

孙旭光, 杨修群. El Nino 演变不同阶段东亚大气环流年际异常型的数值模拟. 地球物理学报, 2005, 48(3):501~510
Sun X G, Yang X Q. Numerical modeling of interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Nino event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3):501~510

El Nino 演变不同阶段东亚大气环流 年际异常型的数值模拟

孙旭光, 杨修群

南京大学灾害性天气气候研究所, 南京 210093

摘 要 给定 1948~1999 年逐月变化的全球观测的海表温度分布, 使用全球大气环流模式 (CCM3/NCAR) 模拟了大气对海表温度变化的响应, 利用 SVD 和合成检验方法, 分析了 El Nino 发展阶段夏季、成熟阶段冬季以及衰亡阶段夏季东亚大气环流的年际异常型. 结果表明: El Nino 发展阶段夏季, 中国东北、朝鲜半岛以及日本海附近为高度负异常中心, 西太平洋副高偏弱、偏东, 东亚夏季风增强; El Nino 成熟阶段冬季, 东亚大槽加强, 东亚北部冬季风加强; El Nino 衰亡阶段夏季, 西太平洋副高偏强、偏南、西伸, 东亚夏季风减弱; El Nino 事件在其衰亡阶段夏季与东亚大气环流异常的关系最紧密, 其次是成熟阶段冬季, 最后是发展阶段夏季. 模拟的 El Nino 演变不同阶段东亚大气环流年际异常型易于解释以往研究中观测分析揭示的由 El Nino 造成的我国东部气温和降水异常型.

关键词 El Nino, 东亚大气环流, 副热带高压, 东亚季风

文章编号 0001-5733(2005)03-0501-10 **中图分类号** P435 **收稿日期** 2004-01-05, 2004-12-21 收修定稿

Numerical modeling of interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Nino event

SUN Xu-Guang, YANG Xiu-Qun

Institute of Severe Weather and Climate, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract We make numerical modeling for the response of global atmosphere to the prescribed realistic monthly varying global sea surface temperature during 1948~1999 with an atmospheric general circulation model (CCM3/NCAR). Then we analyze interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Nino cycle, with the SVD and composite analysis methods. The result shows that during the summer when an El Nino event develops, there exists an anomalously negative geopotential height center over Northeast China, the Korean peninsula and the Sea of Japan. The subtropical high over the western Pacific is weaker and shifts eastward, and East Asian summer monsoon is strengthened. During the winter when an El Nino event is matured, the East Asian trough is deepened, resulting in a strengthened winter monsoon over the north of East Asia but a weakened one over the south. During the summer when an El Nino event decays, the subtropical high over the western Pacific is stronger and shifts southward and westward, and the East Asian summer monsoon is weakened. There is a closest relationship between the El Nino event and atmospheric anomalies in East Asia only during the summer when the El Nino event decays. Overall, the simulated atmospheric anomaly patterns over East Asia due to El Nino's impact can reasonably explain the observed temperature and precipitation anomaly patterns that were described in previous studies.

基金项目 国家自然科学基金(40233028)和国家杰出青年科学基金(40425009)资助.

作者简介 孙旭光,男,1979年生,南京大学博士研究生,从事海气相互作用方向研究. E-mail: sunxuguang@nju.org.cn

Keywords El Nino, Atmosphere circulation in East Asia, Subtropical high, East Asian monsoon

1 引言

ENSO(恩索)是全球海气相互作用年际变率中最主要的信号,一般认为它具有3~5年的准周期^[1,2].由于ENSO事件发生时,整个大气环流的形势发生很大的变化,全球许多地区包括中国均会出现不同程度的气候异常及旱涝灾害.因此,中国气象学者关于ENSO对东亚季风、中国温度和降水以及西太平洋副高等的影响问题已有许多研究.

我国台站气温和降水观测资料的分析研究表明,在El Nino演变的不同阶段,我国降水异常分布明显不同^[3].黄荣辉和吴仪芳^[3]、金祖辉和陶诗言^[4]和陈文^[5]分析表明,在El Nino处于发展阶段时,夏季降水异常表现为江淮地区多雨,长江中游和华北少雨;而当El Nino处于衰亡阶段时,夏季降水异常正好相反,长江中下游及江南部分地区雨量偏多.刘永强和丁一汇^[6]分析指出,ENSO当年夏季全国降水以偏少为主,东北、江淮和黄河下游、华南沿海及西南部分地区多雨;ENSO次年夏季降水异常分布几乎完全相反;ENSO当年和次年夏季全国气温均以偏低为主,冬季大部分地区为暖冬,但东北地区却低温明显^[6,7].中国降水受ENSO事件影响最大的地区是江淮流域^[8],长江以南和华南地区;气温受El Nino影响最敏感的地区是东北和华南地区^[8,9],如东北地区夏季低温冷害^[7,10,11]等.励申申和寿绍文^[12]指出,不同季节增暖的ENSO事件对江淮流域夏季降水有不同的影响,秋季增暖的ENSO事件导致次年江淮流域夏季降水偏多,春夏季增暖的ENSO事件导致当年夏季江淮流域降水偏少.

根据ECMWF分析资料,倪允琪等^[9]研究指出,El Nino年冬季东亚冬季风加强,有较冷的空气入侵东亚东部地区;El Nino年夏季印度季风减弱,东亚季风增强.而根据NCEP分析资料,李崇银^[7]、陶诗言和张庆云^[13]、穆明权和李崇银^[14]、穆明权^[15]以及陈文^[5]得出,El Nino年冬季季风偏弱.对于东亚夏季风,黄荣辉和吴仪芳^[3]、冯晓伟和孙照渤^[16]、王绍武^[17]以及陈文^[5]等研究表明,El Nino发展期的夏季往往为弱的东亚夏季风,而在其衰亡期的夏季则为偏强的东亚夏季风.另外,彭加毅和孙照渤等^[18~20]利用NCEP资料得出,春季赤道太平洋海温偏暖年,夏季西太平洋副高偏强、偏南、偏西,东亚夏季风偏

弱,南海季风爆发迟.龙振夏和李崇银^[21,22]通过模式模拟表明西太平洋副高对赤道东太平洋正海温异常的持续性不敏感.

