
- [30] Kumar A, Hoerling M P. The nature and causes for the delayed atmospheric response to El Niño. *J Climate*, 2003, 16: 1391-1403.
- [31] 江志红, 吴燕珠, 刘征宇, 等. 基于广义平衡反馈方法的2009/2010中国冬季气温异常型的诊断. *热带气象学报* (待发表).
- [32] Zhong Y, Liu Z, Notaro M. A GEFA Assessment of Global Ocean Influence on US Hydroclimate Variability: Attribution to Regional SST Variability Modes. *J Climate*, 2011, 24: 693-707.
- [33] Ropelewski C F, Halpert M S. Quantifying Southern Oscillation precipitation relationships. *J Climate*, 1996, 9: 1043-1059.
- [34] Gutzler D S, Kann D M, Thornbrugh C. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of Southwestern US winter precipitation by the Pacific decadal oscillation. *Wea Forecasting*, 2002, 17: 1163-1172.
- [35] Sheppard P R, Comrie G. D, Angersbach K, et al. The climate of the US Southwest. *Climate Res*, 2002, 21: 219-238.
- [36] Mo K, Schemm J E, You S. Influence of ENSO and the Atlantic multidecadal oscillation on drought over the United States. *J Climate*, 2009, 22: 6716-6740.
- [37] Frankignoul C, Chouaib N, Liu Z. Estimating the observed atmospheric response to SST anomalies: Maximum Covariance Analysis, Generalized Equilibrium Feedback Assessment, and Maximum Response Estimation. *J Climate*, 2011, 24: 2523-2539.
- [38] Liu Z, Wen N. On the assessment of non-local climate feedback Part II: EFA-SVD and optimal feedback modes. *J Climate*, 2008, 21: 5402-5416.
- [39] Liu Z, Notaro M, Kutzbach J, et al. Assessing global vegetation-climate feedbacks from the observation. *J Climate*, 2006, 19: 787-814.