

赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响

晏红明^{1, 2, 3} 李崇银^{1, 4}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 赤道印度洋纬向海温差异对气候的影响是有关印度洋地区海气相互作用研究的焦点。作者进一步分析了印度洋纬向海温差异的特征, 提出了赤道印度洋纬向海温梯度模的概念, 并在此基础上利用中国科学院大气物理研究所的九层大气环流模式模拟研究了赤道印度洋海温梯度变化对气候的影响。分析结果表明赤道印度洋纬向海温梯度的变化及其对气候的影响比较复杂, 由于海温梯度分别产生于暖海温或冷海温两种不同的大尺度背景场, 因此它对气候的影响不仅与海温梯度的变化有关, 还与其产生的大尺度背景场(暖海温或冷海温)有很直接的关系。在太平洋地区海温不变的情况下, 由于赤道东西印度洋大范围海温的升高或降低, 有可能在整个印度洋和太平洋之间产生一个海温梯度(简称印-太海温梯度), 这一海温梯度对亚洲季风区的降水分布和季风活动起着十分重要的作用, 而赤道印度洋纬向海温梯度与印-太海温梯度的叠加, 不仅加强或减弱了印-太海温梯度引起的大范围大气辐合、辐散, 同时也使得辐合及辐散区的位置发生移动, 进而影响了小范围地区的气候异常, 特别是赤道东印度洋地区的降水分布和风场变化。与赤道印度洋地区纬向海温梯度的作用相比, 赤道印度洋偶极子对气候的影响相对比较简单, 引起的降水异常和风场变化主要与海温偶极子的变化有关。

关键词 赤道印度洋 纬向海温梯度模 偶极子 气候异常

文章编号 1006-9895 (2007) 01-0064-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

A Study of the Sea Surface Temperature Zonal Gradient Mode in the Equatorial Indian Ocean and Its Influence on Climate

YAN Hong-Ming^{1, 2, 3} and LI Chong-Yin^{1, 4}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract In recent years, zonal difference between sea surface temperatures (SST) in the equatorial eastern and western Indian Ocean and its influences on climate are being popularly argued. In this paper, the sea surface temperature anomaly (SSTA) characteristics in the Indian Ocean are further investigated. The results indicate that SST zonal difference resulting from the concurrent cold and warm SST variations in the Indian Ocean basin is also another important feature of SSTA in the Indian Ocean besides SST dipole modes, which is called as SST zonal gradient

收稿日期 2005-05-30, 2006-02-09 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233033, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-226, 云南省自然科学基金项目 2003D0085M 和人才基金 2004PY01

作者简介 晏红明, 女, 1966 年出生, 研究员, 主要从事天气气候研究。E-mail: y-hm@netease.com

mode of Indian Ocean (IOZGM) here. IOZGM has four different patterns. Similar to the positive and negative SST dipole modes in the Indian Ocean, IOZGM is also defined as positive and negative modes. Positive IOZGM may respectively result from the warm or cold SST variations over the Indian Ocean basin, and so does negative IOZGM. Based on four IOZGMs, the authors design four schemes for numerical simulation to investigate the influence of IOZGM on climate by using IAP9L model (nine layers general circulation model which developed by Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences). The results reveal that the effects of IOZGM on climate are not only relative to IOZGM, but also to the cold and warm SST variations over the all Indian Ocean basin. The possible impacting mechanism is that SST in the Pacific Ocean keeps invariably while SST in the Indian Ocean is warming and falling down, which will result in forming a SST gradient between the Indian Ocean and the Pacific Ocean (IO-PO SSTG). Because the direction of IO-PO SSTG and IOZG is either the same or contrary, the common effect of two SST gradients is different significantly from each other. The IO-PO SSTG impacts mainly on large-scale rainfall and monsoon anomalies, and causes large-scale divergence and convergence anomalies over the tropical regions, while IOZGM causes mainly the movement of central location of anomalous divergence and convergence, and further influences the climate anomalies of the small-scale regions, especially the rainfall and wind anomalies over the eastern equatorial Indian Ocean. In comparison with the former works, the authors find that the influences of IOZGM and Indian Ocean Dipole Mode(IOD)on climate anomalies are obviously different from each other. The impact of IOD on climate anomalies is mainly relative to IOD variations.

Key words the equatorial India Ocean, SST zonal gradient mode, dipole, climate anomalies

1 引言

目前,有关赤道印度洋地区东西海温差异的变化及其对气候的影响还是一个比较有争议的问题。1999 年 Saji 等^[1]利用 EOF 方法分析了多年印度洋的海温距平场,发现 EOF 第二模态反映了赤道东西印度洋地区海温明显的反相变化特征,由此认为赤道东西印度洋的海温变化存在一种类似于偶极子型的振荡,即偶极子。根据这一结果,人们进一步研究了赤道印度洋海温偶极振荡的变化特征及其对气候的影响^[2~9],其研究结果表明印度洋偶极子对亚洲季风环流和季风区降水有重要的作用。但近几年来,有关赤道印度洋海温偶极子现象引起了很大争议,针对 Saji 等^[1]在 1999 年的研究结果,Dommenget 和 Latif^[10, 11]对 EOF 分析方法提出了质疑。他们用 EOF 方法研究了多年印度洋海温距平等多种要素的空间分布特征,发现 EOF 第二模态均反映了一种类似偶极振荡的分布特征,而用 REOF 分析和回归方法对相同资料的分析则看不到这种现象。因此,他们认为 Saji 等^[1]的结论中有关赤道印度洋海温的反相振荡现象是不存在的。从相反的研究思路,Behera 等^[12]用一个单极模和一个偶极模人为构造了一组数据,并用 REOF 方法和回归分析方法对这组数据进行了分析,发现这些分析方法不

能重新得到原始数据中所包含的偶极模,由此认为 REOF 方法所得到的结论有时可能会产生一些误导。Hastenrath^[13]的研究则进一步指出,赤道印度洋的海温偶极变化可能只是叠加在大范围海温变化一致背景场上的一种温度梯度扰动,并明确提出,印度洋地区的这种偶极变化应该看作是一种纬向海温梯度的变化,而不应该看作东西海温差异的反位相振荡。鉴于目前对赤道印度洋海温变化的争议,一些学者^[14]认为最好将赤道印度洋东西海温变化的差异称为纬向模,而不应该仅仅看作是一种偶极型振荡现象。

尽管在赤道印度洋海温变化的形式特征上还存在较大的争议,但人们最终关心的问题还是赤道印度洋海温异常对气候的影响。从目前的研究成果来看,赤道印度洋东西海温的偶极振荡以及叠加在印度洋大范围海温变化一致背景场上的纬向海温梯度有可能是赤道印度洋海温变化的两种不同形式,那么这两种不同的海温变化对气候的影响究竟有什么不同?是需要我们搞清楚的问题。晏红明等^[15]通过资料分析和数值模拟方法研究了赤道印度洋海温偶极子对气候的影响。而针对目前争议较大的问题,本文则进一步研究赤道印度洋纬向海温梯度变化对气候的影响,并与文献^[15]的工作相对比,探讨赤道印度洋东西向海温变化的不同形式对气候影

响的差异。

本文首先用 1941~1999 年英国 Hadley 中心的海表温度 (SST) 资料进一步分析赤道印度洋东西海温差异的变化特征, 然后用中国科学院大气物理研究所的九层大气环流模式模拟研究赤道印度洋地区不同海温梯度变化对气候的影响。

2 赤道印度洋纬向海温梯度的变化特征

人们通常根据印度洋海温变化特征, 分别选取赤道东西印度洋地区海温变化最明显的两个区域, 用这两个区域平均海温距平的差值来定义赤道印度洋偶极子, 即取偶极子指数为: $I_d = T_{aw} - T_{ae}$, 这里 T_{aw} 和 T_{ae} 分别为赤道西印度洋和赤道东印度洋区域平均的海温距平。从偶极子定义我们看到, I_d 的变化实际上包含了两种情况: 一种是赤道东西印度洋海温的反相变化 (T_{aw} 和 T_{ae} 有相反符号); 一种是在赤道印度洋海温变化一致 (T_{aw} 和 T_{ae} 符号相同) 时由于增温或降温不一致所产生的纬向海温梯度。过去的研究过于笼统地将这两种海温变化放到一起来讨论, 而对于它们之间的变化特征及其对气候影响的差异却不是十分清楚, 因此有必要对赤道印度洋东西海温差异的变化特征作进一步的分析。

