

智海, 王盘兴, 俞永强, 等. 2009. 印度洋海温异常对南亚区域净初级生产力影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 33 (5): 936–949. Zhi Hai, Wang Panxing, Yu Yongqiang, et al. 2009. Simulation of influence of Indian Ocean sea surface temperature anomaly on the net primary production in South Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 936–949.

印度洋海温异常对南亚区域净初级生产力影响的数值模拟

智海^{1, 2} 王盘兴¹ 俞永强² 丹利³ 徐永福⁴ 郑伟鹏²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

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

3 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029

4 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所发展的全球海洋-大气-动态植被耦合气候模式 (GOALS-AVIM) 的模拟结果, 分析了印度洋海表温度 (SST) 变化及其与南亚陆面净初级生产力 (NPP) 的关系。模式连续运行 50 年, 取后 40 年结果分析。对模拟的印度洋海表温度距平 (SSTA) 的经验正交分解 (EOF) 进行分析, 发现第一特征向量在全区域表现为一致变化的趋势, 表明在春夏秋冬四季中印度洋海温都有一致增暖或降温的趋势, 同时赤道印度洋海温一致变化与赤道太平洋 Niño3 指数有滞后的正相关, 太平洋的 Niño3 指数变化超前印度洋海温一致变化 8 个月左右。第二特征向量则表现为热带印度洋 SST 存在着东西方向振荡的偶极子型振荡特征, 而且偶极子强度有明显季节变化, 并有很明显的季节相位锁定。印度洋 SSTA 的一致变化的异常趋势与南亚地区的季节和年平均 NPP 变化表现出很强的同期和滞后相关性; 与南亚地区年平均 NPP 相关性较高的印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态正负相位对应着不同的 850 hPa 流场、500 hPa 高度场以及南亚地区降水场的异常。分析表明, 印度洋及南亚地区的夏季风加强或减弱导致受南亚地区降水异常, 并使该地区 NPP 产生异常的增加或减少。

关键词 耦合模式 动态植被模式 气候变化 南亚 净初级生产力

文章编号 1006-9895 (2009) 05-0936-14

中图分类号 P732

文献标识码 A

Simulation of Influence of Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly on the Net Primary Production in South Asia

ZHI Hai^{1, 2}, WANG Panxing¹, YU Yongqiang², DAN Li³, XU Yongfu⁴, and ZHENG Weipeng²

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

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

3 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2008-06-06, 2009-04-28 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP07114, 国家自然科学基金资助项目 40605025、40675049, 中国科学院知识创新项目 KZCX2-YW-214, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506

作者简介 智海, 男, 1966 年出生, 博士生, 主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。E-mail: zhihai@mail.iap.ac.cn

Abstract Using the global ocean-atmosphere-land coupled model (GOALS-AVIM) developed at the Institute of Atmospheric Physics (IAP) of the Chinese Academy of Sciences, the Indian Ocean sea surface temperature (SST) abnormality and its relations with the net primary production (NPP) at the land surface in South Asia are analyzed. The model is integrated for 50 years, and the integration results for the later 40 years are used in this work. Results show that there are four dominant steady patterns of annual mean Indian Ocean sea surface temperature anomaly (SSTA) in the Empirical Orthogonal Function (EOF). The first eigenvector exhibits a trend of simultaneous changes in the whole area, which demonstrates that the Indian Ocean SST in the four seasons possesses a consistent increase or decrease. Meanwhile, the trend is consistent with the NPP change at the land surface in South Asia. A correlation analysis shows that the consistent warming or cooling in the equatorial Indian Ocean has a positive lag correlation with the Niño3 index of the equatorial Pacific Ocean, and the lag time is eight months. The second eigenvector shows that the tropical Indian Ocean SST displays a characteristic of the Indian Ocean Dipole (IOD) oscillation with two steady shapes of west-high - east-low and east-high - west-low. The dipole has an obvious seasonal variation, and its seasonal phase locking is also obvious. The abnormal trend of consistent changes in the Indian Ocean SSTA is highly related to the changes in seasonal and annual mean NPP at the land surface in South Asia with lag or contemporary correlation. The positive and negative phases of the first EOF mode of the summer Indian Ocean SST that has a high correlation with annual mean NPP in South Asia correspond to distinct anomalies of 850-hPa wind field, 500-hPa geopotential height field and precipitation field in South Asia. The analysis indicates that the increase or decrease of summer monsoon in the Indian Ocean and South Asia causes the precipitation abnormality in South Asia, which results in the increase or decrease of NPP abnormality in this region.

Key words coupled model, atmosphere-vegetation interaction model, climate change, South Asia, net primary production

1 引言

自从 Webster et al. (1999) 和 Saji et al. (1999) 指出赤道印度洋存在偶极子模态 (IOD) 以来, 印度洋 SST 异常备受关注, 许多学者对此进行了深入的研究 (Yu and Rienecker, 2000; 李崇银等, 2001; 巢纪平等, 2003; 谭言科等, 2003)。Saji and Yamagata (2003) 最新研究发现, 印度洋海温的变化存在气候趋势、年代际变化、海盆尺度的年际振荡和偶极子等多种异常信号, 他们的结果再次表明印度洋 IOD 的存在, 而且是与 ENSO 相互独立的信号。Iizuka et al. (2000) 利用高分辨率海气耦合模式成功模拟了 IOD, 揭示的特征与 Saji et al. (1999) 一致, 指出受海洋动力过程强烈影响的热带海气相互作用对全球的气候变化至关重要。

特别是在近年来, 国内外已经开始密切关注全球变化条件下地表植被与气候相互作用的物理机制, 全球植被覆盖的空间分布与全球气候条件密切相关, 气候的变化会引起植被分布格局和植被生长发育的改变 (Braswell et al., 1997; Schimel et al., 2000)。目前, 大气环流模式和陆面模式对研究植被和气候的相互作用起到了重要的作用 (孙岚等,

2000; 季劲钧等, 2005), 但是在耦合模式中缺少海洋分量模式, 海洋对大气的强迫作用取为定值, 不能真实反映外强迫对大气的作用。NCAR Community Climate System Model (CCSM) 气候变率工作组利用大气模式比较计划 (AMIP) 类型的积分中, 用一个耦合的 CCSM 模式所计算的海温, 来再次单独地强迫 Community Climate Model (CCM) 的大气模式分量。其目的就是回答这样一个问题: 用给定的 SST 强迫大气模式所进行的 AMIP 型的积分, 是否也能产生耦合模式积分中的气候变率特征 (Blackmon et al., 2000)。本文要利用海洋-大气-陆面全耦合模式对植被因子 [例如: Net Primary Production (NPP)、Leaf Area Index (LAI) 等] 与气候因子的关系和大尺度陆面植被物理场的空间分布特征进行研究, 这样可以进一步揭示不同空间和时间的植被特征与气候特征的相互关系。特别是 SST 变化对区域植被的影响, 本文就这方面进行深入的探讨, 并揭示 NPP 与热带海洋 SSTA 异常变化的关系。

中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 从 1993 年开始研制、发展了一个包括海洋、大气、海冰和

陆面相互作用的全球耦合环流模式,称为 GOALS (General Ocean-Atmosphere-Land System) (Zhang and Liang, 1989; Zhang et al., 1996; Wu et al., 1996; Liu et al., 1996, 1998; Liu and Wu, 1997), 实现了一个完整的海洋-大气-陆面耦合系统模式 (吴国雄等, 1997)。Ji (1995) 发展了一个植被-大气相互作用模式 AVIM (Atmosphere-Vegetation Interaction Model), 该陆面过程实现了生态系统和气候系统之间的双向耦合功能, AVIM 中植被的变化由植被生长模式计算, 因而随气候而改变, 实现了大气与植被的相互作用过程 (季劲钧和余莉, 1999)。目前, AVIM 已经与 LASG L9R15 大气环流模式完成了物理过程的耦合 (Dan et al., 2002) 和生物过程的耦合 (Dan et al., 2005), 实现了动态植被与大气相互作用的双向耦合。

