印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系 II. 机理分析

温之平1,2 梁肇宁1 吴丽姬1

1中山大学季风与环境中心/大气科学系,广州 510275 2中国科学院大气物理研究所,北京 100029

摘 要 通过区分 ENSO 外部影响和偶极子内部局地作用, 探讨了前期春季的印度洋海温异常对南海夏季风建 立早晚的可能影响途径。结果表明:在没有去除 ENSO 信号(外部作用)的情况下,全区一致型的海温分布主要 通过影响热带印度洋上空纬向季风环流的强弱来影响南海夏季风建立的早晚。去除 ENSO 信号后,非 ENSO 全 区一致型的海温分布则主要通过影响低层东西向的气压差异和对流层中上层的南北温度梯度的逆转,进而对南 海夏季风建立的早晚产生影响;而南印度洋偶极子(SIODM)型的海温分布则主要通过影响亚洲大陆热低压、西 太平洋副热带高压和高低层的辐合辐散运动影响南海夏季风的建立。

关键词 印度洋 海温异常 南海夏季风 建立迟早 **文章编号** 1006-9895 (2006) 06-1138-09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

The Relationship Between the Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly and the Onset of the South China Sea Summer Monsoon II. Analyses of Mechanisms

WEN Zhi-Ping^{1,2}, LIANG Zhao-Ning¹, and WU Li-Ji¹

Research Center for Monsoon and Environment /Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275
 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract With 1953 – 1998 Reynolds & Smith monthly sea surface temperature (SST) as well as NCEP/NCAR monthly re-analysis data and a picture in the mind that ENSO signal is culled or not from the Indian Ocean sea surface temperature anomaly (SSTA), the possible impacts of Indian Ocean SSTA on the early or late onset of the South China Sea Summer Monsoon (SCSSM) have been analyzed based on Empirical Orthogonal Function (EOF), the new statistical method CEOF (Conditional Empirical Orthogonal Function). The results show that with the influence of ENSO, unipole pattern of the Indian Ocean SSTA mainly does favor to the unusual onset of SCSSM by affecting atmospheric vertical motion at 500 hPa, convergence/divergence motion in the low/high troposphere and the intensity of zonal monsoon circulation over the tropical Indian Ocean, while without the influence of ENSO, the unipole pattern may contribute to the unusual onset of SCSSM through affecting the reverse of meridional temperature gradient in the middle-upper troposphere. The Southern Indian Ocean Dipole Mode (SIODM) pattern also plays a role in the unusual onset of SCSSM by affecting the thermal depression over Asian landmass, the western Pacific subtropical high, and convergence/divergence in the low/high troposphere as well.

Key words the Indian Ocean, SSTA, the South China Sea summer monsoon, early or late onset

收稿日期 2005-04-28, 2005-11-25 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40275026, 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 第一部分

作者简介 温之平,男,1963年出生,副教授,主要研究方向为热带大气环流与气候变化。E-mail: eeswzp@mail. sysu. edu. cn

1 引言

在文献[1]中,我们利用 CSVD 和联合 CSVD 等较新颖的统计方法,通过区分/不区分 ENSO 影 响探讨了印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的 关系,结果表明:在没有去除 ENSO 信号(外部作 用)的情况下,全区一致型的海温分布对南海夏季 风建立的早晚起着重要的作用。当全区温度距平为 正(负)时,南海夏季风建立较晚(早)。在去除 ENSO 信号的情况下,非 ENSO 全区一致型和南印 度洋偶极子(SIODM)型是影响南海夏季风建立迟 早的两个主要的印度洋海温分布型。对于非 ENSO 全区一致型的海温分布,当前期海温全区为负 (正)距平时,南海夏季风建立较早(晚)。而对于 SIODM 型的海温分布,则当前期海温为西负东正 (西正东负)的 SIODM 型时,南海夏季风建立较早 (晚)。

在涉及印度洋海表温度和南海夏季风爆发的研究中^[2,3],关于印度洋某一区域平均的海温与南海 夏季风爆发日期的相关分析较多。最近,在相关的 数值模拟研究方面,晏红明和肖子牛^[4]指出当印度 洋暖(冷)SSTA强迫时,亚洲夏季风建立较正常 偏晚(偏早),撤退较早(较晚);赵永平和吴爱 明^[5]的研究则发现,当南海-热带东印度洋海温异 常偏冷时,有利于南海夏季风加强,爆发可能提 前;屈述军和张铭^[6]的分析也发现,西南印度洋1 ~3月海温出现异常增暖(变冷)时,印度夏季风 和东亚夏季风的建立均较平常晚(早)。然而,印 度洋海温异常通过什么途径影响南海夏季风建立的 早晚?目前尚不十分清楚。

