

热带太平洋-印度洋海温异常综合模及其影响

杨 辉 贾小龙 李崇银

(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; 中国科学院研究生院, 北京 100039; 解放军理工大学气象学院, 南京 211101. E-mail: yanghui@mail.iap.ac.cn)

摘要 已有研究表明, 由于大气瓦克环流和印度尼西亚灌穿流的影响, 太平洋和印度洋的海温异常既有紧密关系、又有各自的一些特点, 单独考虑太平洋的 ENSO 模并不能完全说明海温异常对气候的影响. 本文从统一综合考虑太平洋和印度洋海温异常(SSTA)的形势及特征出发, 提出了太平洋-印度洋海温异常综合模概念, 并进一步比较研究了各个异常模态的不同特征, 以及它们对中国气候和印度夏季降水的不同影响. 为进一步确认资料分析结果, 还用大气环流模式进行了数值模拟试验. 其结果清楚地表明, 必须考虑和研究太平洋-印度洋海温异常综合模及其影响, 从而为短期气候预测提供更好科学依据.

关键词 热带太平洋-印度洋海温异常 综合模 气候影响

海温异常对大气环流和气候的影响已成为大家十分关注的事情, 尤其是赤道太平洋海表温度(SST)的强异常(ENSO事件)的发生往往给全球不少地区造成严重的旱涝灾害, 更是国内外多年来研究的重要问题^[1~4]. 但是, ENSO虽然是年际气候变化的最强信号, 但它并非是引起气候异常的惟一原因. 例如在El Niño年印度地区并非都很干旱^[5,6], 中国东部地区也不是夏季降水就都偏少^[7]. 另一方面, 印度洋海温异常早已引起人们的注意^[8], 而几年前又发现印度洋海温偶极子的存在^[9,10], 其后的研究又进一步揭示了它的重要影响, 包括对中国气候的影响^[11~14]. 但是深入的研究表明, 印度洋偶极子与太平洋ENSO有着密切的联系^[15], 并且不少人已将赤道西太平洋与赤道东印度洋合在一起称之为“大暖池”^[16], 由于印度尼西亚灌穿流^[17,18]和大气瓦克环流^[15]的重要影响, 印度洋和太平洋海温的异常的确有紧密相关. ENSO是气候年际变化中的最强信号, 故一般来讲, 一些气候现象(包括中高纬的SSTA)都滞后赤道东太平洋的SSTA^[19,20]. 但已有资料分析表明^[15], 赤道太平洋的偶极子(ENSO)指数与赤道印度洋偶极子指数间的相关基本上是同时的, 没有明显滞后现象. 这是因为两支异常Walker环流的相互作用, 使得赤道海温的变化(响应)几乎同时. 因此本文的太平洋-印度洋海温异常综合模具有明确的物理意义, 即赤道太平洋和赤道印度洋海温异常的分布和变化都与Walker环流紧密相联, 而Walker环流有两个分支, 也就在赤道太平洋和赤道印度洋分别造成了各自的SSTA型, 但都可以视为“偶极子”. 为了搞清热带海洋的温度异常

对气候的影响规律, 本文将统一综合考虑太平洋和印度洋 SSTA 的形势及特征, 并分别讨论不同的海温异常综合型对中国气候的影响. 本文所用的资料为英国 Hadley 中心的月平均海表温度资料(1900~1999), 中国气象局 160 站降水月总量和气温月平均资料, 以及全球陆地月降水资料(PREC/L)(1951~2000).

1 热带太平洋-印度洋异常海温综合模

大家知道, El Niño(El Niño)或拉尼娜(La Niña)都是以赤道东太平洋的海温距平(SSTA)来定义的, 而实际上当赤道东太平洋有正(负)SSTA时, 赤道西太平洋往往有负(正)SSTA与之对应. 另一方面, 所谓印度洋偶极子是用赤道印度洋东西海温距平的差值来定义的, 表示海温距平的纬向热力对比. 虽然用了“偶极子”的称谓, 但并非数学意义上的“偶极子”(东正(负)、西负(正)的SSTA分布)^[15]. 考虑到太平洋ENSO模与印度洋偶极子的密切联系, 可以用分别标准化的两个海洋赤道地区东西海温差来定义综合模态的指数. 就SSTA而言, ENSO要比赤道印度洋SSTA强, 因为太平洋海盆要大. 但是就其对东亚地区的影响来看, 一系列数值模拟清楚表明^[21~23], 印度洋地区的SSTA的强迫作用还要强于赤道东太平洋的SSTA(ENSO). 因此我们在定义综合模指数时, 在太平洋和印度洋分别进行了SSTA的标准化. 这样, 他们就有其对比性, 而且这样的指数也有其数学物理基础, 基数有意义, 而变化的大小更有意义. 具体计算如下:

$$\begin{aligned}\nabla T_i &= T_1 - T_2, \\ \nabla T_p &= T_3 - T_4,\end{aligned}$$

其中, T_1 , T_2 , T_3 和 T_4 分别表示区域($50^{\circ}\text{E}\sim 65^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$), ($85^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$), ($130^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$)和($140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$)平均的月平均海表温度距平.

综合模的指数定义为

$$I_{com} = \nabla T_i + \nabla T_p,$$

上式 ∇T_i , ∇T_p 已分别进行了标准化处理.

在图 1 中分别给出了 I_{com} (太-印海温异常综合模指数)和 $\text{Ni}\tilde{\text{no}}_{3.4}$ 区的海温距平(亦可称其为 ENSO 指数)的时间变化, 可以看到, 虽然 I_{com} 和 ENSO 指数有着密切的关系, 但是 I_{com} 与 ENSO 指数也有不小的差异. 大部分情况是由于印度洋海温异常的引入使得 I_{com} 要强于(标准化)ENSO 指数, 也有情况是由于印度洋海温异常的引入而改变了 ENSO 指数的型式, 说明研究综合模及其指数 I_{com} 是很有意义的.

为了进一步说明综合模与单独太平洋 ENSO 模的差异, 分别就正位相和准常态两种类型来进行对比分析. 依据图 1 中给出的太平洋-印度洋海温异常模指数, 选取综合模正指数较大(≥ 3.8)的 1951, 1965, 1972, 1982, 1983, 1987 和 1997 年为正位相年的典型代表; 而指数振幅接近零线的 1952, 1956, 1960, 1967, 1968, 1979, 1980, 1981 和 1990 年为准常态年的典型代表. 为了与单独 ENSO 情况进行比较, 选取印度洋海温距平东西差较小(印度洋偶极子指数小)却有 El Niño 事件的 1951, 1953, 1957, 1963, 1965, 1969, 1976, 1986 和 1991 年为单独的 El Niño 年, 而以 $\text{Ni}\tilde{\text{no}}_{3.4}$ 区的海温距平接近零线的 1959, 1960, 1962, 1980, 1981 和 1990 年为太平洋海温准常态年的代表.

上述几种情况的合成海温距平的分布形势分别如图 2 所示. 综合模的准常态年要比 ENSO 模的准常态年能更好反映海温的准常态特征, 其在赤道附近海区 SSTA 都很小; 而综合模的正位相年与 ENSO 模的正位相年相比也有不少差异, 不仅在太平洋, 在印度洋也更好地反映了热带海表温度的东西差异. 它们再一次表明, 印度洋-太平洋异常综合模与太平洋 ENSO 模有明显不同, 提出综合模并对其研究是有意义的.

2 热带太平洋-印度洋异常海温综合模对中国夏季气候的影响

对应图 2 所示的四种情况, 分别就中国夏季的气候资料进行合成, 不难发现各种异常海温形势的气候影响是很不一样的. 由于海温距平有相当的持续性, 这里的分析结果将给中国夏季的气候预测提供一定的依据. 因观测资料的时间长度有限, 合成分析的个例数还不是很多, 但它们在一定程度上显示了异常海温形势对中国东部降水的重要影响. 图 3 分别给出了与图 2 中 4 种形势相对应的中国东部的夏季(6~8 月)降水量距平分布, 其主要特征分别是: 对应太平洋海温的准常态年, 中国华南和东南沿海地区明显多雨, 江南到云南一带少雨, 江淮和华北南部降水也偏多(图 3(a)); 对应太平洋-印度洋海温的准常态年, 长江以南都少雨, 而江淮流域到四川一带多雨, 华北和东北南部少雨(图 3(b)); 对应单独的 El Niño 年, 江淮流域和东北明显多雨, 而长江以南少雨(图 3(c)); 对应太平洋-印度洋海温异常模的正位相年,