本文把 AVIM 与 IAP/LASG 的二十层海洋模式 (OGCM) 耦合成全球耦合模式 (GOALS-AVIM), 利用模拟结果评估模式在植被-大气双向作用下印度洋 SST 季节、年际变化特征的模拟能力, 更为重要的是研究印度洋 SST 与南亚 NPP 的关系, 指出印度洋对南亚生态系统的重要影响。第 2 节介绍模式实验和相关数据; 第 3 节利用模式结果分析了印度洋 SST 年际变化的时空特征; 第 4 节分析了印度洋 SSTA 异常变化与南亚大陆 NPP 同期和滞后相关关系, 第 5 节为相关结论。

2 模式和资料介绍简介

GOALS-AVIM 中的大气子模式 (AGCM) 为 15 个截断波, 垂直分层 9 层, 分辨率为 $7.5^{\circ} \times 4.5^{\circ}$; AVIM 分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 模式包括 3 层土壤和 1 层植被, 主要包括物理交换子模块、植物生长子模块和物理参数转换子模块 (Ji, 1995; 季劲钧和胡玉春, 1989)。由于大气模式分辨率较低, 所以采用了垂直方向单位网格嵌套耦合的办法 (Dan et al., 2002)。

耦合模式中的 OGCM 是一个基于原始方程的全球海洋环流模式, 水平分辨率为 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$, 垂直方向不等距分为 20 层。模式的海陆分布及海底地形是根据 Gates and Nelson (1975) 的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 资料产生的。模式在垂直方向采用了 η 坐标, 详细的物理过程和参数参阅吴国雄等 (1997)。

大气模式提供辐射量、降水、近地层温度、相

对湿度和风速等变量以驱动陆面过程模式。而陆面过程模式所计算的地表面变量则被用于计算大气模式中的表面通量和辐射收支。海洋和大气的耦合方案在预估-校正的月通量距平耦合方案 (Zhang et al., 1992) 的基础上加以改进和推广, 提出了修正的日通量距平耦合方案, 同时将开洋面上的耦合方案直接推广到冰面上, 实现了冰-海-气之间的完全耦合 (俞永强和张学洪, 1998)。

本文利用各分模式独立运行的平衡态作为耦合模式的初始场, 连续运行 50 年, 对模式后 40 年输出的结果进行分析。利用输出的表面气温、海平面气压和降水率、植被净初级生产量等, 评估 GOALS-AVIM 模式对印度洋 SST 异常对南亚区域 NPP 影响的模拟。为了验证模式的模拟结果, 采用世界气象组织气候研究中心的降水观测资料 [CRU/URE TS2. 1 (1901~2001 年)] (Mitchell and Jones, 2005), 海温资料为 Reynolds and Smith (1994) 月平均全球 SST 资料及 WOA01 全球海温资料 (Stephens et al., 2002), 全球植被的年平均初级生产力 (NPP) 的观测值为 Max Planck Institute for Meteorology (MPI) 提供的全球 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的观测资料 (Hagemann, 2002)。

3 印度洋海温年际变化的时空特征模拟

Tourre and White (1995, 1997) 分析了印度洋和西太平洋地区 SST 的变化, 结果表明它们主要表现为 ENSO 的特征。Murtugudde and Busalacchi (1999) 发现印度洋 SSTA 的 EOF 分析的第一模态揭示的是与 ENSO 相关的增暖。晏红明和肖子牛 (2000) 对热带印度洋 SSTA 场的时空特征进行了分析, 发现年平均 SSTA 的 EOF 第二特征向量的时间系数的变化同 ENSO 有较密切关系。Saji et al. (1999) 对 1958 至 1998 年的资料进行了分析, 并利用赤道印度洋西部 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{E}$) 和东部 ($0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 SSTA 之差定义 IOD 指数, 根据这个指数发现它具有很强的季节位相锁定。Behera et al. (2000) 利用海洋模式研究了热带印度洋 SST 的年际变化, 揭示了热带印度洋 SST 具有很大的年际变化特征。

为了评估 GOALS-AVIM 对印度洋 SST 异常的时空分布特征模拟, 对模式模拟的热带印度洋区

域 (30°S~30°N, 20°E~120°E) SSTA 40 年的季节平均的结果进行 EOF 分解, 对季节平均的特征向量场进行分析。计算了各季节主分量数累计方差贡献, 表明印度洋 SSTA 季节平均的 EOF 分解前 8 个特征分量都达到了 70% 以上, 秋季达到了 80% 以上。印度洋各个季节 SSTA 的 EOF 前二个特征向量场占累计方差贡献的 40% 左右 (秋季为 50%)。

各个季节 EOF 的第一特征向量场所反映的分布特征比较一致, 全区为正, 不同季节正值的强度和范围有所差别, 表明印度洋 SST 的变化趋势虽然比较一致, 但各个季节的海区变化强度是有差异的。秋季 SSTA 的 EOF 正值强度和范围比其它季节的大 (图 1a), 最大正值中心在南印度洋, 秋季的 SST 变化幅度也比其它季节大, 而且在南印度洋 SST 变化比北印度洋更明显。第二特征向量场占总方差的 10% 以上, 反映了各个季节不同海域 SST 变化趋势不同的空间分布特征, 除了春季以外, 秋季、夏季和冬季的第二特征向量场的分布特征比较一致, 都表现为东西印度洋 SST 相反的变化趋势, 即东西向的 SST 差异, 尤以秋季最为明显 (图 1b), 南北半球热带印度洋 SST 变化的东西差异显著不同, 热带南印度洋的东西差异较显著。在秋冬季, 第二特征向量场的分布与夏季比较, 开始发生了一些变化, 赤道附近的印度洋东部开始出现负值区, 赤道印度洋中部的正值区开始向西和向南扩展, 与此相应, 南印度洋的负值区范围缩小, 表明在南亚夏季风向冬季风的转换过程中, 热带印度洋 SST 分布开始由夏季型差异向冬季型差异转变, 其 SST 变化首先是从赤道附近的印度洋东部开始的。从春季第二特征向量场的分布可以清楚看到反映南北向 SST 差异的冬季型分布特征, 表明了

春季南北印度洋相反的 SST 变化趋势。

为了分析印度洋 SST 和赤道太平洋 SST 年际变化的关系, 智海等 (2009) 利用 GOALS-AVIM 分析了印度洋 40 年月平均 SSTA 的 EOF 第一模态时间系数与太平洋 Niño3 指数的相关关系, 得出太平洋 Niño3 指数和印度洋 SST 一致性变化存在超前的相关关系, 相关系数通过检验为超前 8 个月, 表明太平洋 Niño3 的变化周期超前印度洋 SST 一致性变化的周期 8 个月左右。相比观测资料的相关分析, 太平洋 Niño3 指数的变化超前印度洋 SST 一致性周期变化约 4~6 个月, 实况资料正相关的超前时间周期比模式模拟小, 但相关性比模拟高。造成这个差异的原因可能是模式模拟的赤道太平洋 ENSO 信号较弱, 导致印度洋 SSTA 的响应减弱, 从而使超前周期加长、相关性减弱。

这种相关关系的存在不是偶然的, 一方面, 它们之间可以通过海洋性的洋流发生相互作用 (Meyers, 1996), 另一方面热带地区的大气纬向环流通过海气相互作用也可以使这两个海盆的海温发生联系。吴国雄和孟文 (1998) 指出赤道印度洋和东太平洋 SST 年际变化之间显著的正相关是由沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空 Walker 环流之间显著的齿轮式耦合造成的。李崇银和穆明权 (2001) 也指出: 赤道印度洋 SST 和赤道太平洋 SST 相互关系的主要纽带是赤道地区大气纬向 (Walker) 环流, 通过海-气相互作用赤道太平洋 SST 对热带印度洋 SST 变化起了重要作用。

通过对印度洋月平均 SSTA 的 EOF 分析, 结果表明, 除了整个海盆尺度的一致变化外, 还存在 IOD 结构的变化, 而且赤道印度洋 IOD 强度在各个月并不一样, 图 2a 给出了模式印度洋 SSTA 的