在有关赤道印度洋偶极子及其气候影响的研究中, 许多工作使用了 Saji 等^[1]定义的东西印度洋区域。同样, 这里我们选取 Saji 定义的区域。由于赤道东西印度洋海温差异的变化有明显的季节特征^[3], 夏季和秋季的差异较明显, 而冬季的差异最

小。因此, 这里我们仅讨论 6~11 月赤道东西印度洋海温的变化特征。图 1 给出赤道东印度洋 $[(10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}, 90^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}), T_{ae}]$ 和赤道西印度洋 $[(10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}), T_{aw}]$ 6~11 月海温距平的区域平均以及它们差值 ($T_{aw} - T_{ae}$) 的变化。为了使我们的讨论具有一定的代表性, 这里仅分别选取差值 $\geq 0.2^{\circ}\text{C}$ 或 $\leq -0.2^{\circ}\text{C}$ 的年份, 1951、1961、1963、1967、1972、1976、1982、1983、1987、1991、1994、1997 和 1999 年可视为正差值年; 1942、1945、1947、1954、1955、1956、1958、1959、1960、1964、1974、1980、1981、1984、1992 和 1996 年可视为负差值年。对比正负差值以及赤道东西印度洋海温距平区域平均的变化, 不难发现, 相应这些正负差值年, 赤道东西印度洋的海温变化是不同的, 有的年份变化相反 (T_{aw} 和 T_{ae} 符号相反), 而有的年份变化相同 (T_{aw} 和 T_{ae} 符号相同)。在差值为正的 13 年中, 1961、1963、1972、1982、1994、1997 年赤道东西印度洋的海温变化相反, 而其余 7 年的海温变化相同; 负差值的 16 年中, 除了 1942、1945、1956、1958、1959、1960、1974、1981、1984 年赤道东西印度洋海温变化相反, 其余 7 年海温的变化相同。为了区别于赤道印度洋的海温偶极型变化 (T_{aw} 和 T_{ae} 符号相反), 这里我们将赤道东西印度洋海温变化相同 (T_{aw} 和 T_{ae} 符号相同) 时产生的海温差异称为赤道印度洋纬向海温梯度。其中当差值为正时称为正海温梯度 (赤道印度洋西部比东部暖), 差值为负时称为负海温梯度 (赤道印度

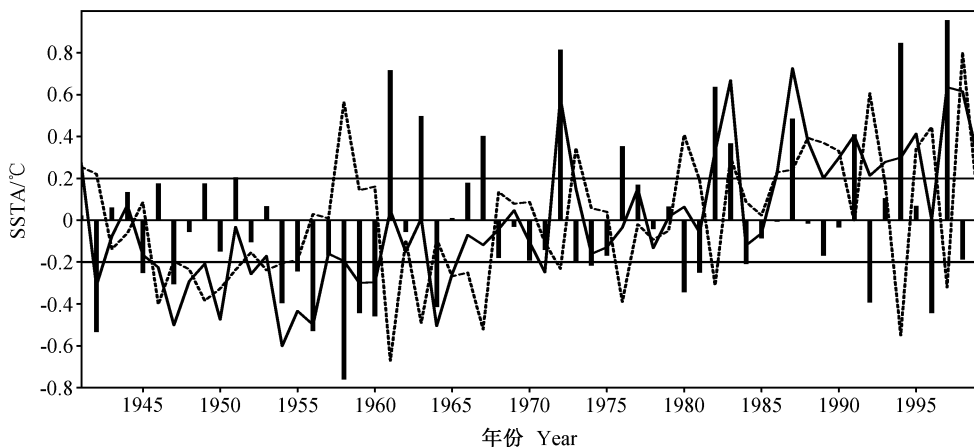


图 1 赤道西印度洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$) (实线) 和赤道东印度洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}, 90^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) (虚线) 6~11 月海温距平 (SSTA) 的区域平均以及它们的差值 (条形棒)

Fig. 1 Regional averaged SSTAs (SST anomalies) from Jun to Nov over the equatorial western $[(10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}), \text{solid line}]$ and eastern $[(10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}, 90^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}), \text{dashed line}]$ Indian Ocean, and their differences (striped bar)

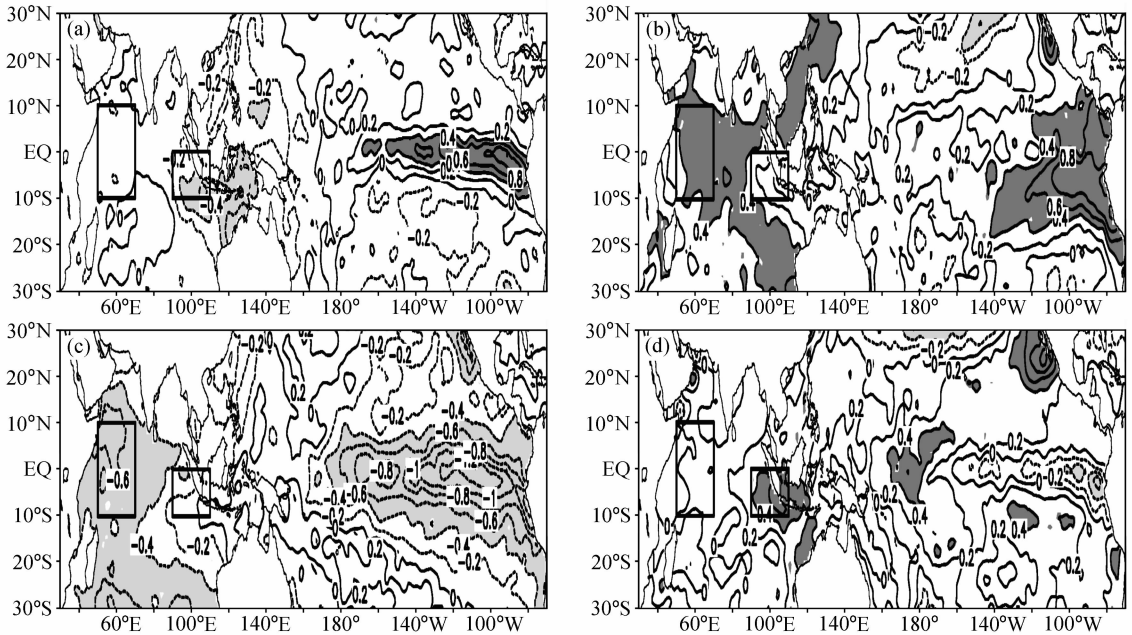


图2 赤道印度洋两种不同的海温背景时, 正 (a: 1951、1967、1976 年; b: 1983、1987、1991、1999 年) 和负 (c: 1947、1954、1955、1964 年; d: 1980、1992、1996 年) 海温梯度年的 6~11 月海温距平合成: (a, c) 冷海温背景; (b, d) 暖海温背景。矩形为本文选取的赤道东、西印度洋区域; 深阴影 $\geq 0.4^{\circ}\text{C}$, 浅阴影 $\leq -0.4^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Composite SSTA fields from Jun to Nov based on two different SSTAs and two different SST gradients (Figs. 2a and 2b show respectively the positive gradient based on cold and warm SST variation; Figs. 2c and 2d show respectively negative gradient based on cold and warm SST variation; rectangles show the selected areas over the Indian Ocean; the SSTAs greater than 0.4°C are in dark shading and those less than -0.4°C are in light shading)

洋东部比西部暖)。从以上分析我们看到, 在选取的赤道印度洋东西海温正负差值年中, 海温梯度变化所占的比例也较大, 正差值年中占了 54%, 负差值年中占 44%。

