

南海海温异常影响南海夏季风的数值模拟研究

黄 安 宁 张 耀 存 黄 丹 青

南京大学大气科学系, 南京 210093

摘 要 采用 $p-\sigma$ 九层区域气候模式 ($p-\sigma$ RCM9) 模拟并研究了南海海温异常对南海夏季风的影响, 数值模拟结果表明, 5 月份的南海海温对南海夏季风的爆发日期起关键作用: 5 月份南海海温持续增温 (降温), 南海夏季风爆发日期偏早 (偏晚)。南海夏季风爆发后, 南海异常增温, 同期的南海夏季风增强, 而后期的南海夏季风减弱; 南海异常降温, 则与之相反。机制分析表明, 南海海温正 (负) 异常增强 (减弱) 了海面与行星边界层之间的能量交换, 主要是潜热通量的输送, 并在大气中通过积云对流加热率的变化来影响对流层热量的分布, 进而引起对流层中低层辐合和高层辐散的变化, 然后使得环流场和风场作出相应地调整, 环流场和风场又会反过来影响积云对流加热率的变化, 这是一个正反馈过程。在 5 月份南海增温 (降温) 强迫下, 5 月份南海地区的对流活动加强 (减弱), 使得对流层低层副热带高压提前 (延后) 撤出南海, 从而有利于南海夏季风爆发偏早 (晚)。在南海海温异常强迫下, 中国东南部和南海地区的降水率异常主要是由积云对流所产生的降水率异常引起。

关键词 南海 海温异常 南海夏季风 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0640-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Numerical Study of the Impacts of SSTA in the South China Sea on the South China Sea Summer Monsoon

HUANG An-Ning, ZHANG Yao-Cun, and HUANG Dan-Qing

Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The impacts of the sea surface temperature anomalies (SSTA) in the South China Sea (SCS) on the SCS summer monsoon have been studied by using a $p-\sigma$ nine-layer regional climate model ($p-\sigma$ RCM9). The numerical simulations show that the SCS SSTA in May play a key role in the onset date of the SCS summer monsoon; the SCS summer monsoon breaks out earlier (later) under the successive positive (negative) SCS SSTA forcing in May. After the SCS summer monsoon onset, when the SST in the SCS increases continuously, the SCS summer monsoon strengthens evidently during the SSTA period, but it weakens after the SSTA period; however the case is reversed when the SST in the SCS decreases continuously. The mechanism study shows that the SCS positive (negative) SSTA forcing results in the increases (decreases) of the energy exchanges at the air-sea interface, especially the latent heat flux exchanges. The energy distribution in air is changed by the anomalies of the cumulus convective heating rates, then the intensification of the convergence in the middle-lower troposphere and the divergence in the upper troposphere change accordingly, and the circulations and wind fields adjust as well. The changed circulations and wind fields influence the cumulus convective heating rate to turn around, they affect each other and there is a positive feedback among them. Under the positive (negative) SSTA forcing in May, the convection over the SCS increases (decreases) and the subtropical high in the lower troposphere retreats from the SCS earlier (later), which leads to earlier (later) onset of the SCS summer monsoon. The precipitation anomalies over SCS and Southeast China under

the SCS SSTA forcing are mainly caused by the cumulus convective precipitation anomalies.

Key words the South China Sea, SST anomaly, the South China Sea summer monsoon, numerical simulation

1 引言

季风是全球大气环流的一个重要组成部分,对天气、气候有重要影响^[1~5]。亚洲季风是由相互联系又有其独立性的南亚季风系统和东亚季风系统组成。过去的研究发现,亚洲夏季风建立征兆最早出现在中南半岛和南海地区,随后分别逐渐向西北和东北方向扩展,最后建立起南亚夏季风和东亚夏季风^[6~8],南海地区强而活跃的季风活动不仅与大尺度热带和副热带流场有关而且还反映出西风带环流的调整。南海夏季风异常与亚洲季风及降水都有很大的关系,我国东部降水强度与南海夏季风强度呈反相关,南海低频夏季风向北传播对长江流域夏季暴雨的形成具有重要的影响^[9]。南海夏季风的爆发日期与中国夏季降水分布有密切关系,爆发偏晚有利于长江流域及其以南地区降水偏多^[10]。南海夏季风的年际异常对大气环流和我国的降水具有明显的影响,在强南海夏季风年,中国东部汛期降水量呈江淮少雨、华南及华北到东北一带多雨的形势;弱南海夏季风对降水的影响正好与强季风年相反^[11]。鉴于南海夏季风的爆发是东亚季节转变和雨季来临的一个重要标志,且与我国汛期旱涝的关系密切,对我国天气、气候的季节和年际变化具有重要的影响,因此,有关南海夏季风爆发及其机制研究一直是我国气象工作者十分关心的问题。

许多学者做了大量工作研究南海夏季风的爆发机制,并取得了不少成果。这些研究表明南海夏季风建立早晚跟南海海温异常有密切的关系,例如,谢安等^[12]发现暖池北移使得北半球热带增暖对南海夏季风爆发起重要作用,南海局地的 SST 升高以及暖中心在南海出现有利于南海深对流发生及 ITCZ 在南海建立。海温异常与南海夏季风爆发有密切关系,季风爆发偏晚年与偏早年冬春季的 SST 正、负距平符号完全相反。南海西南季风与太平洋-印度洋海面温度之间存在显著的相互关系,南海-阿拉伯海海温起着相当重要的作用^[13]。赵永平等^[14, 15]的分析表明,对南海季风爆发有直接影响的是位于进入南海的越赤道气流通道上的以苏门答

腊为中心的热带海洋热力状况的变异,该区海温异常对澳洲初冬越赤道气流有加速和减缓的作用。当该海域海温异常高时,南海季风较弱、爆发晚;当该海域海温异常低时,南海季风较强、爆发早。南亚与其南侧热带海洋之间的经向热力差异是导致南海季风强弱的直接原因。而陈隆勋等^[16]的研究却得出了相反的结论。戴念军等^[17]指出南海夏季风与位于 105°E 越赤道气流通道上的热带海洋热力异常有重要关系。最近,梁肇宁等^[18]的研究发现印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系密切。江霞等^[19]分析高分辨率的卫星遥感资料发现菲律宾以西海域的高温暖水可能是南海季风爆发的触发机制。陈隆勋等^[20]通过数值模拟研究发现,南海 SST 异常对南海季风季节变化和中国降水有很大影响,特别是南海冷海温期的影响远大于暖海温期。赵永平等^[21]等利用大气环流谱模式模拟研究了前期冬春季南海-热带东印度洋海温异常对南海夏季风的影响进行了分析,发现在南海-热带东印度洋海温异常偏暖时南海夏季风偏弱、爆发偏晚,而在异常偏冷时南海夏季风偏强、爆发偏早。

南海位于初夏南半球越赤道气流通道上,其热力状况的异常对南海季风的爆发有重要影响,但由于分析方法及分析角度的不同,人们对南海海温异常如何影响南海夏季风的认识还存在分歧。南海海温异常如何影响南海夏季风?其影响机理是什么?还有待于深入研究。本文拟通过数值模拟来研究南海海温异常对南海夏季风及季风区气候变化的影响,并从加热场和环流场角度对影响机理加以合理的解释,为进一步揭示南海夏季风的爆发机制提供线索和依据。

2 模式介绍和数值试验方案设计

2.1 模式介绍

本文所用的区域气候模式是在钱永甫等^[22]设计的 $p-\sigma$ 混合坐标系原始方程模式基础上经过众多研究者^[23~28]不断改进和完善而发展起来的九层区域气候模式($p-\sigma$ RCM9)。模式的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,大气中共有 9 层,其中 400 hPa 以上为 p 坐标,每层厚度均取为 100 hPa,近地面的边界层