本文将针对上述问题,通过去除与未去除 EN-SO 影响,探讨不同印度洋海温异常分布型对南海 夏季风建立迟早的影响途径及其之间的异同。第2 节先介绍所用的资料和方法,第3节探讨不同的影 响途径,第4节是讨论和结论。

2 资料和分析方法

本文用到的资料主要有两套:(1) Reynolds 和 Smith^[7] 1950~1998 年的 2°×2°重构月平均海表温 度资料 (SST);(2) NCAR/NCEP (美国大气研究 中心/环境预测中心) 1953~1999 年的 2.5°×2.5° 全球大气月平均再分析资料,包括 200 hPa、500 hPa 和 1000 hPa 的高度场资料, 200 hPa 和 850 hPa 的二维风场和速度势场资料,还有 500 hPa 的 垂直速度场资料。

分析方法主要包括经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析、条件经验正交函数(Conditional Empirical Orthogonal Function, CEOF)分析和相关分析(包括单一序列与场的相关及两个场之间的相关)等。这里,主要介绍CEOF这种较新颖的统计方法。与第一部分^[1]中提到的CSVD分析方法相似,CEOF分析方法也是由美国夏威夷大学国际太平洋研究中心的Soon-II^[8]所提出的,它同样可以先去掉变量场本身含有的一些信号,然后再做EOF分析,即做"有条件"的EOF分析。具体做法是,对一个三维气象变量场

$$A(x, y, t) = \sum_{n} \alpha_n(t) e_n(x, y) , \qquad (1)$$

及要去掉的信号 Z=Z(t),可以进行以下的操作

 $A^* = A - Z \times \text{cov}(A, Z)/\text{var}(Z)$, (2) 其中, cov(A, Z)表示场 A 和信号 Z 的协方差, var(Z)则表示信号 Z 的方差。为了检验信号去除 的效果,可以计算两个新的协方差阵 cov(A*, Z), 若矩阵的值全为零,则表示新的变量场 A* 和信号 Z 是正交的,即信号 Z 已被很好地去除。将已去掉 信号 Z 的新变量场 A* 进行 EOF 分析,就称为条件 EOF 分析,它从实际上满足了剔除不必要信号影 响的需要。另外,若信号 Z 和三维变量场 A 之间 存在超前或滞后的相关关系,则 cov(A, Z)要用超 前或滞后协方差代替。

3 印度洋海表温度异常对南海夏季风 建立早晚的可能影响途径

通过去除与未去除 ENSO 的影响探讨印度洋 海温异常对南海夏季风建立早晚的可能影响途径。 首先,对印度洋 3~4 月的 SST 作 EOF 分析和 CEOF 分析,结果如图 1 和图 2 所示。不难发现其 模态的分布型及时间系数变化都与文献[1]SVD/联 合 SVD 和 CSVD/联合 CSVD 所得基本一致。当 EOF/CEOF 第一模态的时间系数是正(负)值时, 表示印度洋海温全区是正(负)距平;而当 CEOF 第二模态的时间系数是正(负)值时,则表示印度 洋海温分布为 N-SIODM 型(P-SIODM 型)。因 此,这里主要用印度洋海温 EOF 分析和条件 EOF



图 1 初春(3~4月)印度洋海表温度 EOF 分析第一模态的空间分布(a)及其时间系数(b)





图 2 初春 (3~4月) 印度洋海表温度 CEOF 分析的空间分布及其时间系数: (a) 第1 模态的空间分布; (b) 第1 模态的时间系数; (c) 第 2 模态的空间分布; (d) 第 2 模态的时间系数

Fig. 2 Spatial distribution and time coefficients of CEOF analysis of Indian Ocean SST in early spring: (a) Spatial distribution of mode 1; (b) time coefficients of mode 1; (c) spatial distribution of mode 2; (d) time coefficients of mode 2

分析所得的不同时间系数作为各种海温异常的时间 系列,分别跟各种大气物理量(包括 200 hPa、 500 hPa 和 1000 hPa 的高度场,200~500 hPa 的对 流层中上层厚度差场,200 hPa 和 850 hPa 的二维 风场和速度势场,还有 500 hPa 的垂直速度场)求 相关,希望找出不同印度洋海温分布特征对南海夏 季风建立早晚的可能影响途径。