从图 1 我们注意到赤道东西印度洋海温距平的区域平均与其海温梯度(差值)的配置比较复杂, 与正负海温梯度相对应分别可以有海温都升高或海温都降低两种不同的大尺度背景。图 2a~d 分别为 6~11 月赤道印度洋两种不同大尺度海温背景场时正、负海温梯度的合成结果。1951、1967、1976、1983、1987、1991、1999 年为正海温梯度年, 其中 1951、1967、1976 年赤道东西印度洋海温距平的区域平均均为负, 表明这种正海温梯度是基于印度洋大范围海温下降时, 赤道东印度洋海温比赤道西印度洋海温降低幅度大产生的(简称冷海温背景正梯度, 图 2a); 与之相反, 1983、1987、1991、1999 年对应的赤道东西印度洋海温距平为正, 表明这种正海温梯度是基于印度洋大范围海温升高时, 因赤道西印度洋海温比赤道东印度洋海温增温明显所产生的(简称暖海温背景正梯度, 图 2b)。在负海温梯

度的 1947、1954、1955、1964、1980、1992、1996 年, 赤道东西印度洋海温距平的变化也存在类似的两种情况, 1947、1954、1955、1964 年赤道东西印度洋均为负海温距平(简称冷海温背景负梯度, 图 2c), 1980、1992、1996 年赤道东西印度洋均为正海温距平(简称暖海温背景负梯度, 图 2d)。

晏红明等^[16]早期的研究发现, 印度洋地区的海温变化存在明显的年代际特征, 20 世纪 50~60 年代为冷海温期, 80~90 年代为暖海温期, 70 年代为冷暖交替的过渡期。从图 1 和图 2 可以看到, 与印度洋海温年代际变化相应, 50~70 年代赤道印度洋正负海温梯度主要产生于冷海温背景(图 2a、c); 而 80~90 年代正负海温梯度则主要产生于暖海温背景(图 2b、d)。

进一步分析赤道印度洋正负纬向海温梯度的季节变化特征发现(图略), 其季节变化特征与赤道印度洋海温偶极子的季节变化特征^[3]基本一致, 12~2 月的海温梯度的强度最弱, 从 3 月份开始逐渐加强, 到 7~10 月强度最强, 11 月后又逐渐减弱。

3 数值模拟方案

数值模拟方法可以研究一种孤立的外强迫源对气候的影响。气候系统是一个非线性的耗散系统,全球的气候异常是多种因子作用的结果。就海洋温度对气候的影响而言,由于全球海洋温度的变化既各有特点又相互联系,其对气候的影响也是密切联系的。作为全球海温异常的最强信号,赤道东太平洋的海温变化对全球的气候异常有着十分重要的作用,这是近 20 多年来的众多工作的研究结果。但一些研究^[17]也表明了印度洋与太平洋地区的海温变化有十分密切的联系,特别是赤道东西印度洋与赤道东太平洋地区的海温变化。因此,在考虑赤道东太平洋海温对气候影响的同时,赤道东西印度洋海温的作用究竟如何是值得进一步研究的问题,而通过资料分析则很难分裂出全球气候异常中印度洋海温作用的信息。本文利用中国科学院大气物理研究所的九层大气环流模式来研究印度洋不同海温背景场时正负纬向海温梯度对气候的影响。

赤道印度洋海温梯度与其产生的背景场配置比较复杂,既有印度洋大范围降温时产生的海温梯度,也有大范围增温时产生的海温梯度。图 2 分别为 6~11 月月平均海温距平平均的合成,平滑了一些海温的季节变化特征,因此所显示的赤道东西印

度洋纬向海温梯度较小。仔细分析印度洋逐年逐月海温梯度的变化(图略),发现赤道东西印度洋海温梯度一般在 $0.5 \sim 1^\circ\text{C}$ 左右,最大可达到 1.4°C 。因此我们设计了如图 3 所示的数值模拟方案,赤道东西印度洋的海温梯度为 1°C ,与观测事实比较接近。在多年月平均海温场上加如图 3 所示的四种异常海温梯度:(1) 异常试验 1 (图 3a): 与图 2a 对应,代表赤道印度洋冷海温背景的正梯度,记为 A1;(2) 异常试验 2 (图 3b),与图 2b 对应,代表赤道印度洋暖海温背景的正梯度,记为 A2;(3) 异常试验 3 (图 3c),与图 2c 对应,代表赤道印度洋冷海温背景的负梯度,记为 A3;(4) 异常试验 4 (图 3d),对应图 2d,代表赤道印度洋暖海温背景的负梯度,记为 A4。以上 4 个模拟试验所加的异常海温分布在一定程度上反映了不同大尺度海温背景场上印度洋正、负海温梯度的变化特征。另外,用多年月平均海温做控制试验,其输出场记为 C。根据赤道印度洋海温的季节变化特征,异常试验时从 3 月开始加异常海温,数值模拟试验的积分时间为 1~12 月。考虑到不同初始场对模式输出结果的影响,每种试验均采用 5 个不同的初始场积分后的集成结果。在下一节分析中,我们用异常海温强迫试验的输出场减去控制试验输出场的差值来表示海温梯度对气候的影响,其中 A1-C 和 A2-C 分别表示

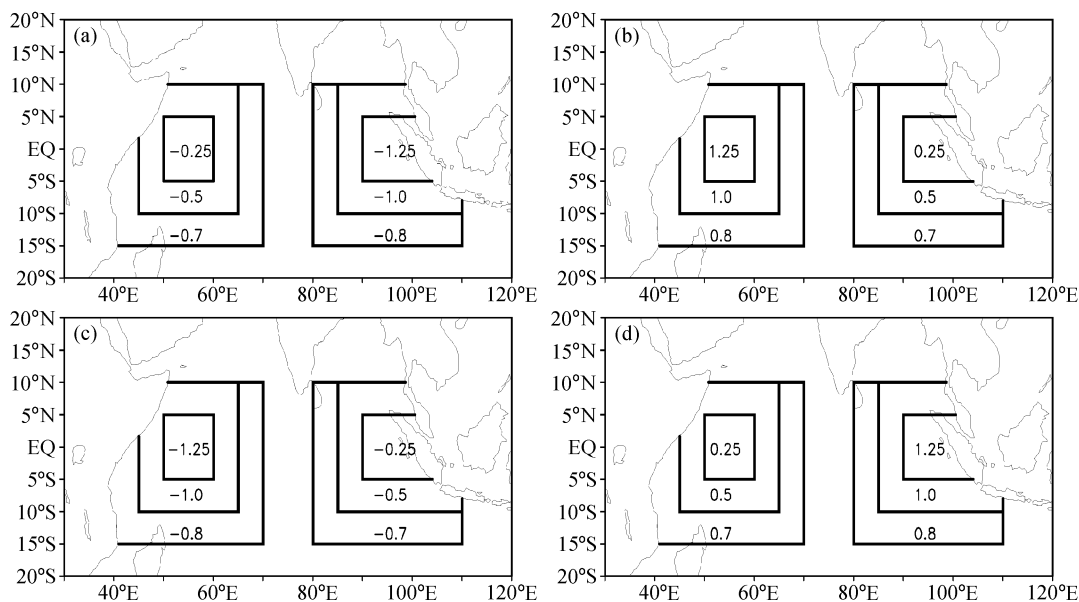


图 3 赤道印度洋海温梯度数值模拟设计方案:(a) 试验 A1;(b) 试验 A2;(c) 试验 A3;(d) 试验 A4

Fig. 3 SSTA patterns over the equatorial Indian Ocean for numerical simulation: (a) Scheme A1; (b) scheme A2; (c) scheme A3; (d) scheme A4

赤道印度洋冷暖海温背景场有正梯度强迫对大气的影
响, A3-C 和 A4-C 分别表示赤道印度洋冷暖海温
背景场时的负梯度强迫对大气的影

4 赤道印度洋纬向海温梯度变化对气候的影响

根据第 2 节的分析, 赤道印度洋海温梯度有明
显的季节变化, 从 3 月份开始逐渐加强, 到夏秋季
最强, 冬季最弱, 据此模拟异常试验从 3 月开始考
虑异常海温的强迫作用。另外, 由于南亚和东亚季
风区降水主要集中在夏季, 夏季风活动和夏季降水
异常是我们主要关心的问题, 因此本文主要分析海
温梯度变化对夏季气候的影响。