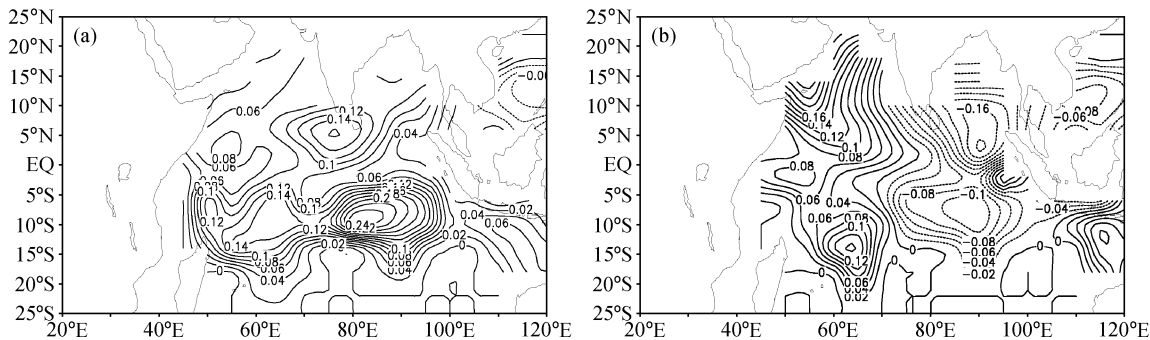


图 1 模式模拟的秋季印度洋 SSTA 的 EOF 分解的前 2 个主要分量的向量场: (a) 第一模态; (b) 第二模态
Fig. 1 The EOF's vector fields of the Indian Ocean autumn SST anomaly (SSTA) from the coupled model simulation; (a) The first vector field; (b) the second vector field

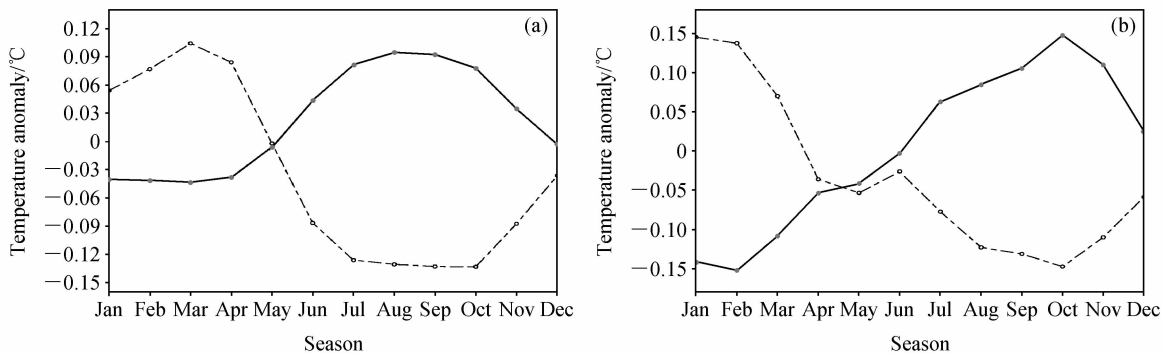


图2 IOD强度的季节变化(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) GOALS-AVIM 模拟; (b) WOA01 观测资料。实、虚线: 正、负位相年合成

Fig. 2 The seasonal change of Indian Ocean Dipole (IOD) intensity: (a) GOALS-AVIM simulation; (b) WOA01 observation. Solid (broken) line: composite for positive (negative) phase years

EOF 第一模态正位相年和负位相年合成的 IOD 强度季节变化特征, 可以看到赤道印度洋 IOD 的强度在 1~5 月偏弱, 在 7~12 月偏强, 表现出很大的季节相位锁定。与观测资料的分析结果(图 2b)吻合得较好, 只是模式的最强月出现在 8 月, 最弱月出现在 3 月。而观测资料的最强月出现在 10 月, 最弱月出现在 2 月。

4 印度洋 SSTA 异常变化与南亚大陆 NPP 同期和滞后相关分析

南亚地区三面濒临印度洋, 印度洋表面热力状况对南亚季风的活动有重要作用。在北半球夏半年, 强劲的西南季风将印度洋上空大量的水汽输送到南亚和东亚, 并在那里形成充沛的季风降水。研究南亚地区 NPP 的变化与印度洋 SST 异常变化的关系, 对于进一步探索区域地区植被分布与气候变化的相互作用具有一定实际意义。

分析表明, 赤道印度洋 SST 异常与亚洲南部流场、青藏高原和西太平洋副高异常都有明显关系(晏红明等, 2000), 印度洋 SST 年际变化通过亚洲季风, 把 SST 变化的信号向亚洲大陆传播, 影响着亚洲的气候变化。温刚和符淙斌(2000)就植被生长对气候响应的多年平均状况进行了分析, 发现在多数时段, 亚洲植被生长与降水的季节变化存在显著相关关系。在此基础上, 张佳华等(2002)分析了全球尺度的 LAI 与降水及温度的总体和距平相关, 用以揭示全球尺度的植被季节和年际变化对气候变化的响应特征, 结果发现, 全球尺度植被与气候因子的相关关系在季节和年际变化中随不同的生

态系统差异明显。

GOALS-AVIM 由于耦合了 AVIM, 具有了陆面植被 NPP 和海洋物理场 SST 同为模式输出量的特点, 为上述陆面植被 NPP 和海洋 SST 区域相关的分析提供了条件。一般比较常用的是年平均 NPP, 而不是月平均 NPP。图 3 是全球植被的年平均 NPP 的观测值和模拟。观测的年平均 NPP 最高的地区分布在赤道附近及热带雨林地区, 它们主要位于赤道附近的非洲、中南半岛和印度尼西亚一带以及南美地区, 其值可达 $1100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。低值区分布在青藏高原及西亚沙漠区。模式的模拟结果在北半球比观测值偏低, 其中偏低区域主要位于青藏高原、中国的东部和北美洲南部等地区。

误差主要出现在北半球, 出现误差的原因主要是耦合模式在这些地区气温模拟的偏低造成了植被生产力模拟值的下降。加之, 对于模式中的青藏高原雪盖的物理过程不完善使得青藏高原模拟的 NPP 结果偏低(丹利, 2003)。在总体上, 耦合模式可以合理地模拟全球植被净初级生产力的分布。

智海(2008)在对 GOALS-AVIM 评估的基础上, 利用 AVIM 的双向特点分析了全球 NPP 分布与气候场的相关关系, 结果显示 NPP 分布与全球 SST、降水 and 气温有很好的区域相关关系, SST 通过影响区域的降水和气温间接影响着 NPP。在对全球 SST 和 NPP 的奇异向量分解(SVD)分析中发现赤道太平洋和热带印度洋是影响 NPP 的关键区域, 其中赤道太平洋 SST 的年际变化对东亚 NPP、热带印度洋 SST 与南亚 NPP 表现出很好的相关性, 而且东亚夏季 NPP 的年际变化与赤道太

平洋 Niño3.4 有同期正相关的对应关系, 而且赤道太平洋 SST 的变化通过影响东亚地区的降水和温度, 间接地影响东亚地区的 NPP, 并分析了东亚地区 NPP 对当地水热条件的响应。下面就南亚 NPP 与热带印度洋 SST 的变化关系进行近一步的分析。

4.1 SSTA 异常与 NPP 同期相关

尽管上面分析中印度洋 SST 季节变化的第一特征向量表现为全区一致的变化趋势, 但值得注意的是, 南印度洋 SST 变化比北印度洋明显, 各个季节 SST 变化强度也是有差异的。秋冬季期间印度洋 SST 的变化较大, 春夏季期间印度洋 SST 变化相对较小。对模拟结果做进一步分析, 发现具有代表性的秋季印度洋 SSTA 的 EOF 第一特征向量时间序列与模拟的南亚同期 NPP 相关最为显著, 借此分析秋季南亚 NPP 对印度洋 SST 一致变化的同期响应关系。从图 4 看到, 在南亚大部分主要为正相关, 通过信度检验的区域占南亚地区的大部分区域 (样本为 40, 显著水平 $\alpha=0.05$ 的相关系数的临界值为 0.23), 表明南亚地区 NPP 年际变化与印度洋 SST 的一致变化有很强的正相关性, 即随着印度洋区域 SST 的升高 (降低), 南亚区域 NPP 表现出增加 (减少) 的趋势。第一特征向量场所反映的不同季节印度洋 SST 分布特征表明, 南亚季风虽然主要由不同季节海陆热力差异所引起, 但这一海洋的热力差异的异常变化, 通过海气耦合作用, 对于南亚季风的加强或减弱的影响是很大的。表明海气界面热通量异常的交换对热带印度洋 SSTA 模式的形成和演变起着重要的作用, 垂直输送作用是热带印度洋 SST 异常变化影响亚洲大气环流场异常发生和演变的主要物理机制 (李东辉等, 2005)。