厚度取为 50 hPa, 而中间为 σ 坐标, 也取为四层, 每一层厚度为 $\Delta\sigma=0.25$ 。模式区域为 ($0^{\circ}\sim60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim140^{\circ}\text{E}$), 包括了整个青藏高原、东亚大陆以及孟加拉湾、南海和西太平洋部分海域。模式包括了干对流调整过程、大气扩散过程、大尺度和积云对流尺度凝结过程, 以及辐射加热过程, 其中辐射加热包含太阳短波辐射加热和大气长波辐射加热, 太阳辐射具有日变化, 并考虑了大气中几种主要吸收气体的影响以及云量的变化和气候效应。边界层采用依据相似理论设计的参数化方案^[26], 积云对流参数化采用郭晓岚方案^[29]。 $p-\sigma$ RCM9 模式较好地考虑了地-气和海-气间的相互作用, 其中土壤模式将土壤分为两层, 第一层较薄, 反映土壤温度和水分的日变化, 第二层较厚, 反映土壤温度和水分的变化, 由热量和水分守恒原理建立土壤表层和深层平均温度和湿度的预报方程^[30]。陆面分为 5 种类型, 分别是粘土草地、热带雨林、沙漠、泥泞土和雪面。海洋混合层模式与土壤模式相类似^[31], 也分为两层, 厚度分别为 50 m 和 250 m, 假定在第一层海温随深度没有变化, 在第二层海温随深度线性下降, 并假设层底温度梯度为零, 没有考虑洋流的影响。时间积分方案采用 1 小时欧拉后差和 5 小时中央差交替进行, 时间步长为 3 分钟。

2.2 数值试验方案设计

我们设计了一个控制试验 (简称 CON), 在这个试验中, 利用 1990~2004 逐日的 NCEP/NCAR 再分析资料 15 年的气候平均场经过插值后处理得到模式所需的初始场和嵌套场, 包括温度场、风场、高度场和比湿场。利用 1990~2004 共 15 年逐周的 OISST (Optimally Interpolated Sea Surface Temperature) 海表温度资料^[32]处理成气候平均资料, 最后线性插值成逐日资料提供模式的海洋边界强迫, 采用 15 年气候平均的 1 月 1~10 日的 NCEP/NCAR 逐日再分析资料作为模式大气的 10 个初始场, 模式从 1 月 1 日 08 时 (北京时, 下同) 积分至 12 月 31 日, 共进行 10 个成员的集合模拟, 并将这 10 个成员的模拟结果进行集合平均作为 CON 试验最后的模拟结果。

为了研究南海海温影响南海夏季风及季风区气候变化的影响, 我们还设计了四组理想的南海海温异常强迫敏感性试验, 各敏感试验的初始场和嵌套场与 CON 试验的相同。图 1 给出了模式区域的地

形和海温异常区分布, 理想试验的海温异常加在阴影区域标记的南海海域的气候平均海温上。

各敏感性试验方案列于表 1, “+”表示在气候平均海温基础上增温 2°C , “-”表示在气候平均海温基础上减温 2°C , P (Persistent) 表示 4~7 月持续增、减温。每组试验均从 1 月 1 日 20 时开始, 至 12 月 31 日结束, 共积分一年。同样, 将 10 个成员的模拟结果进行集合平均作为各敏感性试验最后的模拟结果。

另外, 为了考察南海海温异常和南海以外海区海温异常对南海夏季风影响的各自贡献大小, 我们额外选择南海夏季风爆发偏晚年 (1991 年, 6 月 2 候爆发) 和偏早年 (1994 年, 5 月 1 候爆发)^[33]两个年份进行数值试验。分别利用 1991 年和 1994 年的 NCEP/NCAR 资料提供模式所需的初始场和嵌套场。海温强迫列于表 2 中。模式分别从 1991 年和 1994 年的 1 月 1 日 08 时积分至 12 月 31 日。

表 1 数值试验方案
Table 1 Numerical expt schemes

	试验设计	简称
第一组	4 月 SST 增减 2°C , 5~7 月用气候平均 SST	SCS4+, SCS4-
第二组	4、5 月各月平均 SST 增减 2°C , 6、7 月用气候平均 SST	SCS45+, SCS45-
第三组	4~6 月各月平均 SST 增减 2°C , 7 月用气候平均 SST	SCS456+, SCS456-
第四组	4~7 月各月平均 SST 持续增减 2°C	SCSP+, SCSP-

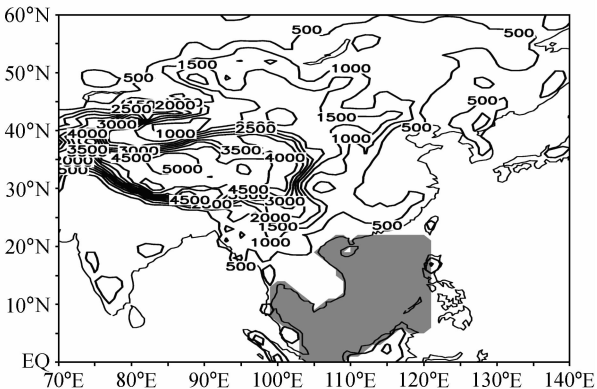


图 1 模式区域地形分布和海温异常区域。阴影: 海温异常区; 等值线: 地形高度, 单位: m
Fig. 1 The distributions of topography altitude (contour, units: m) and SST anomaly area (shaded) in the model domain

表 2 1991 和 1994 年数值试验方案
Table 2 Numerical expt schemes for 1991 and 1994

试验设计	简 称
模式区域海区采用气候平均海温	91CTRL、94CTRL
南海用气候平均海温，模式区域其他海区 分别采用 1991 年和 1994 的年实际海温	91SEN、94SEN
模式区域所有海区分别采用 1991 年和 1994 年实际海温	91SEN1、94SEN1

3 模式性能检验

$p-\sigma$ RCM9 气候模式对东亚地区的降水、地面气压、500 hPa 和 100 hPa 位势高度和温度场的气候态、年际变率及其季节变化特征的模拟能力已有较多的分析和检验^[34~36]，表明在较长时间的连续积分中，该模式对上述气候要素场具有较好的模拟能力。但未对模式模拟南海夏季风的能力进行系统的检验，鉴于本文的研究目的，有必要检验模式对南海夏季风及其气候特征的模拟能力，下面给出控制试验的模拟结果。

图 2 给出了 NCEP/NCAR 再分析资料和 CON 试验模拟的 850 hPa 上 10°N~20°N 带内风矢的时间-经度演变特征。从图 2a 中看出，早在 4 月初，在中南半岛一带就出现了微弱的西南风，而南海地区为东南风所控制，这种形势一直维持到 5 月初，到 5 月上旬（25 候）左右，西南风在孟加拉湾东部、中南半岛和南海西部加强，在 24~27 候间，西南风不断向西扩展，在 27 候西南风西扩至 85°E 左右，而在这段时间，西南风东扩不明显，基本上维

持在 110°E 以西。在 27 候过后，西南风迅猛向东扩展，在 27~33 候间，西南风不断向东扩展，在 33 候东扩至 120°E 左右。在第 33 候之后，在 85°E~125°E 区域内均为强大的西南风所控制，这与钱永甫等^[38]得出的结论是一致的。从控制试验模拟的结果（图 2b）发现模式非常成功地模拟出了 850 hPa 上 10°N~20°N 带内风矢的时间-经度演变特征。

为了定量描述南海夏季风，我们采用李崇银等^[39]所定义的南海夏季风指数，其表达式如下：

$$\begin{cases} D_i = (\Delta u/\Delta x + \Delta v/\Delta y), \\ \Delta D = (\overline{D_{850}} - \overline{D_{200}})_i, \\ I_{scs} = \Delta D / \sqrt{\sum (\Delta D_j)^2 / n}, \end{cases} \quad (1)$$

其中， I_{scs} 是定义的南海季风指数， i 是某一计算格点， j 是时间序列，“—”表示空间平均，所取区域为（5°N~20°N，105°E~120°E）。从上面的表达式可以看出，所定义的南海夏季风指数用对流层上下层的散度差来描述南海夏季风，既能同时考虑纬向风和经向风，又代表了环流场的重要特性，具有较强的物理意义。

