

摘 要

太平洋海温异常对北半球大气环流异常有重要影响, 而 ENSO 循环是太平洋海气耦合系统中典型的异常演变过程, 不仅描述了热带地区大气和海洋异常现象, 而且与中高纬度的气候异常变化相联系。观测分析和数值模拟结果表明中纬度与热带地区的海气相互作用存在差异, 但深入讨论不同关键海区的持续性 SSTA 对大气环流影响的工作还不充分。利用 1951.1-1999.12 间 NOAA 海洋和大气环流资料集, 分析太平洋 SSTA 与北半球冬季大气环流异常的关系, 并着重研究海温异常影响下大气环流的变化特征。

中纬度西风漂流区以及热带中东太平洋 SSTA 与北半球大气环流存在显著的相关, 是太平洋最主要的两个关键区。时频分析表明, 这两个海区区域平均的 SSTA 时间序列存在显著的 2-4 年年际振荡以及准年代际变化。自相关分析表明西风漂流区与热带中东太平洋 SSTA 在冬季的持续性较好。太平洋 SSTA 与大气 500 hPa 高度场异常的 SVD 分析表明, 太平洋海温状况与 PNA 以及 WP 遥相关型存在密切的相关, 而 850 hPa 风场与太平洋 SSTA 的 SVD 分析进一步反映了海温异常与大气遥相关间的联系。

建立两种不同的合成模型分析太平洋 SSTA 与大气环流演变特征。合成位相反映了太平洋 SSTA 演变特征, 以及相对应的大气环流异常特征: 当西风漂流区处于暖态而热带中东太平洋海温偏低时, 合成大气模型当中阿留申低压减弱, 500 hPa PNA 指数为负异常; 当西风漂流区处于冷态, 热带中东太平洋处于暖态 (El Nino 峰值-成熟期 SSTA 典型分布), 合成大气模型中阿留申低压加强, 500 hPa PNA 指数为正异常。

为确立两个关键海区持续性 SSTA 对大气环流中的作用, 进行数值试验分析并分析其物理机制。IAP AGCM 冬季条件下的敏感性试验表明, 大气环流对中纬度西风漂流区与热带中东太平洋持续性 SSTA 均有显著的响应。西风漂流区持续负 SSTA 时或者热带中东太平洋持续正 SSTA 时, 阿留申低压均有所加强, 正 PNA 指数型的大气环流特征显著。而当相反符号的 SSTA 持续作用时, 大气中阿留申低压减弱, 对应 PNA 指数为负。数值试验结果与统计分析基本一致, 并初步解释了其物理机制。

关键词: 太平洋, SSTA, 大气环流, 数值试验

ABSTRACT

The relationship between sea surface temperature anomaly in Pacific and the circulation of Northern Hemisphere is the focus of air-sea interaction research in recent years. The SSTA in Pacific contributes to Remote Response in mid-latitude atmosphere, and is connected with climate changes in global. The cycling of ENSO is typical phenomena of large scale in Pacific air-sea interaction system.

Results of recent observation and numerical experiments show that prominent difference exists between air-sea interaction in tropical and in mid-latitude, and work is not enough related to the impact of persistent SSTA on the circulation considering different district in Pacific. By use of NOAA SST and atmosphere circulation datasets, the relation between SSTA in Pacific and anomaly in circulation is studied.

Various statistical research reveals that there is significant correlation between North Hemisphere Circulation and SSTA in West Wind Drift region, as well as in tropical eastern Pacific, which are the two key regions in Pacific. The frequency analysis of area-averaged SSTA time series in key regions indicates that the power spectrum peaks is centered at 2-4yr annual oscillation, and there is also long temporal scale oscillation such as quasi decadal oscillation revealed by Wavelet Analysis. Singular Value Decomposition (SVD) analysis shows significant correlation exists between Pacific SSTA pattern similar to peak-mature phase of El Nino event and Remote Response Pattern of PNA and WP in 500 hPa geopotential height, which is further confirmed by SVD analysis between SSTA and 850 hPa wind fields.

On base of results above, composite model of SSTA in Pacific and circulation anomaly are constructed for analysis their evolution. During mature phase of El Nino usually in winter, positive SSTA dominates in tropical eastern ocean and negative SSTA dominates in West Wind Drift District in mid-latitude ocean, correspondingly the PNA index of 500 hPa geopotential height is positive which means the Aleutian Low gets strong, and the situation is somewhat inversely during La Nina phase of SSTA. Numerical experiments are set up for analysis impact of SSTA in two key regions on atmosphere circulation.

Under perpetual winter condition IAP R15L9 AGCM is set up for sensitive experiments of Pacific SSTA without seasonal variability. The circulation of positive PNA index pattern is prominent in the case of persistent forcing of negative SSTA in West Wind Drift region or positive SSTA in tropical eastern Pacific, which is the typical SSTA Pattern during El Nino peak-mature phase. And the results is somewhat inversely forced by SSTA of opposite sign in distribution.

Key Words: Pacific, SSTA, Circulation, Numerical Experiments

第一章 引言

1.1 热带地区海气相互作用

海气相互作用一直是近年来研究的热点, 现有研究集中在对热带海气耦合系统尤其是 ENSO 现象的演变机制上。ENSO 循环是海气耦合系统中典型大尺度环流异常演变过程^[1], 其时间尺度从 2—10 年, 空间尺度上可影响到全球范围。ENSO 循环不仅是热带地区和海洋异常的年际变化的现象, 并且与中纬度气候异常变化相关联。

Rasmusson and Carpenter^[2] 根据 1949-1974 年之间 6 次主要的 El Nino 事件进行合成分析, 提出了 El Nino 演变过程的图像。分析表明 El Nino 事件的发展与季节循环存在明显的依赖关系, 即所谓对季节循环的“锁相”(locked Phase)特征: El Nino 事件一般开始于北半球春季, 海温正距平(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)在秘鲁沿岸—赤道东太平洋形成; 到了晚夏和初秋 El Nino 事件的发展期间, 暖水从赤道东太平洋扩展到赤道中太平洋; 至晚秋和冬季, 赤道中东太平洋的海温距平达到最大值, 称为 El Nino 事件发展的成熟期, 此后热带中东太平洋的正 SSTA 信号开始减弱, El Nino 事件进入衰落期。

ENSO 期间热带太平洋对大气的异常加热影响到全球范围。Bjerknes^[3]分析了热带和温带大气环流变化之间的关系, 认为 ENSO 冬季期间观测到的阿留申低压的加深是 Hadley 环流加强的结果, 这是由于 Hadley 的加强增加了高层角动量向北输送, 引起了较强的西风和增大的经向气压梯度。Bjerknes 描述的三个北太平洋—北美环流距平区与太平洋—北美遥相关型(PNA)有关。在 ENSO 年冬季, 这些距平中心和赤道附近的反气旋距平中心形成一支明显的波列, Horel and Wallace^[4]认为这一遥相关型可能反映了自赤道附近的异常强迫区向高纬传播的沿大圆路径的 Rossby 波列。

1.2 热带外地区 SSTA 与大气环流相互作用的研究

热带地区 SSTA 与大气环流存在显著的相互作用, 热带外中纬度 SSTA 在全球海气相互作用中也有相当重要的地位。在中、长期预报中, 往往将中纬度和热带地区的大陆和海表特征的某些统计指标视为大气变化的重要预报因子。

中纬度 SSTA 与大气之间的相互作用是大气科学中长期争论的问题, 研究难点主要集中在: 一, 难以区分中低纬度海洋对大气变化的贡献, 需要从物理规律出发, 设计更好的数学方法, 评价中纬度海洋对大气变化的影响。二, 中纬度大气对热源的响应与热带大气不同, 很难像热带地区一样达到对流层顶。三, 对应观测中的大气环流异常特征, 通常从两方面解释原因: Webster^[5],

Hoskings and Karoly^[6]首先从海温强迫、地形强迫等大气外强迫进行模拟研究；而 Charney^[7]将大气持续异常同系统内部动力过程导致的非线性多平衡态相联系。事实上两方面的研究工作都是不充分的。

Davis^[8]研究表明，北太平洋 SSTA 第 1 经验正交函数主分量(EOF)以 35°N 为轴心有一个横跨太平洋的纬向中心，在阿拉斯加有一个与之反号的中心，这种模态经常发生在 El Nino 期间。Pole RM^[9]研究表明北太平洋冬季 SSTA 的持续异常具备从北太平洋中部传播到阿拉斯加湾南部的时空变化特征。

Namias^[10-12]对北太平洋中部 SSTA 与大气环流异常的关系进行了分析。北太平洋中部存在 SSTA 方差极大值区，其中心最大值与 El Nino 区域的均方差最大值基本相当。Namias 认为 700hPa 高度场对 SSTA 的响应，导致北美西岸脊发展，东岸槽加深，解释了 1976/77 冬季美国东部的严寒。

尽管个例研究表明在北太平洋 SSTA 影响了大尺度大气环流，但中纬度 SSTA 对气候是否有显著影响仍然有争论。Barnett 和 Harnack^[13]的经验预测研究表明，同热带 SSTA 相比，中纬 SSTA 预测技巧很弱。Frankignoul^[14-15]利用基于多变量显著性检验的统计分析方法，发现北太平洋中纬度的 SSTA 存在对北半球大气环流有较弱的影响，但这种影响效果超过了显著性水平检验。

大量的观测分析和理论研究证明中纬度大气的变化既有中纬度海洋的作用，也有热带海洋的作用。Wallace 遥相关理论、Hoskings and Karoly 关于 Rossby 在球面上频散的理论都表明了强迫作用对中纬度大气的变化是重要的。

Clare Deser and Blackmon^[16]利用 EOF 分析，研究了 SST 与表面风场的关系、热带和北太平洋 SSTA 之间的联系以及一个 SSTA 指数与冬季位势高度异常之间的联系。

朱乾根^[17]指出北太平洋 SSTA 对东亚季风有一定的影响，特别是对我国东部夏季风降水有明显的作。太平洋中纬度海温异常首先对同期 850hPa 斜压波列施加影响，从而对中国东部夏季降水产生影响。

林学椿^[18]的研究表明，北太平洋异常海温区的海气相互作用是很强的。暖水区上空附近出现高度场的正距平区，冷水区出现高度的负距平区。当北太平洋为冷水时，东亚大陆将建立一个弱的平均脊区。海水分布的北冷南暖型使太平洋、北美地区环流指数减少，经向环流加大，南冷北暖型使这两个地区环流指数增加，纬向环流发展。这种影响对太平洋地区几乎是和海温型的形成是同步的，并以每月 15 个经度向东传播。

若干研究表明^[19-20]，北太平洋海区海温异常的持续性敏感区与我国夏季降水关系密切。海温异常分布型可通过夏季热带对流活动以及中高纬环流异常，与华北夏季降水异常产生联系。

近年太平洋地区 SSTA 的年代际变化^[21] (Pacific Decadal Variability, PDV) 成为研究的热点。将基于 EOF 主分量与 ENSO 变化相一致的部分，视为年际气候变化的代表，而其余则认为年代际时间尺度的变化，并认为与 ENSO 模有类似之处，称为类 ENSO 模，也称为北太平洋年代际振荡。李崇银^[22]研究了关

于北太平洋海温的年际以及年代际变化与大气环流、气候的异常之间的联系,表明北太平洋 SST 的年代际变化包括 25-35 年以及 7-10 年两个基本模。

1.3 海气系统的数值模拟研究

大气环流模式 (General Circulation Model, GCM) 是理解大气对 SSTA 响应的有效方法,使用 GCM 模拟 SSTA 强迫下的大气响应已成为海气系统动力学研究的重要手段^[23]。利用模式模拟数据,能够提供可以和真实大气相比较的模式大气特征,模拟结果经过分析诊断后能够了解模式大气的对异常 SSTA 响应,以及它与真实大气的关系。

海气间的能量交换由风、温度、湿度以及 SST 控制,大空间尺度范围的 SSTA 与大气异常之间存在紧密的相关。滞后相关分析、SSTA 随机模型的发展以及耦合海气模式的模拟表明在热带外地区是大气驱动海洋,但 SSTA 对大气也有反馈作用,中纬度 SST 相对季节平均的偏差强烈依赖于海气相互作用。一些统计研究和数值模式结果表明在特定季节中纬度 SSTA 影响了大气环流的发展。然而在早期 GCM 中的模拟表明,只有 SSTA 振幅放大的数值试验,才能在模式大气异常试验的数据统计上出现显著的遥相关响应,这种现象的原因可能是由于试验个例中信噪比太小,或可能与 GCM 性能有关。但在大多数情况下,模式大气对中纬度 SSTA 的响应是可辨别出来的。

Blackmon^[24]使用 NCAR Community Climate Model 研究了 1 月份大气对太平洋海温异常的响应。在控制试验中模式使用的气候海温场,暖个例试验中由气候海温场叠加给定的 SSTA 场;冷个例试验中,模式海温场为气候平均场减去暖个例给定的 SSTA 场。模式大气 500 hPa 异常在北太平洋和北美地区的异常中心分布和 PNA 遥相关型类似,西欧上空出现负异常中心,西伯利亚地区出现正异常中心。模式结果表明北半球冬季大气 PNA 型的距平场是赤道中太平洋潜热异常直接强迫的结果。

Chevin^[25]利用 NCAR GCM 研究了模式气候对 SSTA 的敏感性,验证了 GCM 对 SSTA 响应在物理上的合理性,并以观测数据的统计分析证明。GCM 响应包括长波振幅的变化、垂直倾斜结构的变化以及暖水区增强的直接热力环流;对流层中层的响应延伸到 SSTA 区下游。模式大气响应的气候特征是显著的:在正 SSTA 附近,相对的直接热力环流增强,低层对流层气压降低,对流层上层气压上升,垂直运动增强。模式大气响应对 SSTA 的空间位置,以及该区域模式大气的气候特征较敏感。中纬度大气异常响应引发了下游波状变化,但副热带大气异常响应局限于 SSTA 区域附近。在研究中证明了 GCM 对北太平洋海域 SSTA 强迫响应的一些关键机制,但在模式中使用了不合理的大的 SSTA。

Shukla^[26]的数值研究表明,北半球冬季大气对中纬度 SSTA 的响应很弱,但与赤道 SSTA 有较强的遥相关,但一些试验表明 PNA 流型也可由北太平洋中纬度的异常海温激发。某些数值模式中的 200hPa 高度场对 Rasmusson 合成模型

的 SSTA 的响应给出了清晰的 PNA 流型,但另外一些试验给出了不清晰的结果,例如正海温距平和负海温距平所产生的北半球 700hPa 高度距平场的分布是基本一致的,与 PNA 型流场相似。这些问题说明对中纬度海气相互作用的物理机制还不清晰。

Palmer and Sun^[27]从观测分析、理论研究和数值模拟三方面分析了北大西洋纽芬兰湾 SSTA 对大气环流的作用,证明了中纬度海洋对大气的强迫作用。研究表明在中纬度大西洋存在 SSTA 持续作用时,大西洋中部有正的位势高度异常,欧洲有负的位势高度异常。模式结果表明 GCM 对中纬度 SSTA 的异常响应弱于对热带地区 SSTA 的响应,并从物理机制上解释了中纬度海气相互作用的正反馈过程。

Alexander^[28]利用 CCM 与一个北太平洋海洋模式的耦合研究了 EL Nino/La Nina 期间北太平洋区域的海气相互作用,指出北太平洋 SSTA 对大气的作用可解释北半球大气异常的 1/3。Ni^[29]利用类似的模式模拟了北半球冬季大气对赤道中东太平洋海温距平的响应。在北半球也同样模拟了类似 PNA、WA 和 EUP 型的位势高度异常分布。

Y. Kushnir and Lau NC^[30]利用一个 GCM 研究了大气对北太平洋 SSTA 不同空间分布特征时的响应。数值试验表明,大气对 SSTA 强迫最显著的响应特征是高度异常的相当正压结构。当北太平洋 SSTA 以 40°N 为中心呈双极“+-”型分布时,在 SSTA 中心附近存在低压异常,异常低压中心向东伸展。同时对流层底层的气温的异常响应表明北太平洋上大气斜压性较弱。

Lau and Nath^[31]应用一个 GFDL 的 15 波菱形截断的 9 层模式进行了若干 SSTA 敏感性试验。热带试验表明,暖异常试验合成代表的 500 hPa 高度异常场,阿留申地区为负异常,加拿大地区正异常,北美高纬度东岸存在负异常,响应值大概在-50 位势米左右,冷异常试验合成的形势大致与此相反。中纬度试验表明,暖异常试验的 500 hPa 高度异常上,中纬度北太平洋有较弱的正异常,加拿大—北美西岸存在弱的负异常(-10 到-20 位势米),北美高纬东岸为正异常,极区的响应也较强。热带太平洋正 SSTA 伴随有异常的表面气旋性环流。在北太平洋,异常的表面西风以及北太平洋中部北风与负热量通量异常共存,阿拉斯加湾增强的西南风伴随着正的热量通量。当干冷空气相伴的异常北风越过相对暖的海洋表面时,将会增强热量和水汽的损失,这样就降低了局地的 SST。相反的,当与异常南风相随的暖湿空气入侵将会导致正 SSTA 发展。而 30—40 度之间气候平均西风的加强将会提高从海洋表面的热量通量,这样会降低海表温度。

Zhou TianJun 等^[32]研究表明赤道太平洋 SSTA 强迫导致了北太平洋大气环流异常响应,而中纬度大气环流的异常又通过海洋混合层的动力过程强迫局地 SSTA 的发展,大气桥 (Atmosphere Bridge)^[33]发挥了关键的物理机制,以此解释北太平洋西风漂流区与 El Nino 同时发展的 SSTA 的现象。

1.4 海气相互作用的若干物理机制

Simmons^[34]根据简单动力学模式研究表明,在冬季北半球大气对热带强迫的响应可形成类似于 PNA 型,具有固定地理位置的正规模式。在这样的背景条件下,强的降水区及其伴随的对流层高层反气旋的东移或西移都将产生与 PNA 型类似的大气响应。

Cayan^[35]研究了北半球中纬度海洋的潜热和感热通量对 SSTA 的驱动作用。热带太平洋的处于暖位相时,海洋模式中强的西边界流可能会从热带地区输送更多的热量到中纬度地区,在亚洲海岸引起微弱的正 SSTA 信号,并且中纬度 SSTA 可能由于 SST-气压梯度-风速-热量通量扰动的正反馈加强。

Lau and Nath^[36]利用一个 GFDL 的数值模式研究了热带以及热带外 SSTA 在全球海-气耦合系统中的相对作用。由于洋盆空间尺度决定了其内在变化具有长期的时间尺度,因而不可能将当前时段异地海洋 SST 变化完全归因于海洋内部过程。分析表明北太平洋 SST 场首要是由当地的大气环流驱动,是对热带太平洋 SST 变化的遥响应。

Namias and Born 的研究表明中纬度大尺度 SSTA 的持续具有季节性特征。在北大西洋和北太平洋选择的关键区域表明, SSTA 从冬季持续到下一年冬季, SSTA 的持续长达 1 年。关键区内 SSTA 的持续性表明冬季的影响延长,而夏季 SSTA 并不显著, SSTA 在几个月内很快衰减。Clare Deser^[37]对北太平洋中纬度 SSTA 的持续性提出了物理解释,指出上层海洋混合层深度的季节发展可能是关键因素。研究表明冬季活跃的海气交换导致的温度扰动扩展到冬季混合层的深部,当晚春混合层变浅时,在夏季混合层高度层分的条件下,冬季 SSTA 导致的热力异常于浅的混合层之下,与海气热交换相绝热,当晚秋以及早冬混合层有一次加深时,次表层的热力异常或许会重新进入混合层,这样就在下一个冬季影响海表温度以及混合层热量平衡。