4.1 正海温梯度

图 4a、b 分别为在赤道印度洋冷、暖海温背景
下正海温梯度强迫对夏季 (JJA, 下同) 降水的影响。
可以看到赤道印度洋海温梯度强迫不仅对强迫区
的降水影响较大, 对西太平洋、南亚和东亚地区
的降水变化也有明显的影响。从印度洋-西太平洋
地区大范围降水距平的分布来看, 虽然同为正海温
梯度强迫, 但降水响应却有着明显不同的特征。在
冷海温背景下的正梯度强迫时 (图 4a), 印度洋及
附近的大部分地区, 包括中南半岛西南部、马来半
岛、苏门答腊岛等地区为降水负距平, 负距平降水
中心位于东印度洋赤道附近, 中国东南部的降水也
偏少; 而西太平洋的大部分地区, 包括南海、印度
尼西亚、菲律宾群岛为降水正距平, 正距平降水
中心位于菲律宾群岛附近, 印度次大陆的降水偏多。
在暖海温背景下的正梯度强迫时 (图 4b), 西南印

度洋为降水正距平, 而东北印度洋、中南半岛、中国
东南部以及西太平洋的大部分地区均为降水负距平。

比较赤道印度洋冷 (图 4a) 暖 (图 4b) 不同海
温背景下的正海温梯度对降水分布的影响, 发现对
应两种不同海温背景场, 赤道东印度洋、中南半
岛、马来半岛和苏门答腊岛地区的降水变化比较一
致, 均为降水负距平; 而赤道西印度洋和西太平洋
地区的降水变化几乎是相反的。这种大范围相反的
降水距平分布型, 似乎更多反映了赤道印度洋和西
太平洋之间海温梯度的影响。另外, 对比分析还发
现, 不同海温背景下正海温梯度的作用对中国大部
分地区降水分布的影响是相同的, 其作用有使中国
东南部降水偏少的趋势。

图 5a、b 分别为对应两种不同背景场时正海温
梯度对夏季 850 hPa 风场的影响。可以看到冷海温
背景下的正梯度强迫时 (图 5a), 中南半岛-西北太
平洋有一异常气旋环流, 赤道印度洋附近为异常东
风, 在阿拉伯海北部-印度半岛-孟加拉湾北部-中
南半岛南部-赤道西太平洋为异常西风。暖海温背
景下的正梯度强迫时 (图 5b), 北印度洋区域为异
常气旋环流, 孟加拉湾北部有较弱的异常反气旋环
流, 与此相应赤道西太平洋-中南半岛南部-孟加
拉湾-阿拉伯海为异常东风; 赤道印度洋附近为异
常西风, 该异常西风在赤道印度洋东部地区转向南
流入南半球。

比较印度洋和赤道西太平洋地区距平风分布可
以看到, 对应不同海温背景场的正梯度强迫, 在印
度洋和太平洋地区距平风的强度也是不同的。冷海
温背景下的正梯度强迫时, 西太平洋地区的异常西

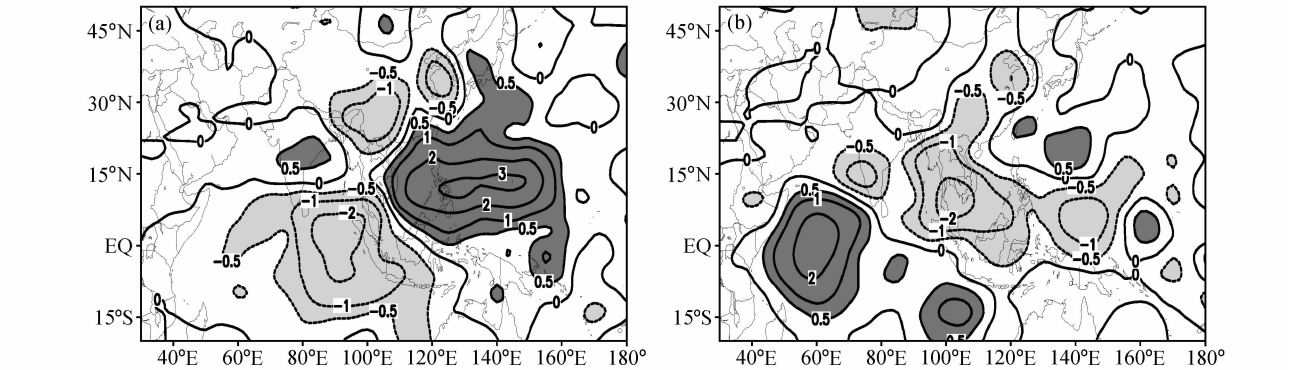


图 4 试验 A1 和 A2 时正海温梯度强迫的夏季降水距平分布: (a) 冷海温背景; (b) 暖海温背景。深阴影 ≥ 0.5 mm/d, 浅阴影 ≤ -0.5 mm/d

Fig. 4 Anomalous precipitation distributions in summer (JJA) for scheme A1 and scheme A2: (a) Cold SST; (b) warm SST. The precipi-
tations greater than 0.5 mm/d are in dark shading and those less than -0.5 mm/d are in light shading

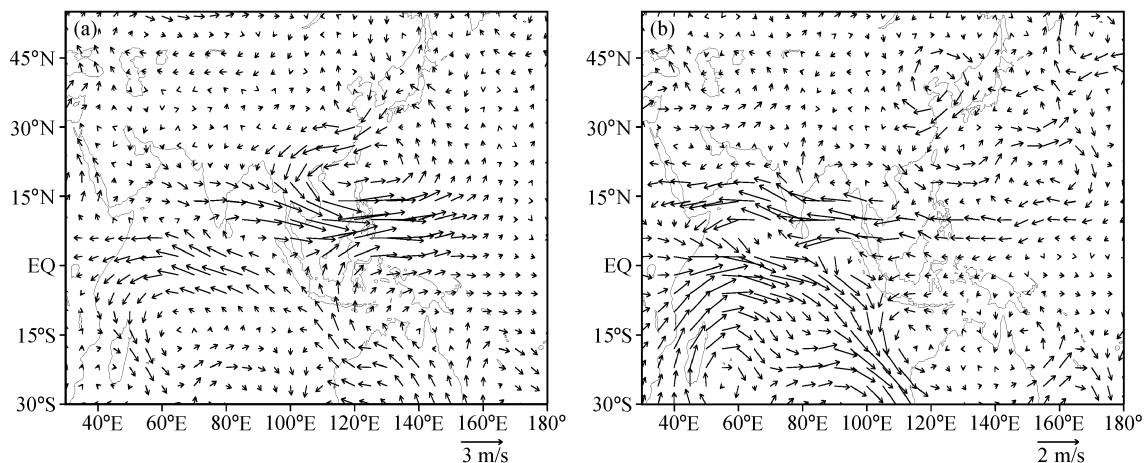


图5 试验 A1 和 A2 时正海温梯度强迫的夏季 (JJA) 850 hPa 距平风场: (a) 冷海温背景; (b) 暖海温背景

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for anomalous wind at 850 hPa