图 3 给出了 CON 试验模拟的和 NCEP/NCAR 再分析资料气候平均的南海夏季风指数。基于南海夏季风的低层辐合高层辐散的环流特征，当指数由正值变为负值时可以视为南海夏季风的爆发。从图 3 中 NCEP/NCAR 资料计算的指数（实线）发现，在 5 月中旬（27 候）以前，指数为正值，而在这之后为负值，可见南海夏季风一般在 5 月中旬左右爆发。从 CON 试验模拟的结果可以发现，模式非常

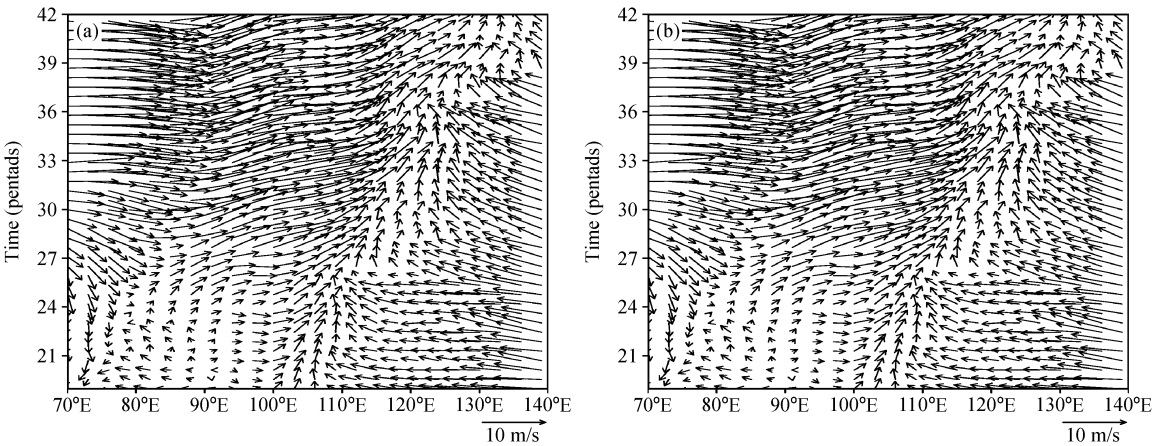


图 2 850 hPa 10°N~20°N 纬带内风矢的时间-经度演变（单位：m/s）：(a) NCEP/NCAR 再分析资料；(b) CON
Fig. 2 Longitude-time cross sections of climatic mean wind vectors at 850 hPa averaged over 10°N–20°N; (a) NCEP/NCAR re-analysis data; (b) CON

成功地模拟出了南海夏季风的指数在 5 月中旬左右开始爆发的这一重要特征,且模拟的南海夏季风强度和 NCEP/NCAR 资料十分接近。

通过上面的分析发现, $p-\sigma$ RCM9 模式对南海夏季风的爆发时间和强度均具有良好的模拟能力,它为我们研究南海海温异常对南海夏季风的影响及机理提供了一个有力的工具。

4 南海海温异常对南海夏季风的影响及可能机理

4.1 南海海温异常对南海夏季风及季风区降水率的影响

首先,图 4 给出了 1991 年和 1994 年模拟的南

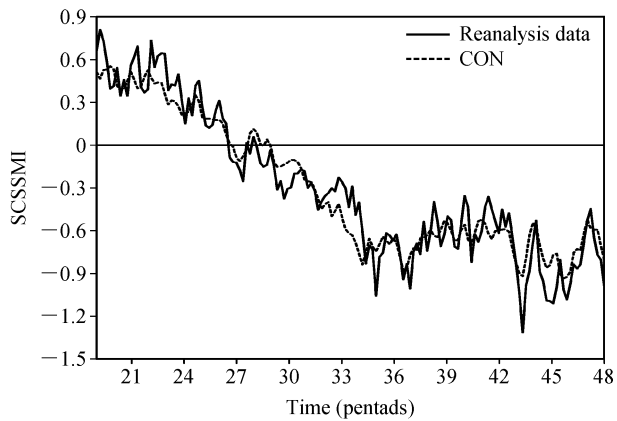


图 3 CON 模拟的和 NCEP/NCAR 再分析资料的气候平均的南海夏季风指数
Fig. 3 Temporal variation of the South China Sea summer monsoon index (SCSSMI) for CON and NCEP/NCAR reanalysis data

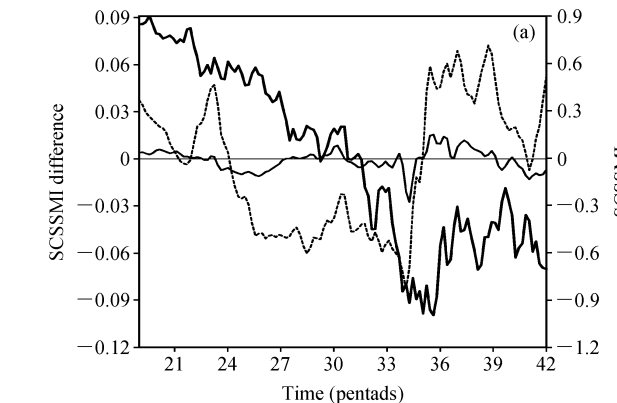
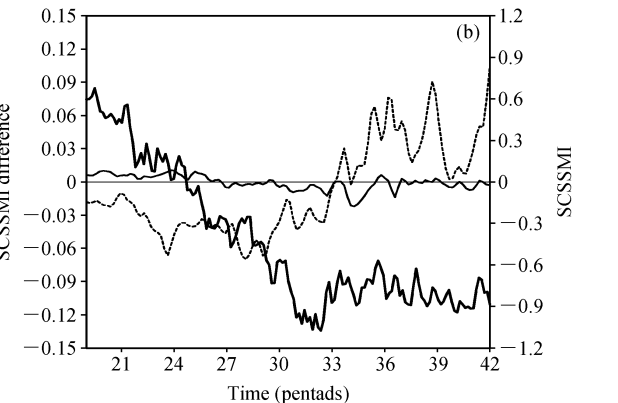


图 4 NCEP/NCAR 再分析资料的南海夏季风指数(粗实线)及其不同海温强迫下模式模拟的南海夏季风指数差异的演变特征:(a) 1991 年;(b) 1994 年。虚线: SEN 试验与 CTRL 试验之差,细实线: SEN1 与 CTRL 试验之差
Fig. 4 The temporal evolution of SCSSMI for NCEP/NCAR reanalysis data (thick solid line) and its differences in 1991 (a) and 1994 (b) simulated under different SST forcing (dashed line; the differences between SEN and CTRL; thin solid line; the differences between SEN1 and CTRL)

海夏季风指数差异的演变特征。从图 4a、b 中可以看出,在南海实际海温强迫下引起的南海夏季风指数变化远比南海以外海区海温强迫下的大。结合我们以前的工作^[36, 37]可以得出如下结论:南海海温对南海夏季风的影响远比模式区域内南海以外海区海温的大,南海局地海温异常对南海夏季风有非常重要的影响。下面,我们将深入分析理想的南海海温异常对南海夏季风的影响。

为了了解南海海温正、负异常强迫对南海夏季风的影响,图 5 给出各个敏感性试验与 CON 试验模拟的南海夏季风指数演变特征。从图 5a 发现,在 4 月份南海海温异常强迫下模拟的南海季风指数在第 25 候以前与 CON 试验模拟的结果存在比较明显的差异,而在第 25 候以后差异非常小,且发现三个试验模拟的南海季风指数均是在 27 候左右从正值变成负值,说明 4 月份南海海温对南海夏季风的爆发时间基本上影响甚微,只是对 4 月份的南海季风强度有较大影响。从图 5b 发现,在 4、5 月份南海海温持续正异常强迫下模拟的南海夏季风爆发日期将偏早,而在南海海温负异常强迫下模拟的结果与之相反。在南海海温正异常强迫下,南海夏季风在 6 月之后减弱,而在南海海温负异常强迫下,则与之相反。图 5c 和图 5d 中的南海夏季风指数均表现出与图 5b 中类似的变化特征。