以往工作主要集中研究了东亚地区降水、温度、季风、副高等某些方面的问题,但还没有给出El Nino不同阶段东亚大气环流高低层完整的异常结构特征.在观测分析方面,对于El Nino事件影响的阶段性问题,以往的研究大多揭示中国降水或气温和El Nino的关系,而与这种关系相对应的大气环流异常结构由于缺乏长期的真实观测资料并没有得到确认;在数值模拟方面,以往研究仅仅是针对El Nino事件的成熟位相的个例试验,几乎没有考虑海表面气温(SST)连续变化导致的El Nino影响的阶段性问题.本文将主要针对El Nino事件发展阶段夏季、成熟阶段冬季以及衰亡阶段夏季东亚大气环流异常结构进行详细的分析.为了客观地揭示El Nino事件三个阶段的东亚大气环流异常结构,本文利用美国国家大气研究中心(NCAR)的全球大气环流谱模式(CCM3),进行了全球逐月SST强迫的长期积分试验,模拟了东亚大气环流对El Nino事件不同阶段的年际异常响应特征.

为了揭示大气环流异常和SST异常之间的耦合关系,本文使用了奇异值分解(SVD)分析方法.由于热带太平洋SST异常主要为El Nino信号支配,同时由于El Nino事件的生命期具有对季节的锁相性和一年左右时间的持续性,即El Nino事件往往在春夏季发生发展、秋冬季成熟、次年春夏季衰亡,故本文在分析时将热带太平洋海温异常(SSTAs)固定在冬季,以突出El Nino信号的影响.另外,本文还将对多次El Nino事件不同阶段的大气环流异常进行合成以确定SVD分析结果.

2 模式和试验

本文使用的模式是美国国家大气研究中心(NCAR)第4代全球大气环流谱模式(CCM3),采用三角形波谱截断,水平分辨率为T42(近似 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$),垂直方向共有18层,模式层顶为2.917hPa,模式积分时间步长为20min.模式中包含日变化,辐射通量每小时计算一次,在每两次计算之间辐射通量保持不变.CCM3的大气动力学框架为欧拉型,而水汽传输方案为半拉格朗日方案.CCM3耦合了详

细的路面过程物理模式 (LSM) 和两种可选的海洋模式, 即数据海洋模式 (DOM) 和平板海洋模式 (SOM). 本研究采用数据海洋模式, 海表温度 (SST) 人为给定. 在 CCM3 中对所有物理过程和计算方法的详细描述可参阅文献 [23, 24].

本文利用 CCM3 设计运行了一个长期模拟积分试验, 用观测的具有年际变化的全球月平均 SST 作为强迫场, 用 NCAR 提供的 9 月 1 日大气资料作为初始场, 从 1948 年 9 月 1 日积分到 1999 年 8 月 31 日, 共 52 年. 本文分析只取 1949~1998 年共 50 年的

模式结果进行分析. 在分析以前, 对模式结果进行了年际尺度 (13 个月 ~ 8 年) 的带通滤波, 以突出年际气候异常特征.