Peng S and J S Whitaker^[38]总结了大气对中纬度 SSTA 响应的物理机制研究进展。研究表明对海洋关键区的确定需要更为仔细,包括新的数值模式模拟,分析冬季之外的其他季节的响应,大气响应的垂直结构,大气响应结构与模式内部大气变率的比较,大气非线性响应特征的分析以及风暴轴作用的分析等都需要深入研究。

1.5 进行的研究工作

研究工作探讨太平洋海温异常与北半球冬季大气环流异常的关系,并重点研究太平洋不同关键海区的 SSTA 对大气环流的变化影响。

探讨太平洋地区海温异常基本时空特征,确立与大气环流异常相联系的关键海区及关键区 SSTA 变化特征。

研究北半球大气环流异常的主要信号—遥相关型异常的时空特征。

综合分析海洋—大气系统演变的基本特征，建立 SSTA 合成距平模型，研究同期大气环流的异常的基本特征。

为确立 SSTA 在影响大气环流中的作用，进行数值试验分析。应用 IAP AGCM，在控制数值试验的基础上，进行 SSTA 强迫试验；分析数值结果，研究太平洋 SSTA 强迫下北半球冬季大气环流异常，确立与观测数据中环流异常指标的关系。在统计分析和数值试验数据分析的基础上，尝试从物理机制上解释大气环流对太平洋不同关键海区 SSTA 持续作用下的响应机制。

第二章 太平洋海温异常与北半球大气环流异常

关系的统计分析

2.1 太平洋海温异常基本时空特征分析

2.1.1 资料说明

采用资料是 NOAA 官方网站 (<http://www.cdc.noaa.gov>) 提供的 1951.1-1999.12 期间月平均的海洋-大气资料集: 位势高度场、风场、海平面气压场资料以及海表温度 (SST) 资料。同期 NCAR/NCEP 提供的感热、潜热通量资料。

空间分辨率: 除海温场为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 外, 其它资料均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

太平洋海温主要研究区域: $20^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}-80^{\circ}\text{W}$ 。

NOAA 海温资料纬向范围 $88^{\circ}\text{S}-88^{\circ}\text{N}$, 经向包括全球范围。NOAA 月平均全球海温资料从 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 原始海温观测资料处理得来^[39], 其应用先进统计学方法保证使用较稀疏的观测数据时格点数据的稳定重建。



Fig2.1 冬季海温均方差

计算表明研究区域内海温在冬季均方差最大的区域位于热带中东太平洋, 均方差最大值在 1.8°C 左右。在 $30^{\circ}-45^{\circ}\text{N}$ 的西风漂流区, 存在弱于于热带中东太平洋的方差极值中心, 中心数值在 1.2°C 左右。

2.1.2 太平洋海温异常旋转 EOF 分析

根据 1951.1-1999.12 之间 588 个月的太平洋 SST 资料, 去除季节变化趋势建立海温距平 (SSTA) 场。经验正交分解 (EOF) 是分析 SSTA 时空特征较好的方法, 但 EOF 方法对资料取样的要求较高, 分离出的空间结构难以表达不同地理区域的特征, 采用旋转经验正交函数 (REOF) 可以克服以上缺点^[40]。REOF 分析的典型空间分布结构清晰, 可以较好的反映中纬度和热带太平洋地区 SSTA 的区域性时空特征以及相关分布状况。

计算过程中选取 EOF 分析的前 15 个 PC (Primary Component, 简称 PC) 进行旋转。旋转后前三个 RPC (Rotated Primary Component, 旋转主分量) 的

方差贡献分别为 50.22%，12.42%，8.63%。RPC 的空间系数场又称为载荷向量 (Loading Vector)。

第 1 载荷向量 (Fig2.2) 方差贡献占 50% 以上，表明了太平洋海温信号中最主要的时空特征，此载荷向量主要反映热带东太平洋 El Nino 信号特征。热带中东太平洋载荷系数绝对值较大，中纬度西风漂流区载荷系数绝对值相对较小，其变化的幅度也相应较小。西风漂流区与热带中东太平洋的载荷系数符号相反，表明两区域 SSTA 相反的空间分布特征。第 1 载荷向量空间结构与典型 El Nino/La Nina 事件峰值—成熟期 SSTA 的分布特征相似，其时间系数也反映了 El Nino 事件最强烈的信号—热带中东太平洋 SSTA 时间变化特征，从图中可清晰分辨在 1951 年-1999 年发生的若干次 El Nino/La Nina 事件。

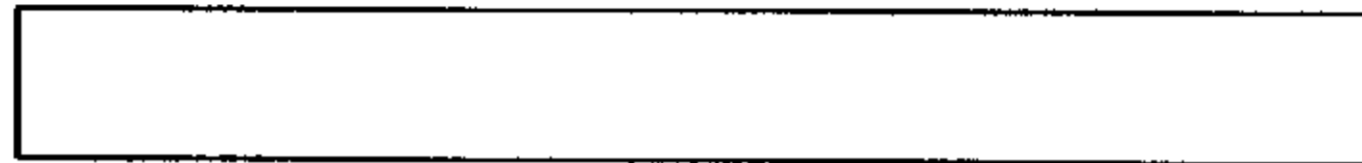


Fig2.2-2.4 旋转 EOF 分析的前 3 个载荷向量及其时间系数

第 2 载荷向量 (Fig2.3) 的方差贡献 12.4%。载荷系数绝对值在热带地区较小，系数绝对值较大的区域集中在中纬度海区，成东西向偶极子分布。150°W 以西的中纬度西风漂流区 (纬度范围 35°-40°N) 均为负系数分布，负值中心位于 160°W 左右；正系数区主要分布在 140°W 以东的中纬度洋面，正值中心位于北美加利福尼亚沿岸附近。该载荷向量主要反映了中纬度海区的 SSTA 时空分布特征。

第 3 载荷向量 (Fig2.4) 的方差贡献为 8.3%。载荷系数较大的区域集中在以 40°N 为中心的东亚急流出口区下的洋面，正值中心位于 160°E 附近，其他地区的空间载荷系数都较小。前三个载荷向量占据方差贡献的 70% 以上，反映太平洋 SSTA 主要时空分布特征，方差贡献最大的第 1 载荷向量主要反映 El Nino/La Nina 事件中热带中东太平洋 SSTA 特征，第 2、3 个载荷向量主要反映了中纬度海洋西风漂流区的 SSTA 特征，方差贡献占 20% 以上。REOF 的分析表明，除热带中东太平洋表征 El Nino 事件的 SSTA 信号以外，中纬度西风漂流区以及黑潮区的 SSTA 在太平洋地区 SSTA 时空变化中占据相当重要的地位。

2.1.3 太平洋海温异常的持续性分析

为研究冬季太平洋 SSTA 持续性，使用自相关技术可以比较清楚的辨明 SSTA 持续较好，对大气持续施加影响的区域^[41]

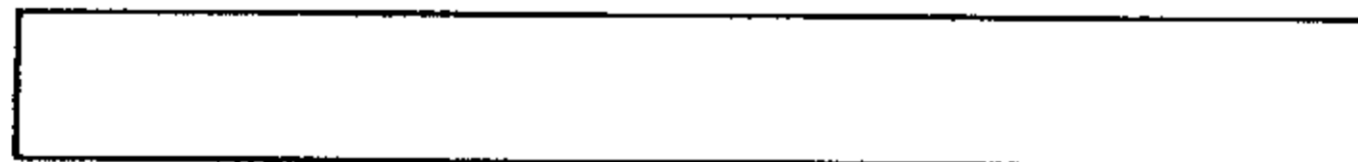


Fig2.5 1 月、4 月、7 月和 10 月 SSTA 滞后 3 个月的自相关

滞后时间为 k 的自相关系数为：

$$R(k) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - \bar{x})(x(t+k) - \bar{x}(t+k))}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t+k) - \bar{x}(t+k))^2}}$$

对 1951 年-1999 年间月均 SSTA 场进行滞后时间 1-6 个月的自相关分析，滞后 3 个月的自相关系数超过 0.05 信度检验即可认为该区域的 SSTA 持续性较好。春季 4 月份 SSTA 持续状况 (Fig2.5a) 表明，春季 SSTA 变化较快，热带中太平洋和西风漂流区的自相关系数都较小，这两个区域 SSTA 的持续性较差，不具备持续性的特征。夏季 7 月份滞后 3 个月的 SSTA 自相关 (Fig2.5b) 较好的区域位于在热带中东太平洋，而西风漂流区 SSTA 持续性较差。秋季 10 月份热带中东太平洋滞后相关性 (Fig2.5c) 仍然较好，但相关中心较夏季向西漂移；西风漂流区 SSTA 持续性较好。冬季 1 月份 SSTA 滞后 3 个月的自相关系数 (Fig2.5d) 超过信度检验的海区位于在中纬度的西风漂流区、热带中东太平洋，相关中心都在 0.8 以上。

在 SSTA 滞后 3 个月的自相关图上，热带中东太平洋 SSTA 信号随季节的传播特征比较清楚：春季秘鲁沿岸海区开始增温，夏季 SSTA 信号从东太平洋向西传播，整个热带中东太平洋开始增温，而在秋冬季节 SSTA 振幅的最大值逐渐漂离秘鲁沿岸，传播到中东太平洋。西风漂流区的 SSTA 信号也具备类似的季节特征，在春、夏季节 SSTA 的持续性较差，而在秋、冬季节的持续性较好。

各个季节 SSTA 的自相关分析表明，冬季西风漂流区和热带中东太平洋的 SSTA 具备较好的持续性，对大气变化施加的影响最为重要，并为数值试验 SSTA 在时间和空间上的设计提供了依据。

2.2 太平洋 SSTA 与大气环流的相关关系

2.2.1 逐月 PNA/WP 指数与海温异常的相关分析

PNA 指数和 WP 指数反映北半球大气环流异常的主要特征，并且这种特征在冬季尤为明显。计算大气遥相关指数与海温场的相关，可表明大气环流异常与海温异常相关最紧密的区域。PNA 指数定义为^[42]：

$$PNA = \frac{1}{4} [z'(20^\circ N, 160^\circ W) - z'(45^\circ N, 165^\circ W) + z'(55^\circ N, 115^\circ W) - z'(30^\circ N, 85^\circ W)]$$

其中 z' 为标准化的 500 hPa 位势高度。

对应正 PNA 指数值, 阿留申地区受 500 hPa 高度负距平控制, 阿留申低压较强; 对应负 PNA 指数值的大气环流, 阿留申低压较弱, PNA 遥相关是相当正压结构。Fig2.6 表明 1951.1-1999.1 月平均 PNA 指数与北太平洋中部以 35°N 为中心的西风漂流区 SSTA 为显著的反相关; 另一与 SSTA 相关显著的区域在热带中东太平洋, 但表现为正相关。大气 PNA 型与海温场相关显著的关键海区是中纬度的西风漂流区以及热带中东太平洋。



Fig2.6 1951.1-1999.12 间 PNA 指数与 SSTA 的相关

WP 指数定义为^[42]:
$$\text{WP} = \frac{1}{4} [z'(60^{\circ}\text{N}, 155^{\circ}\text{E}) - z'(30^{\circ}\text{N}, 155^{\circ}\text{E})]$$

对应正 WP 指数, 阿留申低压和日本上空的急流较弱; 负 WP 指数型环流特征正好相反。WP 遥相关也是相当正压结构。Fig2.7 为 1951.1-1999.12 间 WP 指数与太平洋 SSTA 的相关: 负相关显著的区域位于日本东南的黑潮区; 正相关显著的区域主要位于勘察加半岛海域附近以及副热带海区, 在热带中东太平洋 WP 指数与 SSTA 的相关性并不显著。



Fig2.7 1951.1-1999.12 间 WP 指数与 SSTA 的相关

大气遥相关指数与海温异常的相关表明, 与大气 PNA/WP 型遥相关相关最显著的区域是北太平洋西风漂流区、热带中东太平洋以及黑潮区。

2.2.2 太平洋海温异常与北半球 500 hPa 位势高度异常的奇异值分析

奇异值分析 (SVD) 是研究大尺度海气耦合系统的有力工具, 可清晰描绘两个场之间的高相关区^[43]。选取 1951.1-1999.12 之间月平均太平洋 SSTA 与同期北半球 500 hPa 高度场异常进行 SVD 分析。

SVD 第 1 对奇异向量解释方差为 66.9%, 奇异向量时间系数相关 0.54。SSTA 异类相关图 (Fig2.8a) 上相关显著的区域分别位于: 1) 赤道东太平洋, 中心的相关系数在 0.8 以上; 2) 北太平洋以 35°N 为中心的西风漂流区, 中心相关系数在 -0.6 以上。另一个相关显著的地区位于以 10°N 为轴心的副热带海区 ($140^{\circ}\text{E}-180^{\circ}$)。中纬度西风漂流区与热带中东太平洋的异性相关系数符号相

反。SVD 第 1 模态中，北半球 500 hPa 高度异常的异性相关系数 (Fig2.8b) 表明热带高海气相关性，中纬度大气有显著的太平洋—北美 PNA 遥相关型特征。第 1 对奇异向量表明，冬季太平洋 SSTA 与北半球 PNA 型环流异常可能存在较好的对应关系。



Fig2.8-Fig2.9 SSTA 与 500hPa 高度场第 1、2 对奇异向量异性相关

第 2 对奇异向量解释方差 8.8%，其时间系数相关 0.38。SSTA 异类相关 (Fig2.9a) 显示了中纬度太平洋海温异常偶极子分布形态，正相关较大的区域位于以 30°N 为轴心，从东亚沿岸到 180° 附近的北太平洋西风漂流区；负相关区位于阿拉斯加湾—加利福尼亚太平洋沿岸附近，但异性相关系数绝对值相对较小，热带地区的相关系数也比较小。500 hPa 位势高度异常的异性相关系数 (Fig2.9b) 表明，在东亚—西太平洋附近，中高纬度位势高度异常的异性相关系数符号相反，其正负相关中心的绝对值都在 0.5 以上，与 WP 型遥相关型环流的空间分布较为类似。

2.2.3 SVD 奇异向量时间系数及功率谱分析

为分析 SSTA 与 500 hPa 高度异常奇异向量的时间变化，对标准化的奇异向量时间系数进行功率谱分析^[44]。采用自谱估计方法计算功率谱（最大时间滞后 120 个月），并进行信度 0.05 的红噪声检验。

太平洋 SSTA 第 1 奇异向量的时间系数 (Fig2.10a) 清晰的表明了 1951-1999 年间 El Nino/ La Nina 事件的时间特征，正指数表明暖事件 (El Nino) 发生，负指数表明冷事件 (La Nina) 发生。显著的 El Nino 事件发生在：1957-58, 1972-73, 1982-83, 1986-87, 1991-1992 以及 1997-1998 年，显著的 La Nina 事件发生在：1955, 1970-71, 1975-76 以及 1987-88，与观测统计指出的 El Nino/La Nina 事件历史记录基本一致^[45]。时间系数表明 70 年代前气候处于偏冷态，La Nina 事件活动频繁，振幅也较同期的 El Nino 事件强；而 80 年代以来太平洋有明显增温的趋势，El Nino 事件发生次数较多，振幅较强，最为明显的是 1982—1983 以及 1997—1998 两次 20 世纪最强的 El Nino 事件。时间系数的功率谱分析 (Fig2.10b) 表明，通过信度 0.1 红噪声检验的显著周期带为 2-4 年，反映 El Nino 事件的年际变化特征。



Fig2.10 SSTA 第 1 奇异向量时间系数以及功率谱分析

第 1 对奇异向量中 500 hPa 高度异常的时间系数 (Fig2.11a) 主要表明大气 PNA 流型的时间变化特征。负时间系数对应大气环流 500 hPa 上负 PNA 指数流型, 阿留申低压偏弱; 正时间系数对应大气当中正 PNA 指数流型较明显, 阿留申低压偏强。70 年代中期来 PNA 遥相关型的演变趋势表明, 在偏暖态气候背景下正 PNA 指数型的大气环流特征比较明显。功率谱分析表明 (Fig2.11b), 通过 0.1 红噪声检验的显著周期包括 10 年左右的年代际振荡、准 4 年的年际振荡以及更小尺度的振荡。

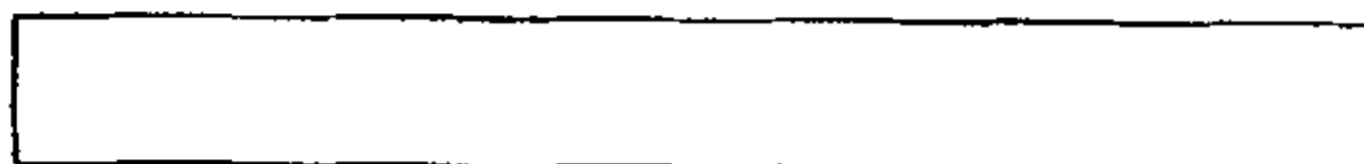


Fig2.11 500 hPa 第 1 奇异向量时间系数及功率谱分析

鉴于自谱估计方法的不足, 难以准确辨明各个关键区 SSTA 序列在频域上的主要特征, 而小波分析^[46]方法作为近来优秀的信号分析工具, 可较准确的诊断信号的时频特征。在此之前, 继续应用 SVD 方法诊断北太平洋 SSTA 与大气环流间的相关特征。

2.2.4 太平洋 SSTA 与 850 hPa 风场异常 SVD 分析

对太平洋 SSTA 与 850 hPa 风场异常进行 SVD 分析。第 1 对奇异向量的方差贡献 62.3%, 奇异向量时间系数的相关为 0.86。SSTA 异性相关系数 (Fig2.12a) 最显著的区域为热带中东太平洋、以 35°N 为轴心的中纬度西风漂流区, 两区域分布的异性相关系数反号。850 hPa 风场异常的异性相关系数场上 (Fig2.12b), 热带地区盛行的西风异常, 而阿留申地区为气旋性异常。第 1 对奇异向量表明了 El Nino 峰值—成熟期间热带中东太平洋维持正海温异常, 西风漂流区维持负海温异常时, 大气对应的 850 hPa 风场特征^[47]: 热带地区大气在正 SSTA 强迫下, 活跃的对流上升运动导致低层大气向 SSTA 区的辐合; 中纬度地区风场气旋性异常与阿留申低压的加强相联系。在 La Nina 事件期间, 850 hPa 环流特征形势与之大概相反。

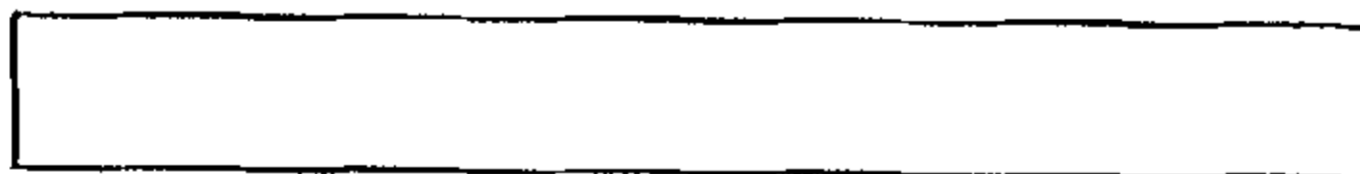


Fig2.12-2.13 SSTA 与 850 hPa 风场第 1、2 对奇异向量

第 2 对海温异常-风场异常奇异向量的方差贡献 12.9%, 其时间系数相关为 0.77。海温异常的异性相关系数 (Fig2.13a) 与 2.2.3 中 SSTA 和大气 500 hPa 高度异常进行 SVD 分析时的结果显著不同, 异性相关系数较大的区域位于热带中

太平洋以及热带西太平洋，两区域分布的异性相关系数符号相反，而西风漂流区异性相关系数较小。Fig2.13b 表明了 850 hPa 风场异常的异性相关系数分布，热带地区的风场向 SSTA 异性相关的正中心辐合，副热带为气旋性异常，阿留申地区为反气旋性异常。第 2 对奇异向量主要反映了 El Nino/La Nina 事件发展阶段的大气特征。