综合分析图 5a~d,发现单纯 4 月份的南海海温异常对南海夏季风的爆发日期几乎没有影响,它只对 4 月份的南海季风强度有较大影响。而 5 月份



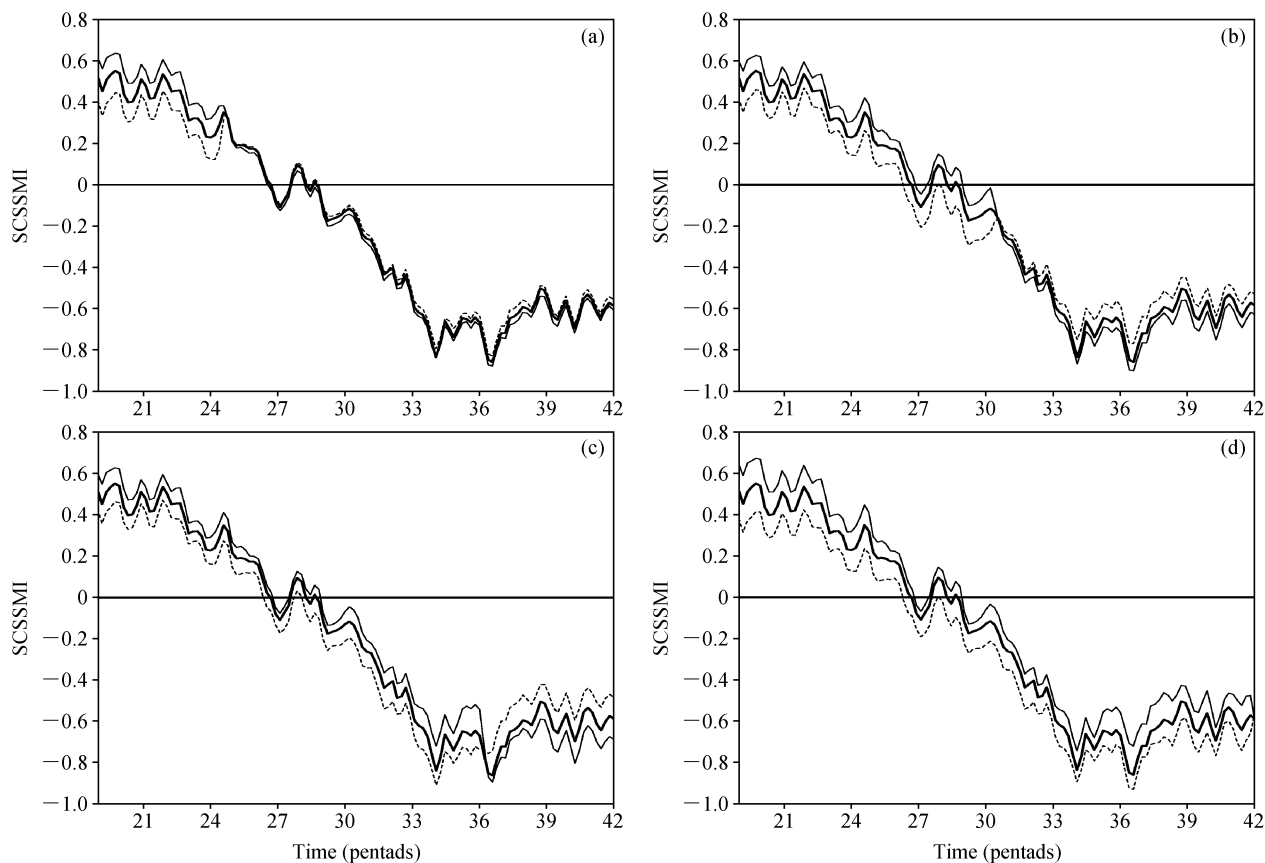


图 5 CON 试验和敏感性试验模拟的南海夏季风指数：(a) 4 月南海海温异常；(b) 4、5 月南海海温持续异常；(c) 4~6 月份南海海温持续异常；(d) 4~7 月南海海温持续异常。粗实线：CON 模拟；短虚线：南海海温正异常；细实线：南海海温负异常

Fig. 5 Temporal variation of the SCSSMI in CON and sensitive experiments; (a) SST anomaly (SSTA) in the South China Sea (SCS) in Apr; (b) persistent SCS SSTA in Apr and May; (c) persistent SCS SSTA from Apr to Jun; (d) persistent SCS SSTA from Apr to Jul. Thick solid line: CON; dashed line: positive SCS SSTA; thin solid line: negative SCS SSTA

的南海海温异常对南海夏季风的爆发日期起关键作用，当 5 月份南海海温持续增温（减温）时，南海夏季风爆发日期偏早（偏晚）。南海夏季风爆发后，在南海海温异常增温（减温）强迫下，同期南海夏季风的强度增强（减弱），而后期南海夏季风的强度减弱（增强）。

图 6 给出了各敏感性试验与 CON 试验模拟的沿 110°E~120°E 平均的降水率差值的纬度-时间演变图，图中阴影区为用 t 检验得到的信度超过 95% 的显著性区域。分析图 6a、e 发现，在 4 月份南海海温正异常强迫下，4 月份南海地区降水率增加，后期华南-江南地区（20°N~30°N）的降水率减小。而在 4 月份南海海温负异常强迫下，4 月份南海地区降水率减少。从图 6b、f 中可以看出，在 4、5 月份南海海温正异常强迫下，南海地区的降水率将增加，而在南海海温负异常强迫下，南海地区的降水

率将减少。同时发现，在 6 月初至 7 月末期间，南海海温主要对华南-江南地区（20°N~30°N）的降水影响明显，而对南海地区降水率的影响基本上消失。图 6c、g 与图 6d、h 中的降水率差异分布特征和前面分析的结果类似。

综合分析图 6 发现，南海海温正（负）异常主要引起南海地区降水率的正（负）异常，而对后期南海地区降水率的影响微弱，降水率差异主要以局地响应为主。同时，发现前期的南海海温异常主要影响后期华南和江南地区的降水率。

为了更好地了解南海海温异常对各分区降水率的影响，图 7 给出了华南地区（20°N~27°N，105°E~120°E）和江淮地区（27°N~35°N，105°E~120°E）降水率差异的时间演变特征。从图 7a 可以看出，在南海海温正异常强迫下，华南地区 4 月份的降水率基本上是增加的，而 5 月中旬以后的降水率则是