3 El Nino 发展阶段夏季东亚大气环流异常结构

图 1 给出了模拟的夏季东亚地区 500hPa 高度距平场与紧随冬季热带太平洋 SST 异常场之间 SVD 第一模态的异性相关场空间分布及相对应的时间系

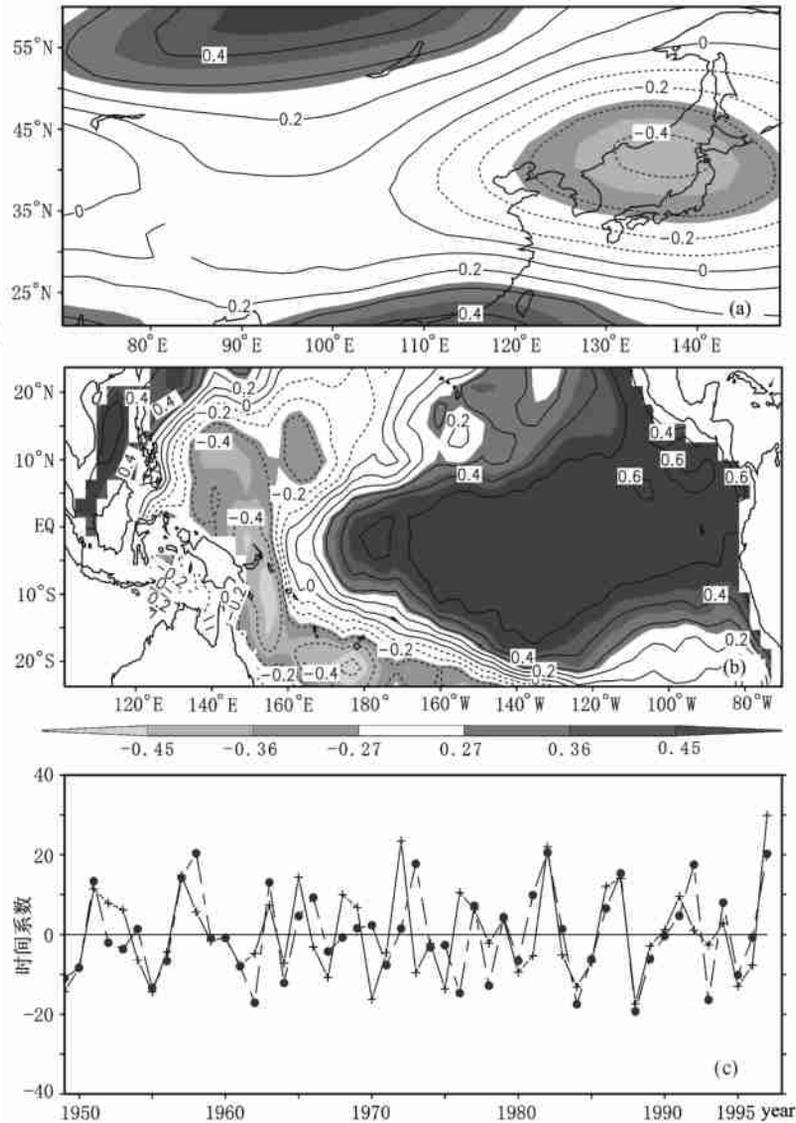


图 1 (a) 年际尺度上夏季东亚地区 500hPa 高度距平场, (b) 紧随冬季南北纬 25 之间的热带太平洋 SST 异常场, (c) SVD 第一模态的异性相关场及相对应的时间系数
色标表示不同异性相关信度水平, (c) 中的实线和虚线分别对应于 (a) 和 (b) 的时间系数.

Fig. 1 (a) Leading SVD mode of anomalous 500hPa geopotential height in summer, (b) SSTA in tropical Pacific (25°S ~ 25°N) in the following winter, and (c) Hetero-correlation patterns and their corresponding time coefficients

The shaded areas in (a) and (b) indicate that hetero-correlations are significant at different levels.

Solid line and dashed line in (c) represent time coefficients in (a) and (b), respectively.

数. SVD 第一模态解释总协方差 55.21%, 时间系数相关系数为 0.59. 由图 1b 中的热带太平洋 SST 异常的异性相关场分布可见, 在赤道中东太平洋大范围区域均为显著的正相关, 这种分布反映了冬季 El Nino 成熟位相时典型 SST 异常结构. 图 1c 中与图 1b 相联系的时间系数 (图中实线) 与年际尺度上冬季 Nino3 指数的相关系数为 0.97. 因此可以认为, 图 1a 中夏季东亚地区 500hPa 高度异性相关场实际上反映了 El Nino 事件发展阶段夏季东亚地区 500hPa 高度距平场的异常结构, 其中显著的异性相关表明了该阶段东亚地区 500hPa 高度场的这种异常结构与 El Nino 事件有很好的对应关系. 东亚地区 500hPa 高度场的异常结构 (图 1a) 为: 东亚东北部 (中国东北、朝鲜半岛以及日本海附近) 为显著负异常中心, 而在

其西部的巴尔喀什湖和贝加尔湖之间以及 30°N 以南的低纬地区则为显著正异常.

为了进一步确认上述 SVD 分析得到的 El Nino 发展阶段夏季东亚大气环流异常型, 本文根据年际尺度 Nino3 指数, 选取 1949 ~ 1998 年共 50 年中 8 个较显著的 El Nino 事件 (即 1957/58, 1965/66, 1972/73, 1976/77, 1982/83, 1986/87, 1991/92, 1997/98), 对其发展阶段夏季 500hPa 高度距平场和 850hPa 风场距平场作合成, 并进行 t 检验 (如图 2). 对于 500hPa 高度场 (见图 2a), 东亚东北部的中国东北、朝鲜半岛以及日本海附近为一显著 (超过 0.1 信度水平) 的负异常中心, 这与 SVD 分析结果一致.

对于低层的 850hPa 风场 (见图 2b), 与 500hPa 东亚东北部高度负异常中心相对应, 存在气旋式风

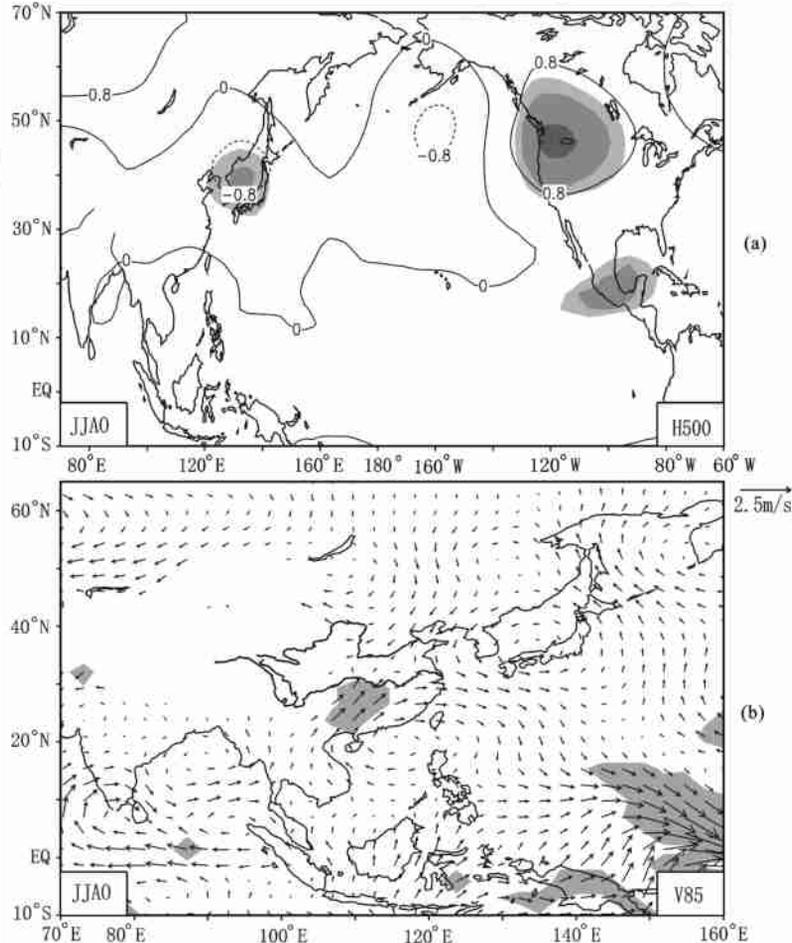


图 2 在 El Nino 发展阶段夏季 (JJA0) 8 个 El Nino 事件 (57/58, 65/66, 72/73, 76/77, 82/83, 86/87, 91/92, 97/98) 的 500hPa 高度距平场 (H500, 单位: 10m) (a) 和 850hPa 风场距平场 (V85, 单位: m/s) (b) 的合成图

阴影区表示合成 t 检验 10% 信度水平的区域.