海温异常与 850 hPa 风场异常的 SVD 分析揭示了 SSTA 与大气低层环流的相关特征，与 850 hPa 风场异常紧密相关的海区包括热带中东太平洋和西风漂流区。方差贡献最大的奇异向量表明了 El Nino 峰值—成熟期间海洋和大气的高相关特征。

2.2.5 SSTA 关键区的确立及 SSTA 序列多尺度特征分析

根据均方差分析、REOF 以及 SVD 的分析结果，海温异常与 500hPa 高度异常、850 hPa 风场异常相关最紧密的地区以及 SSTA 持续性最好的地区都集中在太平洋中纬度西风漂流区、热带中东太平洋。另外不完全具备以上特征，异常信号相对较弱的海区还包括黑潮区、北半球副热带特定海区。为便于分析太平洋 SSTA 变化特征划分以下关键海区：

Nino C Region: 180° - 90° W, 10° S- 0° 热带中东太平洋^[48]

NPAC Region: 160° E- 160° W, 35° N- 45° N 北太平洋中部西风漂流区

Kuroshio Region: 120° E- 150° W, 15° N- 30° N 黑潮区

Subtropical Region: 160° E- 170° W, 5° N- 15° N 副热带太平洋



Fig2.14 关键海区的划分范围

对 1951.1-1999.12 之间 588 个月关键海区区域平均的 SSTA 序列进行功率谱分析。黑潮区和副热带海区异常海温序列功率谱分析（图略）表明主要是 2-4 年周期比较显著，并伴随有较长周期的低频振荡。

研究表明^[49]采用 180° - 90° W, 10° S- 0° 间区域平均 SSTA 涵盖 Nino3、Nino4 区 SSTA 信号，可较清晰的监测 El Nino 事件发展。Fig2.15a 上比较显著的 El Nino 事件（暖事件）主要发生在：1957-1958 年，1966 年，1973-1974 年，1982-1983 年，1992-1993 年，1997-1998 年。比较显著的冷事件有：1956-1957 年，1965 年，1976-1977 年，1985 年，1988 年。80 年代以来 El Nino 事件发生次数增多，振幅也有增强，1997-1998 年的 El Nino 事件为本世纪以来最强的一次 El Nino 事件。功率谱分析（Fig2.16a）表明 Nino C 区区域平均 SSTA 序列具备多种尺度的振荡，其中 2-4 年的年际振荡以及 7-8 年较长尺度的低频振荡较为显著。

同期 NPAC 区区域平均的 SSTA 的功率谱（Fig2.16b）分析表明，通过 0.1

信度检验的主要周期带在 2-4 年，然而时间序列信号中也存在更长时间尺度的振荡，周期可能在 10 年以上。鉴于功率谱分析对于低频振荡分辨能力的不足，对序列又进行了小波分析。



Fig2.15-2.16 关键海区 SSTA 时间序列以及功率谱分析

为研究关键区 SSTA 信号的多尺度特征，对其进行小波分析 (Wavelet Analysis)。小波分析将一维信号在时间和尺度 (频率) 两个方向上展开^[50]，能够分辨局部的奇异点，并判断气候序列的显著周期。

小波分析的基本方法：首先将 1951.1-1999.12 之间月平均 SSTA 标准化序列进行对称延伸 (原序列的头尾分别向前、向后对称延伸) 由 588 扩展到 1024，应用基于快速傅立叶变换 (FFT) 的快速小波变换算法，小波变换后仅分析延拓前原时段的小波变换系数。

若采用快速小波算法，小波变换尺度将按照 2 的幂指数进行增长，和变换尺度对应的伪频率 (Pseudo-Frequency) 与序列取样率以及变换方法有关。选用 MEXH (墨西哥帽小波) 与复 Morlet 小波进行小波变换，其变换尺度与对应的伪周期如表 2.1 所示。

所采用的小波变换方法均根据数学工程软件 MATLAB Release 12 中 Wavelet Toolbox (Copyright 1984-2001, MathWorks Inc) 中提供的标准小波快速算法。

$$\text{MEXH(墨西哥帽)小波原型函数: } \text{MEXH}(x) = \frac{2}{\sqrt{3\pi^4}} (1-x^2)e^{-\frac{x^2}{2}}$$

$$\text{Morlet 复数小波原型函数: } \text{CMOR}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi Fb}} e^{i2\pi Fc x} e^{-\frac{x^2}{2Fb}}, \text{ 其中 } Fb \text{ 为带宽参}$$

数，Fc 为小波中心频率。

小波分析分析对象为信号的小波变换系数。以纵轴代表小波变换尺度，横轴代表时间，等值线值为小波变换系数，代表 SSTA 的振幅，正值中心对应的时段 SSTA 正异常较大，对应 El Nino 暖事件，负值中心对应时段 SSTA 负异常较大，对应 La Nina 冷事件。

表 2.1a: MEXH 小波变换尺度及对应伪频率/周期:

变换尺度 (Scales)	2	4	8	16	32	64
伪频率 (Pseudo-Frequency)	0.125	0.0625	0.0313	0.0156	0.0078	0.0039
对应周期 (年)	0.67	1.3	2.7	5.3	10.7	21.3

表 2.1b: 复 Morlet 小波变换尺度 (实部) 及伪频率/周期:

变换尺度(Scale)	2	4	8	16	32	64	128	256
伪频率 (Pseudo-Frequency)	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.0313	0.0156	0.0078	0.0039
对应周期 (年)	0.17	0.33	0.67	1.33	2.67	5.33	10.67	21.3

MEXH 小波及复 Morlet 小波的变换结果都证明在热带中东太平洋 SSTA 序列当中 2-4 年的年际振荡比较显著, 两种小波变换对冷暖事件的判断在时域上是一致的。从 Fig2.17a 中可清晰的分辨显著的 El Nino 事件 (暖事件, 闭合中心值大于 4) 发生的时段为: 1957-1958 年, 1966-1967 年, 1972-1973 年, 1982-1983 年, 1987-1988 年, 1997-1998 年。负值中心对应时段 SSTA 负异常较为显著, 对应 La Nina 事件 (冷事件闭合中心值小于 -4) 发生的时段为: 1955-1956 年, 1971 年, 1976-1977 年, 1985-1986 年, 1989 年, 1996 年。MEXH 小波具备较好的分辨时间序列突变的能力, 最显著的突变发生在 1976-1977 年。复数 Morlet 小波变换对于分辨时间序列的周期具备特殊的优势, 从 Fig2.17b 小波变换系数实部的结果看, Nino C 区的 SSTA 序列存在较为显著的 2-4 年周期变化, 并且在 10 年以上的尺度存在振荡。



Fig2.17 Nino C 区 SSTA 的 MEXH/复 Morlet 小波分析 (实部)

对 NPAC 区 SSTA 序列 MEXH 小波变换结果表明 (Fig2.18a), NPAC 区较强的暖事件发生在: 1956-1957 年, 1962-1963 年, 1967 年, 1983 年, 1991-1992 年, 1995 年。比较显著的冷事件主要有: 1956 年, 1966 年, 1970 年, 1987 年, 1993 年和 1997 年。70 年代中期发生了一次显著的气候态突变, 60 年代-70 年代中期以来的偏暖态的海温转变为从 70 年代中期-80 年代中期的偏冷态; 1987-1988 年 El Nino 事件成为海温冷暖事件的突变点, 偏暖态的海温一直持续到 1992 年左右又再次发生变化, 此后的 90 年代一直处于偏冷的海温态。



Fig2.18 NPAC 区 SSTA 的 MEXH/复 Morlet 小波分析 (实部)

NPAC 区 SSTA 序列的复 Morlet 小波变换结果表明 (Fig2.18b), 准 2 年的周期振荡比较显著, 在 10 年以上的时间尺度上存在显著的年代际变化: 50 年代中期-60 年代中期持续偏冷态, 60 年代中期-70 年代中期持续偏暖态, 70 年

代中期—80年代中期持续偏冷。90年代以来,西风漂流区 SSTA 在频域上的变化则以季节振荡和 2 年周期为主。

KUR 区 SSTA 序列的小波分析表明(图略),主要周期集中在 2-4 年,但冷暖事件的对比强度并不强烈,区域内冷暖事件的振幅都较小。复 Morlet 小波变换结果表明在频域上 2-4 年时间尺度的周期振荡比较显著。STR 海区 SSTA 序列的复 Morlet 小波变换表明,10 年以上的年代际振荡较为显著,而 2-4 年的年际振荡相对较弱。

小波变换从时域和频域上辨明了 1951.1-1999.12 之间各个关键海区 SSTA 的变化规律。4 个关键海区的 SSTA 信号 2-4 年周期的年际变化振荡都是重要的,表明 ENSO 特征尺度在整个太平洋都有影响,热带中东太平洋 SSTA 2-4 年的 ENSO 特征尺度的振荡最为显著。NPAC 区以及副热带海区在 10 年以上的年代际尺度上变化显著。以 Nino C 区以及 NPAC 区两个关键海区的 SSTA 作为太平洋 SSTA 的主要信号,可较好的反映热带太平洋以及中纬度西风漂流区 SSTA 的区域特征,在一定的程度上简化问题,并为数值试验设计提供了依据。

2.3 太平洋 SSTA 与大气环流异常的合成模型

2.3.1 太平洋 El Nino 特征海温场的空间位相

热带中东太平洋的 SSTA 反映了 El Nino 事件的活动特征,也是太平洋 SSTA 变化最强的信号。为研究太平洋 SSTA 的变化特征,综合分析 5 次 El Nino 事件发生、发展过程。选择合成时段如表 2.2 所示。

表 2.2: 太平洋合成 SSTA 模型

Table 2.2: The composite model of Pacific SSTA

描述	特征时段				
El Nino 建立前期	1956 冬季	1971 冬季	1981 冬季	1985.4-6	1994.7-9
NinoC 区开始增温	1957 春季	1972.5-7	1982 春季	1985.5-6	1996.7-9
El Nino 峰值—成熟期	1957 冬季	1972 冬季	1982.8-10	1986.9-11	1997 年冬季
El Nino 衰落期	1958.4-6	1973.2-4	1982 年冬季	1987 年冬季	1998 年春季

合成模型表明了太平洋 SSTA 的发展情况。Fig2.19a 表明 El Nino 前期(特征时段一般在 El Nino 事件前一年秋冬季节),负 SSTA 主要分布在 10°S - 10°N , 180° 以东的热带太平洋,振幅可达 -1°C ;在阿拉斯加湾—加利福尼亚沿岸也有负 SSTA 分布。正 SSTA 主要分布在 160°E - 140°W , 35°N - 45°N 之间的中纬度海洋西风漂流区,最大振幅在 0.6°C 以上。El Nino 前期热带地区的 SSTA 分布类似于 La Nina 事件发生时的 SSTA 分布,称为类 La Nina 位相。

El Nino 建立期(Fig2.19b,特征时段一般在 El Nino 年的春季以及初夏)热

带中东太平洋的负 SSTA 削弱，赤道东太平洋迅速增温，热带东太平洋的暖信号到达 160°W ，而中纬度海区原本在黑潮区附近的负 SSTA 信号沿 30°N 附近向东扩展并越过日界线，中心 SSTA 幅度在 -0.5°C 以上，西风漂流区正 SSTA 振幅有所减弱，范围有一定缩小。中纬度的海温异常呈现明显的南北向偶极子分布。

El Nino 峰值—成熟位相 (Fig2.19c, 特征时段一般为 El Nino 年的秋季、冬季) 秘鲁沿岸以及 Nino 3 区正 SSTA 信号发展到最强，在赤道中东太平洋出现若干 SSTA 正值中心，中心温度异常在 2°C 以上，在南北纬 10 度附近地区 SSTA 振幅仍在 0.5 度以上。 30°N 附近负 SSTA 控制范围扩大，逐渐占据中纬度西风漂流区的位置，而附近的正 SSTA 信号开始衰减，并向阿拉斯加湾内转移， $20^{\circ}-40^{\circ}\text{N}$ 的北美沿岸 (加利福尼亚附近海域) 也为正 SSTA 控制。

进入 El Nino 衰减期 (Fig2.19d, 特征时段一般在 El Nino 年冬末至第 2 年的春季)，热带东太平洋正 SSTA 信号较 El Nino 峰值—成熟期间的信号振幅衰减，中纬度西风漂流区海区维持负 SSTA，振幅可达 0.6° 以上。黑潮附近又出现微弱的正 SSTA 信号，在所划定的太平洋区域上 SSTA 分布特征与 El Nino 事件前期类 La Nina 型的 SSTA 分布近似相反。



Fig2.19 太平洋合成 SSTA 第 1-4 位相 (a-d)

分析指出 SSTA 变化最显著的区域位于热带中东太平洋、中纬度的西风漂流区，并且冬季的情况表明，这两个区域 SSTA 的持续性较好，足以对大气环流的变化产生影响。在 La Nina 事件中，热带中东太平洋区维持较强的负距平，中纬度西风漂流区 (NPAC 区) 维持正距平；El Nino 事件中，当热带中东太平洋维持较强的正距平，中纬度西风漂流区就有较强的负距平维持，两关键区的海温大致成相反的变化，但 NPAC 区 SSTA 信号振幅弱于热带中东太平洋 SSTA 信号振幅。

2.3.2 同期 500 hPa 位势高度异常

对应表 2.2 中 5 次 El Nino 事件发展情况，与 SSTA 特征时段同期的 500 hPa 高度异常的合成在 Fig2.20a-d 表示。

在 El Nino 事件前期，500 hPa 高度异常显著特征为阿留申地区的正高度距平，其中心值在 40 gpm 以上，表明阿留申低压较弱；太平洋—北美地区的高度距平按大圆规律传播的波列状分布，距平中心符号表明此时的 PNA 指数为负值。当热带中东太平洋开始增温时 (伴随中纬度西风漂流区的降温)，北半球大气环流的 PNA 流型崩溃，阿留申地区的正位势距平削弱。在 El Nino 发展的峰

值期（一般在 El Nino 年的秋季），阿留申地区逐渐受 500 hPa 负位势高度距平控制，500 hPa 上阿留申低压增强，太平洋—北美地区建立正 PNA 指数型的大气环流形势。从 El Nino 事件的成熟一直到衰落期，北太平洋中高纬地区完全在负高度距平控制下，其阿留申群岛附近的负距平中心值在-80 gpm 以上，太平洋—北美地区高度距平中心为明显的正 PNA 指数型分布，而中低纬度间负 WP 型的经向环流形势也十分显著，意味东亚急流和阿留申低压的增强。



Fig2.20 北半球对应第 SSTA 第 1-4 位相 500 hPa 位势异常 (a-d)

2.3.3 同期 850 hPa 合成风场异常

根据 El Nino 事件的统计表 2.2，对 850 hPa 的风场进行非同步月份的位相合成，合成结果主要反映太平洋不同空间分布特征的 SSTA 对应的低层水平风场结构。



Fig2.21 对应第 SSTA 第 1-4 位相的合成 850 hPa 风场异常 (a-d)

El Nino 事件前期 (Fig2.21a, 对应 El Nino 前 1 年秋冬季节)，在赤道中东太平洋 (160°W 以西, 10°S - 10°N) 具有较强的东风距平并向赤道外地区辐散，可能与此地区维持负 SSTA 直接导致的热力作用相关。在赤道西太平洋暖池区存在西风异常。中纬度流场异常主要为阿留申地区的反气旋性风场异常。以 35°N 为中心轴线，日本以东的东风异常表明东亚急流的减弱，对应正 WP 指数，将在 WP 指数的月份同步合成分析中得以验证。

在 El Nino 事件的发展期 (Fig2.21b, 多在 El Nino 年春夏季节)，850 hPa 上热带风场异常也发生显著变化，赤道太平洋均为西风距平控制，最强的西风信号出现在 160°E 附近的赤道附近。多种 El Nino 事件分析研究将西太平洋地区的突然增强的西风距平作为即将发生 El Nino 事件的预示信号，在合成分析模型也得到了一定体现。中纬度风场异常主要表现为阿留申地区反气旋性环流减弱，控制范围缩小。

在 El Nino 事件的峰值—成熟期 (Fig2.21c, 多在 El Nino 年的秋冬季)，赤道太平洋均为较强的西风距平控制，在赤道的南北两侧有一对气旋性涡度的风场异常存在。热带地区 850 hPa 风场的分布与 Gill^[51]、Zebiak^[52] 建立的 ENSO 动力模型是一致的，在一定程度上验证了合成距平模型的可信性。此时阿留申

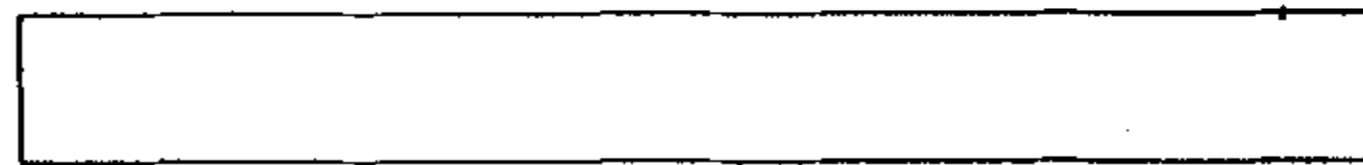
地区维持气旋性异常，表明阿留申低压的加强。

在 El Nino 事件的衰减期 (Fig2.21c)，热带中东太平洋正 SSTA 信号开始衰减，同期 850 hPa 异常风场上赤道中东太平洋西风距平减弱，160°E 以西的西太平洋赤道暖池区受东北信风距平控制。阿留申地区维持气旋性异常，35°N 附近的东亚西风急流得到增强，此时大气环流对应负 WP 指数型。

2.3.4 PNA/WP 指数特征的演变

根据表 2.2 中统计的 5 次 El Nino 事件的发展情况，对区域平均的 Nino C 区与 NPAC 区 SSTA 进行合成分析。

合成方法不同于从表 2.2 中选取特征时段合成，而是选定 5 次 El Nino 事件成熟期年份的 4 月份作为基点，记为 El Nino 年 (第 0 年) 4 月，将向前 8 个月，向后 24 个月份共计 32 个月份 Nino C 区与 NPAC 区的海温距平进行合成分析。将此合成方法称为同步月份的合成异常分析，相应的 2.3.1-2.3.2 中对 SSTA、位势高度异常、850 hPa 风场异常的合成方法称为非同步月份的合成位相分析，分别代表了异常信号在空间和时间上的合成特征



a: NPAC 与 Nino C 区 SSTA b: NPAC 区 SSTA 与 PNA 指数

c: NPAC 区 SSTA 与 WP 指数

Fig2.22 SSTA 与 PNA/WP 指数的合成演变特征

Fig2.22 中两条水平直线代表分别代表 $\pm 0.5\sigma$ (距平均方差) 标准，超过此标准即表明 SSTA 振幅比较显著，对应持续时段可视为 El Nino 事件峰值—成熟期。合成结果 (Fig2.22a) 表明在 El Nino 事件发生前 1 年 (第-1 年) 的秋季，热带中东太平洋在负 SSTA 控制下，SSTA 空间合成图上表现为类 La Nina 事件偏冷海温状态分布。在第 0 年的春夏季热带中东太平洋迅速增温，至冬季 SSTA 发展到峰值—成熟阶段。在 El Nino 事件后一年 (第 1 年) 的春夏季节 SSTA 开始衰减。其间 SSTA 大于 0.5σ 维持显著异常的时间超过 8 个月。NPAC 区 SSTA 的变化与热带中东太平洋相反：在第-1 年的秋季，正 SSTA 占据主导地位，维持超过 -0.5σ 的异常，在第 0 年 El Nino 发展的春夏季节中纬度海洋开始降温，在第 0 年的冬季负海温异常发展到成熟稳定期，并在第 1 年的春季负 SSTA 信号开始衰减。在热带中东太平洋 SSTA 达到峰值—成熟期间，NPAC 区 SSTA 的持续性特征也是较显著的，其 SSTA 大于 -0.5σ 的时间超过 6 个月。