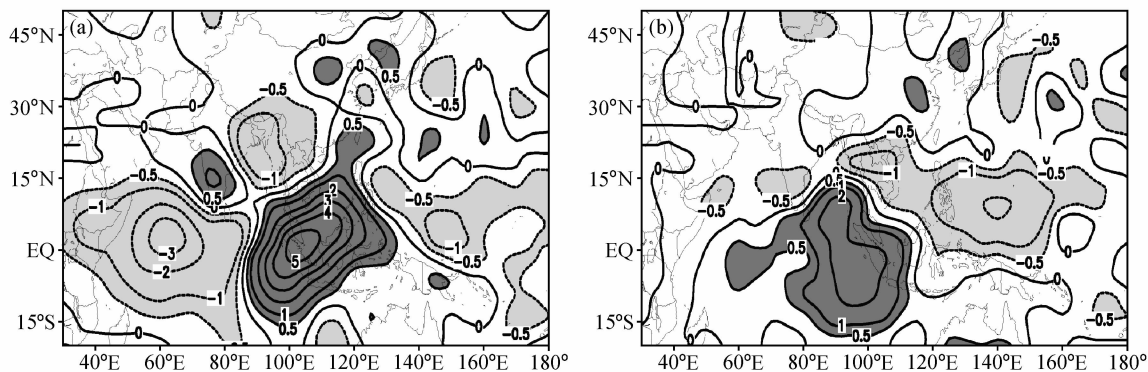


图6 试验 A3 和 A4 时负海温梯度强迫的夏季降水距平: (a) 负海温背景; (b) 正海温背景。深阴影 ≥ 0.5 mm/d, 浅阴影 ≤ -0.5 mm/d
Fig. 6 Anomalous precipitation distributions in summer (JJA) for scheme A3 and scheme A4: (a) Cold SST; (b) warm SST. The precipitations greater than 0.5 mm/d are in dark shading and those less than -0.5 mm/d are in light shading

风明显比北印度洋地区的异常西风强;与此相反,对应暖海温背景下的正梯度强迫,北印度洋地区的异常东风明显比赤道西太平洋地区的异常东风强。

对比图 4 和图 5 可以看到,对应距平风辐合的地区降水偏多,而距平风辐散的地区降水偏少。冷海温背景下的正海温梯度时,由于北印度洋地区有反气旋性距平环流,赤道西北太平洋地区有气旋性距平环流,因此赤道印度洋的降水偏少,西北太平洋地区的降水偏多。暖海温背景下的正海温梯度时,对应赤道西印度洋地区的气旋性距平环流辐合区的降水偏多,而对应孟加拉湾和中南半岛的异常反气旋性环流辐散区的降水偏少。

4.2 负海温梯度

图 6a、b 分别为赤道印度洋冷、暖海温背景时负海温梯度对夏季降水的影响,从图中我们同样可

以看到,除了印度洋海温强迫区,东南亚、东亚和西太平洋地区的降水响应也很明显。冷海温背景下的负海温梯度强迫时(图 6a),赤道印度洋-西太平洋地区为负-正-负型降水距平分布,其中赤道西印度洋和赤道西太平洋为降水负距平,赤道东印度洋及附近地区,包括中南半岛南部、印度尼西亚、菲律宾群岛为降水正距平。暖海温背景下的负海温梯度强迫时,印度洋-西太平洋地区的降水距平分布为正-负型,其中印度洋及附近的大部分地区,包括马来半岛和苏门答腊岛地区为降水正距平,中南半岛-赤道西太平洋为降水负距平。另外,不同冷暖海温背景时的负海温梯度强迫均使中国东部降水有偏多的趋势。

图 7a、b 分别为对应冷、暖海温背景场时负海温梯度对夏季 850 hPa 风场的影响。可以看到,对

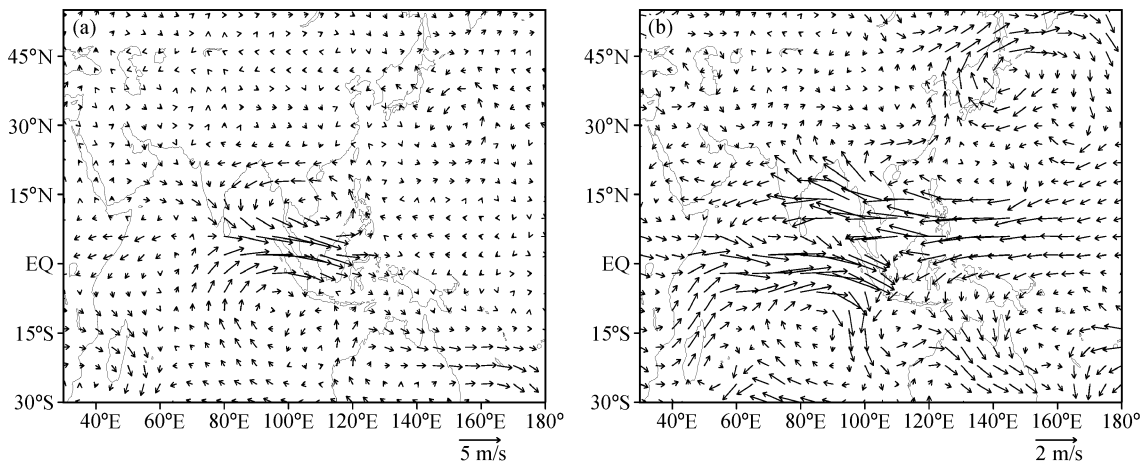


图7 试验 A3 和 A4 时负海温梯度强迫的夏季 (JJA) 850 hPa 距平风场: (a) 冷海温背景; (b) 暖海温背景

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for anomalous wind at 850 hPa

应冷海温背景下的负海温梯度的作用, 在孟加拉湾-中南半岛南部有异常气旋环流, 阿拉伯海有异常弱反气旋环流, 与此相对应, 在阿拉伯海北部-印度半岛南部-赤道东太平洋为异常西风。另外, 在赤道印度洋 80°E 附近有异常的偏南风分为东西两支气流, 向西的一支在赤道西印度洋地区形成异常东风, 向东的一支与赤道中印度洋转向的异常西风汇合加强了赤道东印度洋地区的异常西风。对应暖海温背景下的负海温梯度, 赤道印度洋附近有明显的异常西风, 赤道西太平洋-中南半岛-孟加拉湾-阿拉伯海为异常东风, 与印度洋地区的异常风相应, 在印度洋 5°N 附近有异常气旋环流。

从以上分析我们看到赤道印度洋纬向海温梯度对气候的影响比较复杂, 其气候影响不仅与海温梯度的变化有关, 还与海温梯度产生的背景场有十分直接的关系。综合对比图 4a、图 4b、图 6a 和图 6b 发现, 赤道印度洋纬向海温梯度变化与印度洋海温背景场变化对不同地区降水影响的相对重要性是不同的: 赤道东印度洋及附近地区, 包括中南半岛南部、马来西亚和苏门答腊岛的降水变化主要与赤道印度洋海温梯度的强迫有关, 海温正 (负) 梯度强迫使以上地区的降水偏少 (偏多); 而赤道西印度洋和西太平洋地区的降水变化主要与印度洋海温背景场的变化有关, 暖 (冷) 海温背景的作用有使赤道西印度洋地区降水偏多 (偏少) 而使赤道西太平洋地区的降水偏少 (偏多) 的趋势。另外, 中国大部分地区的降水变化与赤道印度洋海温梯度的变化有一定的关系, 正 (负) 海温梯度有使中国东南部地区降水偏少 (偏多) 的趋势。

5 正负海温梯度影响气候的可能机制

在海-气相互作用过程中海洋主要通过对大气的加热作用推动其上的大气运动, 暖海温区海温的加热作用使气流上升, 造成上升区的低层气流辐合, 而冷海温的冷却作用则使气流下沉, 相应使下沉区低层的气流辐散。低层气流主要表现为从冷海温区流向暖海温区, 气流的这种辐合辐散作用进而可影响季风活动和降水变化。

海洋的加热或冷却作用对大气的垂直和水平运动有十分重要的影响。综合比较上节 850 hPa 风场对不同背景场下的海温梯度的响应 (图 5a 和图 5b、图 7a 和图 7b), 发现赤道西太平洋和印度洋大部分地区的风场变化对印度洋海温背景场的响应相当敏感。那么为什么同样是正海温梯度或负海温梯度的影响, 只是由于背景场不同就形成如此明显的气候差异? 这里我们结合印度洋大范围海温背景场和海温梯度的变化特征, 进一步探讨海温梯度影响气候的可能机制。