Fig. 2 Composites anomalous 500hPa geopotential height (H500, unit: 10m) (a) and 850hPa wind field (V85, unit: m/s) (b) by 8 El Niño events (57/58, 65/66, 72/73, 76/77, 82/83, 86/87, 91/92, 97/98)

during summer (JJA0) when an El Niño event develops

Shaded areas indicate that the t statistic of the composites are significant at the 10% level.

场异常,这在中国东北地区产生强大的异常偏北风,从而造成东北地区夏季异常低温.显然,高低层异常表现为相当正压结构.同时,赤道西太平洋为强烈的异常西风,标志着 El Nino 事件的发展.菲律宾以东洋面为异常的气旋式风场,表明西太平洋副高减弱、偏东.在中国华南南部有一反气旋式异常风场,它与孟加拉湾地区反气旋式异常风场共同作用,增强了印度夏季风和东亚夏季风.增强的季风输送热带孟加拉湾地区的暖湿水汽越过华南和长江中游而到更北的江淮流域,并与江淮流域北部的干冷异常偏北风共同作用,造成江淮流域多雨,而长江中游和华南地区少雨.以上结论与 El Nino 发展阶段夏季中国

160 站的气温和降水观测事实相吻合.

4 El Nino 成熟阶段冬季东亚大气环流异常结构

图 3 给出了模拟的冬季东亚地区 500hPa 高度距平场与同期冬季赤道太平洋 SST 异常场之间 SVD 第一模态的异性相关场空间分布及相对应的时间系数,其解释总协方差 77.40%,时间序列相关系数为 0.78.图 3b 与图 1b 很相似,同样反映了冬季 El Nino 成熟位相时典型 SST 异常结构,同时,图 3c 中与图 3b 相联系的时间系数(图中实线)与年际尺度上冬

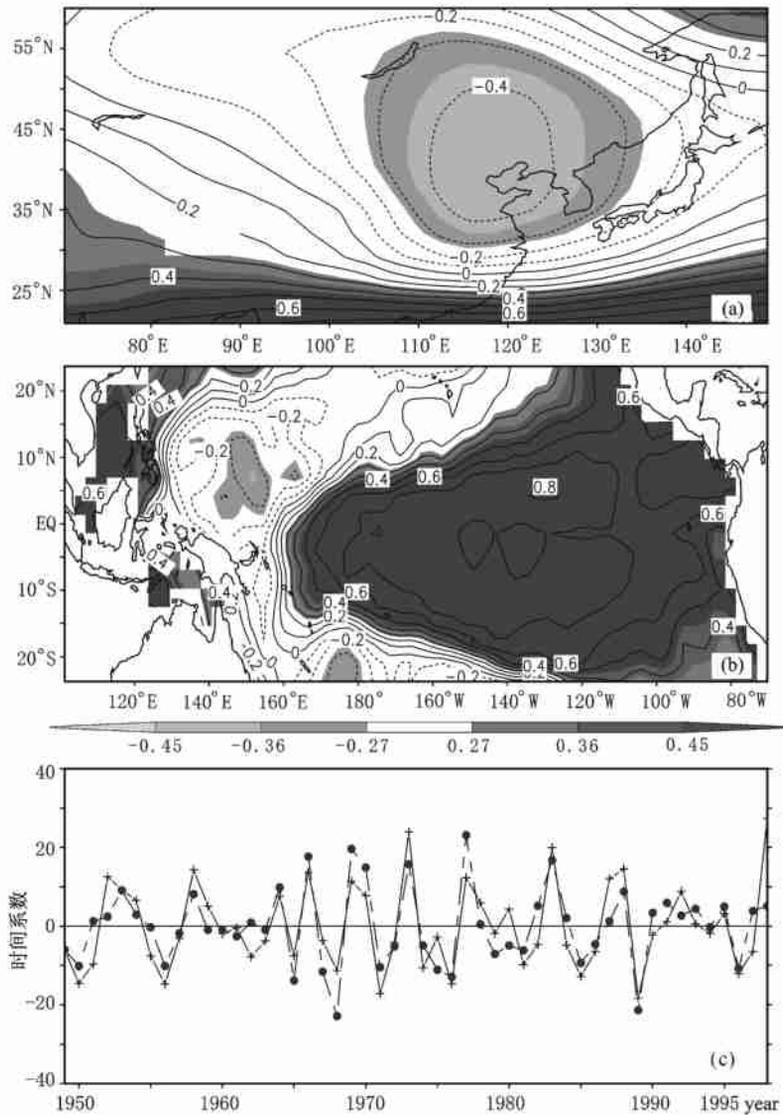


图 3 同图 1,但为冬季东亚地区 500hPa 高度距平场(a)与同期冬季南北纬 25 之间赤道太平洋海温异常场(b)的 SVD 第一模态和它们的时间系数(c)

Fig. 3 Same as Fig. 1 but for anomalous 500hPa geopotential height (a) and SSTA in tropical Pacific (25°S ~ 25°N) in wintertime (b) and their associated time coefficients (c)

季 Nino3 指数的相关系数为 0.95. 因此可以认为, 图 3a 中冬季东亚地区 500hPa 高度场异常异性相关场实际上反映了 El Nino 成熟阶段冬季东亚地区 500hPa 高度距平场的异常结构, 其中显著的异性相关也同样表明了该阶段东亚地区 500hPa 高度场的这种异常结构与 El Nino 事件有很好的对应关系. 500hPa 高度在东亚东北部 (中国华北、东北以及朝鲜半岛和贝加尔湖以南地区) 为显著的负异常中心, 在 30°N 以南的低纬地区为显著正异常. 其中, 东亚东北部 500hPa 显著负异常中心位置比 El Nino 发展阶段夏季偏西, 但强度更大, 范围更广. 冬季东亚地区 500hPa 高度场南正北负的显著异常结构, 一方面使冬季东亚大槽异常加深, 有利于冬季冷空气南下, 另一方面, 30°N 附近以南 500hPa 高度场紧密平直的显著正异常会使西风异常增强, 阻止了冷空气的进一步南下, 从而使 El Nino 事件成熟阶段的冷冬限制

在东亚北部地区.