NPAC 区 SSTA 信号与热带中东太平洋代表 El Nino 事件的 SSTA 信号是统一变化的整体，都具备季节锁相的特征，即在春夏季节开始发生变化，秋冬季节 SSTA 信号发展到成熟稳定阶段，并在第 2 年的春季开始恢复正常。西风漂

流区 SSTA 与热带中东太平洋 SSTA 振幅相当但符号相反, 在峰值—成熟期间维持了较长时间, 能够影响中纬度局地海气相互作用, 进而影响大气环流异常。

基于同样的合成原则, 将 5 次 El Nino 期间的滑动平均的 PNA 指数与 WP 指数进行合成, 合成时间与 SSTA 信号的合成时间保持一致。2.2.1 中指出 PNA 指数与中纬度西风漂流区 SSTA 成负相关, 与热带东太平洋 SSTA 成正相关, 在合成分析结果(Fig2.22b)也清晰的反映了这种关系。在 El Nino 事件前期 PNA 指数负值较大, 反映 500 hPa 上阿留申低压较弱, 北太平洋地区中低纬间经向环流较弱。第-1 年的冬季至第 0 年的春季热带中东太平洋开始增温时, NPAC 区有较大的降温幅度, PNA 指数向正值转变, 表明 500 hPa 上阿留申低压加深, 北太平洋中低纬度间的经向环流加强。第 0 年秋冬季 (El Nino 峰值—成熟期) 的 PNA 指数合成正信号比较弱, 虽然保持了一定的持续性, 但未达到或超过 0.5σ 的水平, 主要是每次 El Nino 事件不尽相同的发展特征, 以及由于大气相对海洋较快的变率, 造成按月份合成时的位相干涉。然而合成分析表明月季大气环流对于海温异常信号是敏感的, 在 El Nino 事件的发展过程中, 大气对于太平洋不同空间结构的 SSTA 有符合一定规律的响应。

WP 型遥相关指数主要反映东亚急流的变化特征, 与阿留申低压的变化也存在一定联系。正 WP 指数反映日本上空的急流较弱, 阿留申低压较弱, 负 WP 指数反映的大气环流状况大致相反, 合成 WP 指数的变化特征与 PNA 指数变化特征相反。合成分析表明 (Fig2.22c), WP 指数与 NPAC 区区域平均的 SSTA 变化基本反相, 验证了空间合成分析的结论。El Nino 事件前期 (第-1 年的秋冬季), WP 指数维持正异常, 表明东亚急流较弱, 阿留申低压较弱; 在 El Nino 事件的发展期 (第 0 年的春季), 当 NPAC 区开始降温, 热带中东太平洋增温时, WP 指数则由正向负转变, 表明阿留申低压开始增强, 日本上空的急流也有所增强, WP 指数正距平在第 0 年的秋冬季 (El Nino 峰值—成熟期) 一直维持。因每次 El Nino 事件发展过程的不同, 按月合成 WP 指数由于合成位相不尽一致造成干扰而未能通过 0.5σ 的水平, 但平均状况仍然反映了同期阿留申低压以及东亚急流在 El Nino 事件中的活动状况。

PNA/WP 指数与 SSTA 的相关证明, 大气对太平洋 SSTA 信号是敏感的, 尤其在 SSTA 振幅较强, 持续性较好的 El Nino 冬季, 大气遥相关指数与 SSTA 信号具有高度的相关性, 太平洋 SSTA 对大气环流的变化可能具有相当程度的影响。合成模型中当冬季太平洋 SSTA 持续性较好的时期, 中纬度西风漂流区与热带中东太平洋 SSTA 的符号总是相反, 在真实大气中这两个 SSTA 信号总是同时对大气施加影响的, 从统计上很难分别诊断中低纬 SSTA 对大气影响的物理机制。现代的气候数值模式为分析这一类问题提供了途径, 针对太平洋 SSTA 的时空结构设计不同的数值试验, 进行敏感性试验分析, 可能会为问题的解答提供更多的资料和途径。

2.3.5 太平洋地区感热、潜热通量的主要时空特征

海洋与大气间感热、潜热通量输送过程，是海气耦合系统十分重要作用的物理机制，当冬季中纬度太平洋 SSTA 持续性较好时，大范围的 SSTA 若伴随较大的风速，海气间潜热、感热通量交换比较强，对大气环流异常影响明显。分析 NCAR/NCEP 1951-1999 年 1 月平均热量输送：感热输送 (Fig2.23a) 在黑潮、黑潮延伸区以及白令海峡附近较明显，中心值在 $120-150 \text{ W/m}^2$ 以上；潜热输送 (Fig2.23b) 在东亚沿岸—黑潮区一带显著，中心值高于 250 W/m^2 ，副热带海区潜热输送也在 $120-150 \text{ W/m}^2$ 以上，而赤道附近的潜热输送较小。冬季中纬度海气间热量的传输比较活跃，感热、潜热通量输送在中纬度太平洋持续 SSTA 时都比较重要，而热带海区潜热较感热输送量高一个量级。



a: 感热输送 b: 潜热输送

Fig2.23 太平洋 1 月平均热量通量

计算表明在 El Nino/La Nina 期间，中纬度的感热、潜热异常处于同等重要的地位。Fig2.24a 表明 El Nino 建立前期，正热量输送异常（感热+潜热）集中在 30°N 为中心的中纬度海洋以及南半球辐合带 (SPCZ) 地区，负热量输送异常集中在 40°N 以北的高纬度海洋、黑潮区以及热带东太平洋。Fig2.24b 对应合成 SSTA 峰值—成熟位相期间的热量输送异常，正热量输送异常集中分布在 40°N 为中心的西风漂流区以及热带中东太平洋，负热量输送异常集中于阿拉斯加湾—北美沿岸地区。在热带中东太平洋地区在正 SSTA 持续强迫下，海洋向大气的热量输送增加，而在中纬度地区西风的增强也同样使得海表向大气的热量输送增强。

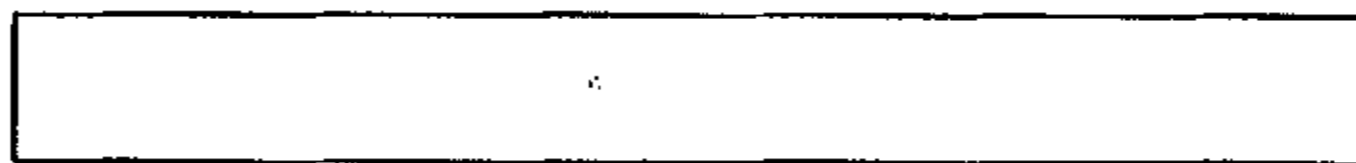


Fig2.24 对应 SSTA 第 1、4 位相感热+潜热输送异常

热带中东太平洋持续正 SSTA 时，海洋向大气的热量输送有显著提高，而在中纬度海洋，热量输送异常与 SSTA 分布存在较大差异。SSTA 在中纬度海洋和热带海洋的不同作用，导致了海气相互作用的复杂性，借助大气模式数值模拟，可进一步反映热带\中纬度 SSTA 对大气异常的作用。

第三章 IAP AGCM 数值试验分析

3.1 IAP AGCM 模式发展及基本特征

IAP AGCM 大气环流模式源自 Simmons and Lin^[53]，基于此模式已经做出许多改进和提高，Wu^[54]建立了一个全新的 AGCM 版本。IAP AGCM 是一个 15 波菱形截断，垂直 9 层 σ 坐标的全球谱模式。基于这个大气模式以及一个 20 层全球洋流模式，中科院大气物理研究所建立了一个全球大气—海洋—陆地系统的耦合模式 (GOALS)。

在 LASG AGCM 的主要改进包括^[55]：一个温度标准分层介入到模式动力框架中，标准大气扣除的方法引入模式；引入一个新的 K-分布辐射计算框架，能够很容易的模拟 CO₂、CH₄、N₂O 和 CFC 等示踪气体的影响；云过程的处理更加合理；简化生物圈和土壤/雪盖模式(SSiB)引入模式当中；改进了海洋表面动量拖曳系数计算方法；短波和长波辐射具有日变化。以下数值试验采用的 AGCM 版本即来源于此。模式全球高斯格点分布 48×40，水平分辨率约为 7.5°×4.5°，时间步长 30 分钟。

模式能够模拟气候平均状态，如以相当的精度模拟地表气压，降水和风的分布，模式有能力模拟亚洲季风的爆发以及与 ENSO 相关的年际变率，模拟赤道地区的云层覆盖情况。

IAP AGCM 的主要缺陷包括模式大气在西赤道太平洋表面信风过强；低估了中、高纬度东北太平洋上的云层覆盖状况；向下短波辐射全球范围内高估了 20%；夏季 500 hPa 副热带高压在西太平洋位置偏西。

已有研究认为，热带的不稳定海气相互作用激发的大气环流异常尤其是经向环流的异常导致了中纬度大气的异常，所导致的中纬度海洋海洋异常和大尺度的海洋调整又影响了中纬度局地海气相互作用。进行冬季太平洋 SSTA 持续异常的敏感性数值试验，研究冬季大气环流对太平洋 SSTA 的响应状况，进行三组共 7 个数值试验。

3.2 模式试验设计

因只限于讨论冬季 SSTA 对大气环流的影响，将具有季节变化的 IAP AGCM 改造为冬季条件下的数值模型。改造的内容主要包括辐射条件、冰雪分布、海温强迫等。控制试验积分时模式的冰雪条件、辐射条件、海温强迫均与 AMIP 气候平均的 1 月数据相同，从 12 月 1 日开始积分，在此条件下积分 300 天，将最后 30 天的积分的平均结果作为模式的控制试验结果。模式控制试验反映冬季平均海温强迫下大气的气候平均状态，为异常海温试验提供可对比的参照。

异常试验的设计采用集合预报 (Ensemble Forecast) 技术，采用多个初始场

的积分结果确定试验的可靠性，尽量减小模式的随机误差。在异常试验中模式改用叠加了一定 SSTA 的海温场作为外强迫，若干异常试验采用的 SSTA 强迫区范围如 Fig3.1 所示。从控制试验结束开始积分并保留 5 天模式场，再分别将这 5 天作为模式的初始场起步积分，连续积分 100 天，以最后 30 天的平均结果作为一次异常试验样本的结果，因而一次完整的异常数值试验包括 5 个样本的运行。在具体的异常试验试验中，为模拟冷暖海温对大气的的影响，实施以下计算方案：

第 1 组异常试验：

异常数值试验 WN (Warm SSTA Persistence in North Pacific)：模拟中纬度西风漂流区持续暖异常时大气的响应，其他海区维持海温气候值。西风漂流区 +2°C 的海温异常叠加至模式控制试验采用的全球气候平均的 1 月海温场上。

异常数值试验 CT (Cold SSTA Persistence in Tropical Pacific)：模拟热带中东太平洋持续冷异常时的大气响应，其他海区维持海温气候值。热带中东太平洋叠加 -1°C~-2°C 的海温异常。

合成异常试验 EN1：模拟 El Nino 前期西风漂流区持续正 SSTA，热带中东太平洋持续负 SSTA 大气的响应状态。将合成第 1 位相的 SSTA 叠加到气候海温场上。



Fig3.1: 异常数值试验采用的 SSTA 强迫范围

第 2 组异常试验：

异常数值试验 CN (Cold SSTA Persistence in North Pacific)：模拟中纬度西风漂流区持续冷异常时大气的响应，西风漂流区叠加 -2°C 的海温异常，其他海区维持海温气候值。

异常数值试验 WT (Warm SSTA Persistence in Tropical Pacific)：模拟热带中东太平洋持续正 SSTA 时大气的响应，热带中东太平洋叠加 +1°C~+2°C 海温异常，其他海区维持海温气候值。

合成异常试验 EN3：模拟 El Nino 事件峰值—成熟位相时的大气响应，热带中东太平洋持续正 SSTA，中纬度西风漂流区持续负 SSTA，将合成第 3 位相的 SSTA 叠加到气候平均场上。

定义异常：每个试验中的 5 个结果样本进行平均，将异常数值试验结果-控制试验结果视为持续 SSTA 作用下的大气环流异常。

3.3 模式试验结果分析

模式模拟气候平均状态分析

控制试验分析: 从平均冬季条件下模拟的海平面气压场 (Fig3.3a) 上看, 模式比较准确的模拟了平均气候态。北半球冬季主要的大气活动中心反映都比较准确, 阿留申低压, 蒙古高压、以及冰岛低压的都比较好的反映出来, 但与观测气候平均态^[56]相比阿留申低压的范围偏小, 中心位置也过于偏北, 格陵兰岛高压偏弱。850 hPa 上日本以东洋面的东亚急流比较好的反映出来, 但急流偏弱。500 hPa 高度场上 (Fig3.3c) 极涡中心分裂为两个, 一个靠近勘察加半岛, 另一个靠近格陵兰岛, 东亚、欧洲和北美三支大槽的位置与观测较为一致。

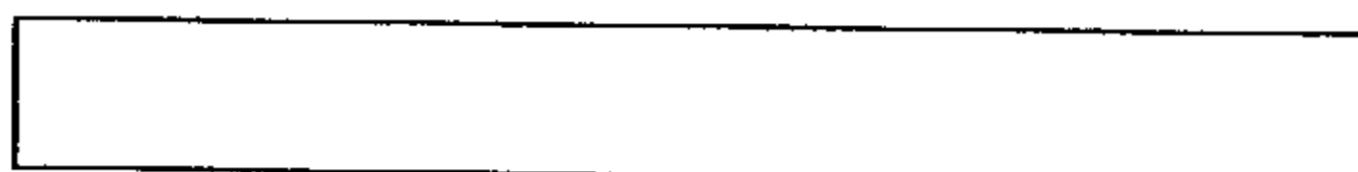


Fig3.2 模式采用的 1 份平均海温以及海冰分布状况

模式模拟的冬季平均感热通量 (Fig3.3d) 的最大值在东亚—日本附近洋面, 最大值在 250 W/m^2 左右, 与 NCAR/NCEP 的通量观测 (Fig2.23a) 比较接近。在热带地区由于海洋表面温度与大气的温度十分接近, 因而感热通量远较潜热通量小。潜热通量 (Fig3.3e) 在东亚沿岸—日本附近也有极值中心, 最大值 300 W/m^2 左右, 热带地区的潜热通量值基本都在 100 W/m^2 以上。热量通量在冬季的分布表明, 感热、潜热的分布在东亚—日本一带的中纬度海区都是重要的。虽然中纬度海洋水汽向大气的输送没有热带地区强烈, 但海洋表面附近的风速较大, 一定程度上提高了海气间热量通量的输送, 尤其在东亚沿岸到日本附近东亚急流出口区, 在冬季潜热、感热通量的输送十分活跃。

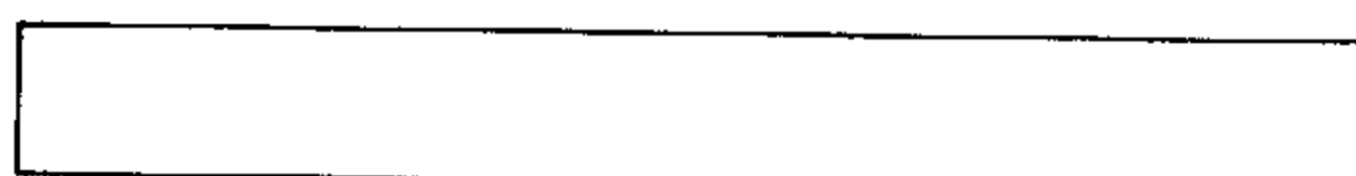


Fig3.3 IAP AGCM 平均气候状态模拟

第 1 组异常试验分析

CT 异常试验分析: 异常试验 CT 主要反映了热带中东太平洋处于冷位相时大气的响应, 在冬季情况下热带中东太平洋维持 -1°C 到 -2°C 左右的 SSTA。试验结果表明 (Fig3.4a), 500 hPa 上阿留申地区的正位势高度异常较强, 其正常中心位于阿留申群岛以西, 中心值在 -100 gpm 以上, 日本以南的太平洋上有负位势异常中心, 中心值在 -80 gpm 以上。太平洋—北美地区大气 PNA 型环流

异常不清晰。异常试验的环流形势表明，大气环流 PNA 流型减弱，而正 WP 指数的环流型比较显著，阿留申低压和东亚急流较弱。欧洲地区为负的位势高度异常所控制。

异常试验 WN 主要反映冬季中纬度西风漂流区正 SSTA 持续情况下的大气响应。试验结果表明 (Fig3.4b)，在 500 hPa 上东北太平洋—阿留申群岛附近位势高度增加，正异常中心位于阿留申群岛以西，中心值在 50 gpm 以上，表明阿留申低压有所减弱。150°E 附近高低纬度间的正 WP 指数型环流形势明显，而太平洋-北美间 PNA 遥相关型不明显。WN 试验同 CT 试验的结果有相似之处，但 WN 试验中大气的响应值较弱。



Fig3.4 第 1 组异常试验主要数值结果 (a-e)

试验 EN1 的海温强迫场采用观测合成的 El Nino 前期持续性 SSTA (Fig2.19a)，经插值叠加在 48×40 高斯格点的 AMIP 气候平均海温场上。在西风漂流区 SSTA 为正值，平均值在 0.5°C 左右，热带中东太平洋的负 SSTA 峰值在 -1°C 左右。500 hPa 高度异常表明 (Fig3.4c)，以 40°N 为中心，从日本以西的西北太平洋到北美西岸为“—+—+”形势的异常波列分布，阿留申群岛附近存在正位势高度异常，中心值在 40 gpm 以上，表明阿留申低压有所减弱。850 hPa 异常风场 (Fig3.4d) 上最显著的异常特征是阿留申群岛附近存在反气旋性异常中心，风场异常与 500 hPa 上的异常环流形势一致，表明了中纬度大气对 SSTA 响应的相当正压结构。在热带西太平洋上有较强的东风异常，与热带中东太平洋负 SSTA 相配合。

相比与 CT/WN 试验分别模拟热带中东太平洋与西风漂流区存在 SSTA 时的大气环流响应，EN1 异常数值试验中大气环流异常在 500 hPa 位势异常数值上更为合理，但与观测合成的第 1 位相的大气环流异常相比，在观测合成中位势异常中心位于阿留申群岛以东，EN1 数值试验中的阿留申地区正异常中心偏离到阿留申群岛西侧。EN1 试验中的热量输送异常 (感热+潜热) (Fig3.4e) 表明，西风漂流区正 SSTA 导致局地的热量输送增加，而 NPAC 关键海区上游黑潮延伸区、下游阿拉斯加—北美加利福尼亚沿岸的热量输送均有减少。

第 2 组异常试验分析

WT 异常数值试验分析：WT 反映热带中东太平洋持续正 SSTA 时的大气响应状况，其 SSTA 的分布同 El Nino 峰值—成熟期热带中东太平洋 SSTA 的分布类似，增加 $+1^{\circ}\text{C}$ — $+2^{\circ}\text{C}$ 的海温异常。Fig3.5a 表明在 500 hPa 上太平洋—北美—大西洋地区呈现显著的遥相关波列分布 (—+—)。以 40°N 为中心，中纬

度太平洋地区为负位势异常控制。北美—加拿大地区受正位势异常控制，北美东岸至大西洋地区为正位势异常。北太平洋中部的位势异常中心峰值在-80位势米以上，正PNA指数型环流较强。欧洲地区的负位势异常比较显著，异常中心值在-120位势米以上。500 hPa的位势异常表明，在热带SSTA的作用下，阿留申低压加深，北美地区的高压脊增强，可能给冬季北美地区带来严寒的天气，而亚洲地区位势高度的响应并不明显，较高纬度为欧洲负异常中心的延伸区控制下，中亚地区的弱脊增强。