4.2 SSTA 异常与 NPP 滞后相关分析

由于 NPP 物理量的特殊性 (年平均量是逐月的累加量), 本节借助于 GOALS-AVIM 的模拟结果, 通过 EOF 分析解释印度洋 SSTA 异常与南亚年平均 NPP 的变化关系。南亚年平均 NPP 与赤道印度洋 SST 的各季节 EOF 的最大相关为当年年平均夏季印度洋 SSTA 的第一特征向量场时间变化与南亚来年年际平均 NPP 的相关, 通过了 90% 信度检验。从印度洋夏季 SSTA 的 EOF 第一特征向量场的时间系数对应的正位相和负位相的 850 hPa 年平均秋季异常流场, 可以看到亚洲季风区有着不同的流场异常 (图 5a、b)。对应正位相, 赤道印度

洋地区有异常东南风, 印度有异常西风, 孟加拉湾到南海一带有异常偏西风。因此, 正位相偶极子将对应着较强的南海夏季风, 印度夏季风也较强; 对应负位相, 赤道印度洋为西风异常, 南海和中南半岛地区为异常偏南风, 印度半岛异常偏北风明显, 印度半岛夏季风偏弱。因此, 赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态对亚洲夏季风的影响也是明显的。

已有一些研究表明南亚高压的异常对东亚夏季风的活动有一定影响 (Li and Mu, 2001; 陶诗言等, 2001)。西太平洋副热带高压是东亚夏季风系统的重要成员之一, 也是夏季影响东亚地区气候异常的重要系统 (喻世华和杨维武, 1991; 廖海清等, 2004), 南亚高压强弱实际上也反映了亚洲夏季风强弱 (余丹丹等, 2007)。图 6 给出了赤道印度洋 SST 的 EOF 分解对应的正、负相位的 500 hPa 异常位势高度分布, 从中可以看到一个强的负值中心正位于青藏高原上空, 表明赤道印度洋 SST 的变化与南亚高压的强度存在明显的负相关。对应赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 的第一模态正位相, 南亚高压偏弱; 而对应负位相, 南亚高压偏强, 但位置偏西。可以看到印度洋夏季 SST 异常与太平洋副高有明显关系, 对应正相位, 在 $25^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 纬度的太平洋上有一负相关区, 西太平洋副高偏弱; 而对于负位相, 西太平洋副高偏强, 在东亚大陆上空为正相关, 说明对应于赤道印度洋 SST 偶极子的正 (负) 位相, 东亚大陆有异常高空脊 (槽) 活动。

与 NPP 变化紧密联系的是降水等, 印度洋 SST 异常通过亚洲夏季风和高空环流场异常导致南亚地区气候发生变化, 直接造成南亚的降水异常, 从而影响南亚地区 NPP 变化。同样, 给出印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态正负相位对应的南亚地区的降水异常场。图 7 给出了赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 分解对应的正负相位降水异常分布。对应正相位, 位于南亚印度半岛的降水偏强, 为正距平, 降水增加; 对应负相位, 位于南亚印度半岛的降水偏弱, 为负距平, 降水减弱。降水与 NPP 具有较高的相关性, 也是直接造成 NPP 增加或减少的主要气候因子 (Dan et al., 2007)。由于南亚印度半岛的降水正负相位的异常分布, 导致了南亚印度半岛的年平均 NPP 变化与印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态时间分布滞后正相关。图 8 为赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 分解对应的正负相位的

NPP 异常分布, 可以看到对应正相位 NPP 的异常分布为南亚半岛为正距平, NPP 体现出增加的趋

势; 对应负相位 NPP 的异常分布为南亚半岛为负距平, NPP 体现出减少的趋势。

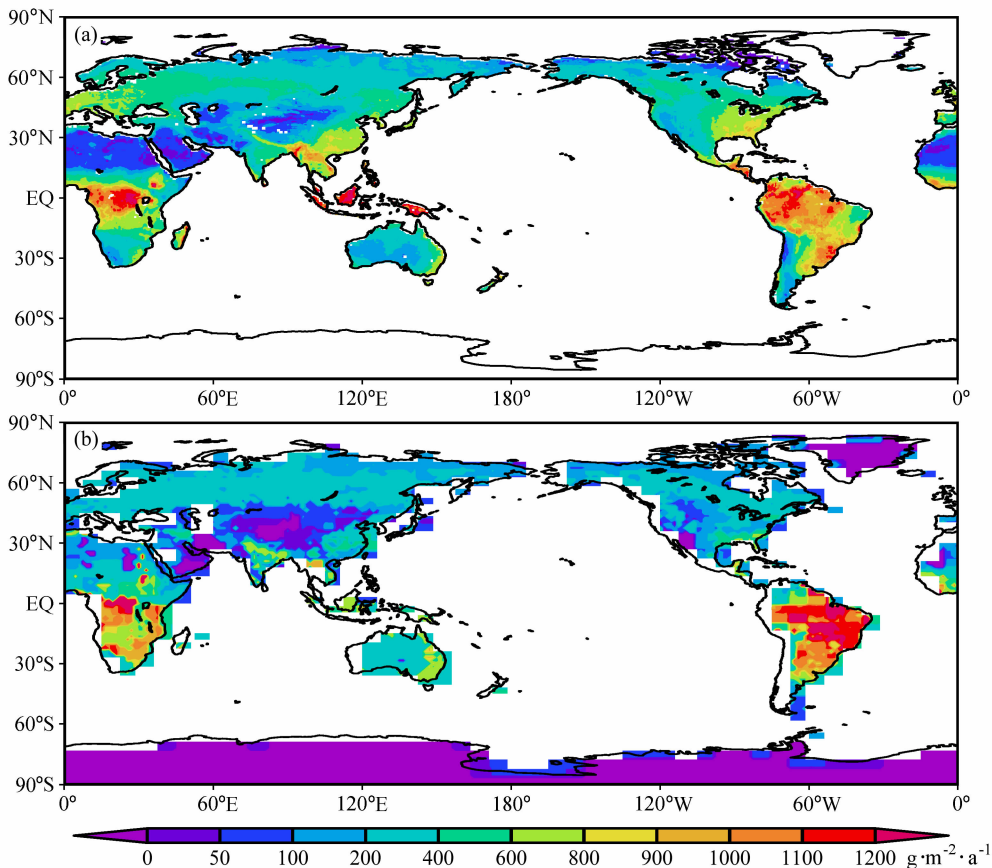


图 3 年平均 NPP (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); (a) 观测资料; (b) 耦合模式

Fig. 3 Global annual mean of the net primary production (NPP): (a) Observational data; (b) GOALS-AVIM simulation

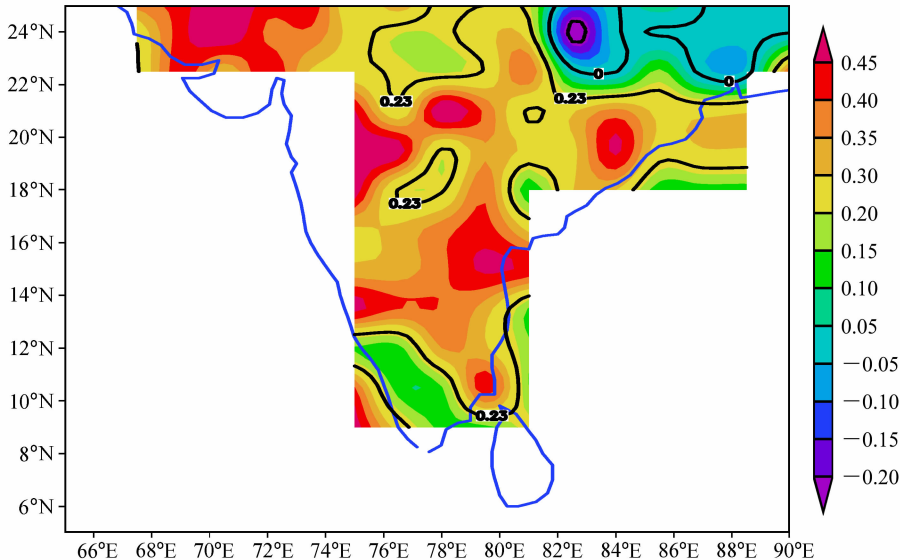


图 4 南亚地区 NPP 与秋季印度洋 SST 的 EOF 第一特征向量的时间系数的相关分布

Fig. 4 Correlation between NPP in South Asia and temporal coefficient of the first EOF eigenvector of the Indian Ocean SST in autumn