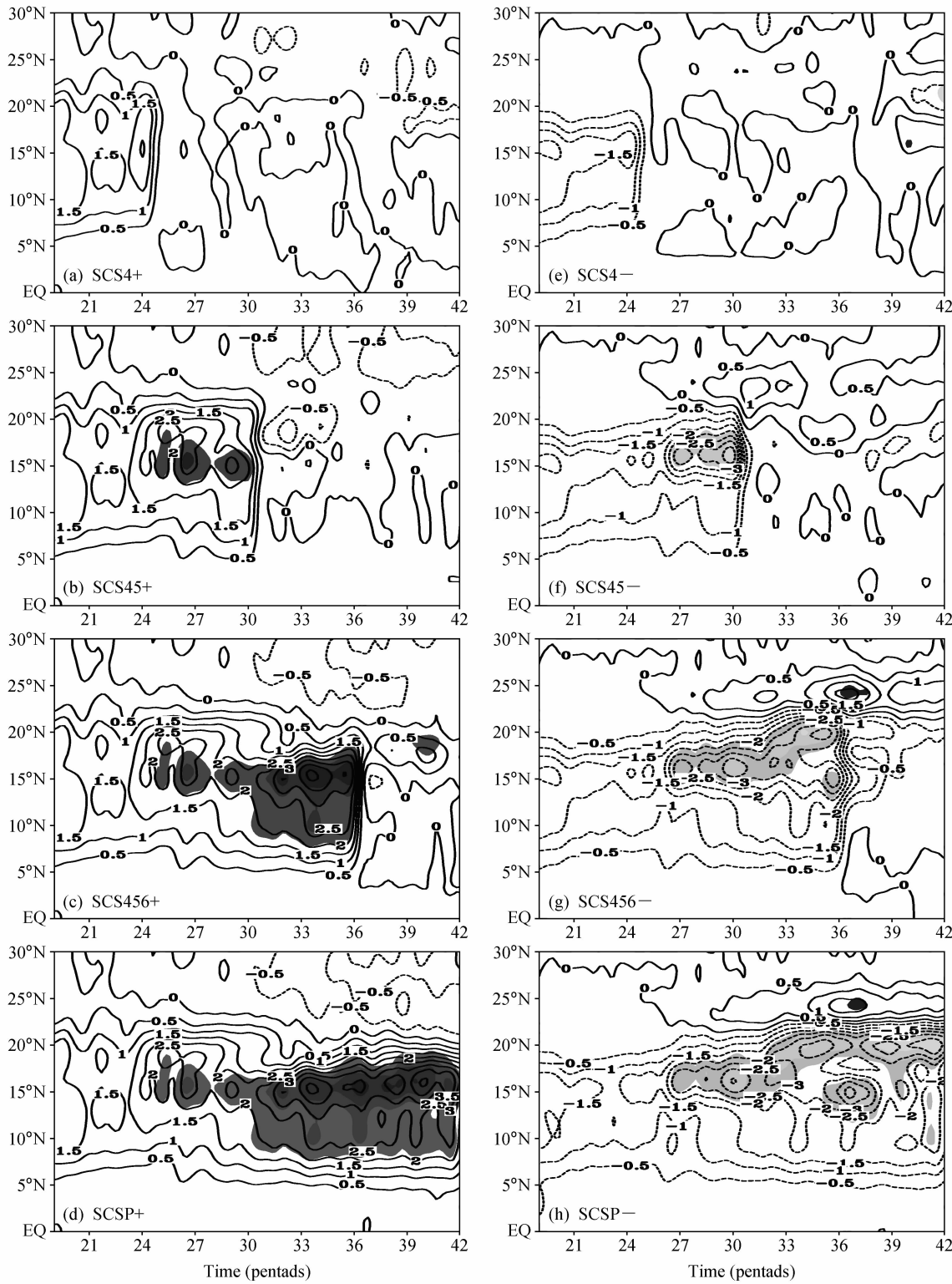


图 6 南海海温正异常 (a~d) 和负异常 (e~h) 试验与 CON 模拟的沿 110°E~120°E 平均的降水率差值的纬度-时间演变特征 (单位: mm/d)。阴影为信度超过 95% 的显著性区域

Fig. 6 Latitude-time cross sections of the precipitation rate differences (mm/d) averaged over 110°E–120°E between the sensitive experiments with positive or negative SSTA forcing in the SCS and CON. Regions over the 95% significance level are shaded

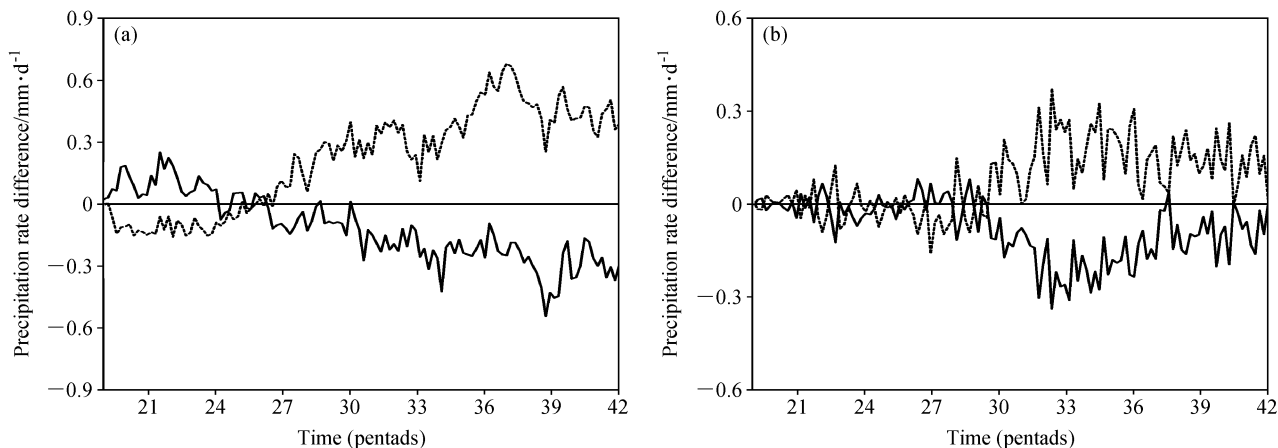


图7 华南地区(a)和江淮地区(b)降水率差异的时间演变(单位: mm/d)。实线: SCSP+ 与 CON 之差; 虚线: SCSP- 与 CON 之差

Fig. 7 Temporal evolutions of precipitation rate differences (mm/d) over (a) South China and (b) the Changjiang-Huaihe valley. Solid line: the differences between SCSP+ and CON; dashed line: the differences between SCSP- and CON

减少的;在南海海温负异常强迫下,则反之。分析图7b发现,在南海夏季风爆发之前,降水率差值很小,说明在这段时间内南海海温异常对江淮地区降水率的影响较小,而在南海夏季风爆发以后,南海海温异常对江淮地区降水率的影响明显增强。在南海海温正异常强迫下,江淮地区的降水率将减少,而在南海海温负异常强迫下,则反之。结合图5d中南海夏季风指数的变化情况,可以得到以下结论:在4~7月南海异常增温(减温)强迫下,南海夏季风将增强(减弱),江淮地区的降水率减少(增加),这与李崇银等^[11]的结论是一致的。

4.2 可能的机制

在不同形式的南海海温异常强迫下,南海夏季风及季风区的天气和气候产生了相应的变化,是什么机制在起作用?这是我们需要回答的一个重要问题。下面,我们将从热力场和环流场角度对南海海温异常的影响机理进行合理的解释。

分析南海海温异常强迫下模拟的沿 $5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均的地面潜热通量差值的时间-经度演变(图8a、b)发现,在南海海温正异常下(图8a),南海及中南半岛东部地区潜热通量将增加,且潜热通量异常大值区始终位于南海地区($110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$),且在27候之后潜热通量异常迅速增加,最大中心强度可达 50 W/m^2 以上;而在南海海温负异常强迫下(图8b),地面潜热通量异常出现了与之相反分布特征。地面感热通量的异常分布特征(图8c、d)与地面潜热通量的异常特征类似。需要指出的是,

南海海温异常引起的南海及其临近地区的地面潜热通量异常远远大于地面感热通量异常,这说明南海海温异常主要改变南海地区海-气间的潜热通量交换。

我们知道,地面潜热通量主要是通过蒸发以水汽的形式进入大气,它不能直接加热大气,需要在大气中通过凝结释放的潜热才能加热大气。从图9中发现,积云对流加热率异常和地表潜热通量异常具有非常好的一致性,即南海增温时,同期南海及中南半岛东部地区的积云对流加热率将增加,反之,则积云对流加热率将减少。

分析850 hPa位势高度异常的时间-经度演变分布特征(图10a、b)发现,在南海海温正异常强迫下(图10a),南海地区850 hPa位势高度减少,而在南海海温负异常强迫下(图10b),南海地区850 hPa位势高度增加。同时结合图6发现,850 hPa位势高度异常和积云对流加热率异常有相反的变化特征,且两者的异常中心有非常好的对应关系,即:积云对流加热率正异常中心与850 hPa位势高度负异常中心对应,而积云对流加热率负异常中心与850 hPa位势高度正异常中心对应。分析200 hPa位势高度异常的时间-经度演变特征(图10c、d)发现,在南海海温正异常强迫下(图10c),南海地区200 hPa的位势高度将增加;而在南海海温负异常强迫下200 hPa位势高度则减少(图7d),这与850 hPa面上的异常情况相反。