为了进一步确认上述 SVD 分析得到的 El Nino 成熟阶段冬季东亚大气环流异常型, 与第三节相似, 取相同的 8 次 El Nino 事件, 对成熟阶段冬季 500hPa 高度距平场和 850hPa 风场距平场作合成, 并进行 t 检验 (如图 4). 对于 500hPa 高度场 (见图 4a), 太平洋北美地区出现 PNA 异常结构, 东亚东北部的华北、东北以及朝鲜半岛和日本海附近为显著负异常中心, 加深了东亚大槽. 相对于 El Nino 发展阶段夏季, 该显著的负异常中心强度更强. 另外, 25°N 附近以南的低纬地区为显著正异常. 这也与 SVD 分析结果一致.

对于低层的 850hPa 风场 (见图 4b), 与 500hPa 东亚东北部高度负异常中心相对应, 存在气旋式风场异常, 与 El Nino 发展阶段夏季相比, 该气旋式风场中心位置偏西, 结构更明显, 强度更强, 在中国华

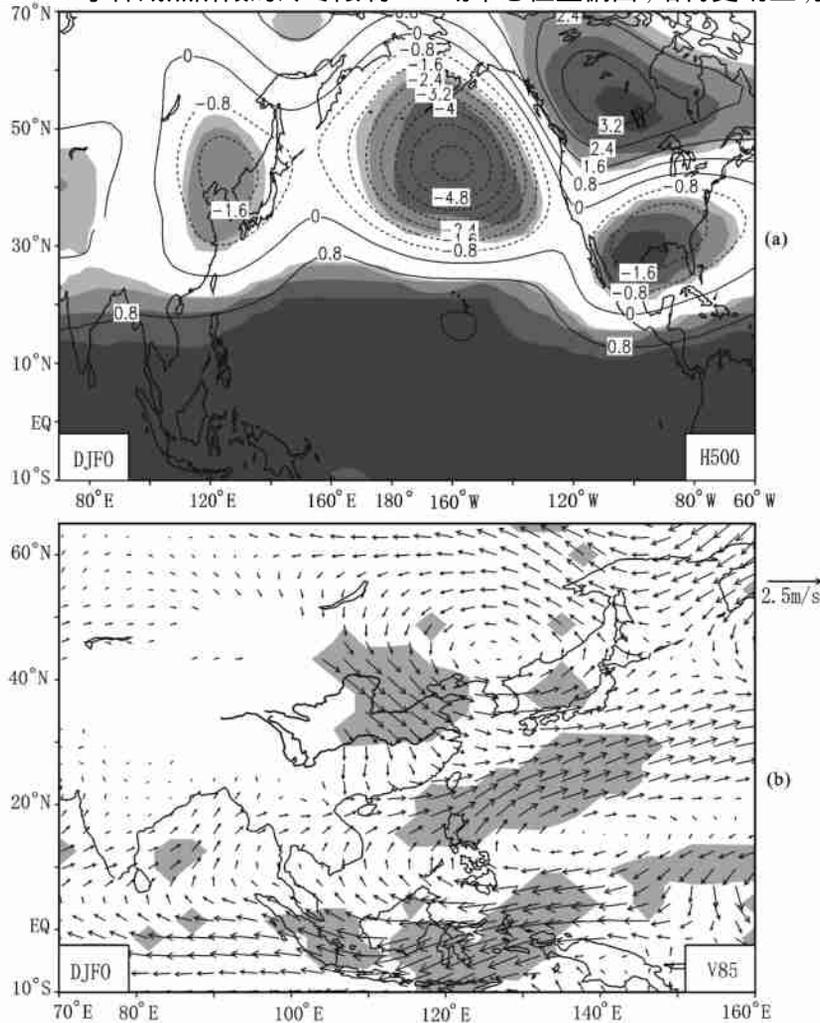


图 4 同图 2, 但为 El Nino 成熟阶段冬季 (DJFO)

Fig. 4 Same as Fig. 2 but for the winter (DJFO) when an El Niño event matures

北地区强大的异常北风会造成华北地区冬季低温异常. 同样, 高低层异常表现为相当正压结构. 150 °E 以西的赤道西太平洋和印度洋均为强烈的东风异常, 标志着 El Nino 事件的成熟. 整个西太平洋及其孟加拉湾地区为一致的反气旋异常风场, 该反气旋异常风场可以看作是 El Nino 发展阶段异常风场的延续增强. 该强大的反气旋异常风场在东亚东部 30 °N 附近产生的显著的异常西风阻止了冷空气的进一步南下, 从而中国东南部大部分地区冬季偏暖. 另外, 华南南部地区气旋式异常风场的切变, 造成中国华南地区降水偏多. 以上结论与 El Nino 成熟阶段冬季中国 160 站的气温和降水观测事实相吻合.