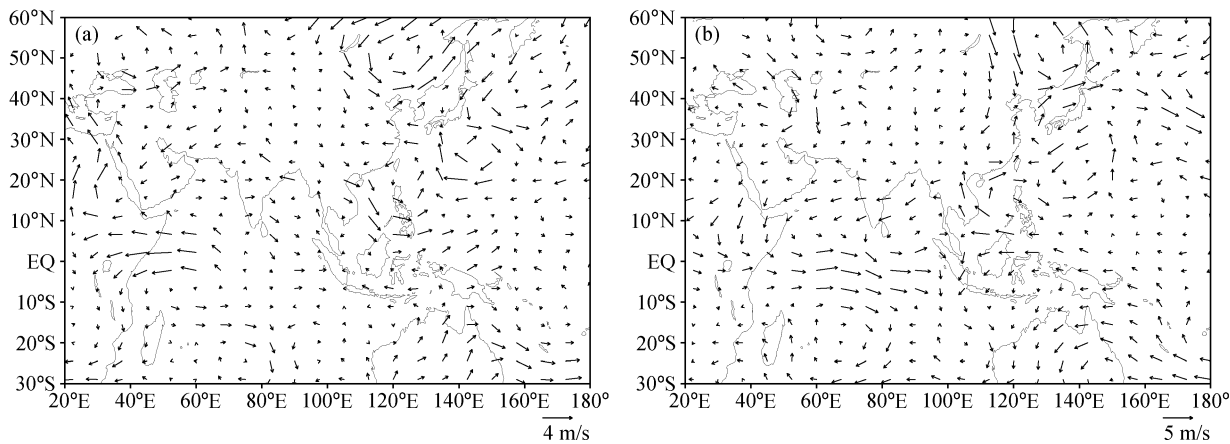


图 5 赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态的 (a) 正、(b) 负位相对应的亚洲南部地区夏季 850 hPa 异常风场形势

Fig. 5 The summer abnormal wind fields at 850 hPa in South Asia corresponding to (a) the positive phase and (b) the negative phase of the first EOF mode of the summer equatorial Indian Ocean SST

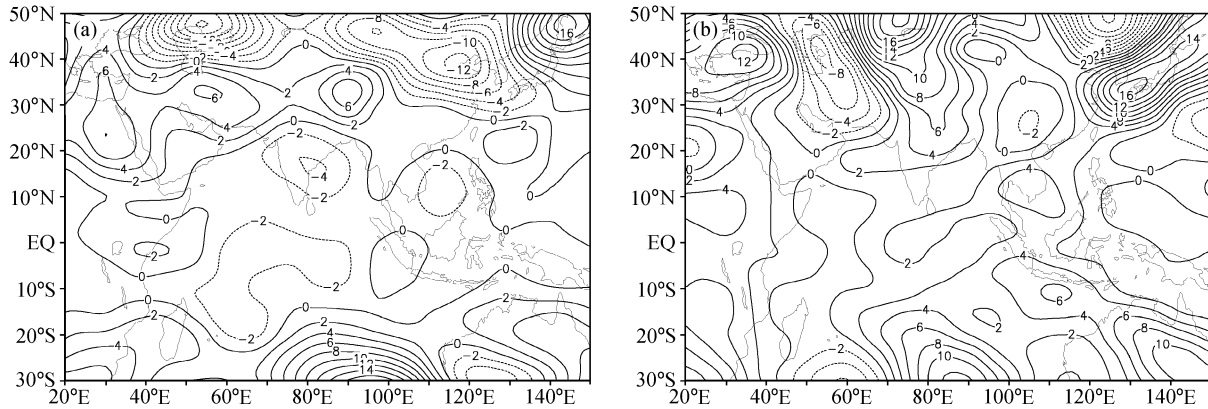


图 6 赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 的第一模态的 (a) 正、(b) 负位相对应的亚洲南部地区夏季 500 hPa 高度场异常形势 (单位: gpm)

Fig. 6 The summer abnormal geopotential height (gpm) fields at 500 hPa in South Asia corresponding to (a) the positive phase and (b) the negative phase of the first EOF mode of the summer equatorial Indian Ocean SST

综上所述，与南亚地区来年年平均 NPP 相关性较高的印度洋当年夏季 SSTA 的 EOF 第一模态正负相位对应着不同的 850 hPa 流场、500 hPa 高度场、以及南亚大陆的降水场，可以认为在 SST 异常分布的作用下，对南亚的气候产生了影响。对于这作用的机理，晏红明和李崇银 (2007) 提出了赤道印度洋纬向海温梯度模的概念，指出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，不仅加强或减弱了印度洋-太平洋海温梯度引起的大范围大气辐合和辐散，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。引起降水和风场异常主要与 SST 异常变化有关，也就是对应正相位的 SST 异常场，使印

度洋及南亚地区的印度夏季风加强，导致受印度洋夏季风影响的南亚地区水汽和热量异常北上，同时，相应使南亚高压偏弱且位置偏西，西太平洋高压减弱，从南亚到东亚出现了高空槽，也造成南亚的地面气温异常增加，导致南亚降水增加。对于亚热带，NPP 严重依赖水汽和地面气温 (Dan et al., 2007)，使 NPP 产生了正的异常增加。对于负相位的印度洋 SST 的第一模态，为负的一致性，对应 850 hPa 异常环流场南亚地区的夏季风减弱，印度半岛上的偏东风增强，造成南亚高压和西太平洋高压正异常，成高压脊。使南亚地区的地面气温降低、降水出现负距平，导致南亚 NPP 减少。

对于上述模拟的赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 分解的正负相位对应 NPP 异常分布与气候场的对

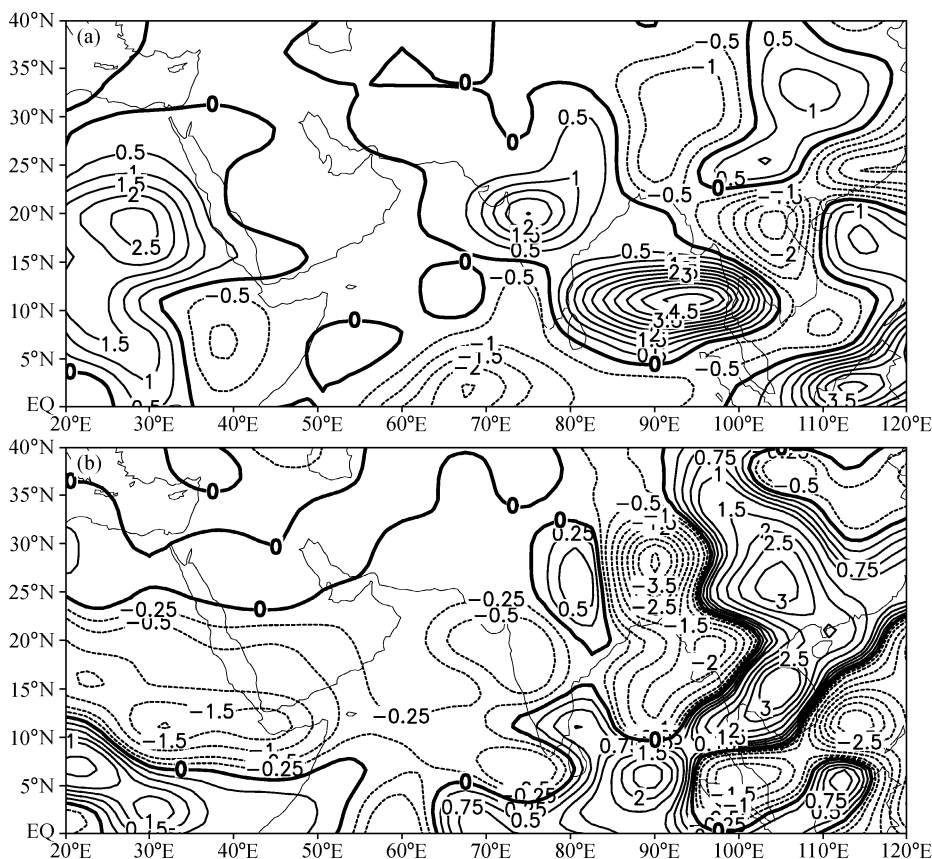


图 7 模式模拟的赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 的第一模态的 (a) 正、(b) 负位相对应的亚洲南部地区夏季降水异常场 (单位: mm/d)