通过分析对流层低层和高层位势高度异常发

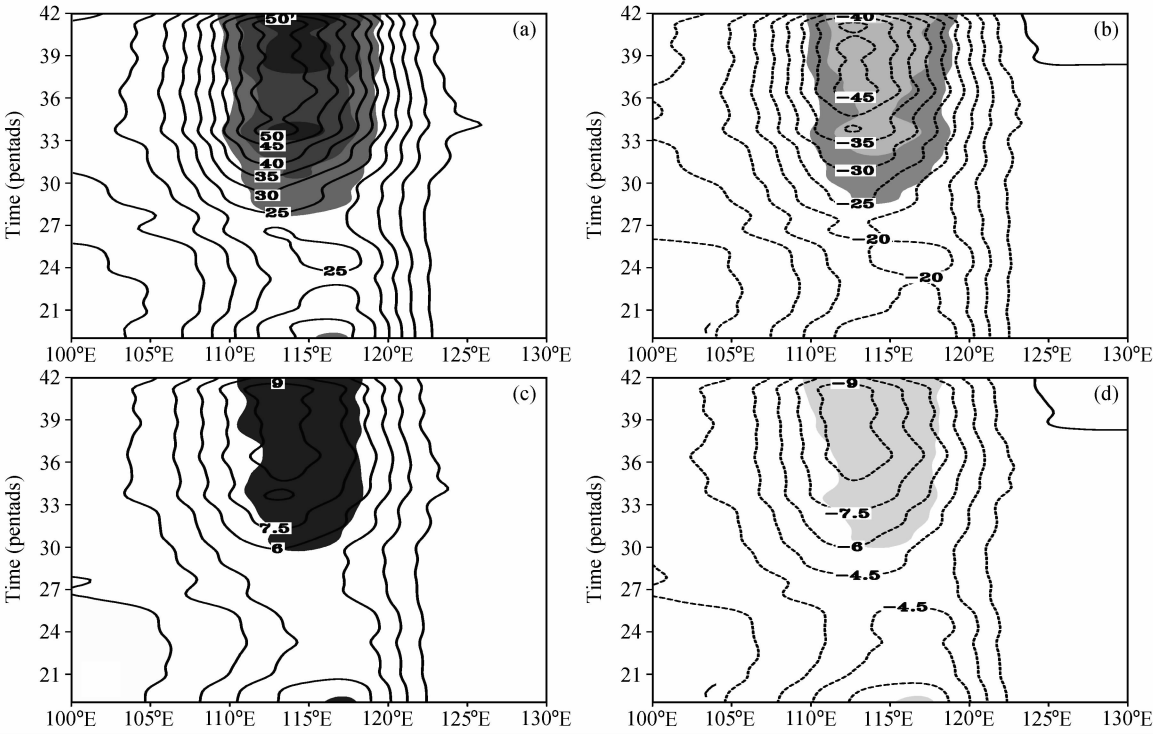


图 8 沿 5°N~20°N 平均的地面潜热 (a、b) 和感热 (c、d) 通量差值的时间-经度演变特征 (单位: W/m^2): (a、c) SCSP+ 减 CON; (b、d) SCSP- 减 CON。阴影为信度超过 95% 的显著性区域

Fig. 8 Longitude-time cross sections of the surface (a, b) latent heat and (c, d) sensible heat fluxes differences (W/m^2) averaged over 5°N–20°N: (a, c) The differences between SCSP+ and CON; (b, d) the differences between SCSP- and CON. Regions over the 95% significance level are shaded

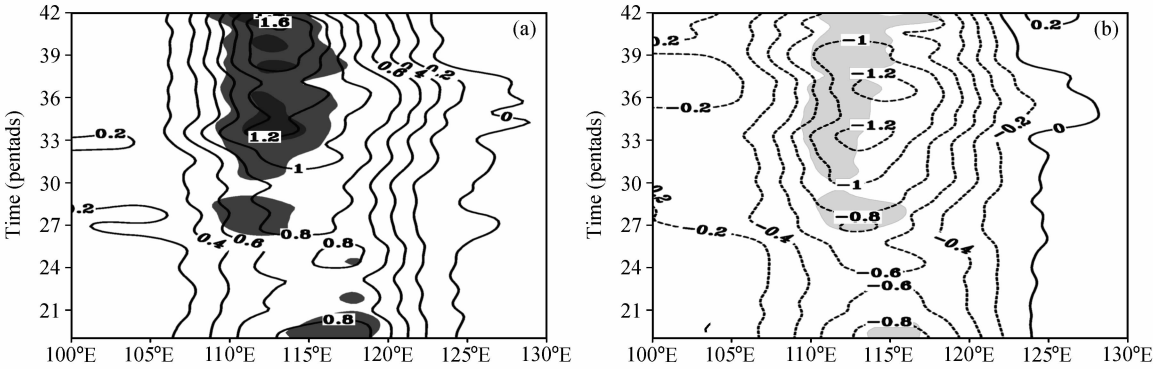


图 9 沿 5°N~20°N 平均的 850~300 hPa 积云对流加热率差值的时间-经度演变特征 (单位: K/d): (a) SCSP+ 减 CON (b) SCSP- 减 CON

Fig. 9 Longitude-time cross sections of the mean cumulus convective heating rate differences (K/d) in 850 hPa–300 hPa averaged over 5°N–20°N: (a) The difference between SCSP+ and CON; (b) the difference between SCSP- and CON. Regions over the 95% significance level are shaded

现,南海海温异常引起对流层低层和高层位势高度相反的变化:南海海温正异常强迫下,对流层中低层的位势高度减少,而对流层高层的位势高度增加,这有利于加强对流层中低层辐合、高层辐散的环流形式,进一步加剧对流的发展;反之,在南海

海温负异常强迫下,则会抑制对流的发展。对流的发展将会影响积云对流加热率的变化,改变的积云对流加热率再反作用于环流场,这是一个正反馈过程。研究发现,对流层低层副热带高压脊从中南半岛和南海地区东撤到菲律宾以东的洋面上,对流层

高层南亚高压从菲律宾以东移到中南半岛北部是南海季风爆发期间南海和中南半岛地区环流系统最显著的特征^[40~42]。从积云对流加热率和对流层高、低层位势高度差异场可以看出，在 5 月份南海增温（减温）强迫下，5 月份南海地区的对流活动加强（减弱），对流层中、低层副热带高压提前（延后）

撤出南海，从而有利于南海夏季风爆发偏早（晚）。
分析南海海温异常强迫下沿 110°E~120°E 平均的 850~300 hPa 垂直平均的积云对流加热率异常的时间-纬度演变特征（图 11），并与图 6d、h 中的降水率异常作比较发现，在南海海温异常强迫下，两者有非常一致的变化特征，说明在南海海温