3.1 未去除 ENSO 信号的影响

图 3~5 为 3~4 月印度洋海表温度 EOF 分析 的第一模态时间系数与有关大气物理量作相关所得 的相关系数分布图。与 4 月 500 hPa 无辐散层的垂 直速度相关场 (图略)具体表现为,当时间系数为 正时,与印度洋高海温区相对应的区域 (0°~20°S, 60°E~100°E) 是一个显著负相关区,相关系数通 过 95%的显著性检验 [R(0.05)=0.2875,下同], 表明当 3~4 月热带印度洋该出现正海温异常时, 使得南热带印度洋地区上升运动明显;而从南海南 部向东一直到 180°E 的北热带西太平洋则是一个显 著正相关区,表示该区盛行下沉运动,这一特征在 5 月继续维持 [图 3a,负值(正值)代表上升(下 沉)运动]。图 4 给出了 3~4 月印度洋海表温度 EOF 分析的第一模态时间系数与5 月高、低层速度 势场(正值表示辐合,负值表示辐散)的相关系数 分布图。低层 850 hPa 相关(图 4a)上,当时间系 数为正时,与 500 hPa 垂直上升运动明显区相对应 的为一显著正相关区,与下沉区相对应的为一显著 负相关区。表示当 3~4 月热带印度洋该出现正海 温异常时,南热带印度洋低层有明显的辐合运动, 热带西太平洋低层有明显的辐散运动。相反,在与 高 层 200 hPa 速度势相关(图 4b)上,与 500 hPa



图 3 3~4 月印度洋 SST EOF 分析第一模态时间系数与 5 月 500 hPa 垂直速度和高度场的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a) 与 500 hPa 垂直速度的相关; (b) 与 500 hPa 位势高度场的相关

Fig. 3 Correlation coefficients between EOF time coefficients of the Indian Ocean SST in early spring and vertical velocity (a) and geopotential height (b) at 500 hPa in May. Regions with 95% confidence level are shaded



图 4 3~4 月印度洋 SST EOF 分析第一模态时间系数与 5 月高低层速度势的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a) 与 850 hPa 速度势的相关;(b) 与 200 hPa 速度势的相关

Fig. 4 Correlation coefficients between EOF time coefficients of the Indian Ocean SST in early spring and velocity potentials at 850 hPa (a) and 200 hPa (b) in May. Regions with 95% confidence level are shaded



图 5 3~4 月印度洋 SST EOF 分析第一模态时间系数与 5 月高低层纬向风场的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a) 与 850 hPa 纬向风场的相关; (b) 与 200 hPa 纬向风场的相关

Fig. 5 Correlation coefficients between EOF time coefficients of the Indian Ocean SST in early spring and zonal wind fields at 850 hPa (a) and 200 hPa (b) in May. Regions with 95% confidence level are shaded

上升运动区相对应的是显著负相关区(表示强辐 散),而与下沉运动盛行区相对应的则是显著正相 关区(表示强辐合)。此外,从时间系数与5月高、 低层纬向风的相关系数分布(图5)可以发现,当 3~4月印度洋海表温度 EOF 分析的第一模态时间 系数为正时, 低层 850 hPa 纬向风相关 (图 5a) 显 示,在印度半岛-孟加拉湾-中南半岛以南的热带印 度洋区域及其向东伸展到热带西太平洋的区域,为 一个显著负相关区,表示这一个东-西向的带状区 域东风异常; 高层 200 hPa 纬向风相关 (图 5b) 显 示,与此带状区域相对应的则是一个显著正相关 区,表示西风异常。另外,再由与 500 hPa 高度场 的相关(图 3b)也可以看到,5月整个南北纬 30°之 间的区域都是显著正相关区,表示当印度洋全区海 温为正距平的分布时,上述高相关区的高度值比常 年要高,表示副热带高压比常年要强,显著相关区 的相关系数最大可达到 0.8 以上。

以上分析表明, 在未去除 ENSO 信号影响的情况下, 当前期春季印度洋海温表现为"ENSO 循环 年际变化"叠加在"年代际线性增暖背景"趋势上 全区一致的异常分布型时, 它首先通过影响南热带 印度洋地区上空的垂直运动, 进而影响高、低层的 辐合辐散运动, 并且透过热带印度洋上空的纬向季 风环流的异常, 影响南海夏季风建立的早晚。具体 而言, 当前期 3~4 月印度洋海温距平全区为正 (负)时, 有利于异常区上空 500 hPa 的垂直上升运 动(下沉运动)增强, 同时该区域低层辐合(辐散) 高层辐散(辐合), 菲律宾以东的热带西太平洋上 空 500 hPa 则盛行下沉(上升)运动, 同时低层辐 散(辐合)高层辐合(辐散);与上述辐合、辐散中 心相联系的是低层吹偏东风(西风)而高层吹偏西 风(东风)的纬向距平环流,同时,500 hPa上空南