5.1 冷海温背景

我们首先来看赤道印度洋地区相同冷海温背景而不同正负海温梯度时的情况。在异常试验 A1 和 A3 中, 赤道印度洋海温下降而太平洋海温不变, 海温的这种相对变化无形中在两个大洋之间产生一个由西向东的海温梯度 (简称印-太海温梯度)。而在赤道印度洋区域, 由于东西海温下降幅度不一致, 其内部还有一个海温梯度。在异常试验 A1 (图 8a) 中, 赤道印度洋海温梯度的方向与印-太海温梯度的方向相反, 相叠加后有可能削弱了赤道印

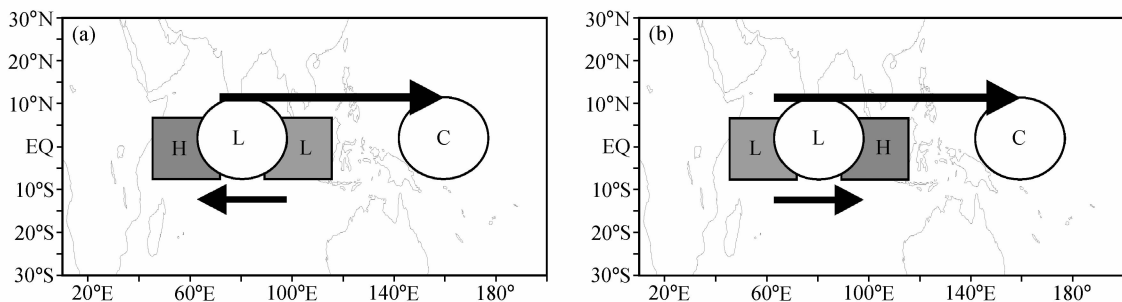


图 8 对应异常试验 A1 (a) 和 A3 (b) 的背景场海温梯度 (长箭头) 和赤道印度洋海温梯度 (短箭头) 示意图。H 为高温区; L 为低温区; C 为海温不变的区域

Fig. 8 SST zonal gradient between the Indian Ocean and the Pacific Ocean (long arrows) and SST zonal gradient over the equatorial Indian Ocean (short arrows) according to scheme A1 (a) and scheme A3 (b). Letters H denote warm SST regions, letters L denote cold SST regions, and letters C denote unchanged SST regions

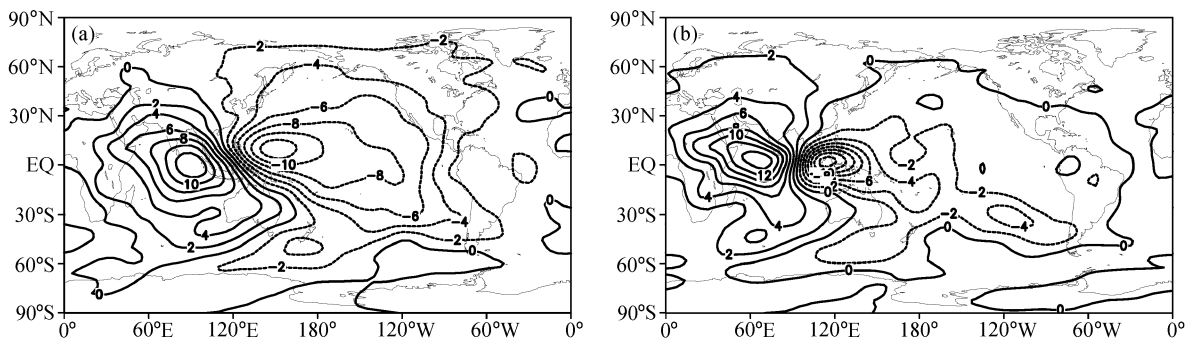


图 9 冷海温背景时正梯度 (a) 和负梯度 (b) 夏季低层 850 hPa 速度势响应场 (单位: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)

Fig. 9 Velocity potential anomalies ($10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) at 850 hPa in summer for positive (a) and negative (b) SST gradients while SST of the Indian Ocean is cold

度洋地区印-太海温梯度的作用;从相应的异常风场 (图 5a) 看到,反向海温梯度叠加减弱了北印度洋地区印-太海温梯度作用产生的异常西风,使得北印度洋异常西风明显比赤道西太平洋的异常西风弱。另外,由于受赤道印度洋海温梯度的影响,赤道印度洋地区出现异常东风。在赤道东印度洋附近有明显的气流辐散。在异常试验 A3 (图 8b),赤道印度洋内部的海温梯度的方向与印-太海温梯度方向相同,叠加后加强了印度洋地区印-太海温梯度的作用;从相应的异常风场 (图 7a) 看到,阿拉伯海-印度半岛南部-赤道东印度洋-赤道西太平洋为明显的异常西风,而赤道西印度洋的异常风场与印度洋海温梯度的作用相反,为异常东风。赤道印度洋中部 75°E 附近有气流辐散。

图 9a、b 分别为对应赤道印度洋冷海温背景下的正、负梯度强迫时 850 hPa 速度势响应场,其分布反映了大气低层的辐合、辐散状态。可以看到速度势正、负距平的分布形式极为相似,印度洋为正

距平而太平洋为负距平,速度势距平场的分布特征表明低层气流在太平洋辐合而在印度洋辐散,气流的流向与印-太海温梯度的方向一致,由冷海温区流向暖海温区 (相对的)。但仔细分析后我们注意到,速度势距平场除了大范围分布特征相似外,正负距平区的中心位置有很大的差异。冷海温背景下的正梯度强迫时,赤道附近速度势正、负距平的分界在 120°E 附近 (图 9a);相比之下,冷海温背景下的负梯度强迫时,赤道附近正、负速度势距平区的分界以及正负距平区的中心位置明显西移,正、负距平区的分界西移到 90°E 附近,其正负距平中心相应也西移了近 30 个经距 (图 9b)。

速度势中心位置对印度洋冷海温背景下不同海温梯度的响应差异实际上与赤道印度洋海温梯度变化有十分密切的联系。在异常试验 A1 中,由于赤道印度洋的海温梯度与印-太海温梯度的方向相反,其作用不仅削弱了印度洋地区印-太海温梯度的作用,对赤道印度洋地区异常风的变化还有十分重要

的影响,使赤道印度洋附近出现异常东风,这一异常东风与赤道西太平洋地区的异常西风形成了赤道东印度洋地区明显的气流辐散(图 5a),相应的,速度势响应场的正距平中心位于赤道东印度洋地区(图 9a)。而在异常试验 A3,赤道印度洋的海温梯度与印-太海温梯度的方向相同,叠加后其作用虽然加强了赤道东印度洋地区印-太海温梯度的影响,但对赤道西印度洋附近风场变化的作用却明显较弱。仅在赤道东印度洋地区出现与赤道印度洋海温梯度相应的异常西风,而赤道西印度洋地区为异常东风,与赤道印度洋海温负梯度的方向相反。与异常试验 A1 相比,试验 A3 使在赤道东印度洋的气流辐散区西移到赤道印度洋中部。另外,与低层相对应有相反的高层异常速度势分布(图略)。

降水场的变化与低层辐合、辐散强度及位置的变化是很好相匹配的。对比异常试验 A1 和 A3 的相应降水响应场(图 4a 和图 6a)看到,虽然相同背景场时印度洋-太平洋范围内降水距平分布型极为相似,但赤道东印度洋附近的降水变化却也有明显的不同,赤道东印度洋地区的降水变化刚好相反,试验 A1 为降水负距平,而试验 A3 为降水正距平。

5.2 暖海温背景

图 10 为相同暖海温背景下不同赤道印度洋海温梯度的影响情况。印度洋暖海温背景时由于印度洋地区海温升高,太平洋地区海温不变,由此在印度洋和太平洋之间产生一个由东向西的海温梯度。而在赤道印度洋地区,由于东西部地区增温幅度的差异,也存在一个海温梯度。在异常试验 A2(图 10a),赤道印度洋的海温梯度与印-太之间由东向西的海温梯度方向相同,相叠加后虽然其作用加强了印度洋地区印-太海温梯度的作用,但对赤道印度洋强迫区风场变化的影响却明显减弱。从相应的