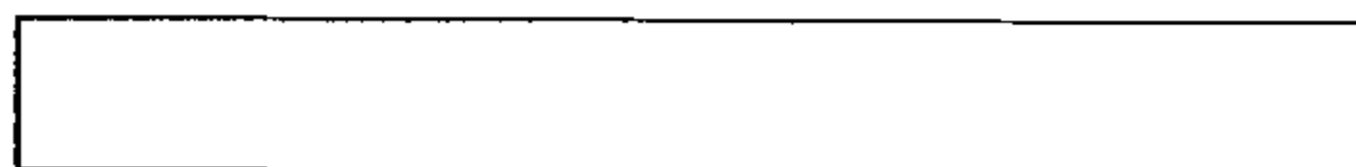


Fig3.5 第2组异常试验主要数值结果 (a-e)

CN异常试验主要反映中纬度西风漂流区存在负SSTA时冬季大气的异常状况。数值试验的结果表明 (Fig3.5b)，500 hPa高度的异常与WT异常试验中500 hPa异常形势分布相似，阿留申地区存在负的位势高度异常，负异常的中心靠近阿拉斯加，较正常位置偏东，异常中心值在-100 gpm以上，表明NPAC海区负SSTA局地影响比较显著，大气的响应过强。加拿大—北美地区均为正位势高度异常，中心值在100 gpm左右，表明北美高压脊的增强，欧洲地区同样为负的位势高度异常控制，但中心强度较WT试验强。CN异常试验中的异常环流形势也主要表明了太平洋—北美地区PNA型环流的增强，对应正PNA指数型环流显著。850风场的形势表明，中纬度SSTA导致的环流异常在低层也为类似的PNA流型，表明了中纬度大气PNA遥相关型对SSTA的响应是相当正压的结构。

对比WT异常试验和CN异常试验，在500 hPa上都反映了PNA异常流型，但环流异常中心位置和强度有所不同。同观测合成数据 (Fig2.20) 相比，环流异常的振幅过大，尤其是在CN异常试验中，阿留申低压的加深超过100 gpm，欧洲负位势异常在-200 gpm以上，明显的偏离观测平均，试验中异常中心也过于靠东，可能是数值试验中使用了过强的SSTA有关。

EN3分析：数值试验EN3采用了合成分析中El Nino峰值—成熟位相期间的SSTA平均场 (Fig2.19c) 作为冬季平均海温强迫场 (将原先 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的海温异常插值在 48×40 的高斯格点)，西风漂流区的SSTA异常在 -0.8°C 左右，热带中东太平洋的SSTA在 $1-2^{\circ}\text{C}$ 之间，在这样海温强迫场下，模式大气反映了在El Nino峰值—成熟期SSTA的响应。

在热带中东太平洋和西风漂流区SSTA共同作用下，500 hPa异常高度场 (Fig3.5c) 上太平洋—北美地区的PNA流型十分清楚。阿留申群岛附近为负位势异常中心，中心值在-80 gpm以上，表明了阿留申低压在El Nino型海温强迫下增强；加拿大—北美地区的高压脊增强，而北美南部墨西哥湾附近为负位势异常控制，大气环流中建立典型的PNA型，对应PNA指数正值也应较高。东

亚中高纬度地区由一个弱的异常高压脊控制，异常中心靠近我国东北地区，正位势异常中心在 40 gpm 以上，表明 El Nino 成熟期间大陆高压有所增强。副热带东太平洋上出现了一个弱的高压中心，位势响应在 20 gpm 以上，与中纬度太平洋—北美地区的大气异常一起呈现“+ - + -”的波列中心排列。在 EN3 异常试验出现了从热带向中纬度大气传播的异常波列，并且该波列与中纬度大气中 PNA 遥相关型密切相关。

850 hPa 风场异常上 (Fig3.5d)，在阿留申地区为明显的气旋性环流异常，上游地区的东亚急流出口处也有较强的气旋性异常，表明 El Nino 成熟期的冬季东亚大槽有所加强，阿留申低压的下游地区北美西岸附近中高纬度地区的反气旋性环流加强，表明北美高压的增强。热带地区中太平洋上（模式当中热带叠加 SSTA 区域的西侧）有显著西风异常，热带东太平洋上有显著的东风异常，与 Gill^[49]设计的在 SSTA 强迫下的热带大气模型所揭示的结果是一致的。在 El Nino 成熟—峰值期间 SSTA 强迫下，阿留申低压增强，亚洲大陆高压增强，大气 PNA 流型较明显。

EN3 试验潜热+感热输送的异常变化表明 (Fig3.5e)，中纬度负 SSTA 在上下游引起明显的热量输送变化：东亚沿岸附近的黑潮区向大气的热量输送加强，而北美沿岸热量输送减弱。东亚沿岸热量输送的增加引起的暖平流使东亚大槽加强，利于冷空气南下，增加了东亚地区寒潮爆发的强度和频率，与合成 850 hPa 环流形势 (Fig2.21c) 一致。同期北美沿岸热量输送异常减小，阿留申低压增强，可能造成下游北美地区冬季严寒和天气异常，与 Namias 关于北太平洋 SSTA 影响天气的观点有一致之处。比较 EN1 与 EN3 异常试验的热量输送异常，在近似相反符号的 SSTA 作用下，EN1 试验中的热量异常变化幅度较小，与 EN3 异常试验的结果也并非完全反号，体现了中纬度海气相互作用的非线性特征。

综合分析 IAP AGCM 数值结果表明：北半球冬季大气环流的异常是热带东太平洋以及中纬度海洋 SSTA 共同作用的结果。西风漂流区的 SSTA 能够造成 500 hPa 位势高度场以及 850 hPa 风场较显著的异常，影响了中纬度大气环流 PNA/WP 遥相关型的变化。El Nino 期间阿留申低压加深、经向环流异常发展加强了低纬大气向中纬大气的斜压热量输送，联合北太平洋中部的海洋冷却作用，共同影响中纬度大气。La Nina 期间中、低纬间大气热量输送减弱，但中纬度海洋正 SSTA 加强了向局地大气的热量输送，中纬度海洋对大气异常的贡献不如在 El Nino 期间明显。

3.4 海温场与大气的协同变化特征及物理机制

在 El Nino 年冬季，正 SSTA 信号在热带中东太平洋持续发展，负 SSTA 信号在西风漂流区占据主导地位。在热带地区强潜热强迫的条件下，有可能激发从赤道向中高纬度传播的强迫波列，引起大气中纬度遥相关型的异常变化。从环流的观点看，热带地区正 SSTA 激发强烈的上升运动，北半球大气中直接热

力环流—Hadley 环流加强 (El Nino 冬季尤为显著), 并在地转偏向力的作用下, 中纬度西风增强并增大了经向气压梯度, 阿留申低压得以相应加强。冬季西风漂流区负 SSTA 持续强迫首先对低层风场施加影响, 数值试验表明在中纬度西风漂流区 SSTA 持续作用时, 850 hPa 上东亚沿岸—日本一带的低层西风加强, 阿留申地区气旋性涡度加强, 下游阿拉斯加湾附近的反气旋性环流增强。这些效应共同导致了中纬度大气的异常变化。中纬度的感热、潜热输送异常处于同等重要的地位, 东亚太平洋沿岸—日本附近低层西风的加强增加了海洋向大气感热、潜热通量输送, 而在阿拉斯加湾—北美中纬度太平洋沿岸的一些地区, 从高纬度南下的干冷气流导致热量输送的异常减少。

El Nino 冬季期间阿留申低压加强、大气环流中正 PNA 指数型环流增强、低层东亚急流增强等大气环流异常情况, 是在热带地区 SSTA 强迫导致的中纬度大气遥相关以及中纬度西风漂流区 SSTA 局地强迫效应下共同造成的。热带地区海气相互作用与中纬度海气相互作用是统一的整体, 但中/低纬度海气相互作用在物理机制上的差异, 以及它们之间的相互作用的复杂性, 导致以 SSTA 完全解释中纬度大气环流异常十分困难。观测统计以及数值试验结果表明, 中、低纬度的 SSTA 都对大气有显著贡献。

四 总 结

太平洋海温异常对北半球大气环流异常有重要影响, 而 ENSO 循环是太平洋海气耦合系统中典型的异常演变过程, 不仅描述了热带地区大气和海洋异常现象, 而且与中高纬度的气候异常变化相联系。

观测分析和数值模拟均表明中纬度与热带地区的海气相互作用存在差异, 需要深入讨论太平洋不同关键区持续性 SSTA 对大气环流影响。利用 1951.1-1999.12 之间的 NOAA 海温以及大气环流资料分析太平洋 SSTA 与北半球冬季大气环流异常的关系, 并重点研究海温异常影响下大气环流的变化特征。

冬季情况下太平洋 SSTA 的两个均方差极大的区域分别处于中纬度的西风漂流区和热带中东太平洋。利用旋转 EOF 分析了太平洋 SSTA 的主要时空特征, 其第 1 特征向量表明了 El Nino 事件期间太平洋中低纬度 SSTA 相反符号分布的特征。自相关分析表明冬季太平洋 SSTA 持续性最好的区域位于西风漂流区以及热带中太平洋。

相关分析表明中纬度西风漂流区以及热带中东太平洋 SSTA 与北半球大气环流 PNA/WP 遥相关指数都有统计显著的相关, 是太平洋最主要的两个关键区。时频分析表明这两个关键区 SSTA 存在 2-4 年的 ENSO 年际振荡, 也存在准年代际尺度的振荡。太平洋 SSTA 与大气 500 hPa 高度场异常的 SVD 分析表明, 太平洋的海温异常与大气环流 PNA 以及 WP 遥相关型都存在密切的相关, 而 850 hPa 风场异常 STA 的 SVD 分析进一步反映了海温异常与大气遥相关之间的联系。

在以上结果的基础上, 建立两种不同的合成模型, 分析太平洋 SSTA 以及同期的北半球大气环流异常特征。SSTA 合成分析的 4 个合成位相清晰的反映了西风漂流区与热带中东太平洋 SSTA 在 El Nino/La Nina 事件期间的演变特征。当西风漂流区处于暖态而热带中东太平洋海温偏低时, 合成大气模型当中阿留申低压减弱, 500 hPa PNA 指数为负异常; 当西风漂流区处于冷态而热带中东太平洋处于暖态 (El Nino 峰值-成熟期)。合成大气模型中阿留申低压加强, 500 hPa PNA 指数为正异常。为深入研究两个关键海区持续性 SSTA 对大气环流中的影响, 进行数值试验分析。

利用 IAP AGCM 进行冬季条件下的敏感性试验, 模式大气对中纬度西风漂流区与热带中东太平洋的持续性 SSTA 均有显著的响应。西风漂流区持续负 SSTA 时或者热带中东太平洋持续正 SSTA 时, 阿留申低压均有所加强, 大气当中 PNA 型的环流加强。而当相反符号的 SSTA 持续作用时, 大气中阿留申低压减弱, PNA 指数表现为负异常。数值试验结果与利用 NOAA 资料统计分析的结论基本一致, 但在 500 hPa 位势响应高度的数值偏大, 可能与理想数值试验中采用的较大的 SSTA 振幅有关。数值试验指出, 热带中东太平洋以及中纬度

西风漂流区的持续性 SSTA 强迫均能对阿留申地区 500 hPa 的位势高度造成显著的异常，对 850 hpa 上的东亚西风急流产生影响，引起大气 PNA 以及 WP 遥相关型的变化。

以上初步研究了两个关键区 SSTA 对大气强迫的不同效果和机制，而对于产生这种差异的机制需要进一步的深入研究。同时研究工作仅限于讨论冬季北半球大气环流对太平洋持续性 SSTA 强迫时的响应情况，对热带、中纬度海气相互作用机制的认识并不充分，对于春、夏季节中具有较高时空变率的海气耦合系统也缺乏深入研究，都是以后更深入工作的方向。

五 致 谢

感谢来自家庭在生活和学习上无微不至的关心和照顾。

感谢导师孙照渤教授对论文的悉心指导并提供良好的科研条件。

感谢陈海山博士提供 IAP AGCM 模式。

感谢李忠贤博士提供 NOAA 资料集。

感谢林振敏硕士提供 SVD 分析程序以及功率谱分析程序。

感谢南京气象学院研究生部钱翼梅等老师在生活学习上的关心鼓励。

感谢与秦正坤硕士、宋洁硕士、余贞寿硕士、王晓玲硕士等进行愉快有益的学术讨论和合作。

六 参考文献

- [1] B. Hoskings, R. Pearce. (编著), 孙照渤, 屠其璞, 雷兆崇 (译). 大气大尺度动力过程 [M], 1987, 北京: 气象出版社.
- [2] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in the tropical sea Surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation and El Nino [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(5):354-384.
- [3] Bjerknes, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. Mon. Wea. Rev. 1966, 97:163-172
- [4] Horel, J.D. and J. M. Wallace. Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. Mon.Wea.Rev, 1981, 109:813-829.
- [5] Webster, P.J. Mechanisms determining the atmospheric response to sea surface temperature anomalies. J. Atmos. Sci, 1981, 39:722-733
- [6] Hoskings B.J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing[J]. J.Atmos.Sci.38, 1170-1196
- [7] Charney, J.G. and J. G. Devore., Multiple flow equilibria in the atmospheric and blocking. J. Atmos. Sci. 1979, 36:1250-1256
- [8] Davis R E. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. J.Phys.Oceanogr. 1976, 8:233-146
- [9] Pole RM. The life cycles of persistent anomalies and blocking over the northern Pacific[J]. Rev Geophys. 1986, 29, 31-69
- [10] Namias J. Recent seasonal interactions between North Pacific waters and the overlying atmosphere[J]. J.Geophys.Res. 1959, 64:631-646
- [11] Namias J. Seasonal interaction between North Pacific ocean and the atmosphere during the 1960s[J]. Mon.Wea.Rev.1969, 97:173-192
- [12] Namias J. Experiments in objectively predicting some atmosphere and oceanic variables for the winter of 1971-1972[J]. J.Appl.Meteo. 1972, 1164-1174
- [13] Barnett, T.P.,1981, Statistical prediction of north American air temperature from pacific predictors[J].
- [14] Frankignoul. Response of the Giss general circulation model to a mid latitude surface temperature anomaly in the North Pacific[J]. J.Atmos.Sci, 1988, 45:95-108
- [15] Frankignoul. Analysis of the Giss GCM response to a sea surface temperature anomaly using the linear model[J]. J.Atmos.Sci.1988, 45:3833-3845
- [16] Clare Deser. Maurice L. Blackmon. On the relationship between tropical and north pacific sea surface temperature variations[J]. J climate. 1995, 8(6): 1667-1680
- [17] 朱乾根, 徐建军. ENSO及其年代际异常对中国东部气候异常影响的观测分析[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(4):615-623
- [18] 林学椿. 北太平洋海表持续加热对夏季中国降水及大气环流的影响[J]. 热带气象学

- 报, 1999, 15(3): 258-266
- [19] 杨英, 孙照渤. 中纬度北太平洋 SST 异常与大气环流的关系[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(2): 192-199
- [20] 于润玲, 孙照渤, 陈海山. 华北夏季降水与北半球环流及北太平洋海温关系的初步分析[J]. 南京气象学院学报, 2002(5): 577-586
- [21] Nicholas, E Graham, TP Barnett, Robert, wilde. The roles of tropical and midlatitude SST in forcing interannual and interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere Circulation[J]. J climate. 1994, 7(9), 1416-1441.
- [22] 李崇银, 咸鹏, 北太平洋海温研究年代际变化与大气环流和气候的异常[J], 气候与环境研究, 2003, 8(3), 258-273
- [23] 倪允琪, 气候动力学[M], 气象出版社, 北京, 1993
- [24] Picher, E.J., M.L.Blackmon, G.T.Bates, Munoz. The effects of North Pacific sea surface temperature anomalies on the January climate of a general circulation model. J.Atmos.Sci.45:173-188
- [25] Chevin, Response of the NCAR general circulation model to prescribed changes in ocean surface temperature. Part II: mid-latitude and subtropical changes[J]. J.Atmos.Sci, 1980, 37:308-332
- [26] Shukla, Wallace J.M. Numerical simulation of the atmosphere response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies[J]. J.Atmos.Sci. 1983, 40(7):1613-1630
- [27] Palmer and Sun. A modeling and the observational study of the relationship between sea surface temperature in the north-west Atlantic and the atmosphere circulation[J]. Quart.J.Meteo.Soc.1985, 111(470): 947-975
- [28] Alexander, M.A. Midlatitude air-sea interaction during El Nino. Part I: the North Pacific Ocean[J]. J.Climate, 1992, 5:944-958
- [29] Ni Yunqi, Zhang Qin and Lin Wuyin. Seasonal characteristics and interannual variability of low-frequency variation in a low resolution spectral model. Adv. Atmos. Sci. 1990, 8(3):317-326
- [30] Yochanan Kushnir, Ngar-Chung Lau. The general circulation model response to a North Pacific SST anomaly dependence on time scale and pattern polarity[J]. J Climate., 1992, 5(4): 271-283
- [31] NC Lau, MJ Nath. A model study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of global atmosphere-ocean system. J climate, 1994 7(8)
- [32] Zhou TianJun, Yu Rucong, Li Zhaoxin. ENSO-Dependent and ENSO-Independent variability over the mid-latitude North Pacific. Observation and air-sea Couple model simulation[J]. A.A.S, 2002, 19(6), 1127-1147
- [33] Lau N C, Nath M J. The role of 'atmosphere bridge' in linking tropical pacific ENSO events to extratropical SST anomalies[J]. J Climate, 1996, 9(9): 2036-2057.
- [34] Simmons, A. J., Wallace, J.M. and G.W. Branstator. Barotropic wave propagation and

- instability and atmospheric teleconnection pattern. *J. Atmos. Sci.* 1983,40:1363-1392
- [35] Cayan. Latent and sensible heat flux anomalies over northern oceans driving sea surface temperature. *J phys Oceangr.* 1992, 22, 859-881
- [36] Lau N.C., M.J. Nath, A general circulation model study of the atmospheric response to extratropical SST anomalies observe in 1950-1979[J]. *J.Climate*, 3:965:989.
- [37] Clare Deser, M A Alexander, MS Timlin. Understanding the persistence of sea surface temperature anomalies in mid-latitude. *J climate*, 2003, 16(1).
- [38] Peng S. J S Whitaker. Mechanisms determining the atmospheric response to mid-latitude SST anomalies. *J Climate*, 1999, 12, 1393-1407
- [39] Thomas, M Smith, Richard W. Reynolds Extended Reconstruction of Global Sea Surface Temperature Based on COADS Data (1854-1999). *J Climate*. 2003.16(10), 1495-1510
- [40] 魏凤英. 气候统计诊断与预测技术[M], 北京: 出版社, 128-134
- [41] Namias, X Yuan, DR Cayan. Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmosphere flow patterns[J]. *J climate* 1988, 682-703
- [42] Wallace,J.M., C.E.Sasamori. Teleconnections in the geopotential height field during the North Hemisphere winter[J]. *Mon.Wea.Rev.*109:785-812.
- [43] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular Value Decomposition of wintertime sea surface temperature and 500 hPa height anomalies[J]. *J Climate*, 1992, 5(6):561-576.
- [44] Priestley, M.B. Spectral analysis and timeseries[M],vol.1-2, 1981, Academic Press.
- [45] 李晓燕, 翟盘茂. NSO 事件指数与指标研究[J], *气象学报*, 2000, 58(1):101-109
- [46] 崔锦泰, 程正兴 (译). 小波分析导论[M], 1995, 西安交通大学出版社
- [47] Composite analysis of wintertime wind stress vector fields with respect to SST anomalies in western North Pacific and the ENSO events, Part I SST composite[J].
- [48] J K Angell. Comparison of variations in atmospheric quantities with sea surface temperature variations in equatorial eastern Pacific. *Mon.Wea.Rev.* 1981, 109(2):230-243
- [49] 国家气候中心. 月气候监测公报, 1997(1), 47
- [50] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M], 北京: 气象出版社, 1999.50-51
- [51] Gill, A.E., Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1980, 108: 87-93
- [52] Stephen. E. Zebiak, A simple model of relevance to El Nino[J]. *J. Atmos. Sci.* 1982, 39:2017-2027
- [53] Simmons I. Analysis of the 'spinup' of a general circulation model. *J. Geophy. Res.* 1985, 90(D3):5637-5660
- [54] Wu guoxiong, Liu Hui,Zhao Yucheng,et al. A nine layer atmosphere general circulation model and its performance[J]. *Adv. Atmos. Sci.* 1996, 13(1):1-18
- [55] Liu Hui etc. Users' Guide for Components AGCM+SSiB of the GOALS/LASG Model. LASG, IAP, CAS.
- [56]朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 天气学原理和方法[M]. 1992, 北京: 气象出版社. 211-214