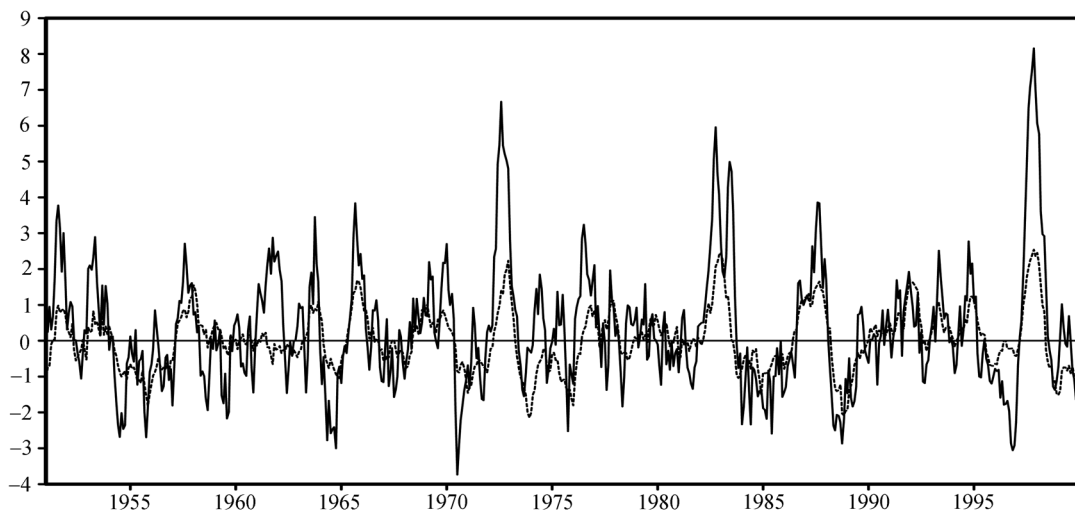


图 1 印度洋-太平洋异常海温综合模指数(实线)与 $\text{Ni}\tilde{\text{no}}_{3.4}$ 区的海温距平(虚线, 单位)的时间变化

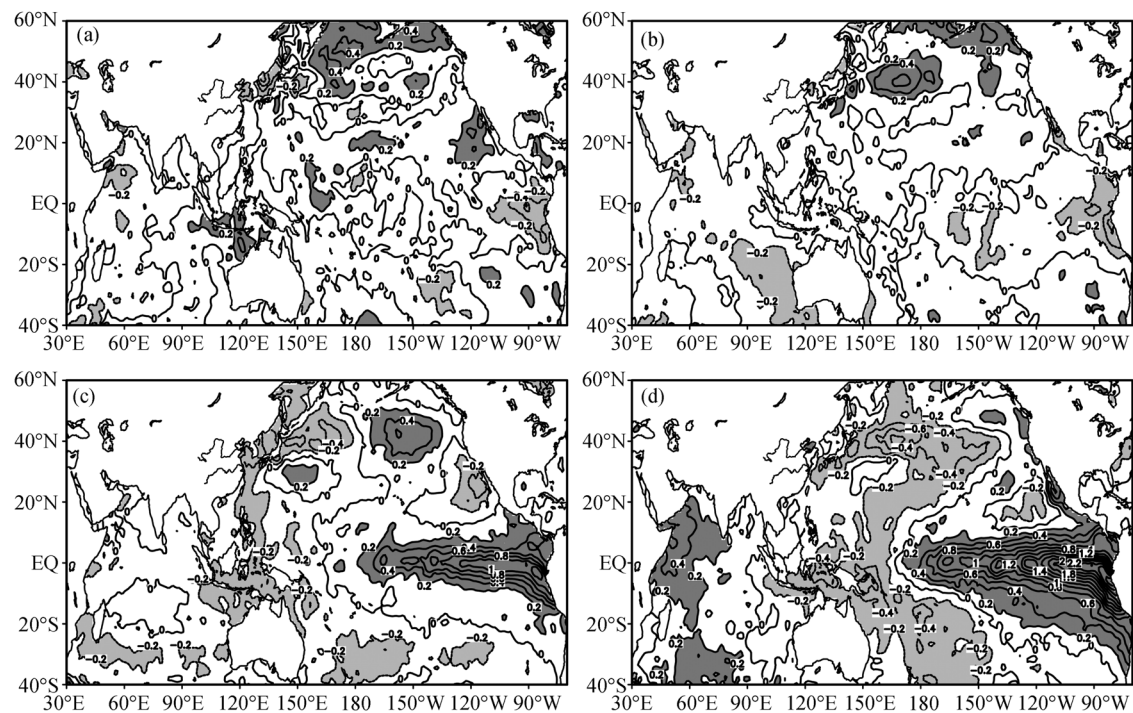


图 2 合成的海温距平()形势图

(a) 太平洋 ENSO 模的准常态年; (b) 太平洋-印度洋综合模的准常态年; (c) 太平洋 ENSO 模的正位相(El Niño)年; (d) 太平洋-印度洋综合模的正位相年

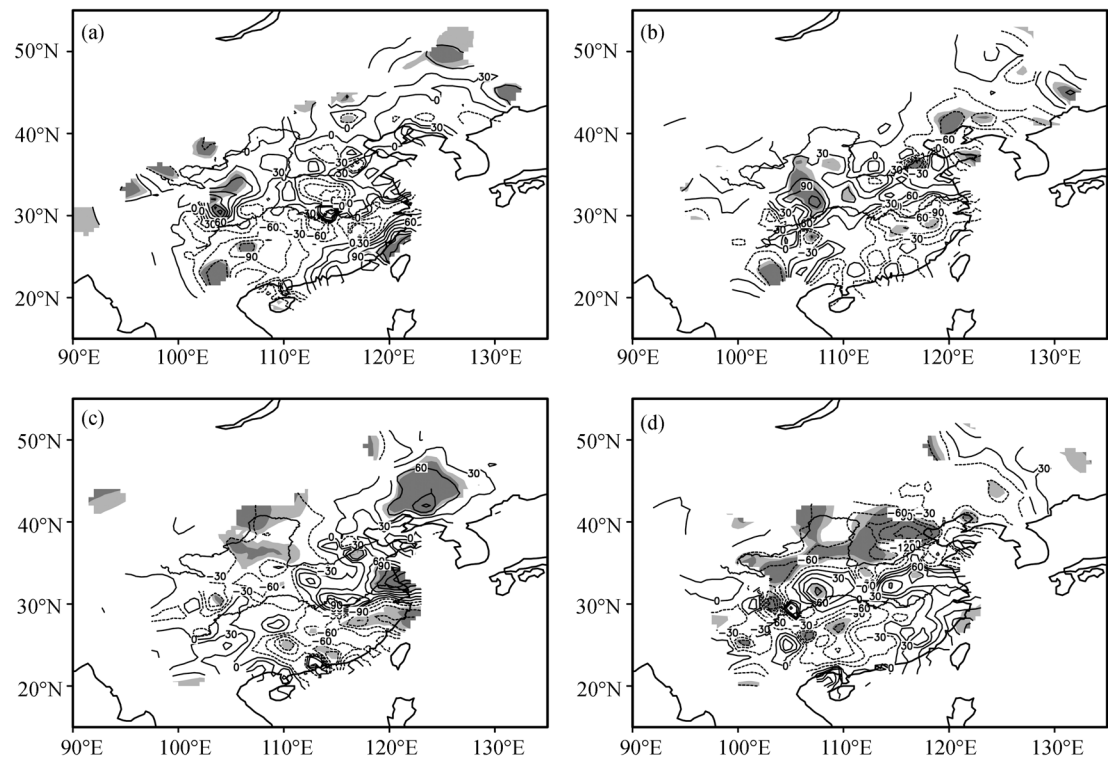


图 3 中国东部夏季(6~8 月)降水量距平(mm/JJA)分布

浅、深阴影区分别表示超过显著性水平 0.10, 0.05 的 t 检验的区域. (a) 太平洋 ENSO 模的准常态年; (b) 太平洋-印度洋综合模的准常态年; (c) 太平洋 ENSO 模正位相(El Niño)年; (d) 太平洋-印度洋综合模的正位相年

东南沿海和江淮到四川一带明显多雨,而华北和东北少雨(图 3(d)). 比较图 3(a)和(b),以及图 3(c)和(d),可以清楚看到,对于中国夏季降水来讲,单独太平洋海温异常的影响与太平洋-印度洋海温异常的综合影响是很不一样的.