5 El Nino 衰亡阶段夏季东亚大气环流异常结构

图 5 给出了模拟的夏季东亚地区 500hPa 高度距平场与前冬赤道太平洋 SST 异常场之间 SVD 第一模态的异性相关场空间分布及相对应的时间系数, 其解释总协方差 88.62%, 时间序列相关为 0.76. 图 5b 与图 1b 很相似, 同样反映了冬季 El Nino 成熟位相时典型 SST 异常结构, 同时, 图 5c 中与图 5b 相联系的时间系数(图中实线)与年际尺度上冬季 Nino3 指数的相关系数为 0.96. 因此可以认为, 图

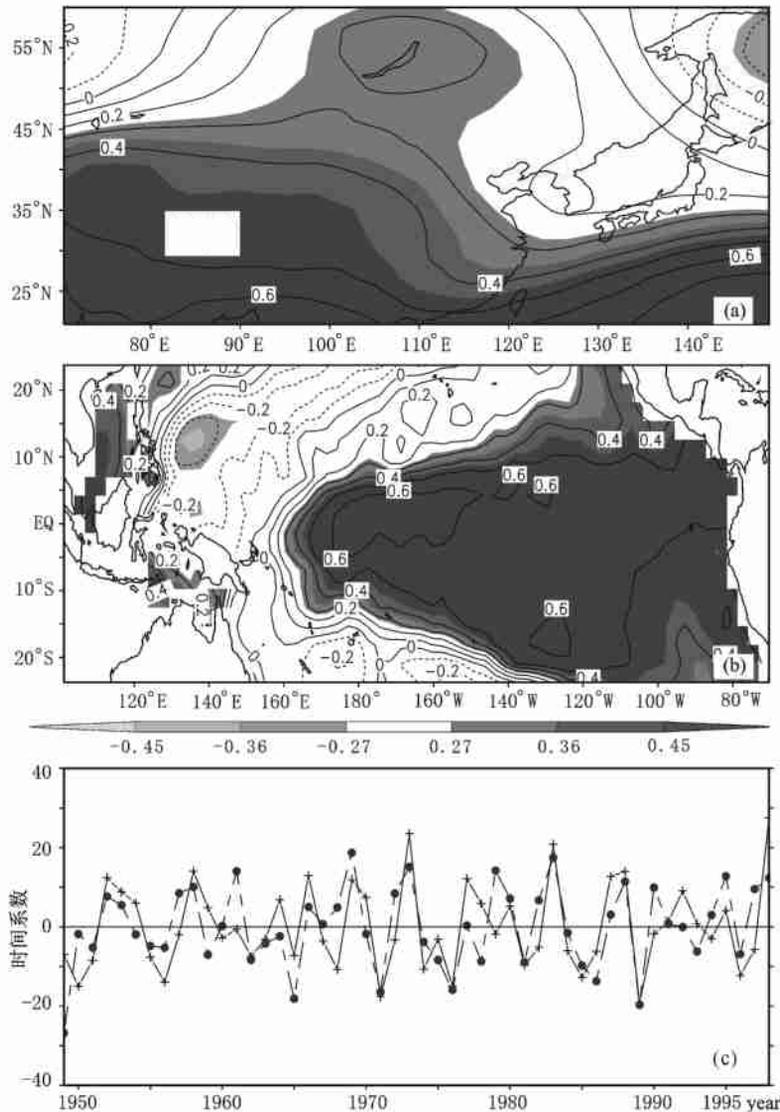


图 5 同图 1, 但为夏季东亚地区 500hPa 高度距平场 (a) 与前冬季南北纬 25 之间赤道太平洋海温异常场 (b) 的 SVD 第一模态和它们的时间系数 (c)

Fig. 5 Same as Fig. 1 but for anomalous 500hPa geopotential height in summer (a) and SSTA in tropical Pacific (25°S ~ 25°N) in previous winter (b) and their associated time coefficients (c)

5a 中夏季东亚地区 500hPa 高度场异常异性相关场实际上反映了 El Nino 衰亡阶段夏季东亚地区 500hPa 高度距平场的异常结构, 同样, 异性相关的显著性表明了该阶段东亚地区 500hPa 高度场的这种异常结构与 El Nino 事件有很好的对应关系. 图 5a 中模拟的东亚地区 500hPa 高度场的异常型为: 东亚大部分地区为显著的正异常, 最大显著正异常位于低纬地区.

为了进一步确认上述 SVD 分析得到的 El Nino 衰亡阶段夏季东亚大气环流异常型, 与第三节相似, 取相同的 8 次 El Nino 事件, 对衰亡阶段夏季 500hPa 高度距平场和 850hPa 风场距平场作合成, 并进行 t 检验 (如图 6). 对于 500hPa 高度场 (见图 6a), 整个中纬度北太平洋地区为显著的负异常, 其中勘察加半岛和北太平洋东北部为两个显著的负异常中心; 巴

尔喀什湖和贝加尔湖之间为显著正异常中心, 25°N 附近以南地区为显著正异常.

对于低层的 850hPa 风场 (见图 6b), 与东亚东北部 500hPa 高度负异常中心相对应, 在贝加尔湖附近为反气旋式风场异常, 在东亚东北部为气旋式风场异常, 这两个异常风场在东亚东北部产生的偏北冷气流强烈地影响中国东北地区, 造成东北冷夏. 整个赤道西太平洋和印度洋地区均为一致性的强烈东风异常, 标志着 El Nino 事件的衰亡. 菲律宾以东洋面至中南半岛为强大的反气旋风场异常, 表明西太平洋副高偏强、偏南、西伸. 华南南部地区的气旋式风场异常造成东亚夏季风减弱, 因此由孟加拉湾地区输出的西南暖湿气流不容易到达长江以北, 从而造成了江淮流域降水偏少, 而长江流域和江南的降水异常增多, 这与 El Nino 发展阶段夏季情况几乎正好