附 图

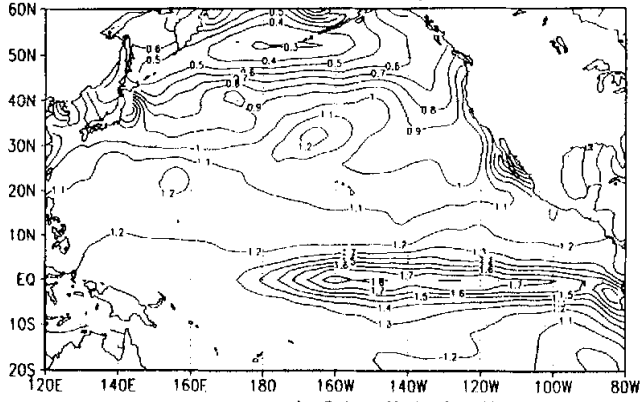


Fig2.1 NOAA 冬季海温均方差 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

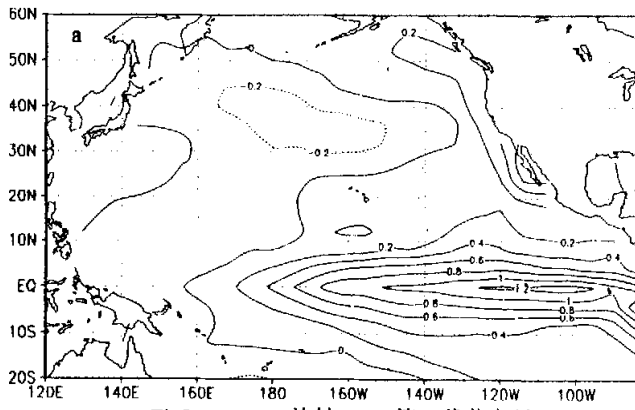


Fig2.2a SSTA 旋转 EOF 第 1 载荷向量

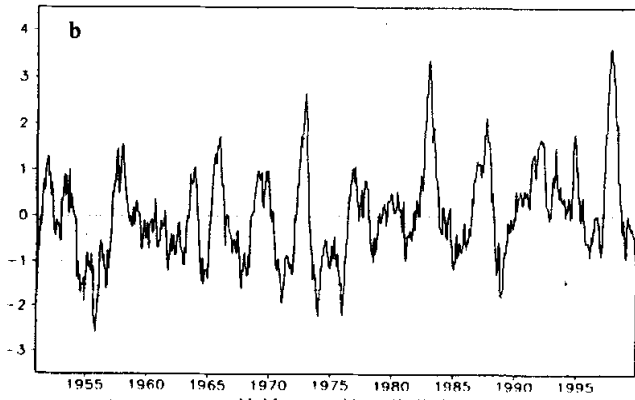


Fig2.2b SSTA 旋转 EOF 第 1 载荷向量对应时间系数

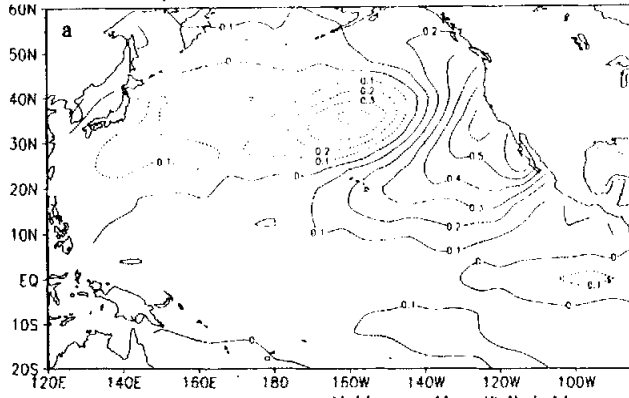


Fig2.3a SSTA 旋转 EOF 第 2 载荷向量

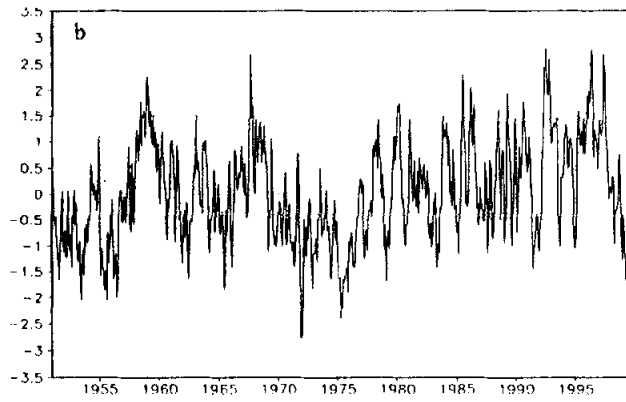


Fig2.3b SSTA 旋转 EOF 第 2 载荷向量对应时间系数

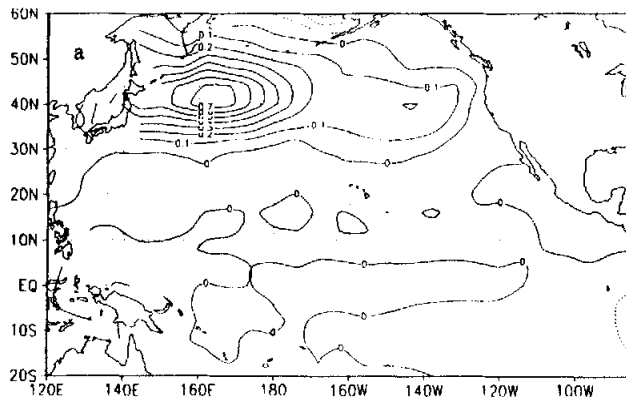


Fig2.4a SSTA 旋转 EOF 第 3 载荷向量

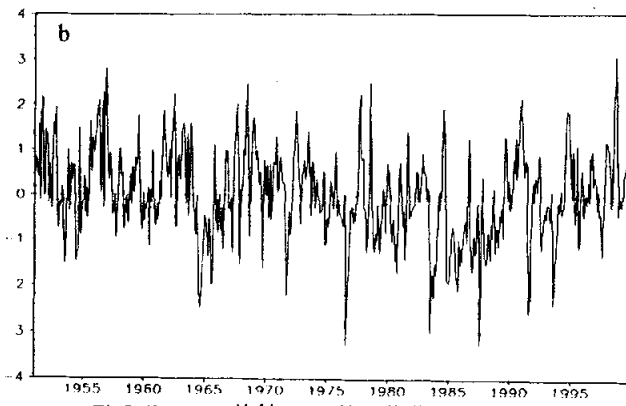


Fig2.4b SSTA 旋转 EOF 第 1 载荷向量对应时间系数

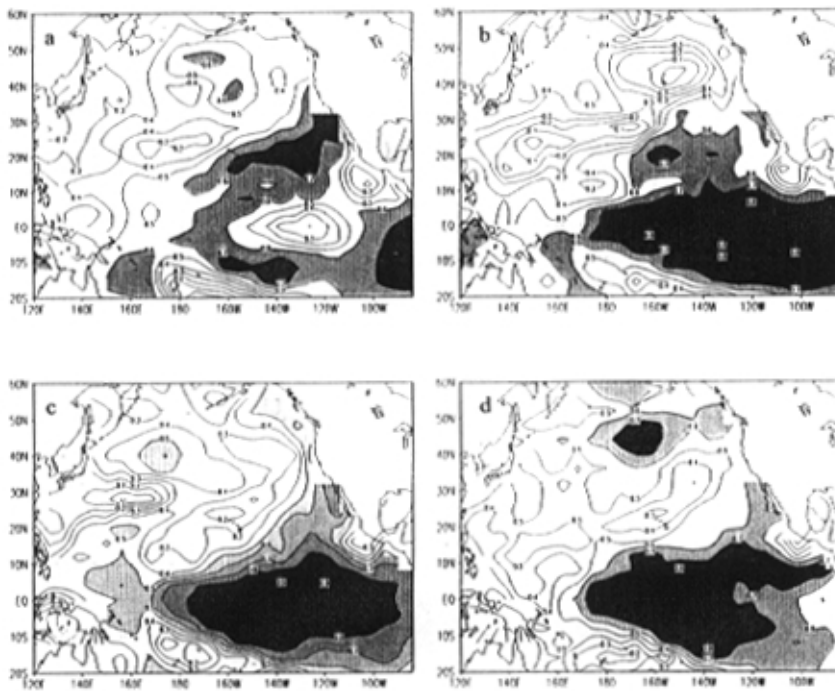


Fig2.5 4月、7月、10月和1月 SSTA 滞后 3 个月的自相关 (a-d)

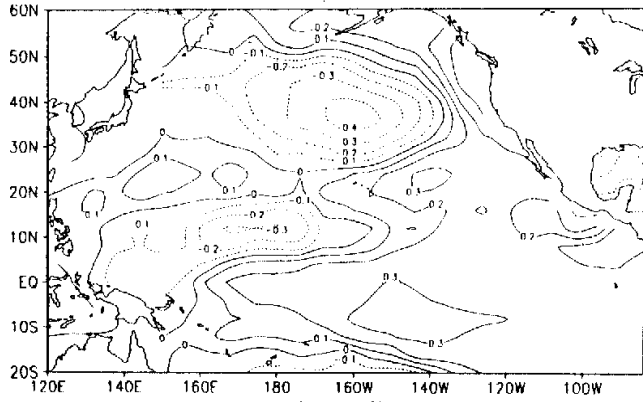


Fig2.6 1951.1-1999.12 间月平均 PNA 指数与 SSTA 相关

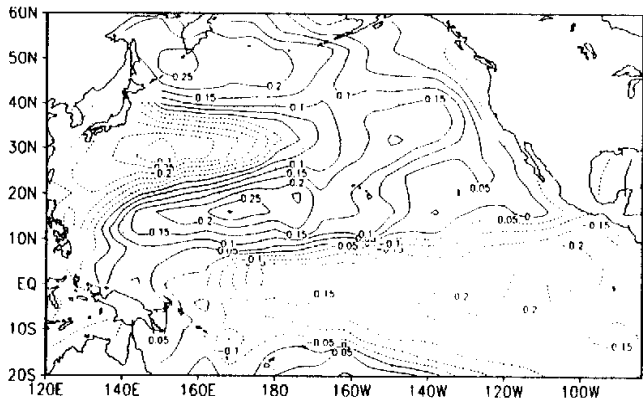
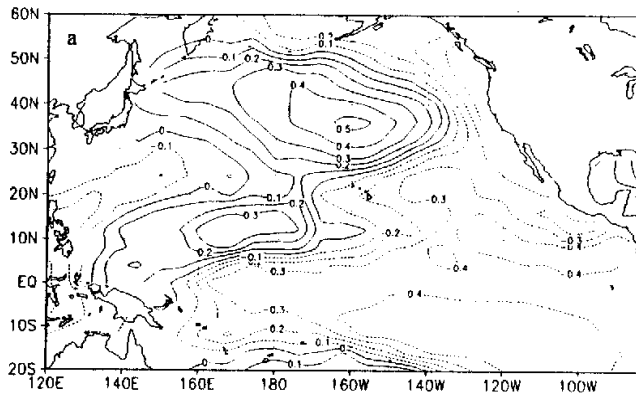
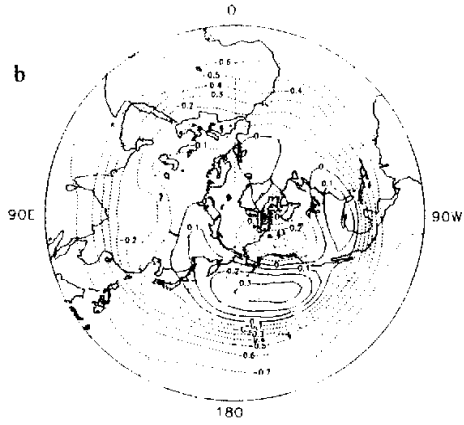


Fig2.7 1951.1-1999.12 间月平均 WP 指数与 SSTA 的相关



a: SSTA 异性相关系数



b: 500 hPa 位势高度异常相关系数

Fig2.8 1951.1—1999.12 SSTA 与 500hPa 高度场异常第 1 对奇异向量。

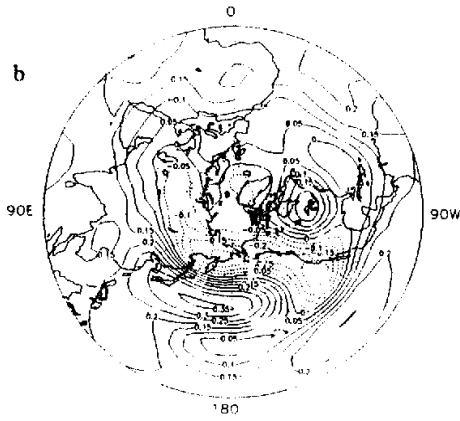
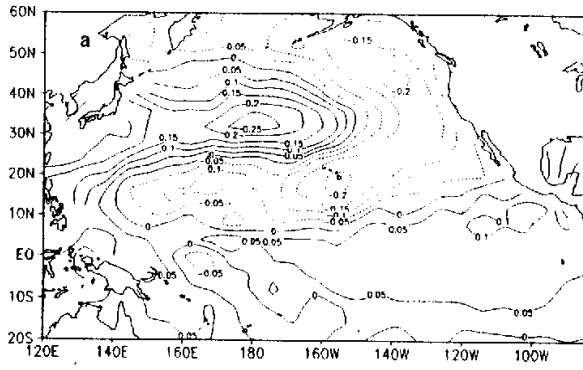


Fig2.9 1951.1—1999.12 SSTA 与 500hPa 高度场异常第 2 对奇异向量
 a: SSTA 异性相关系数, b: 500 hPa 位势高度异常相关系数

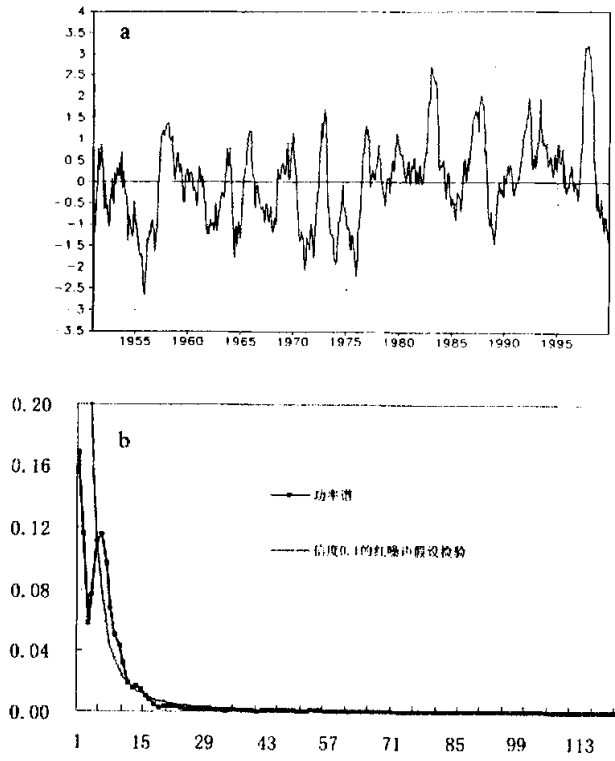
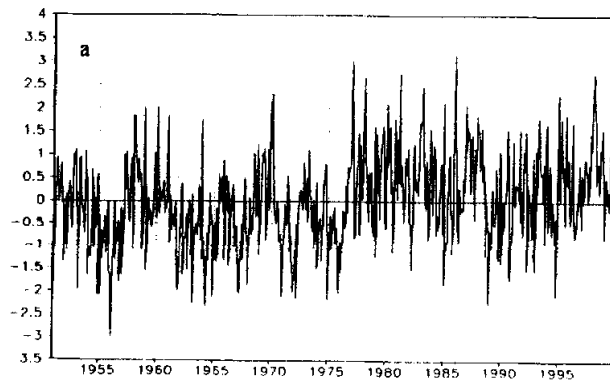


Fig2.10 SVD 海温场第 1 奇异向量时间系数(a)以及功率谱分析(b)



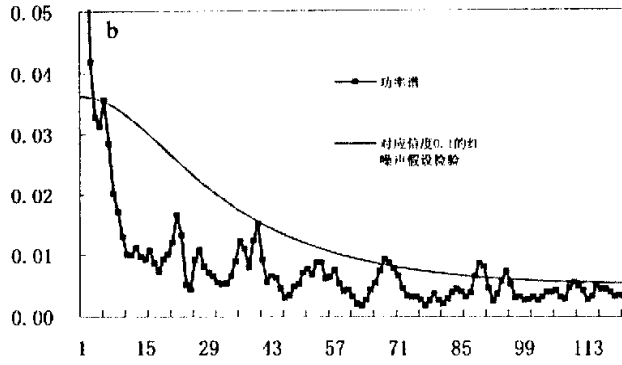


Fig2.11 500 hPa 第1奇异向量时间系数(a)及功率谱分析(b)

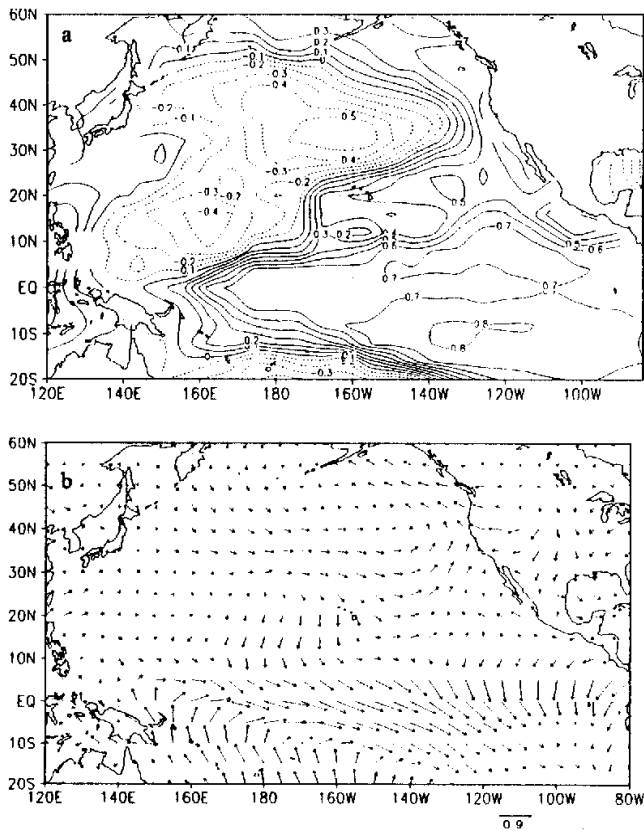


Fig2.12 1951.1-1999.12 SSTA 与 850 hPa 风场异常第1对奇异向量
a: SSTA 异性相关系数 b: 850 hPa 风场异常相关系数