类似地,在图 4 中分别给出了与图 2 中 4 种形势相对应的中国东部夏季地面气温距平的分布,其主要特征分别是:对应太平洋海温的准常态年,江淮流域有较明显的温度正距平(图 4(a));对应太平洋-印度洋海温的准常态年,江南地区有明显的温度正距平(图 4(b));对应单独 El Niño 年,主要是东北地区有明显温度负距平(图 4(c));对应太平洋-印度洋海温异常模的正位相年,长江中下游地区是温度负距平,而华北和东北南部为温度正距平(图 4(d)). 显然,单独的太平洋海温异常对中国东部夏季气温的影响也与太平洋-印度洋海温异常模的综合影响明显不同. 2003 年夏季中国江南出现了大范围持续酷暑,太平洋和印度洋的海温处于准常态年是一个重要原因^[24].

有关 El Niño 对中国夏季气候影响的研究表明,在 El Niño 年,中国江淮流域的降水偏多^[25,26],而中国东

北地区容易出现夏季低温和多雨^[27,28]. 本文有关单独 El Niño 情况的分析结果与已有研究结果基本一致,在一定程度上可以认为本节的有关结果是可信的.

3 印度半岛的夏季降水情况

尽管最近一些年印度夏季降水与 ENSO 的相关关系有些减弱,但总的来讲,印度夏季降水的异常仍是 ENSO 影响的典型例子. 引起印度夏季降水与 ENSO 相关关系减弱的原因之一,被认为是印度洋海温异常的影响,如果同时考虑太平洋和印度洋海温异常的作用,有可能使得我们提出的综合模与印度夏季降水的关系变得会比较好. 图 5 分别给出了对应单独 El Niño 年和对应太平洋-印度洋海温异常模的正位相年的印度夏季降水分布图. 对应单独 El Niño 年,印度中部多雨,而北部和西南部少雨(图 5(a));对应太平洋-印度洋海温异常模的正位相年,整个印度明显少雨(图 5(b)). 比较图 5(a)和(b),可以看到,单独 El Niño 的影响与太平洋-印度洋海温综合模正位相时的影响也是很不一样的,太平洋-印度洋海温综合模正位相时的影响将加大印度的干旱. 虽然在