异常风场(图 5b)看到,同向的海温梯度叠加使得北印度洋地区的异常东风明显比赤道西印度洋的异常东风强,但与赤道印度洋海温梯度的作用是相反的,赤道印度洋地区为异常西风。在异常试验 A4(图 10b)中,赤道印度洋海温梯度与印-太海温梯度的方向相反,叠加后印度洋海温梯度的作用不仅削弱了印度洋地区印-太海温梯度的作用,对印度洋海温强迫区的风场变化还有十分明显的影响。相应异常风场变化(图 7b)在赤道西太平洋-孟加拉湾-阿拉伯海为异常东风,其中赤道西太平洋-孟加拉湾的异常东风比阿拉伯海地区的异常东风强,而与印度洋地区由西向东海温梯度的作用相同,赤道印度洋为异常西风。这些异常风变化在马来西亚附近地区形成明显的气流辐合。与试验 A2 的异常风场中赤道东印度洋地区的异常风辐合区相比,试验 A4 的异常风辐合区明显东移了大约 15 个经距,由 95°E 东移到 110°E 附近。

对应印度洋暖海温背景下的正、负海温梯度强迫,低层气流的辐合辐散,以及相应的降水和低层风场的变化,也有类似于冷海温背景下的正、负海温梯度强迫时的变化特征,在此不再赘述。

根据以上分析我们发现,热带印度洋和太平洋之间由于海温相对变化可能产生的海温梯度(印-太海温梯度)对季风区的气候影响是十分重要的,而赤道印度洋海温梯度的作用又与这种海温背景场梯度有很密切的联系。当两种反向海温梯度叠加时,赤道印度洋海温梯度不仅减弱了印度洋地区印-太海温梯度的作用,对赤道印度洋地区的风场变化还有十分重要的影响;而当两种海温梯度同向叠加时,赤道印度洋海温梯度虽然加强了印度洋地区印-太海温梯度的作用,但对赤道印度洋海温强迫区风场变化的作用却明显减弱。

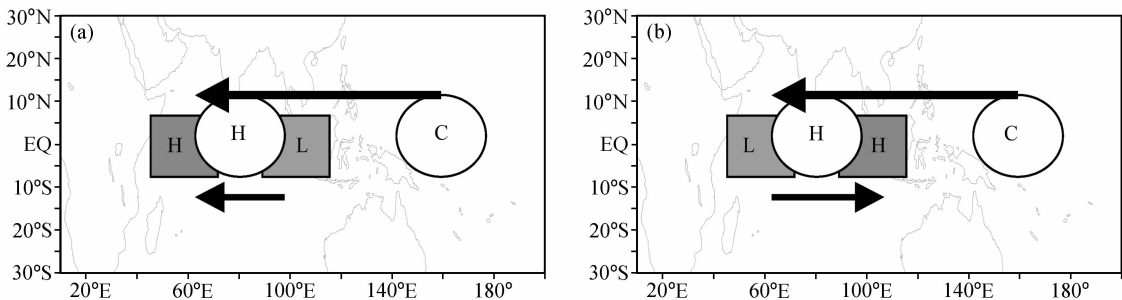


图 10 对应异常试验 A2 (a) 和 A4 (b) 的背景场海温梯度(长箭头)和赤道印度洋海温梯度(短箭头)示意图。H 为高温区; L 为低温区; C 为海温不变的区域

Fig. 10 Same as Fig. 8, but for scheme A2 (a) and scheme A4 (b)

综合本节分析可以认为,由于印度洋大范围海温的升高或降低,在印度洋和太平洋之间有可能产生一个海温梯度,这一梯度对整个亚洲季风区的降水分布和季风活动起着十分重要的作用,而叠加于这一大范围海温背景场上的赤道印度洋海温梯度与印-太海温梯度的叠加,加强或减弱了印度洋地区这种大范围海温梯度引起的风场变化和低层辐合、辐散强度,相应使得赤道印度洋附近的辐合、辐散的中心位置发生移动,进而影响了小范围地区的气候异常,特别是赤道东印度洋附近地区的降水分布和风场变化。

6 数值模拟结果与观测实况的对比分析

气候异常包含了许多因子的作用信息,除了海洋温度的作用之外,大陆雪盖、陆面热力状况的变化以及人类活动等都是影响气候异常的因子,因此针对某一因子影响时相应观测资料的分析只能在很小程度上反映该因子的作用。但通过数值模拟研究则可以孤立地研究某一因子作用结果,并通过对比分析数值模拟结果与观测资料,进一步确认某一因子的作用,同时在一定程度上来验证数值模拟结果的真实性。

全球海洋温度的变化是密切联系的,特别是赤道东西印度洋与赤道东太平洋地区的海温变化。但由于太平洋和印度洋的海盆范围存在很大的差异以及其他的一些原因,与赤道东太平洋地区的海温变化相比,印度洋地区的海温变化要小得多。从图 2 可以看到,在赤道印度洋地区海温梯度大于 0.2°C

的同时,赤道东太平洋地区的海温均出现了明显的变化,特别是印度洋暖海温背景时的正海温梯度(图 2b)和负海温背景时的负海温梯度(图 2c)情况下,赤道东太平洋地区的海温变化均大于 0.8°C ,明显超过了印度洋地区的海温变化,负海温背景负海温梯度时赤道东太平洋地区的海温距平中心甚至达到了 1.2°C ,因此这两种情况下的观测资料有可能更多地包含了赤道东太平洋地区海温的作用信息。而负海温背景时的正海温梯度(图 2a)和正海温背景时的负海温梯度(图 2d)情况下,赤道东太平洋的海温的变化相对较小,基本属于正常范围,因此下面的对比分析就仅针对这两种情况。

图 11a、b 分别为相应的图 2a、d 时夏季的合成距平风场,可以看到在赤道印度洋冷海温背景正海温梯度情况(图 11a),与赤道印度洋海温梯度的方向一致,赤道印度洋出现异常东风,而中南半岛南部-赤道西太平洋赤道为明显的异常西风,赤道东印度洋附近有明显的气流辐散,与相应的数值试验的结果(图 5a)相比,有很相似的分布特征。在赤道印度洋暖海温背景负海温梯度时(图 11b),西太平洋 10°N 附近到中南半岛-孟加拉湾有明显的异常东风,该异常东风在印度半岛附近分成两支,一支继续向西流向阿拉伯海,而另一支则在赤道印度洋中部转向南,并在赤道中印度洋地区再次转向东,在赤道东印度洋附近形成异常西风。赤道太平洋和印度洋、中南半岛南部和孟加拉湾的异常风分布与相应的数值试验结果(图 7b)相比,有极为相似的分布特征。观测资料和数值模拟结果的对比分析进一步证实了以上数值模拟结果的可靠性。

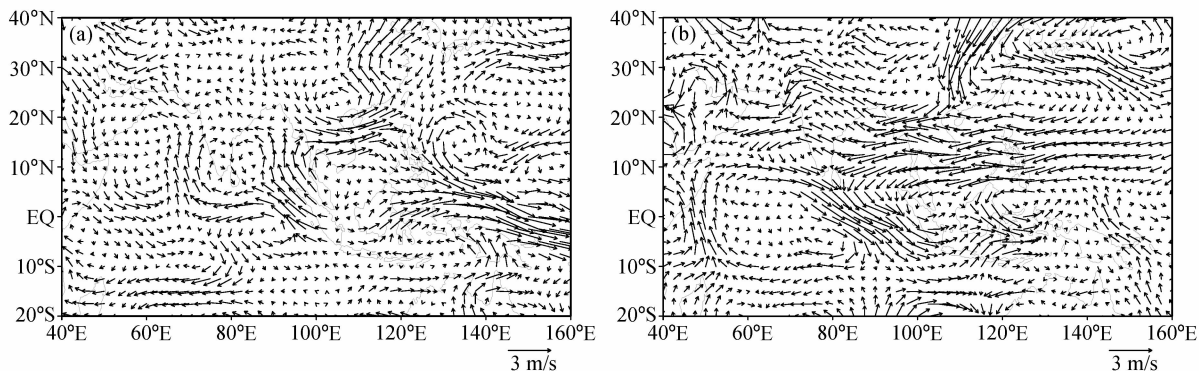


图 11 赤道印度洋负海温背景正海温梯度年 (a) 和正海温背景负海温梯度年 (b) 夏季 850 hPa 合成风场: (a) 1951、1967、1976 年; (b) 1980、1992、1996 年