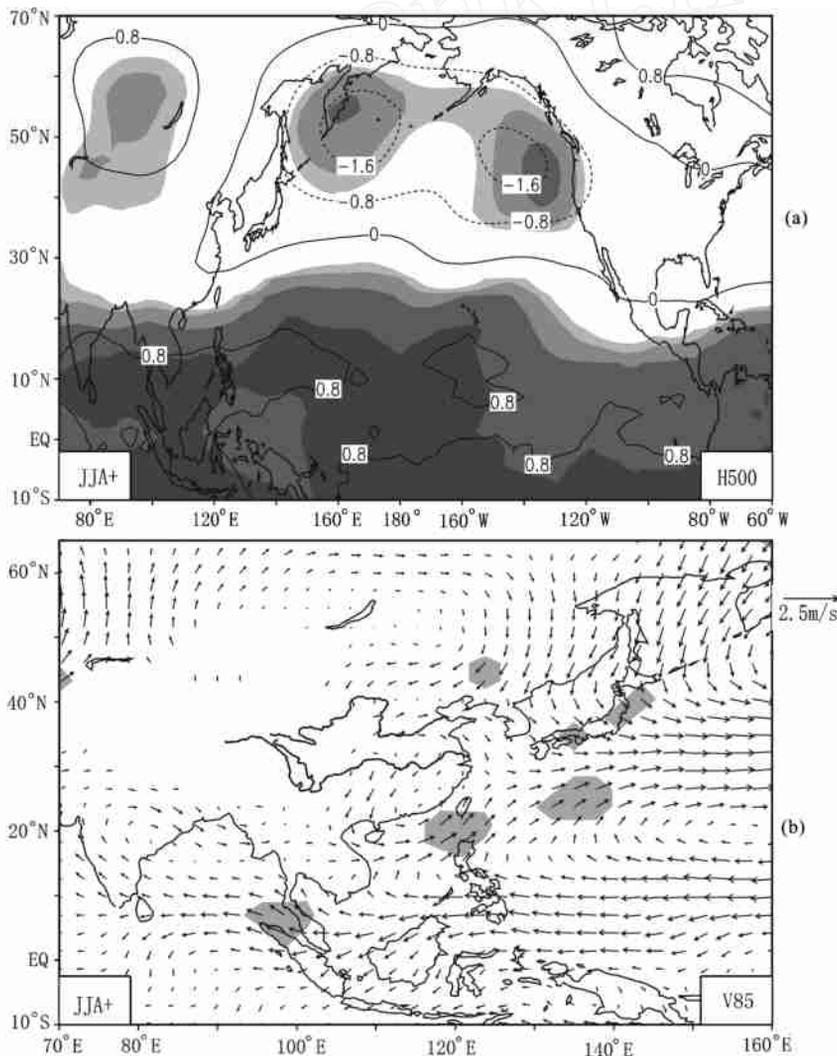


图 6 同图 2, 但为 El Nino 衰亡阶段夏季 (JJA+)

Fig. 6 Same as in Fig. 2 but for the summer (JJA+) when an El Nino event decays

相反. 以上结论与 El Nino 衰亡阶段夏季中国 160 站的气温和降水观测事实相吻合.

6 结论和讨论

在给定的 52 年逐月变化的全球观测海表温度分布, 使用全球大气环流模式 (CCM3), 模拟了大气对海表温度变化的响应. 本文利用模式模拟结果, 详细分析了 El Nino 发展阶段夏季、成熟阶段冬季和衰亡阶段夏季东亚大气环流的年际异常型. 结果表明:

(1) 在 El Nino 发展阶段的夏季, 在中国东北、朝鲜半岛和日本海附近, 高空为 500hPa 高度场的负异常, 低空为 850hPa 气旋式风场异常, 呈相当正压结构; 在西太平洋副热带地区, 气旋式 850hPa 异常风场表明西太平洋副高偏弱、偏东; 华南南部 850hPa 反气旋式异常风场表明东亚夏季风增强, 这有利于把低纬地区暖湿气流输送到江淮流域, 并与北方干冷气流汇合, 造成江淮流域异常多雨; 而在赤道地区 120°E 附近以东显著的异常西风表明了 El Nino 事件开始发展.

(2) 在 El Nino 成熟阶段冬季, El Nino 发展阶段夏季所形成的东亚东北部高空 500hPa 高度负异常中心进一步加强, 位置偏西, 造成东亚大槽加强. 相应地, 低层 850hPa 存在气旋式异常风场, 也呈相当正压结构. 西太平洋地区低层 850hPa 存在强大的反气旋式异常风场, 阻止了冷空气的进一步南下, 从而将冷冬限制在东亚北部地区; 赤道地区显著西风异常的起始位置由 120°E 附近东移至 150°E 附近, 表明了 El Nino 事件发展到成熟阶段.

(3) 在 El Nino 衰亡阶段的夏季, El Nino 成熟阶段加强的高空 500hPa 高度负异常中心北抬至勘察加半岛, 与巴尔喀什湖和贝加尔湖之间的高度正异常中心共同提供了东亚东北部强大深厚的偏北风异常 (850hPa 同样为偏北风异常), 易造成东北冷夏; 菲律宾以东洋面至中南半岛低层 850hPa 强大的反气旋式异常风场表明西太平洋副高偏强、偏南、西伸; 华南南部气旋式异常风场表明东亚夏季风减弱, 这阻止了孟加拉湾的西南暖湿水汽输送到长江以北, 从而造成江淮流域降水偏少, 而长江流域及华南地区降水偏多; 赤道地区一致性的东风异常表明了 El Nino 事件的衰亡.

与 El Nino 发展阶段的夏季、成熟阶段的冬季以及衰亡阶段的夏季相对应, 图 1、图 3 和图 5 中 SVD 第一模态所解释总协方差的百分率分别为:

55.21%, 77.40% 和 86.78%, 呈依次增大趋势. 这表明在年际尺度上, El Nino 事件和东亚地区大气环流异常的关系在 El Nino 衰亡阶段夏季最紧密, 其次是成熟阶段的冬季, 最后是发展阶段的夏季. 总体而言, 本文模拟的 El Nino 演变不同阶段东亚大气环流年际异常型, 易于解释以往观测分析研究所揭示的 El Nino 不同阶段我国东部地区气温和降水异常型.