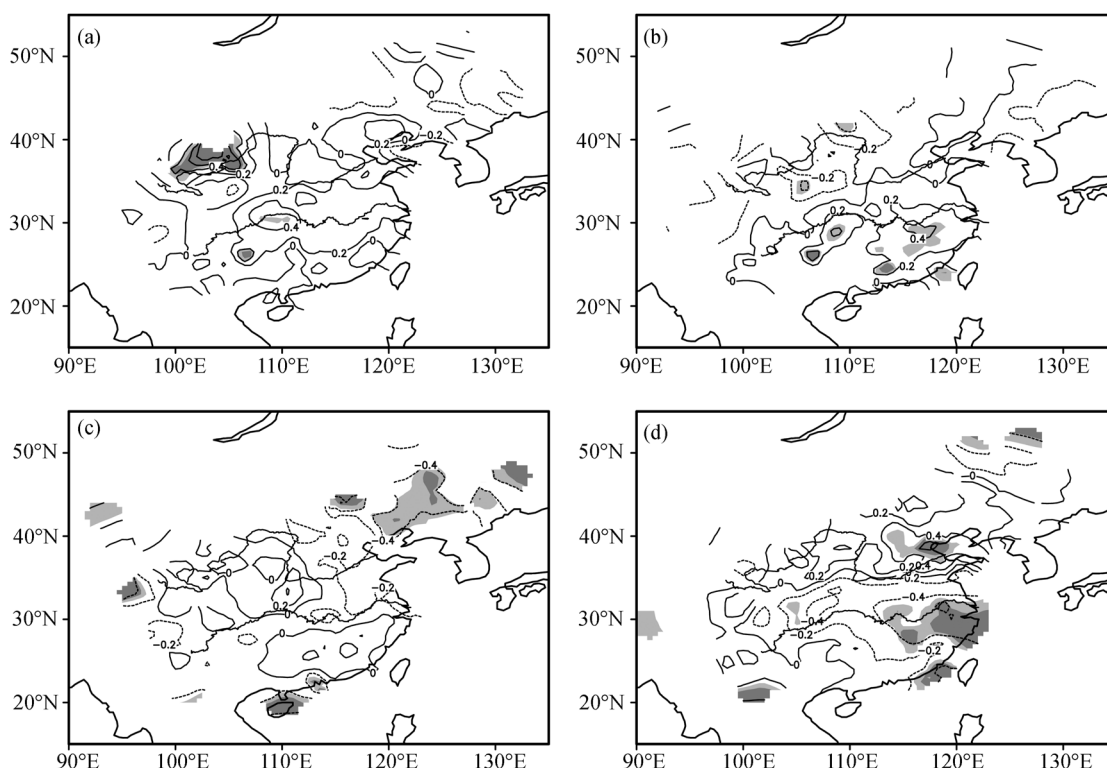


图 4 4 种形势相对应的中国东部夏季地面气温距平()分布

说明同图 3

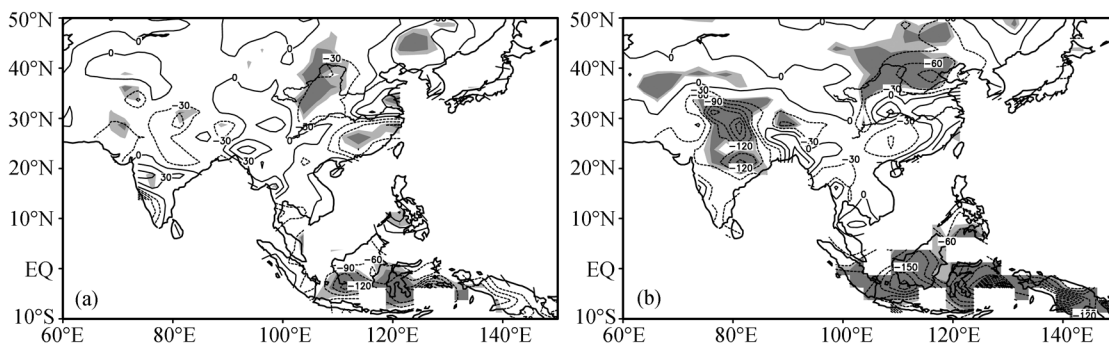


图 5 夏季全球陆地降水(PREC/L)异常(mm/JJA)分布

浅、深阴影区分别表示超过 90%、95%信度检验的区域。(a) 太平洋 ENSO 模正位相(El Niño)年; (b) 太平洋-印度洋综合模的正位相年

1983 年(图略)和 1997 年印度夏季平均降雨量为正常,部分地区还略为偏多^[29],但本文所选的 7 个个例中的其他 5 年的降水均偏少,说明在太平洋-印度洋海温综合模的正位相年,印度夏季降雨偏少仍是主要特征。因此,那种把 El Niño 年印度降水并不为负距平的原因归结印度洋偶极子的出现还值得商榷,近些年来 ENSO 和印度降水关系的减弱,更多的是由于其他因素的影响,包括大西洋的环流^[30]的影响。

4 数值模拟研究

以上的资料分析表明,太平洋-印度洋海温异常综合模与太平洋 ENSO 模及其影响有明显不同。数值模拟是一种很有效的研究方法,能孤立地研究海温异常对气候变化的影响。为了进一步揭示太平洋-印度洋海温异常综合模的气候效应,通过集成数值模拟进行研究。本文使用的 R42L9 模式,是由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(LASG)发展的一个全球大气环流谱模式。该模式的水平分辨率为 R42(即菱形截断,42 个波),垂直方向采用 σ 坐标系,有 9 层。模式动力框架独特,引入了一个参考大气,采用半隐式时间积分方案,时间步长为 15 min。该模式能较好地描述气候平均、季节环流平均及其变化^[31]。