Fig. 11 The composite fields of anomalous wind at 850 hPa in summer during positive IOZGM (zonal gradient mode of India Ocean) based on cold SST in 1951, 1967, 1976 (a) and negative IOZGM based on warm SST in 1980, 1992, 1996 (b)

7 赤道印度洋海温梯度与印度洋偶极子对气候影响的差异

我们在第一部分的工作^[15]中分析了印度洋海温偶极子的作用, 研究发现印度洋偶极子对气候的影响主要是对海温强迫区的降水和风场变化的影响较大, 对南亚和东亚季风区的降水和风场有一定的影响, 而对西太平洋地区的气候影响较小。相应的距平风场和速度势距平场的分布特征均表明比较明显的气流辐合辐散主要出现在东西印度洋海温强迫区, 而与赤道太平洋地区海温变化没有明显的关系。偶极子变化对气候的影响比较单一, 相应的降水分布和风场异常与偶极子海温的强迫有关。与之相比, 赤道印度洋海温梯度对气候的影响则比较复杂, 海温梯度引起的气候异常不仅与印度洋地区海温梯度的变化有关, 在很大程度上还与海温梯度产生的背景场海温的变化有关, 与印度洋和太平洋地区海温的相对变化有关。同时, 由于印-太海温梯度是大范围海温差异产生的海温梯度, 较之赤道印度洋的海温梯度而言, 其变化对于大范围季风区的降水距平分布和风场异常有着十分重要的作用。

8 结论

通过对印度洋海温距平场的变化特征分析, 我们发现有关印度洋偶极指数的定义中不仅包含赤道印度洋东西海温梯度的反向变化, 还包含了印度洋大范围海温变化一致时由于东西海温变化差异所产生的纬向海温梯度。籍此我们设计了四种异常数值试验方案来研究不同海温背景场时海温梯度变化对气候的影响, 得到以下几点结论:

(1) 赤道印度洋的海温梯度的变化比较复杂。正、负海温梯度分别产生于印度洋大范围海温升高(暖海温)和海温降低(冷海温)两种不同的背景场。另外, 赤道印度洋海温梯度与印度洋海温的年代际变化有密切的关系, 20 世纪 50~70 年代的正、负海温梯度主要以印度洋冷海温背景为主, 而 80~90 年代则主要以印度洋暖海温背景为主。

(2) 赤道印度洋海温梯度对夏季降水和夏季风活动的影响比较复杂, 其影响不仅与海温梯度的变化有关, 还与海温梯度的背景场特征有十分密切的关系。由于印度洋地区大范围海温的升高或降低(海温背景场变化), 在印度洋和太平洋之间所产生

的印-太海温梯度对于整个亚洲季风区的大范围降水分布和季风活动起着十分重要的作用, 而赤道印度洋内部海温梯度与印-太海温梯度的叠加, 可以加强或减弱这种大范围海温梯度引起的辐合辐散强度, 同时也使得辐合辐散中心位置移动, 进而影响了小范围地区的降水变化, 特别是赤道东印度洋地区的降水分布和风场变化。

(3) 赤道印度洋的纬向海温梯度和海温偶极子对气候的影响有明显不同。印度洋偶极子对气候的影响相对比较单一, 其作用对海温强迫区风场异常和降水分布的影响较大; 与之相比, 赤道印度洋海温梯度对气候的影响则比较复杂, 海温梯度引起的气候不仅与印度洋海温梯度的变化有关, 在很大程度上还与印-太海温梯度的变化有关, 即与印度洋和太平洋地区海温的相对变化有十分明显的关系。

从本文分析我们了解到, 由于海温梯度背景场对大范围热带海洋温度梯度和风场变化的影响, 使得赤道印度洋海温梯度的气候效应与印度洋和太平洋地区海温的相对变化有十分密切的联系。许多研究表明海洋的温度变化既各有特点又相互联系, 一个地区的海温变化势必会影响到另一个地区的海温异常。而实际上本文的研究是在一种理想的海温变化基础上所做的分析, 对于实际中印度洋和太平洋海温变化的关系和特征目前并不十分清楚, 本文的分析结果在一定程度上可反映赤道印度洋海温梯度的作用。因此, 在以后的工作中有必要对印度洋和太平洋地区海温变化的关系和特征作进一步的分析。

参考文献 (References)

- [1] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, **401**: 360~363
- [2] Goddard L, Graham N E. Importance of the India Ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 19099~19116
- [3] 李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶子型振荡及其气候影响. *大气科学*, 2001, **25** (4): 433~443
Li Chongyin, Mu Mingquan. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (4): 433~443
- [4] 肖子牛, 晏红明. EL Niño 位相期间印度洋海温异常对中国南部初夏降水及初夏亚洲季风影响的数值模拟研究. *大气科*

- 学, 2001, **25** (2): 173~183
- Xiao Ziniu, Yan Hongming. A numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on the early summer precipitation of the southern China during an El Niño year. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (2): 173~183
- [5] Ashok Karumuri, Guan Zhaoyong, Toshio Yamagata. Impact of the Indian Ocean dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall and ENSO. *J. Geophys. Res.*, 2001, **28** (23): 4499~4502
- [6] 谭言科. 热带印度洋海气系统的特征及变异机理. 南京气象学院博士学位论文, 2002
- Tan Yanke. The character and variation mechanism of sea atmosphere system in the tropical Indian Ocean. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing Institute of Meteorology. 2002
- [7] 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系. 热带气象学报, 2002, **18** (4): 335~344
- Xiao Ziniu, Yan Hongming, Li Chongyin. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2002, **18** (4): 335~344
- [8] 钱海峰, 殷永红, 倪允琪. 热带印度洋次表层偶极子模态及其 1997/1998 年过程诊断分析研究. 应用气象学报, 2003, **14** (2): 129~139
- Qian Haifeng, Yin Yonghong, Ni Yunqi. Tropical Indian Ocean subsurface dipole mode and diagnostic analysis of dipole event in 1997/1998. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (2): 129~139
- [9] 闫晓勇, 张铭. 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响. 气候与环境研究, 2004, **9** (3): 435~444
- Yan Xiaoyong, Zhang Ming. A study of the Indian Ocean dipole influence on climate variations over East Asian monsoon region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 435~444
- [10] Dommenget D, Latif M. A cautionary note on the interpretation of EOFs. *J. Climate*, 2002, **15**: 216~225
- [11] Dommenget D, Latif M. Reply. *J. Climate*, 2003, **16**: 1094~1097
- [12] Behera S K, Rao S A, Saji H N, et al. Comments on "A cautionary note on the interpretation of EOFs." *J. Climate*, 2003, **16**: 1087~1093
- [13] Hastenrath S. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**: 735~738
- [14] Lar N-C, Nath M J. Coupled GCM simulation of atmosphere-ocean variability associated with zonally asymmetric SST changes in the tropical India Ocean. *J. Climate*, 2004, **17**: 245~265
- [15] 晏红明, 杨辉, 李崇银. 赤道印度洋海温偶极模气候影响的数值模拟研究. 海洋学报, 2007, 待刊
- Yan Hongming, Yang Hui, Li Chongyin. Numerical simulation of SST dipole mode in equatorial Indian Ocean influence on climate. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2007, in press
- [16] 晏红明, 肖子牛, 谢应齐. 近 50 年热带印度洋海温距平场的时空特征分析. 气候与环境研究, 2000, **5** (2): 180~188
- Yan Hongming, Xiao Ziniu, Xie Yingqi. The analysis of spatial and temporal characteristics of sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean during last 50 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (2): 180~188
- [17] 陈烈庭. 热带印度洋-太平洋海温纬向差异及其对亚洲夏季风的影响. 大气科学, 1988, 增刊: 142~148
- Chen Lieting. The difference between India Ocean and Pacific Ocean and its influence on Asian monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese). 1988, Suppl. 142~148