参考文献 (References)

- [1] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Nino. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**(5): 354 ~ 384
- [2] 钱维宏, 朱亚芬, 叶 谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率. *科学通报*, 1998, **43**(10): 1098 ~ 1102
Qian W H, Zhu Y F, Ye Q. Interannual and interdecadal variability of sea surface temperature anomalies in eastern equatorial Pacific. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 1998, **43**(10): 1098 ~ 1102
- [3] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**(1): 21 ~ 32
- [4] 金祖辉, 陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. *大气科学*, 1999, **23**(6): 663 ~ 672
Jin Z H, Tao S Y. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in Eastern China. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 1999, **23**(6): 663 ~ 672
- [5] 陈 文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚东、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, **26**(5): 595 ~ 610
Chen W. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2002, **26**(5): 595 ~ 610
- [6] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响. *大气科学*, 1995, **19**(2): 200 ~ 208
Liu Y Q, Ding Y H. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 1995, **19**(2): 200 ~ 208
- [7] 李崇银. El Nino 事件与中国东部气温异常. *热带气象*, 1989, **5**(3): 210 ~ 219
Li C Y. El Nino event and the temperature anomalies in Eastern China. *J. Tropical Meteor. (in Chinese)*, 1989, **5**(3): 210 ~ 219
- [8] 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. *南京气象学院学报*, 1998, **21**(4): 615 ~ 623
Zhu Q G, Xu J J. Observational study on the effect of ENSO and its interdecadal variations on the climate anomaly in Eastern China. *J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese)*, 1998, **21**(4): 615 ~ 623
- [9] 倪允琪, 邹 力, 刘 颖. ENSO 和西太平洋暖池对我国气候影响的诊断分析研究. *气象科学*, 1995, **15**(4): 118 ~ 133
Ni Y Q, Zou L, Liu Y. Diagnostic study for impact of ENSO and warm pool of western Pacific on Asian monsoon and climate change of China. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 1995, **15**(4): 118 ~ 133

- [10] 李崇银,胡季. 东亚大气环流与埃尔尼诺相互影响的一个分析研究. 大气科学,1987,11(4): 359~364
Li C Y, Hu J. A study on interaction between the East-Asia atmospheric circulation and El Niño. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1987, 11(4): 359~364
- [11] 曾昭美,章名立. 热带东太平洋关键区海温与中国东北地区气温的关系. 大气科学,1987,11(4): 382~389
Zeng Z M, Zhang M L. Relationship between the key region SST of the tropical eastern Pacific and air temperature of northeast China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1987, 11(4): 382~389
- [12] 励申申,寿绍文. 赤道东太平洋海温与江淮流域夏季旱涝的成因分析. 应用气象学报,2000,11(3): 331~338
Li S S, Shou S W. Equatorial eastern Pacific SST and analysis on causes of summer floods/droughts in the Changjiang and Huaihe River basin. *Quart. J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 2000, 11(3): 331~338
- [13] 陶诗言,张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气科学,1998,22(4): 399~407
Tao S Y, Zhang Q Y. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, 22(4): 399~407
- [14] 穆明权,李崇银. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息. 观测资料分析. 大气科学,1999,23(3): 276~285
Mu M Q, Li C Y. ENSO signals in the interannual variability of East-Asian winter monsoon. Part I: Observed data analyses. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, 23(3): 276~285
- [15] 穆明权. 东亚冬季风异常与 ENSO 循环关系的进一步研究. 气候与环境研究,2001,6(3): 273~285
Mu M Q. A further research on the cyclic relationship between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, 6(3): 273~285
- [16] 冯晓伟,孙照渤. ENSO 对东亚夏季风强度的影响. 南京气象学院学报,1998,21(2): 196~200
Feng X W, Sun Z B. The influence of ENSO on the East-Asian summer monsoon intensity. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 1998, 21(2): 196~200
- [17] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社,2001
Wang S W. *Advances in Modern Climatological Research* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001
- [18] 彭加毅,孙照渤,倪东鸿. 春季赤道东太平洋海温异常与东亚夏季风的关系. 南京气象学院学报,2000,23(3): 385~390
Peng J Y, Sun Z B, Ni D H. Relation of eastern Asian summer monsoon with the equatorial eastern Pacific spring SSTA. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 2000, 23(3): 385~390
- [19] 彭加毅,孙照渤. 春季赤道东太平洋海温异常对西太平洋副高的影响. 南京气象学院学报,2000,23(2): 191~195
Peng J Y, Sun Z B. Influence of spring equatorial eastern Pacific SSTA on western Pacific subtropical high. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 2000, 23(2): 191~195
- [20] 彭加毅,孙照渤. 春季赤道东太平洋海温异常对东亚环流春夏季节演变的影响. 热带气象学报,2001,17(4): 398~404
Peng J Y, Sun Z B. Influence of spring equatorial eastern Pacific SSTA on the seasonal change from spring to summer of eastern Asian circulation. *J. Tropical Meteor.* (in Chinese), 2001, 17(4): 398~404
- [21] 龙振夏,李崇银. 赤道东太平洋不同持续时间的海温正异常对东亚夏季气候影响的数值模拟研究. 大气科学,1999,23(2): 161~176
Long Z X, Li C Y. A numerical study of the summer climatic response in East Asia to positive SSTA with different duration in equatorial eastern Pacific. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, 23(2): 161~176
- [22] 龙振夏,李崇银. 赤道东太平洋海温正异常对西太平洋副高影响的数值模拟研究. 大气科学,2001,25(2): 145~159
Long Z X, Li C Y. Simulating influence of positive sea surface temperature anomalies over the eastern equatorial Pacific on subtropical high. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, 25(2): 145~159
- [23] Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. NCAR Tech. Note NCAR/TN-420 + STR, 1996. 152. Available from NCAR, Boulder, CO80307
- [24] Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. The national center for atmospheric research community climate model: CCM3. *J. Climate*, 1998, 11(6): 1131~1149