Fig. 7 The summer abnormal precipitation (mm/d) fields in South Asia corresponding to (a) the positive phase and (b) the negative phase of the first EOF mode of the summer equatorial Indian Ocean SST

应关系, 可以通过利用实测资料得到验证。图 9 为 Reynolds and Smith (1994) 对热带印度洋 50 年 SST 月平均观测资料 EOF 分解的特征向量场, 得到的第一和第二特征向量场, 前两个特征向量的方差贡献分别为 25.4% 和 11.5%。第一个特征向量在整个热带印度洋均为正值, 而且大值区主要集中在热带印度洋 $10^{\circ}\text{N} \sim 10^{\circ}\text{S}$ 之间; 第二个特征向量的符号具有东西相反的特征, 在热带印度洋表现为西正东负, 西部的正值分布比较均匀, 大的负值区主要集中在热带东南印度洋。这个分析结果说明, 热带印度洋 SSTA 的变化以整个海盆尺度的同号变化 (整体一致型) 为主, 其次是西部与东南部符号相反的东西差异型 (偶极型)。

将实况资料与模式结果的 EOF 分析对比。模拟得到的第一特征向量的空间分布在热带印度洋大部分海区为正, 但不同的是代表一致的正异常变化的距平值偏大。第二个特征向量的空间分布在热带印度洋表现为西正东负的特点, 但与实况资料的

EOF 对比, 耦合模式得到的第二特征向量负值范围偏大, 位置偏北。模拟得到的第一个特征向量的方差贡献偏大, 而第二个特征向量的方差贡献偏小, 表明模式对热带印度洋 SSTA 整体一致性变化的模拟偏强, 对 SSTA 的偶极性变化模拟偏弱。GOALS-AVIM 能够模拟出热带印度洋 SSTA 气候变化的整体一致性和偶极性的特征。

为了进一步评估耦合模式的上述正确性, 对实测资料的印度洋夏季 SST 的 EOF 第一特征向量的时间系数正相位及负相位对应的降水场进行合成分析, 利用 CRU/UEA TS2.1 降水资料分析其正负相位对应的降水异常场, 图 10 为正负相位对应的降水率异常场分布。对应正相位, 为南亚地区存在着降水正距平; 相反, 对应负相位, 在南亚地区分布着降水率的负距平区, 说明上述模式模拟出了南亚地区 NPP 和气候场的对应关系。不同点在于, 观测资料分析出的降水异常场的距平绝对值大于模式异常场的距平绝对值, 也说明模式对气候变化导

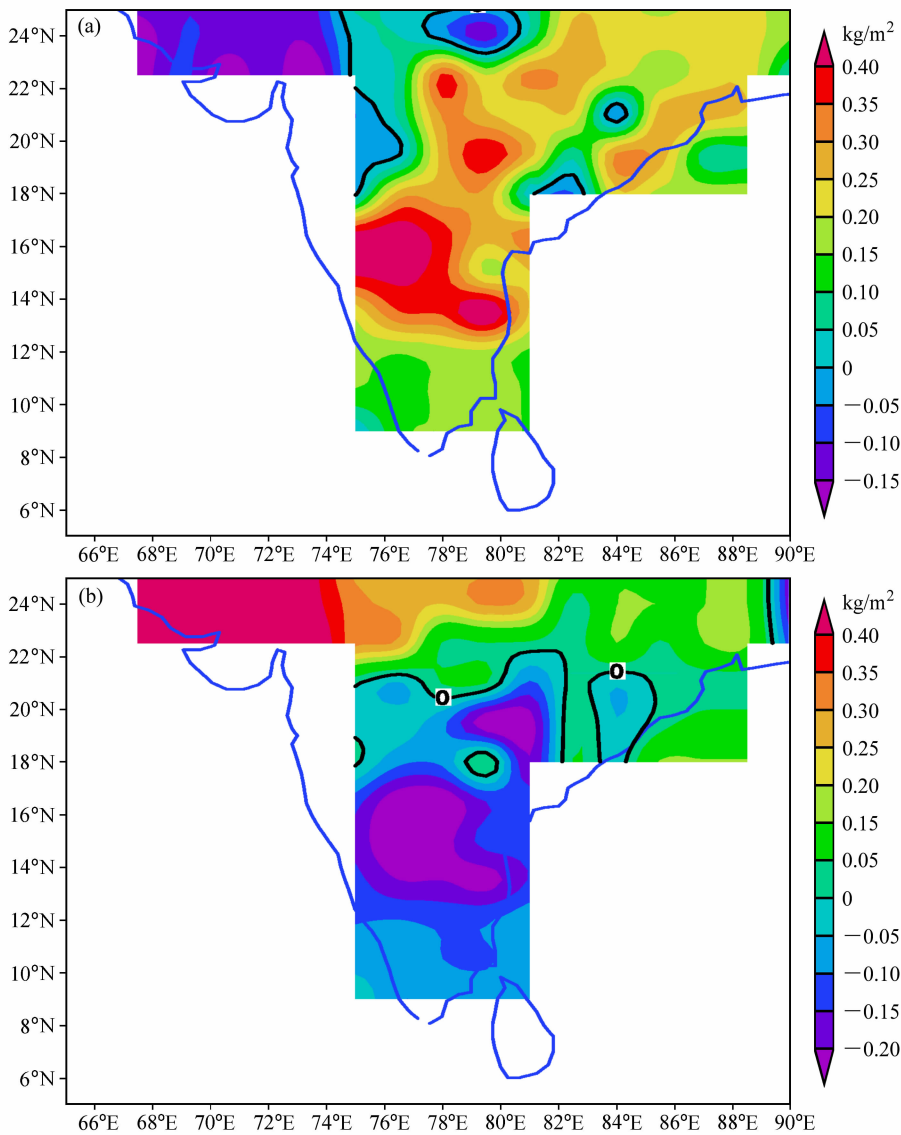


图 8 赤道印度洋夏季 SST 的 EOF 的第一模态的 (a) 正、(b) 负位相对应的亚洲南部地区夏季 NPP 异常场形势 (单位: kg/m^2)

Fig. 8 The summer abnormal NPP (kg/m^2) fields in South Asia corresponding to (a) the positive phase and (b) the negative phase of the first EOF mode of the summer equatorial Indian Ocean SST

致相关物理场异常的敏感性不如观测资料。

5 结论

本文利用 GOALS-AVIM 研究了热带印度洋 SSTA 异常结构,在此基础上探讨了印度洋 SST 与南亚 NPP 的关系及其联系机理,以此对 GOALS-AVIM 的性能进行检验。得到以下结论:

(1) 印度洋 SST 季节变化的第一特征向量全区表现为一致变化的趋势,它表明在春夏秋冬四季中印度洋 SST 都有增暖或变冷趋势,但各个季节的变化是有差异的,秋季最为显著。从第二特征向

量场所反映的不同季节印度洋东西、南北向差异的 SST 分布特征。表明南亚季风主要由不同季节海陆热力差异所引起,印度洋 SST 异常变化对于南亚季风的加强或减弱有很大的影响。

(2) 利用模式的模拟结果分析印度洋 SSTA 的振荡特征,可以再现观测资料的气候特征:① 偶极子有明显的季节变化,在 9~11 月最强,而在 1~4 月最弱,而且存在季节锁相。② 将赤道太平洋的区域 SST 变化与印度洋 SST 的增暖进行相关分析,表明赤道印度洋 SST 一致增暖与赤道太平洋 SST 变化有滞后的正相关,因此印度洋的 SST 变