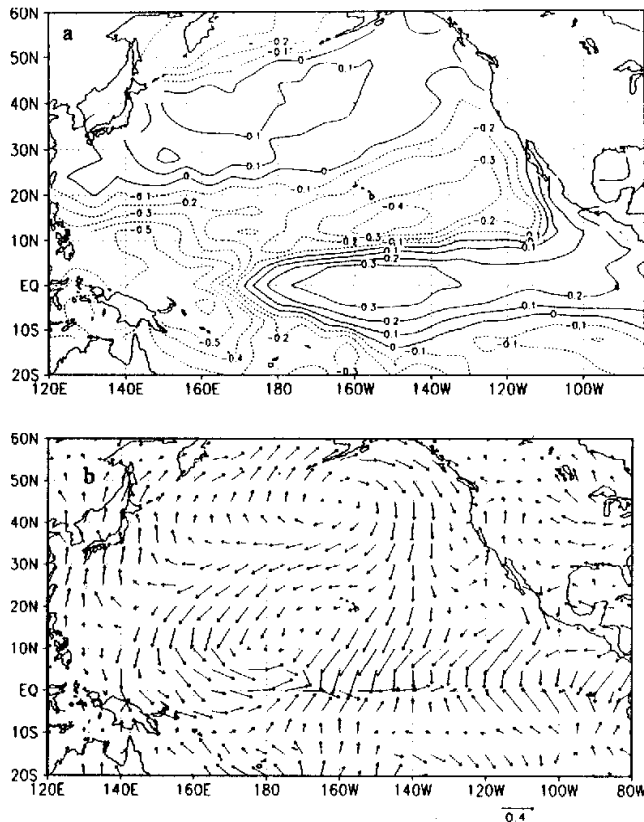


Fig2.13 1951.1-1999.12 SSTA 与 850 hPa 风场第 2 对奇异向量

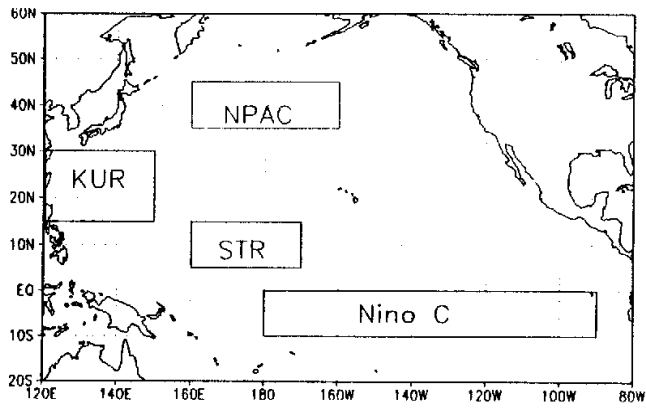


Fig2.14 关键海区的划分范围

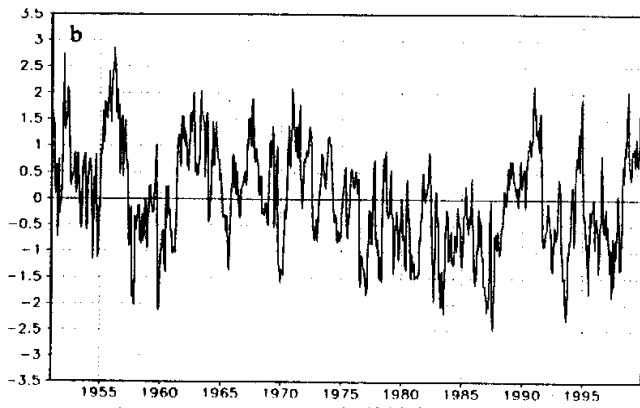
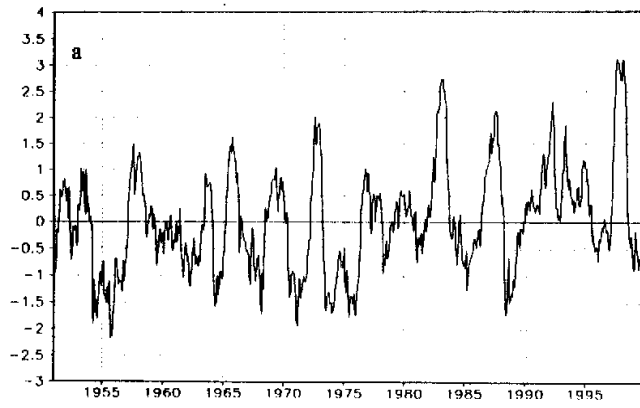
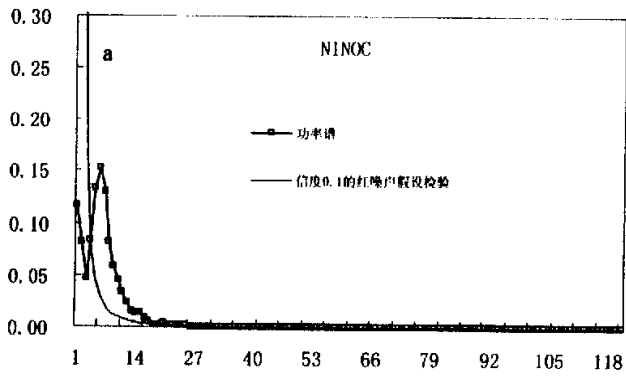


Fig2.15 1951.1-1999.12 间关键海区的 SSTA 序列
a: Nino C 区 b: NPAC 区



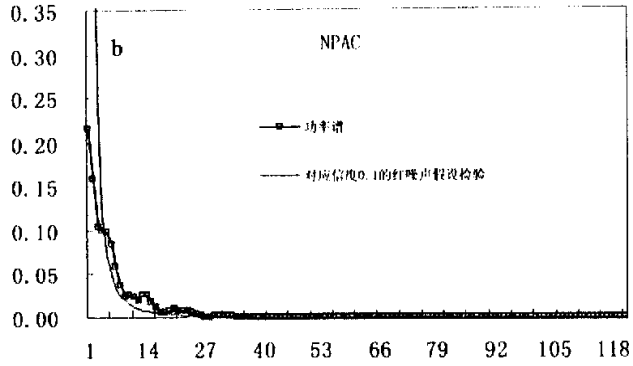


Fig2.16 关键海区 SSTA 的功率谱分析及红噪声检验
a: Nino C 区 b: NPAC 区

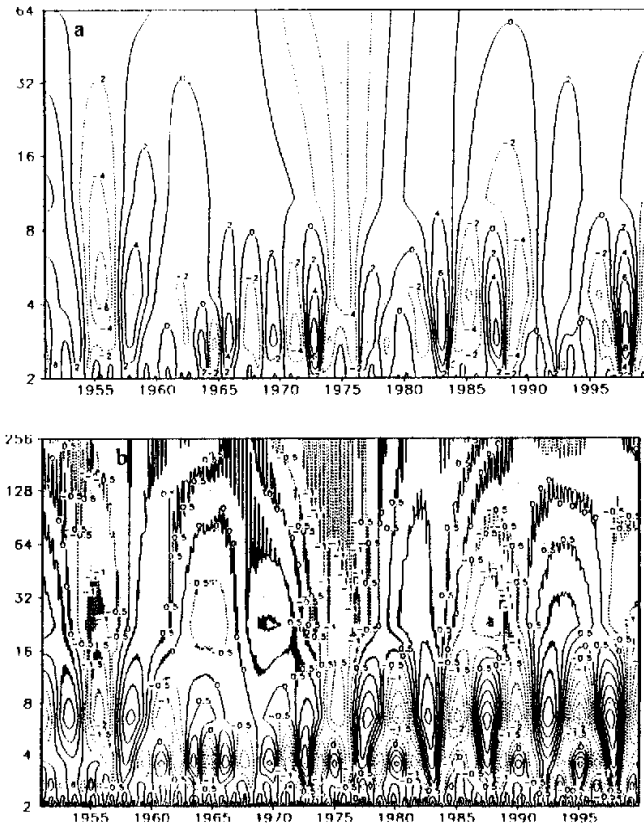


Fig2.17 Nino C 关键区 SSTA 的小波分析
a: MEXH 小波 b: 复 Morlet 小波 (实部)

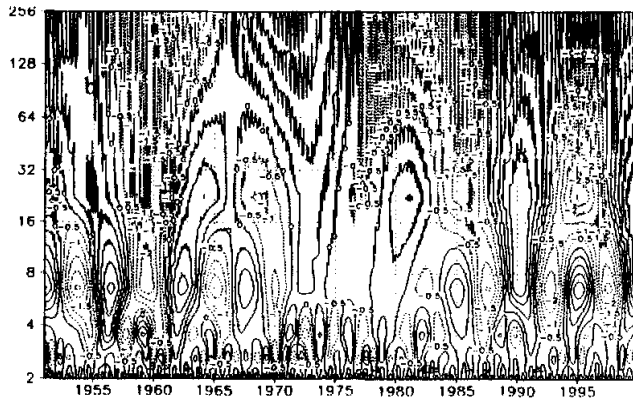
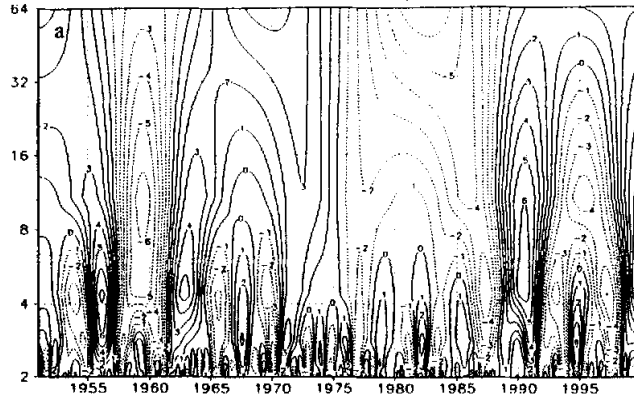
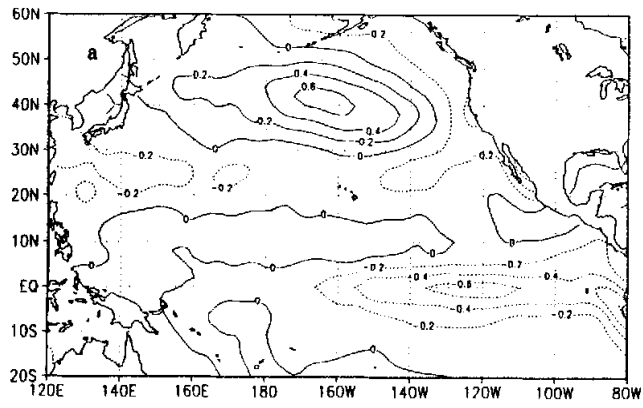


Fig2.18 NPAC 关键区 SSTA 小波分析

a: MEXH 小波 b: 复 Morlet 小波 (实部)



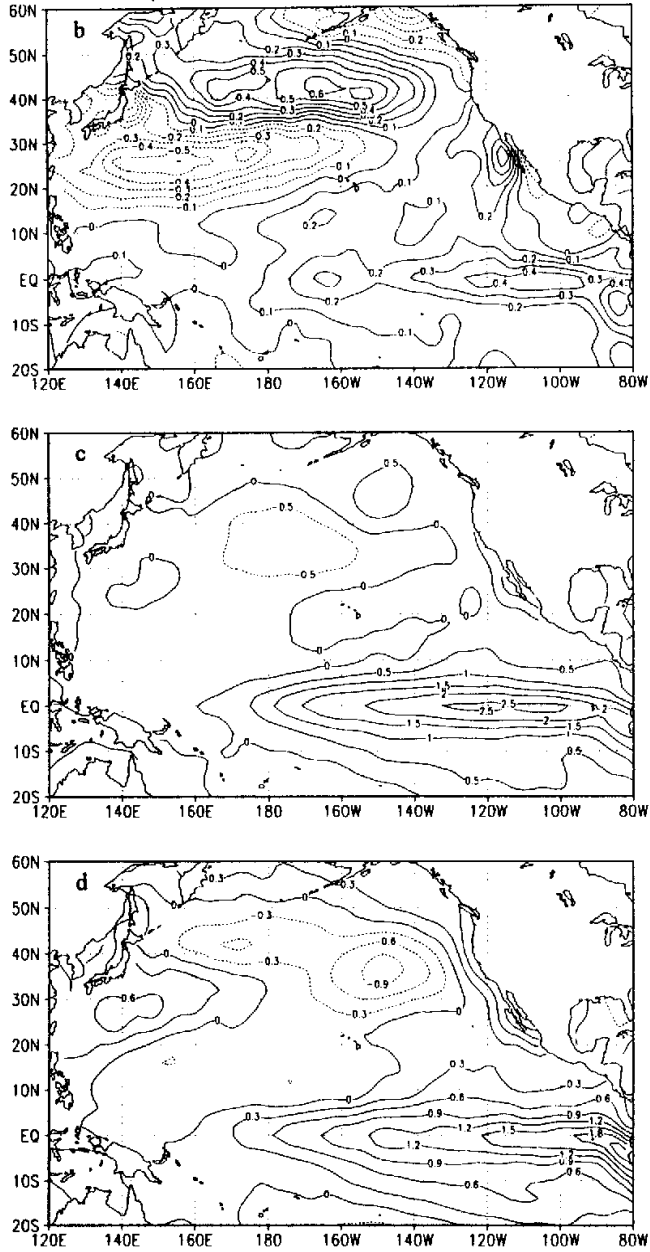


Fig2.19 北太平洋合成 SSTA 第 1-4 位相 (a-d)

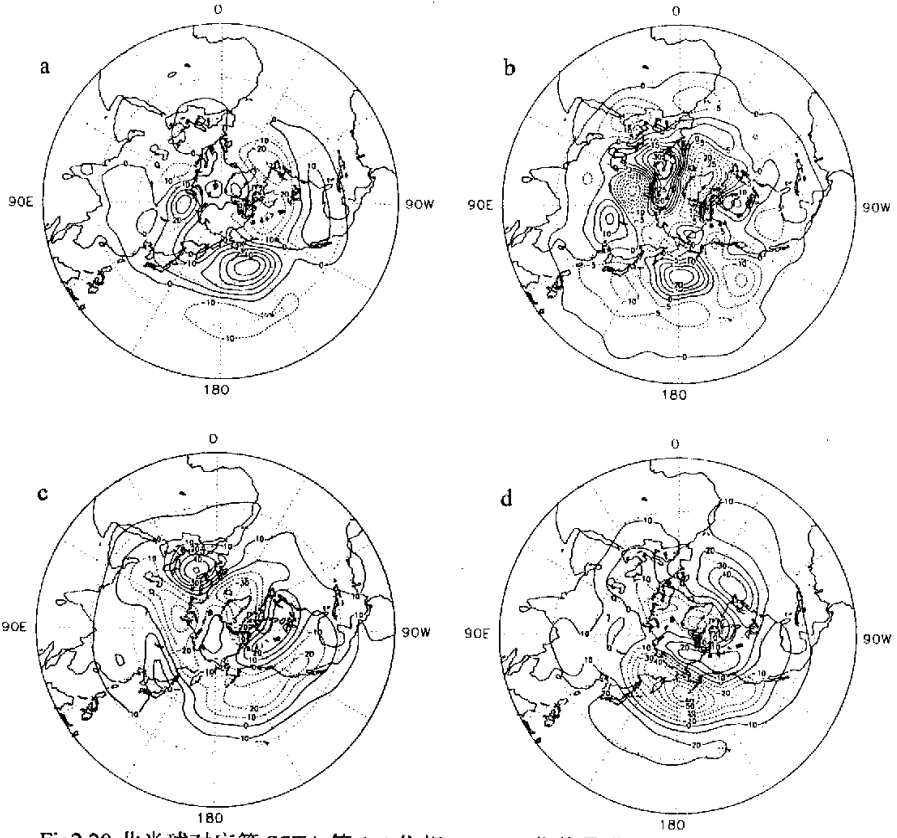
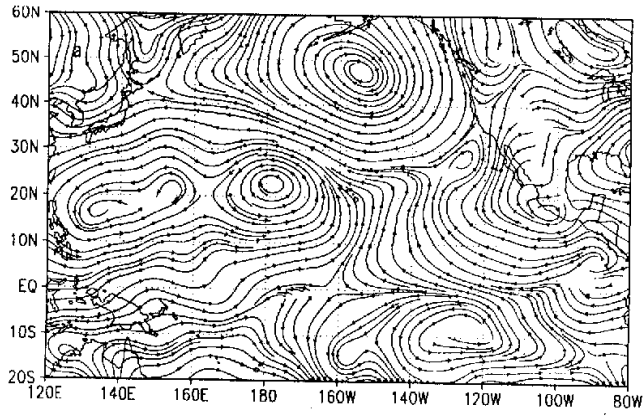


Fig2.20 北半球对应第 SSTA 第 1-4 位相 500 hPa 位势异常 (a-d) (单位: gpm)



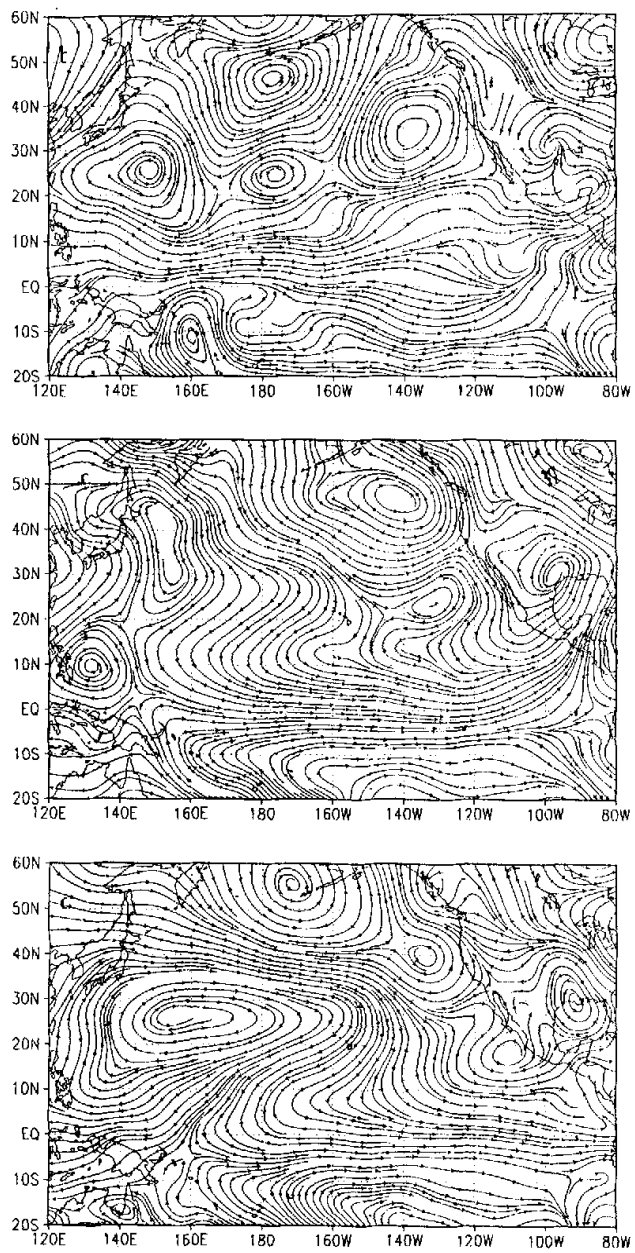


Fig2.21 北半球对应第 SSTA 第 1-4 位相的合成 850 hPa 风场异常 (a-d)