本文共做了两个试验,即对照试验和敏感性试验。积分时间都从 1 月 1 日到 9 月 30 日。对照试验中海表温度为月平均气候值。敏感性试验为从模式积分的 4 月 16 日起将类似太平洋-印度洋海温异常综合模正位相的异常海温(图 2(d))放大 2 倍后(强迫范围为 15°S-15°N,40°E-75°W)加在气候平均的月海温上,再积分 5 个月。为了减少模式初始场和其他因素对模拟结果的影响,对照试验和敏感性试验都分别取了 7 个

不同的初始场进行积分,得到 7 个输出场,将 7 个输出场的平均作为对照试验的输出场(记为 C 场)和敏感性试验的输出场(记为 T 场)。这样由 T 场减去 C 场,可以得到热带太平洋-印度洋海温异常强迫时大气的异常响应场。

图 6 是在太平洋-印度洋综合模的正位相海温异常强迫下的降水距平场,可以看到,在印度半岛、中南半岛以及印度尼西亚一带存在明显负异常区,这与图 5(b)相比十分一致,而与图 5(a)的 ENSO 相比却有不同,说明数值模拟结果与观测相当一致。模拟得到的中国降水是由西南到东北有一正异常带,其中中心在四川-贵州一带以及北朝鲜地区,中国江淮和江南大部也多雨。与观测相比较,所模拟的中国降水有部分地区不一致,但大部分地区与观测结果基本相同。这可能是中国夏季降水的机理比较复杂,中高纬度的影响并不都为海温异常所控制。总体讲,本文的模拟结果与观测有比较好的一致性,进一步表明热带太平洋-印度洋海温异常对亚洲的气候有重要的影响,且不同于 ENSO 模的影响。

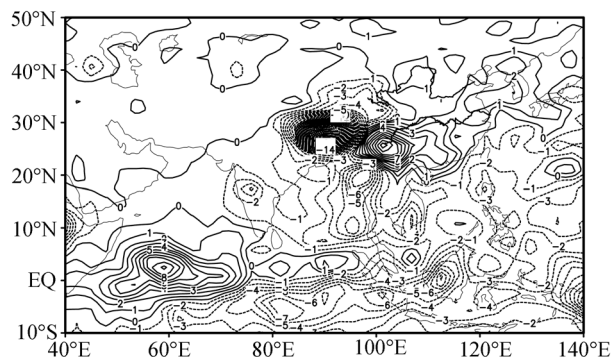


图 6 在太平洋-印度洋综合模的正位相海温异常强迫下的 6~8 月降水距平场(单位: mm/d)

5 结语

本文从统一综合考虑太平洋和印度洋海温(SST)的异常形势及特征出发,提出了太平洋-印度洋海温异常综合模概念,进而比较了各个异常模态的不同特征,以及它们对中国气候和印度夏季降水的影响.其结果清楚地表明:

() 综合模的准常态年要比 ENSO 模的准常态年能更好反映准常态特征,其在赤道附近海区 SSTA 都很小;而综合模的正位相年与 ENSO 模的正位相年相比也有不少差异,不仅在印度洋,在太平洋也更好地反映了热带海表温度的东西差异.

() 对于中国夏季降水和气温来讲,单独太平洋海温异常的影响与太平洋-印度洋海温异常的综合影响是很不一样的.分析和预测亚洲的气候变化,需要综合考虑太平洋和印度洋的海温异常形势,即太平洋-印度洋海温异常综合模.

() 仅就热带海温异常对印度洋降水的影响而论,太平洋-印度洋海温异常综合模的影响要比 El Niño 更加减少印度降水.那种将 ENSO 与印度降水关系近些年有所减弱的原因归结为赤道印度洋偶极子的出现不一定对,其他因素的影响可能更重要.

() 数值模拟得到了与资料分析大体一致的结果,进一步证明了太平洋-印度洋海温异常对亚洲气候有重要影响.

因此,我们应该更深入考虑和研究太平洋-印度洋海温异常综合模及其影响,从而为短期气候预测提供更好科学依据.

致谢 本研究受国家自然科学基金(批准号:40233033)、国家重点基础研究专项经费(批准号:2004CB418300)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:ZKXC3-SW-226)共同资助.