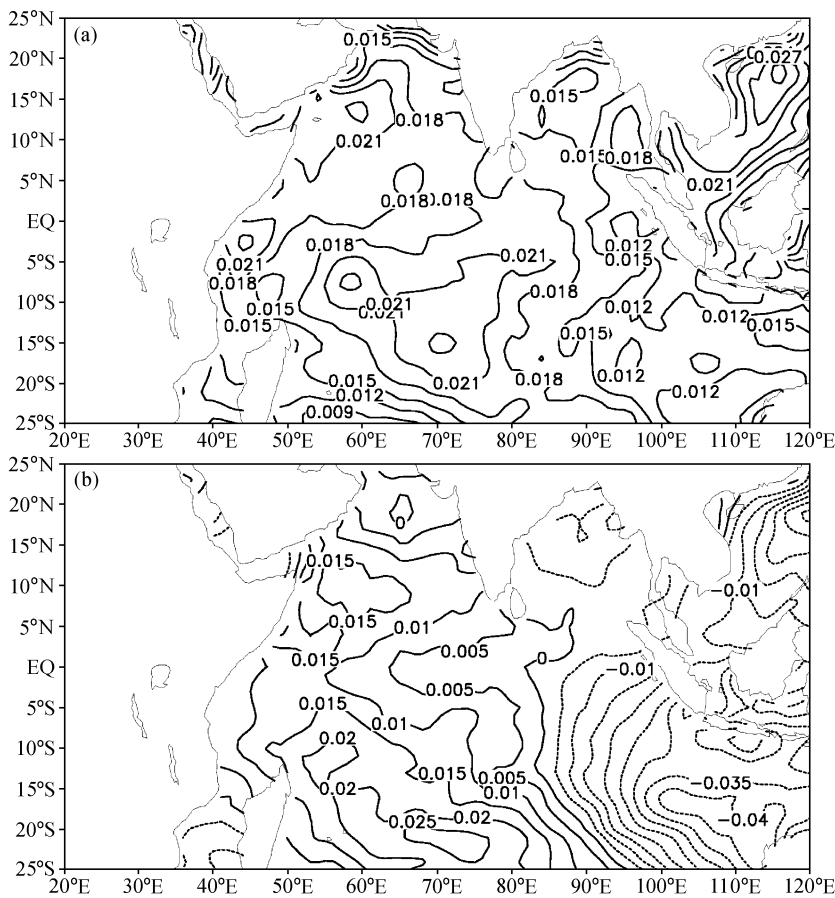


图 9 月平均全球海温 (SST) 资料的印度洋夏季 SSTA 的 EOF 分解的 (a) 第一、(b) 第二特征向量场[引自 Reynolds and Smith (1994)]
Fig. 9 The (a) first and (b) second main EOF eigenvector fields of the Indian Ocean SSTA in summer from the Reynolds observational data (Reynolds and Smith, 1994)

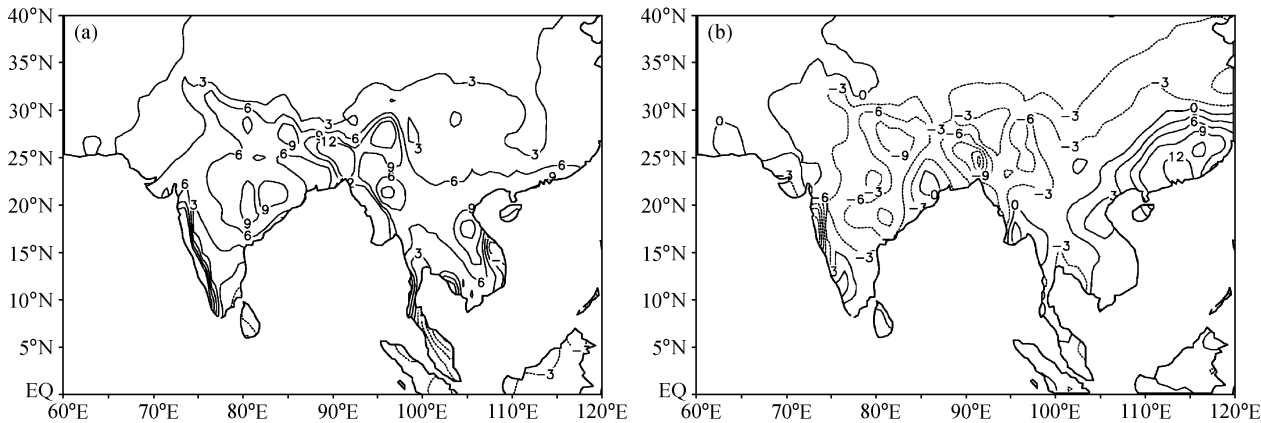


图 10 CRU/UEA TS2.1 降水资料的赤道印度洋夏季海温 EOF 的第一模态的 (a) 正、(b) 负位相对应的亚洲南部地区夏季降水异常场形势 (单位: mm/d)
Fig. 10 The summer abnormal precipitation fields (mm/d) in South Asia from CRU/UEA TS2.1 data corresponding to (a) the positive phase and (b) the negative phase of the first EOF mode of the summer equatorial Indian Ocean SST

化与 ENSO 有相关关系。

(3) 利用具有代表性的印度洋秋季 SST 的

EOF 第一特征向量的时间序列与南亚同期的 NPP 做相关分析, 在南亚大部分主要为正相关, 通过信

度检验的区域占南亚地区的大部分区域, 表明南亚地区秋季 NPP 的年际变化与印度洋秋季 SST 的一致变化有很强的同期正相关性, 即随着印度洋区域 SST 的升高(降低), 南亚区域的 NPP 表现出同期增加(减少)的趋势。

(4) 与南亚地区年平均 NPP 滞后相关性较高的印度洋夏季 SST 的 EOF 第一模态的正负相位对应不同的 850 hPa 流场、500 hPa 高度场、及南亚地区的降水场异常, 对应着来年南亚 NPP 的异常。

(5) 模式模拟的全球 NPP 年平均气候态在北半球小于实测资料, 导致年际变率较小, 使得耦合模式各分量模式之间的年际信号传递不是很敏感, 温跃层附近温度梯度较弱, 导致 SST 的年际变化偏弱, 这也验证了以往的研究结果(俞永强等, 2001)。

致谢 感谢审稿专家认真细致地指导。

参考文献 (References)

- Behara S K, Salvekar P S, Yamagata T. 2000. Simulation of interannual SST variability in the tropical Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 13 (19): 3487 - 3499.
- Blackmon M, Boville B, Bryan F, et al. 2000. Community climate system model plan (2000 - 2005) [R]. The CCSM Scientific Steering Committee, 47pp.
- Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. 1997. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. *Science*, 278: 870 - 872.
- 巢纪平, 袁绍宇, 蔡怡. 2003. 热带印度洋的大尺度海气相互作用事件 [J]. *气象学报*, 61 (2): 251 - 255. Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Cai Yi. 2003. Large-scale air-sea interaction in the tropical Indian Ocean [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (2): 251 - 256.
- Dan Li, Ji Jinjun, Li Yunpeng. 2002. Climate simulations based on a different-grid nested and coupled model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (3): 487 - 499.
- 丹利. 2003. 大气和生物圈双向耦合模式中的多尺度变化模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 192pp. Dan Li. 2003. Simulation of multi-scale variation in the two-way interaction model between biosphere and atmosphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 192pp.
- Dan Li, Ji Jinjun, Zhang Peiqun. 2005. The soil moisture of China in a high resolution climate-vegetation model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (5): 720 - 729.
- Dan L, Ji J J, He Y. 2007. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D02S90, doi: 10.1029/2006JD007721.
- Gates W L, Nelson A B. 1975. A new (revised) tabulation of the Scripps topography on a 1 degree global grid. Part II: Ocean depths [R]. Rep. R-1277-1-ARPS, The Rand Cooperation, Santa Monica Calif, CA, 132pp.
- Hagemann S. 2002. An improved land surface parameter dataset for global and regional climate models [R]. Max Planck Inst. Meteorol. (MPI) Rep. 336, 21pp.
- Iizuka S, Matsuura T, Yamagata T. 2000. The Indian Ocean SST dipole simulated in a coupled general circulation model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (20): 3369 - 3372.
- Ji J J. 1995. A climate vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *J. Biogeography*, 22: 445 - 451.
- 季劲均, 胡玉春. 1989. 陆面过程模式的敏感性试验. *大气科学*, 13 (3): 265 - 272. Ji Jinjun, Hu Yuchun. 1989. Sensitivity testings of the land surface model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 13 (3): 265 - 272.
- 季劲均, 余莉. 1999. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究 [J]. *大气科学*, 23 (4): 439 - 448. Ji Jinjun, Yu Li. 1999. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (4): 439 - 448.
- 季劲均, 黄玫, 刘青. 2005. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究 [J]. *气象学报*, 63 (3): 257 - 266. Ji Jinjun, Huang Mei, Liu Qing. 2005. Modeling studies of response mechanism of steppe productivity to climate change in middle latitude semiarid regions in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (3): 257 - 266.
- 李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子振荡及其气候影响 [J]. *大气科学*, 25 (4): 433 - 443. Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (4): 433 - 443.
- 李崇银, 穆明权, 潘静. 2001. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常 [J]. *科学通报*, 46 (20): 1747 - 1751. Li Chongyin, Mu Mingquan, Pan Jing. 2001. Indian Ocean temperature dipole and SSTa in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 46 (20): 1747 - 1751.
- Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The influence of the Indian Ocean dipole on atmospheric circulation and climate [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (5): 831 - 843.
- 李东辉, 张铭, 张瑰, 等. 2005. 热带印度洋偶极子发生和演变机制的数值研究 [J]. *海洋科学进展*, 23 (2): 135 - 143. Li Donghui, Zhang Ming, Zhang Gui, et al. 2005. The study of the occurrence and evolution mechanism of the tropical Indian Ocean di-