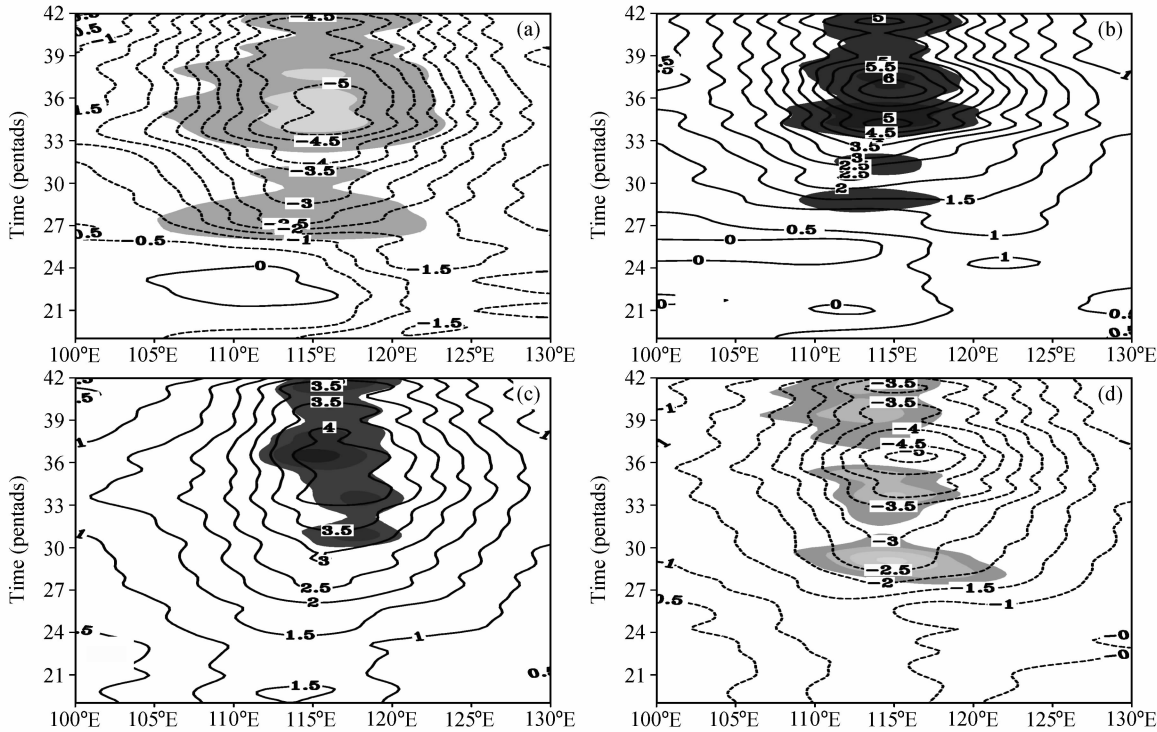


图 10 同图 8，但为 850 hPa (a、b) 和 200 hPa (c、d) 的位势高度（单位：gpm）
Fig. 10 As in Fig. 8, except for the geopotential height (gpm) at (a, b) 850 hPa and (c, d) 200 hPa

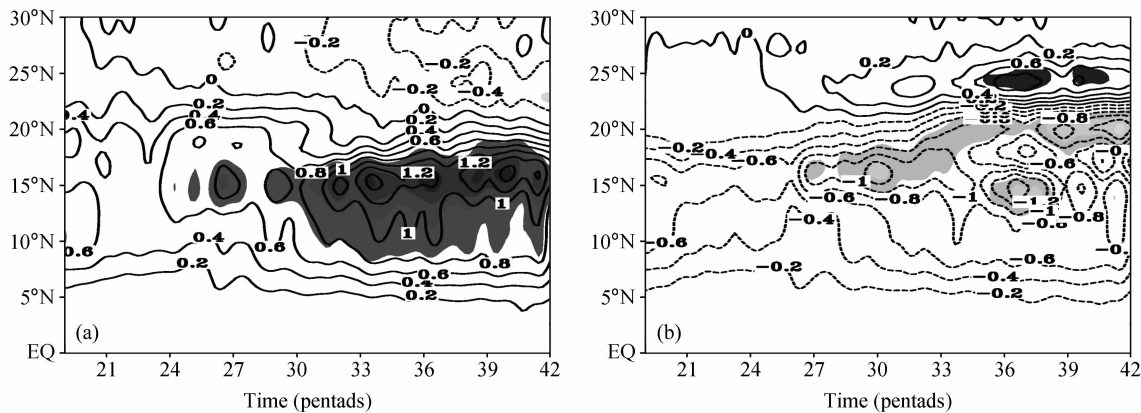


图 11 沿 110°E~120°E 平均的 850~300 hPa 垂直平均的积云对流加热率的纬度-时间演变特征（单位：K/d）：(a) SCSP+减 CON；(b) SCSP-减 CON。阴影为信度超过 95% 的显著性区域
Fig. 11 Latitude - time cross sections of the mean cumulus convective heating rate differences (K/d) in 850 - 300 hPa averaged over 110°E - 120°E: (a) The differences between SCSP+ and CON; (b) the differences between SCSP- and CON. Regions over the 95% significance level are shaded

异常强迫下, 中国东南和南海地区的降水率异常主要是由积云对流所产生的降水率异常引起。

5 结论

本文利用 $p-\sigma$ 九层区域气候模式模拟并研究了南海海温异常对南海夏季风的影响, 并从加热场和环流场角度对影响机理进行了讨论。所得结论如下:

(1) 5 月份的南海海温异常对南海夏季风的爆发日期起关键作用: 5 月份南海海温持续增温 (降温), 南海夏季风爆发日期偏早 (偏晚)。南海异常增温 (降温), 同期的南海夏季风增强 (减弱), 而后期的南海夏季风将减弱 (增强)。

(2) 南海海温异常对同期南海地区降水率的影响显著, 而对后期华南和江南地区的降水率产生影响。在 5~7 月南海异常增温 (减温) 强迫下, 南海夏季风将增强 (减弱), 华南地区的降水率增加 (减少), 江淮地区的降水率减少 (增加)。

(3) 南海海温异常改变了海面与行星边界层之间的能量交换, 主要是潜热通量交换, 并在大气中通过积云对流加热率异常改变对流层的热量分布, 进而改变对流层中低层辐合和高层辐散的强弱, 然后影响环流场和风场, 环流场的改变又反过来影响对流加热率的变化, 这是一个正反馈过程。

(4) 在 5 月份南海异常增温 (降温) 强迫下, 5 月份南海地区的对流活动加强 (减弱), 进而使得对流层低层副热带高压提前 (延后) 撤出南海, 从而有利于南海夏季风爆发偏早 (晚)。在南海海温异常强迫下, 中国东南部和南海地区的降水率异常主要是由于积云对流所产生的降水率异常引起。

本文通过数值试验重点研究了南海海温异常对南海夏季风的影响, 并从加热场和环流场角度对影响机理进行了讨论, 由于所有数值试验的南海海温异常均为理想的海温异常, 试验结果有夸大的倾向, 但是基本能反映出在南海海温异常强迫下南海夏季风的变化趋势, 具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

[1] 郭其蕴. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. 应用气象学报, 1994, **5** (2): 218~225
Guo Q Y. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5**

(2): 218~225
[2] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 2003, **61** (5): 559~568
Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 559~568
[3] 左瑞亭, 曾庆存, 张铭. 季风及季风与西风带相互关系的数值模拟研究. 大气科学, 2004, **28** (1): 7~22
Zuo Ruiting, Zeng Qingcun, Zhang Ming. A numerical simulation of monsoon and the correlation between monsoon and westerlies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (1): 7~22
[4] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系. 地理科学, 2005, **25** (4): 441~448
Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. Relationship of Asian monsoon with dry and wet climate boundary and agro-pasturing climate boundary. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2005, **25** (4): 441~448
[5] 赵平, 张人禾. 东亚-北太平洋偶极型气压场及其与东亚季风年际变化的关系. 大气科学, 2006, **30** (2): 307~316
Zhao Ping, Zhang Renhe. Relationship of interannual variation between an Eastern Asia-Pacific dipole pressure pattern and East Asian monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 307~316
[6] 陶诗言, 陈龙迅. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 1987. 60~92
[7] 黄真, 陶诗言. 1983 年亚洲夏季风爆发过程的诊断研究. 气象学报, 1992, **50**: 210~221
Huang Zhen, Tao Shiyun. Diagnostic study on the onset process of Asian monsoon during the summer of 1983. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1992, **50**: 210~221
[8] 何金海, 朱乾根, Murakami M. TBB 资料揭示的亚澳季风区季节转换及亚洲夏季风建立的特征. 热带气象学报, 1996, **12** (1): 34~42
He Jinhai, Zhu Qian'gen, Murakami M. TBB data-revealed features of Asian-Australian monsoon seasonal transition and Asian summer monsoon establishment. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1996, **12** (1): 34~42
[9] 朱乾根, 徐国强. 1998 年南海夏季风低频振荡特征及其对长江流域降水的影响. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 108~111
Zhu Qian'gen, Xu Guoqiang. Features of 1998 SCS summer monsoon LFO with effect on rainfall in Yangtze Basin. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 108~111
[10] 何敏, 宋文玲. 南海夏季风对中国夏季降水的影响及预测. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出