参 考 文 献

- Rasmusson E M, Carpenter T H. The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over Indian and Sri Lanka. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 517—528[DOI]
- Ropelewsk C F, Halpert M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1606—1626[DOI]
- 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: 21—32
- 李崇银. 气候动力学. 第二版. 北京: 气象出版社, 2000
- Kumar K K, Rajagopalan B, Cane M A. On the weakening relationship between the Indian monsoon and ENSO. *Science*, 1999, 284: 2156—2159[DOI]
- Torrence C, Webster P J. Interdecadal changes in ENSO-monsoon system. *J Climate*, 1999, 12: 2679—2690[DOI]
- 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科技出版社, 1992
- 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和中国南海海温与长江中下游降水量的相关分析. *大气科学*, 1985, 9: 336—342
- Saji N H, Goswami B N, Viayachandrom P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360—363
- Webster P T, Moore A M, Loschnig J P, et al. Coupled ocean-atmospheric dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, 1999, 401: 356—360[DOI]
- 王东晓, 吴国雄, 徐建军. 热带印度洋年代际海洋变率及动力学解释. *科学通报*, 1999, 44(12): 1226—1232
- Li C Y, Mu M Q. Influence of the Indian Ocean dipole on atmospheric circulation and climate. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 831—843
- 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区东西海温的偶极振荡与中国汛期降水的关系. *热带气象学报*, 2002, 18(4): 335—344
- 何金海, 张人禾, 谭言科, 等. 热带印度洋海温异常的变率特征分析. 见: 巢纪平, 李崇银, 陈英仪, 等编. ENSO 循环机理和预测研究. 北京: 气象出版社, 2003. 279—293
- 李崇银, 穆明权, 潘静. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常. *科学通报*, 2001, 46(20): 1747—1751
- Niiler P, Stevenson J. The heat budget of tropical ocean warm-water pools. *J Mar Res*, 1982, 40 (Suppl): 465—480
- Potemra J T, Lukas R, Mitchum G T. Large-scale estimation of transport from the Pacific to the Indian Ocean. *J Geophys Res*, 1997, 102: 27795—27812[DOI]
- Meyers G. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño – Southern Oscillation. *J Geophys Res*, 1996, 101(C5): 12255—12263[DOI]
- Pan Y H, Oort A H. Correlation analyses between sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific and the world ocean. *Clim Dyn*, 1990, 4: 191—205
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J Climate*, 2002, 15(16): 2205—2231[DOI]
- Shen X S, Kimoto M, Sumi A, et al. Simulation of the 1998 East Asian Summer Monsoon by the CCSR/NIES AGCM. *J Meteor Soc Japan*, 2001, 79(3): 741—757[DOI]
- Guo Y F, Zhao Y, Wang J. Numerical simulation of the relationships between the 1998 Yangtze River valley floods and SST anomalies. *Adv Atm Sci*, 2002, 19(3): 391—404
- Guo Y F, Wang J, Zhao Y. Numerical simulation of the 1999 Yangtze River valley heavy rainfall including sensitivity experiments with different anomalies. *Adv Atm Sci*, 2004, 19(3): 391—404
- 杨辉, 李崇银. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究. *气候与环境研究*, 2005, 10(1): 90—95
- 符淦斌, 腾星林. 中国夏季气候异常与 El Niño/南方涛动现象的关系. *大气科学*, 1988, 特刊: 133—141
- 龚道溢, 王绍武. ENSO 对中国四季降水的影响. *自然灾害学报*, 1998, 7: 44—52
- 刘育生, 智景和, 周珍华. 东北夏季气温的周期变化规律及低温的群发性. 见: 《东北夏季低温长期预报文集》编辑组编. 东北夏季低温长期预报文集. 北京: 气象出版社, 1983. 17—21
- 李崇银. El Niño 事件与中国东部气温异常. *热带气象*, 1989, 5: 210—219
- Bell G, Halpert M. Climate assessment for 1997. *Bell Am Meteor Soc*, 1998, 79: S1—S50
- Chang C P, Harr P, Ju J. Possible role of atlantic circulations on the weakening Indian monsoon rainfall-ENSO relationship. *J Climate*, 2001, 14: 2376—380[DOI]
- Wu T W, Liu P, Wang Z Z, et al. The Performance of Atmospheric Component Model R42L9 of GOALS/LASG. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(5): 726—742

(2006-02-14 收稿, 2006-03-30 接受)