- pole [J]. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 23 (2): 135–143.
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. *地球物理学报*, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47 (1): 10–18.
- Liu Hui, Zhang Xuehong, Wu Guoxiong. 1996. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 13 (2): 133–146.
- Liu Hui, Wu Guoxiong. 1997. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14 (3): 289–308.
- Liu Hui, Zhang Xuehong, Wu Guoxiong. 1998. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 15 (3): 410–423.
- Meyers G. 1996. Variation of Indonesian throughflow and the El Nino-Southern Oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (C5): 12255–12263.
- Mitchell T, Jones P. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. *International Journal of Climatology*, 25: 693–712.
- Murtugudde R, Busalacchi A J. 1999. Interannual variability of the dynamics and thermodynamics of the tropical Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 12 (8): 2300–2326.
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation [J]. *J. Climate*, 7: 929–948.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360–363.
- Saji N P, Yamagata T. 2003. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean dipole mode events: COADS observations [J]. *J. Climate*, 16: 2735–2751.
- Schimel D, Melillo J, Tian H, et al. 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States [J]. *Nature*, 287: 2004–2006.
- Stephens C, Antonov J I, Boyer T P, et al. 2002. *World Ocean Atlas 2001, Vol. 1: Temperature* [M]. Levitus S. NOAA Atlas NESDIS 49, U. S. Government Printing Office, Wash., D. C., 167 pp.
- 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬. 2000. 陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15AGCM 耦合及其模式性能 [J]. *气象学报*, 58 (2): 179–193. Sun Lan, Wu Guoxiong, Sun Shufen. 2000. Numerical simulations of effects of land surface processes on climate: Implementing of SSiB in IAP/LASG AGCM L9R15 and its performance [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (2): 179–193.
- 谭言科, 张人禾, 何金海. 2003. 热带印度洋海温的年际异常及其海气耦合特征 [J]. *大气科学*, 27 (1): 53–66. Tan Yanke, Zhang Renhe, He Jinhai. 2003. Features of the interannual variation of sea surface temperature anomalies and the air-sea interaction in tropical Indian Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (1): 53–66.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 2001. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动 [J]. *气象学报*, 59 (6): 747–758. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 2001. An observational study on the behavior of subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (6): 747–758.
- Tourre Y M, White W B. 1995. ENSO signals in global upper-ocean temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (6): 1317–1332.
- Tourre Y M, White W B. 1997. Evolution of the ENSO signal over the Indo-Pacific domain [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 27 (5): 683–696.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–1998 [J]. *Nature*, 401: 356–360.
- 温刚, 符淙斌. 2000. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的尺度特征: 多年平均结果 [J]. *大气科学*, 24 (5): 676–682. Wen Gang, Fu Congbin. 2000. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: Multi-year average results [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (5): 676–682.
- Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yucheng, et al. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 13 (1): 1–18.
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. 1997. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究 [J]. *应用气象学报*, 8 (增刊): 15–28. Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. 1997. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study [J]. *Quart. J. Appl. Meteorol* (in Chinese), 8 (Suppl.): 15–28.
- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I: 资料分析. *大气科学*, 22 (4): 470–480. Wu Guoxiong, Meng Wen. 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 470–480.
- 晏红明, 李崇银. 2007. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响 [J]. *大气科学*, 31 (1): 64–76. Yan Hongming, Li Chongyin. 2007. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its influence on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 64–76.
- 晏红明, 肖子牛. 2000a. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究 [J]. *热带气象学报*, 16 (1): 18–27. Yan

- Hongming, Xiao Ziniu. 2000. The numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on climatic variations over Asian monsoon region [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 16 (1): 18–27.
- 晏红明, 肖子牛, 谢应齐. 2000b. 近 50 年热带印度洋海温距平场的时空特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 2000, 5 (2): 180–188.
- Yan Hongming, Xiao Ziniu, Xie Yingqi. 2000. The analysis of spatial and temporal characteristics of sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean during last 50 years [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 5 (2): 180–188.
- 余丹丹, 张韧, 洪梅, 等. 2007. 亚洲夏季风系统成员与西太平洋副高的相关特征分析 [J]. *热带气象学报*, 23 (1): 78–84.
- Yu Dandan, Zhang Ren, Hong Mei, et al. 2007. A characteristic correlation analysis between the Asia summer monsoon memberships and west Pacific subtropical high [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 23 (1): 78–84.
- Yu L S, Rienecker M M. 2000. Indian ocean warming of 1997–1998 [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (C7): 16923–16939.
- 喻世华, 杨维武. 1991. 副热带季风环流圈的特征及其与东亚夏季环流的关系 [J]. *应用气象学报*, 2 (3): 242–247.
- Yu Shihua, Yang Weiwu. 1991. The features of the subtropical monsoon circulation cell and its relationship with summer circulation over East-Asia [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2 (3): 242–247.
- 俞永强, 张学洪. 1998. 一个修正的海气通量距平耦合方案 [J]. *科学通报*, 43 (8): 866–870.
- Yu Yongqiang, Zhang Xuehong. 1998. A modified monthly flux anomaly scheme for coupling an AGCM and an OGCM [J]. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 43 (8): 866–870.
- 俞永强, Izard A, 郭裕福, 等. 2001. IAP/LASG 海洋环流模式对风应力的响应 [J]. *大气科学*, 25 (6): 721–739.
- Yu Yongqiang, Izard A, Zhang Xuehong, et al. 2001. A response of IAP/LASG oceanic general circulation model to the observed wind stress [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (6): 721–739.
- 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2002. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. *地球物理学报*, 45 (5): 631–637.
- Zhang Jiahua, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. 2002. Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 45 (5): 631–637.
- Zhang Xuehong, Liang Xinzong. 1989. A numerical world ocean general circulation model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6 (1), 43–61.
- Zhang Xuehong, Bao Ning, Yu Rucong, et al. 1992. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica), 16 (2): 129–144.
- Zhang X H, Chen K M, Jin X Z, et al. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 55 (1–4): 65–87.
- 智海. 2008. (GOALS-AVIM) 耦合模式基本气候态模拟评估 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 155pp.
- Zhi Hai. 2008. Evaluation of basic climate simulated by a coupled GCM (GOALS-AVIM) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing University of Information Science and Technology, 155pp.
- 智海, 王盘兴, 俞永强, 等. 2009. 一个海洋-大气-动态植被耦合模式评估——海洋环流模拟 [J]. *气候环境与研究*, 14 (2): 1–12.
- Zhi Hai, Wang Panxing, Yu Yongqiang, et al. 2009. Evaluation of a coupled ocean-atmosphere-dynamic vegetation model—Simulating ocean circulation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (2): 1–12.