- 版社, 1999. 112~116
- He Min, Song Wenling. Perspective and prediction of South China Sea monsoon and its effect on rainfall in summer in China. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 112~116
- [11] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, **23** (3): 257~266
- Li Chongyin, Zhang Liping. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 257~266
- [12] 谢安, 毛江玉, 叶谦. 海温纬向梯度与南海夏季风爆发. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 48~51
- Xie An, Mao Jiangyu, Ye Qian. Relationship between SST zonal gradient and the onset of summer monsoon over South China Sea. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 48~51
- [13] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风强度变化特征及其与海温的耦合关系分析. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 133~139
- Liang Jianyin, Wu Shangsen. The analyses of the intensity variation characteristics of South China Sea summer monsoon and its relation with SST in 1998. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 112~116
- [14] 赵永平, 陈永利, 白学志, 等. 南海-热带东印度洋海温年际变化与南海季风爆发关系的初步分析. 热带气象学报, 2000, **16** (2): 115~123
- Zhao Yongping, Chen Yongli, Bai Xuezhi, et al. The relations between the SST anomalies in South China Sea-Tropical Eastern Indian Ocean and the South China Sea monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, **16** (2): 115~123
- [15] 赵永平, 陈永利. 南海暖池的季节和年际变化及其与南海季风爆发的关系. 热带气象学报, 2000, **16** (3): 202~211
- Zhao Yongping, Chen Yongli. The seasonal and inter-annual variability of the South China Sea warm pool and its relation to the South China Sea monsoon onset. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, **16** (3): 202~211
- [16] 陈隆勋, 刘洪庆, 王文, 等. 南海及其邻近地区夏季风爆发的特征及其机制的初步研究. 气象学报, 1999, **57**(1): 17~29
- Chen Longxun, Liu Hongqing, Wang Wen, et al. Preliminary study on the characteristics and mechanism of summer monsoon onset over South China Sea and region adjacent to it. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (1): 17~29
- [17] 戴念军, 谢安, 张勇. 南海夏季风活动的年际和年代际特征. 气候与环境研究, 2000, **5**: 363~374
- Dai Nianjun, Xie An, Zhang Yong. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5**: 363~374
- [18] 梁肇宁, 温之平, 吴丽姬. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系 I. 耦合分析. 大气科学, 2006, **30** (4): 619~634
- Liang Zhaoning, Wen Zhiping, Wu Liji. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of South China Sea summer monsoon. I. Coupling analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 257~266
- [19] 姜霞, 刘秦玉, 王启. 菲律宾以西海域的高温暖水与南海夏季风爆发. 中国海洋大学学报, 2006, **36** (3): 349~354
- Jiang Xia, Liu Qinyu, Wang Qi. Effects of warm water west of the Philippines on the South China Sea summer monsoon onset. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 2006, **36** (3): 349~354
- [20] 陈隆勋, 王子辉. 南海和西太平洋暖池表面海温对东亚季风影响的数值模拟. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996. 184~198
- Chen Longxun, Wang Yuhui. Numerical experiment of impact of sea surface temperature in South China Sea and West Pacific warm pool on East Asian summer monsoon. *The Recent Advances in Asian Monsoon Research* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 184~198
- [21] 赵永平, 吴爱明. 南海-热带东印度洋海温异常对南海夏季风影响的数值试验. 热带气象学报, 2003, **19** (1): 27~35
- Zhao Yongping, Wu Aiming. Numerical experiments for the influences of SST anomalies over the South China Sea-Eastern Tropical Indian Ocean on the South China Sea monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (1): 27~35
- [22] 钱永甫, 颜宏, 骆启仁, 等. 一个有大地形影响的初始方程数值预报模式. 大气科学, 1978, **2** (2): 91~102
- Qian Yongfu, Yan Hong, Luo Qiren, et al. A P. E. numerical weather prediction model with large scale orography. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1978, **2** (2): 91~102
- [23] Kuo H L, Qian Y F. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2337~2356
- [24] Kuo H L, Qian Yung-Fu. Numerical simulation of the development of mean monsoon circulation in July. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1879~1897
- [25] 钱永甫. 一个考虑地形的五层原始方程模式. 高原气象, 1985, **4** (2): 1~28
- Qian Yongfu. A five-layer primitive equation model with topography. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1985, **4** (2):

- 1~28
- [26] Zhang Qiong, Qian Yongfu. Effects of boundary layer parameterization on the monthly mean simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **13**: 73~85
- [27] 刘华强, 钱永甫. $P-\sigma$ 坐标系区域气候模式对冬夏季月平均场的模拟试验. 南京大学学报(自然科学版), 1999, **35** (3): 337~345
- Liu Huaqiang, Qian Yongfu. Numerical simulation of monthly mean field in summer and winter by a limited area model with $P-\sigma$ incorporated coordinate. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (in Chinese), 1999, **35** (3): 337~345
- [28] 王世玉, 钱永甫. $P-\sigma$ 坐标区域气候模式的垂直分辨率对模拟结果的影响. 高原气象, 2001, **20** (1): 28~35
- Wang Shiyu, Qian Yongfu. The effects of vertical resolution of $P-\sigma$ coordinate regional climate model on simulated results. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20** (1): 28~35
- [29] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105** (3), 270~286
- [30] 钱永甫. 地表热平衡温度的一种计算方法. 气象科学, 1988, **4**: 14~27
- Qian Yongfu. A scheme of calculation of heat balance temperature at ground surface. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1988, **4**: 14~27
- [31] Qian Yongfu. The effects of different sea surface temperature distributions over the western Pacific on the summer monsoon properties. *Acta Oceano. Sinica*, 1993, **12** (4): 535~547
- [32] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 1994, **7** (6): 929~948
- [33] 何金海, 丁一汇, 高辉, 等. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京: 气象出版社, 2001. 123pp
- He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, et al. *The Onset Date of the South China Sea Summer Monsoon and Monsoon Indices* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 123pp
- [34] 王世玉. 东亚区域夏季风的诊断分析及气候变化的数值模拟研究. 南京大学博士学位论文, 2001
- Wang Shiyu. Diagnostic analyses of summer monsoon and numerical studies of regional climate change in East Asia. Ph. D. dissertation (in Chinese), Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 2001
- [35] 王世玉, 钱永甫. $P-\sigma$ 九层区域气候模式对东亚区域气候季节与年际变化的模拟. 大气科学, 2003, **27** (5): 798~810
- Wang Shiyu, Qian Yongfu. Seasonal and interannual variation simulation of the regional climate of East Asia by a nine-level $P-\sigma$ regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5): 798~810
- [36] 黄安宁, 张耀存. 海温季节和年际变化对东亚区域气候变率模拟的影响. 南京大学学报(自然科学版), 2004, **40** (3): 319~329
- Huang Anning, Zhang Yaocun. Impacts of seasonal and interannual variability of sea surface temperature on the climate variability over East Asia. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (in Chinese), 2004, **40** (3): 319~329
- [37] Huang Anning, Zhang Yaocun, Gao Xinfang. Impacts of coastal SST variability on the East Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (2): 259~270
- [38] 钱永甫, 江静, 张艳, 等. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究. 气象学报, 2004, **62** (2): 129~139
- Qian Yongfu, Jiang Jing, Zhang Yan, et al. The earliest onset area of the tropical Asian summer monsoon and its mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (2): 129~139
- [39] 李崇银, 张利平. 南海夏季风特征及其指数. 自然科学进展, 1999, **9** (6): 536~541
- Li Chongyin, Zhang Liping. Features of the South China Sea summer monsoon and its index. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 1999, **9** (6): 536~541
- [40] 何金海, 徐海明, 周兵, 等. 关于南海夏季风建立的大尺度特征及其机制的讨论. 气候与环境研究, 2000, **5** (4): 333~344
- He Jinhai, Xu Haiming, Zhou Bing, et al. Large scale features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism. *Climatic Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 333~344
- [41] 李崇银, 屈昕. 伴随南海夏季风爆发的大尺度大气环流演变. 大气科学, 2000, **24** (1): 1~14
- Li Chongyin, Qu Xin. Large scale atmospheric circulation evolutions associated with summer monsoon onset in the South China Sea. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (1): 1~14
- [42] 张耀存, 周天军. 伴随南海季风爆发区域尺度环流演变机理的诊断分析和数值模拟. 南京大学学报(自然科学版), 2002, **38** (3): 331~340
- Zhang Yaocun, Zhou Tianjun. Diagnostic and numerical study of evolutions of regional circulation system associated with the South China Sea monsoon onset. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (in Chinese), 2002, **38** (3): 331~340