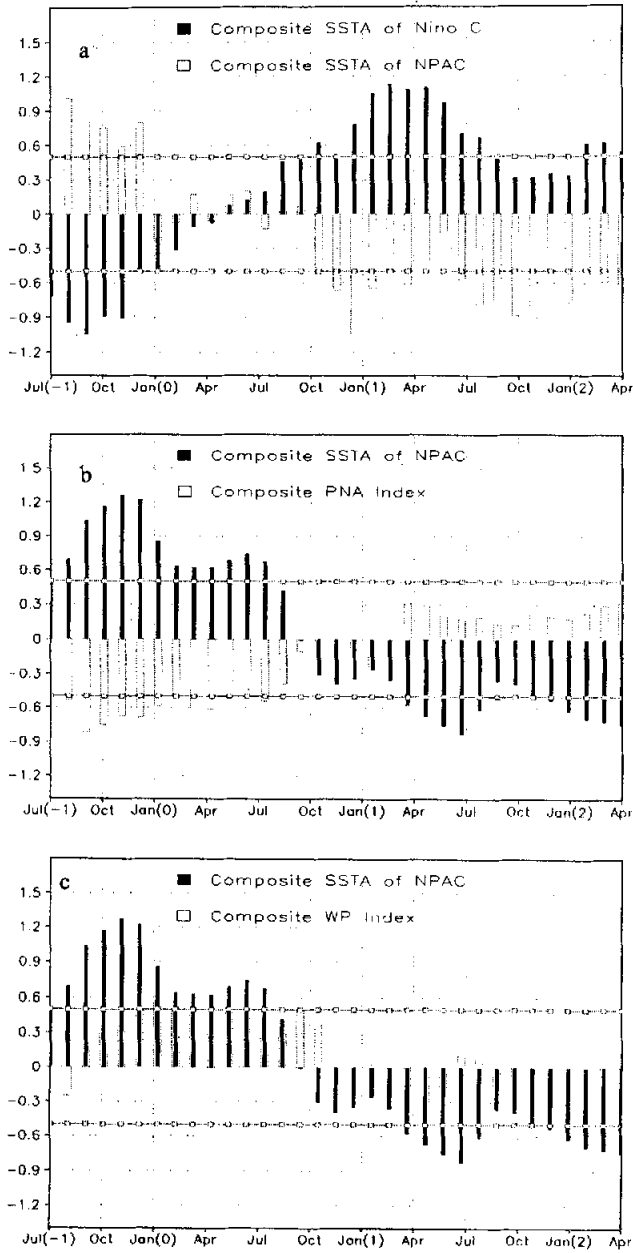


Fig2.22 SSTA 与 PNA/WP 指数的合成演变特征

a: NPAC 与 Nino C 区 SSTA 合成 b: NPAC 区 SSTA 与 PNA 指数合成

c: NPAC 区 SSTA 与 WP 指数合成

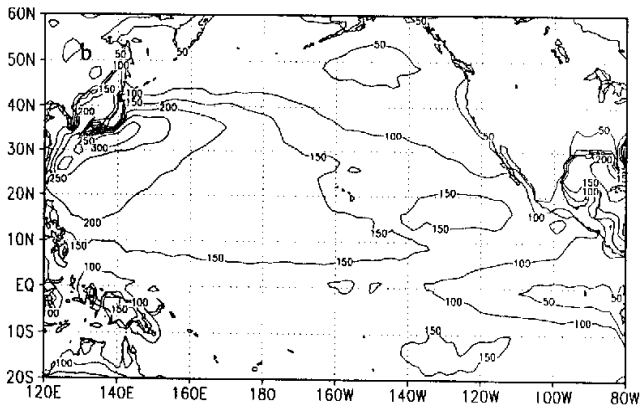
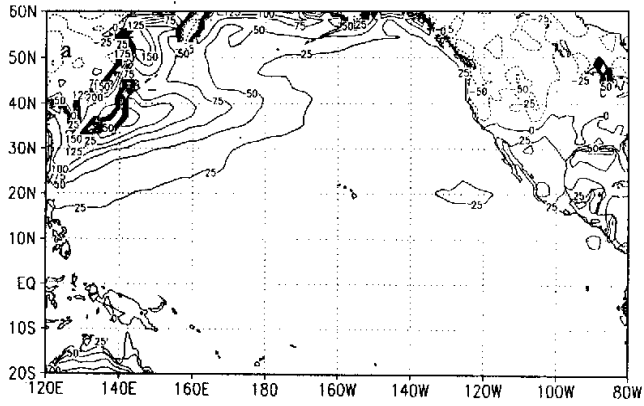
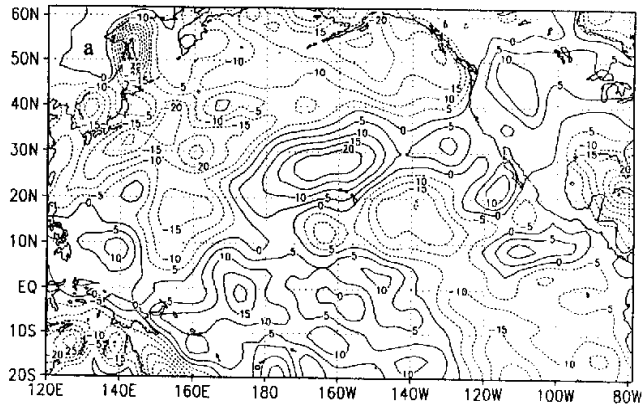


Fig2.23 冬季平均热量通量(单位: W/m^2)

a: 感热 b: 潜热



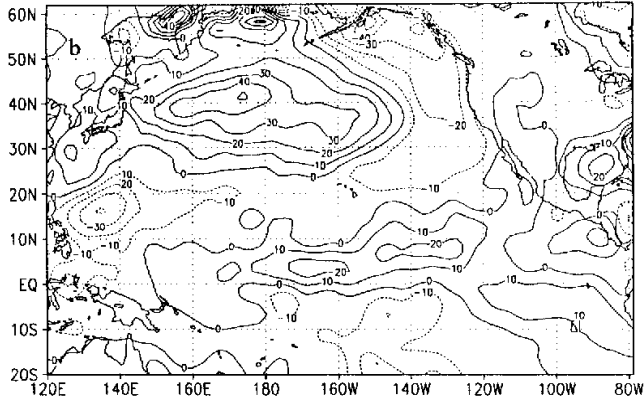


Fig2.24 对应 SSTA 第 1、3 位相感热+潜热输送异常(单位: W/m^2)

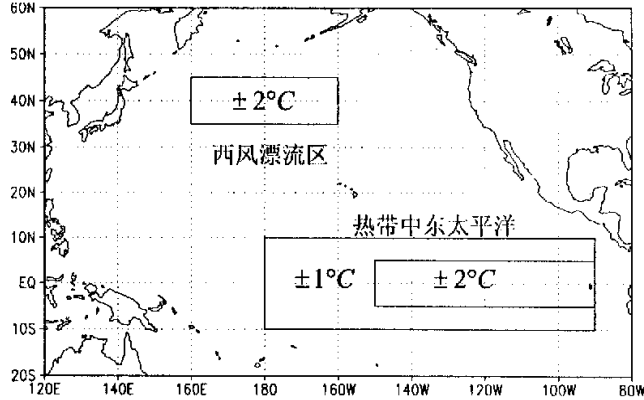


Fig3.1: IAP AGCM 异常数值试验采用的 SSTA 强迫范围

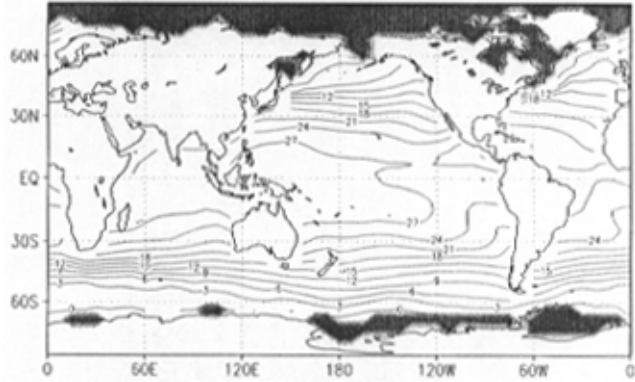
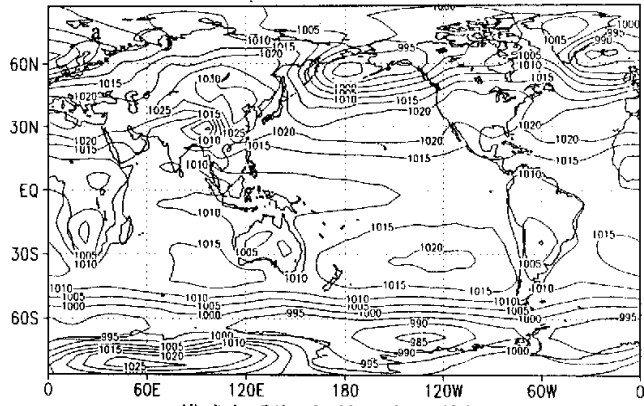
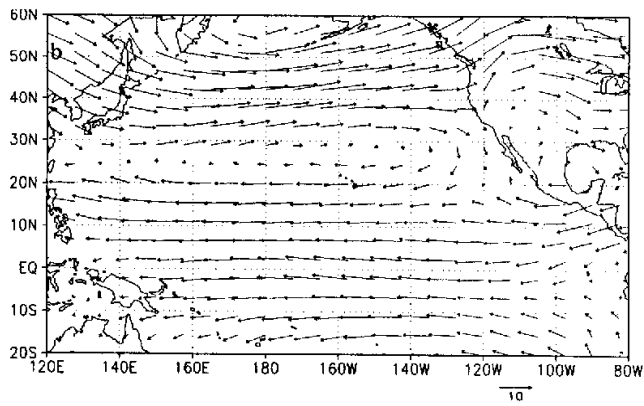


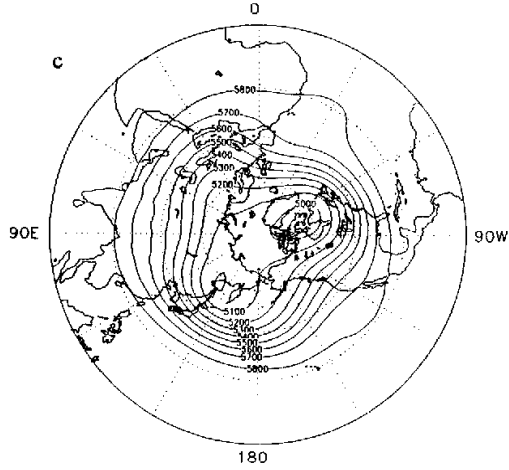
Fig3.2 模式采用的冬季海温以及海冰分布状况



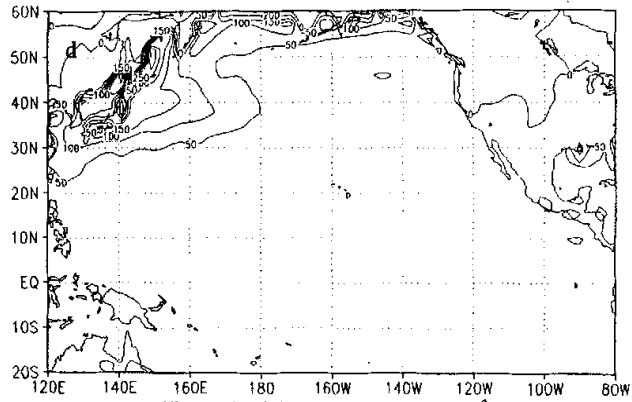
a: 模式冬季海平面气压场 (单位: hPa)



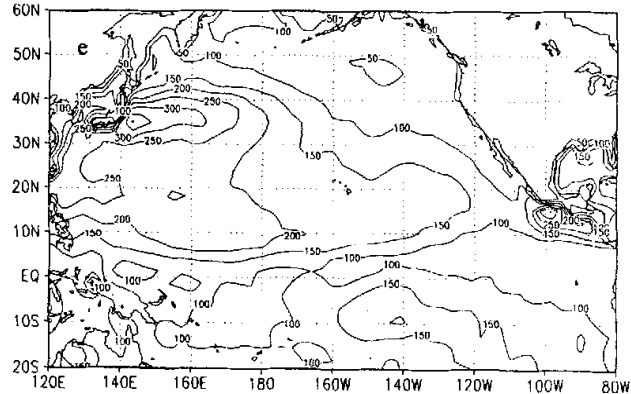
b: 850 hPa 风场分布



c: 500 hPa 位势高度平均场 (单位: gpm)

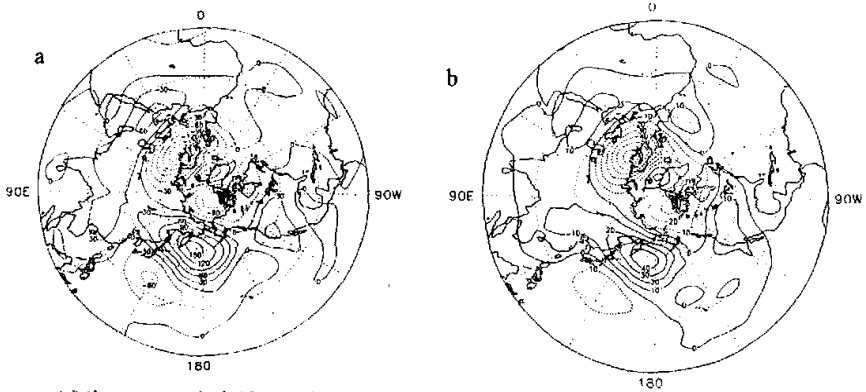


d: 模拟平均感热通量 (单位: W/m^2)



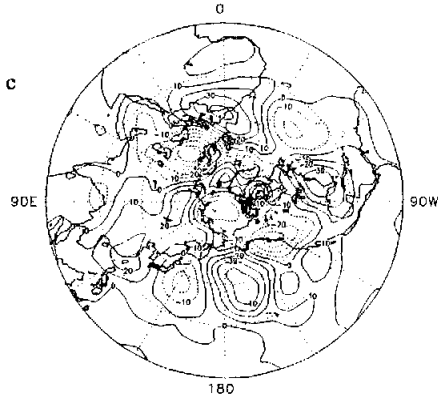
e: 模拟平均潜热通量 (单位: W/m^2)

Fig3.3 IAP AGCM 平均气候状态模拟

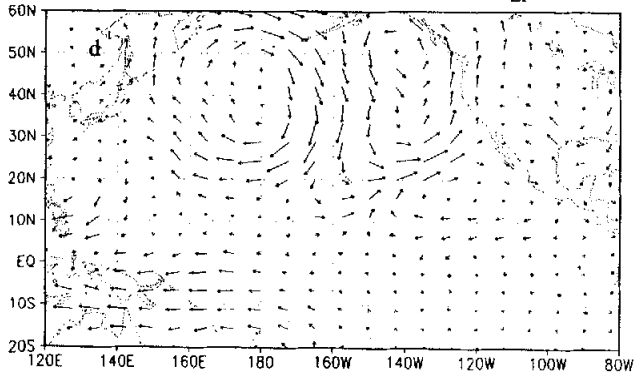


a: CT 试验 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)

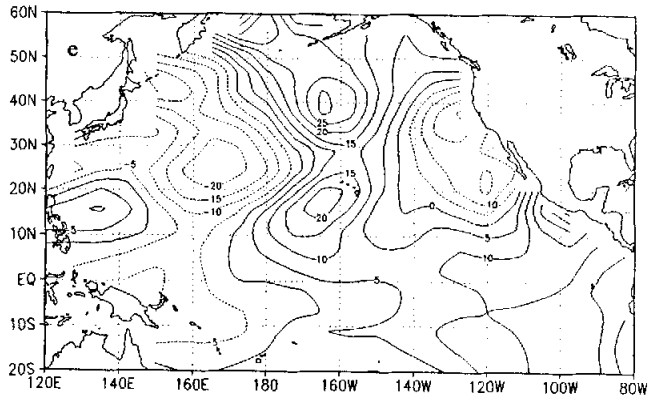
b: WN 试验 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)



c: EN1 试验 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)

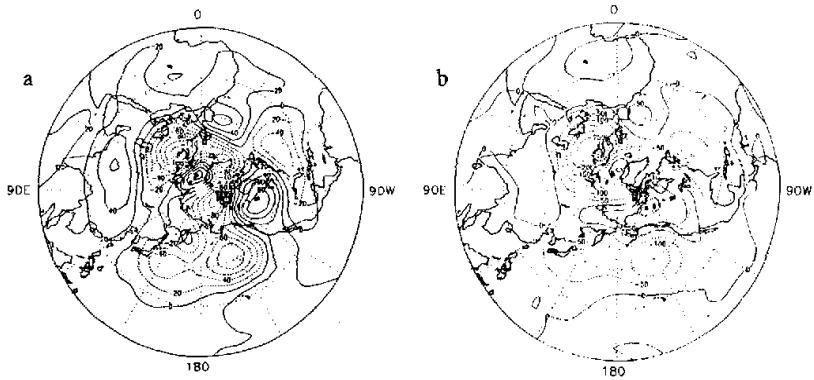


d: EN1 试验 850 hPa 风场异常 (单位: m/s)



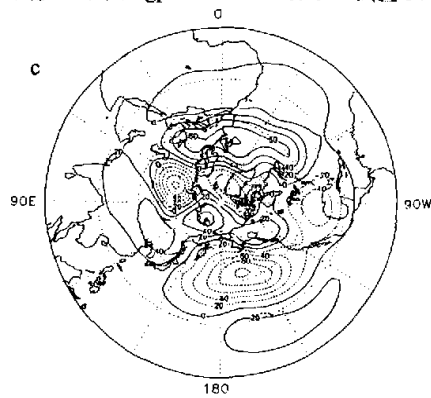
e: EN1 试验量输送异常 (单位: W/m^2)

Fig3.4 第1组异常试验结果 (a-e)

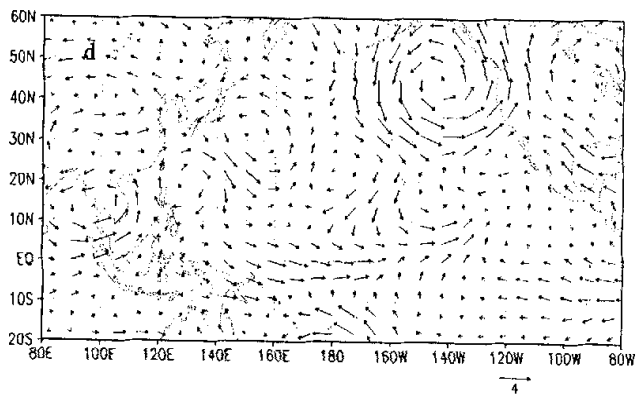


a: WT 试验 500 hPa 高度 (单位: gpm)

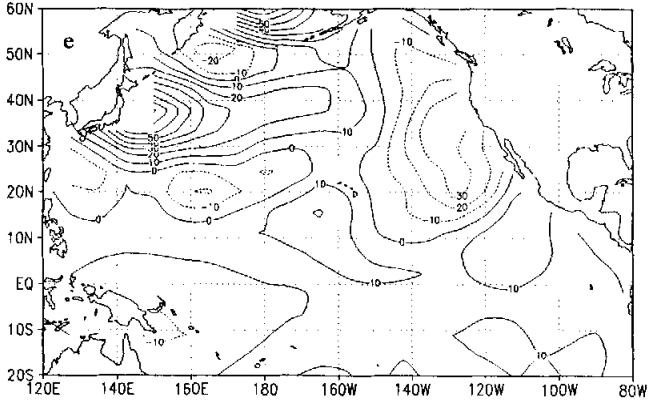
b: CN 试验 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)



c: EN3 试验 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)



d: EN3 试验 850 hPa 风场异常 (单位: m/s)



e: EN3 试验和热量输送异常 (单位: W/m^2)

Fig3.5 第2组异常试验模拟结果 (a-e)