30 卷

Vol. 30



图 6 3~4 月全区一致型的印度洋海温分布对南海夏季风爆发 早晚的影响示意图:(a)全区一致负距平型;(b)全区一致正距 平型

Fig. 6 Sketch map of the influence of the unipole pattern of the Indian Ocean SST in early spring on the onset of the South China Sea summer monsoon: (a) Negative anomaly pattern of the Indian Ocean SST; (b) positive anomaly pattern of the Indian Ocean SST 海及其附近地区高度值异常偏高(偏低)。吴国雄 等^[9,10]提出印-太齿轮耦合的概念,即太平洋海温 的异常(如 ENSO 信号)可以通过赤道印度洋上空 的纬向季风环流和太平洋上空的 Walker 环流的相 互耦合对印度洋的海温造成影响。可见,未去除 ENSO 信号影响的印度洋海温异常也可能通过热带 印度洋上空的纬向季风环流传递信息,对南海夏季 风建立的早晚产生影响。具体可以用一个示意图来 表示全区一致型的印度洋海温分布与南海夏季风建 立早晚的关系(图 6)。

3.2 去除 ENSO 信号的影响

首先,对去除 ENSO 影响后的第一模态(非 ENSO 全区一致型)的海温分布对大气环流场的影响情况进行分析。当全区海温为正时(即时间系数

为正时),由4月和5月的1000hPa高度场相关 (图7)可以看到,亚洲大陆为显著正相关区,西太 平洋上则为明显的负相关区,表明在上述非ENSO 全区一致型的海温特征影响下,亚洲大陆的热低压 和西太平洋上的高压都偏弱,而且这种特征从4月 (图7a)开始一直维持到5月(图7b),这种东西向 的气压差异的减小不利于南海夏季风建立。再由4 月和5月的对流层中上层相关厚度差场(图8)也 可以看到,自西向东沿一个半圆路径,依次呈现一 个"负-正-负-正"相间的显著相关波列,我国东部 为显著负相关区,南海特别是其以东地区则是显著 正相关区,说明不利于东亚地区对流层中上层大气 温度的增暖,5月情况基本相同,但强度相对减弱。 根据简茂球等^[10]的研究,对流层中上层南北温度



图 7 3~4月印度洋 SST CEOF 分析第一模态时间系数与 1000 hPa 高度场的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a)与4月高度场的相关;(b)与5月高度场的相关

Fig. 7 Correlation coefficients between time coefficients of the first CEOF mode for the Indian Ocean SST in early spring and the geopotential height fields at 1000 hPa in Apr (a) and May (b). Regions with 95% confidence level are shaded



图 8 3~4月印度洋 SST CEOF 分析第一模态时间系数与对流层中上层 (200~500 hPa) 位势高度差的相关系数分布图 (阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a) 与 4月厚度差的相关; (b) 与 5月厚度差的相关

Fig. 8 Correlation coefficients between time coefficients of the first CEOF mode for the Indian Ocean SST in early spring and the difference of geopotential heights in the mid-upper troposphere (200-500 hPa) in Apr (a) and May (b). Regions with 95% confidence level are shaded



图 9 3~4月印度洋 SST CEOF 分析第二模态时间系数与 1000 hPa 高度场的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显著性检验的区域): (a)与4月高度场的相关;(b)与5月高度场的相关

Fig. 9 Correlation coefficients between time coefficients of the second CEOF mode for the Indian Ocean SST in early spring and geopotential height fields at 1000 hPa in Apr (a) and May (b). Regions with 95% confidence level are shaded



图 10 3~4 月印度洋 SST CEOF 分析第二模态时间系数与 500 hPa 垂直速度场的相关系数分布图(阴影代表通过 95%显 著性检验的区域)

Fig. 10 Correlation coefficients between time coefficients of the second CEOF mode for the Indian Ocean SST in early spring and vertical velocity field at 1000 hPa. Regions with 95% confidence level are shaded

梯度的逆转对南海夏季风的建立具有较好的指导 意义,这种北低南高的距平温度场相关分布是不利 于南海夏季风建立的。

以上分析表明,去除 ENSO 影响后,前期印度 洋年代际海温增暖的全区一致型分布为正(负)距 平时,亚洲大陆热低压和太平洋高压偏弱(偏强), 对流层中上层温度南高(低)北低(高),不利(有 利)于对流层中上层南北温度梯度的逆转,从而使 得南海夏季风建立偏晚(早)。

对于第二模态的 SIODM 海温分布型,同样分 析其 CEOF 时间系数和各大气变量场的相关系数 分布图。当印度洋海温为 N-SIODM 型(即时间系 数为正)时,4月1000 hPa上空的高度场上就有明 显的响应,4月较强的负相关区位于南热带印度洋 西部(图 9a),5月该负相关区的范围继续向东向南 扩展,强度也进一步增强(图 9b)。另外,由图 9a 和图 9b 还可以看到一种东西向的气压差异,即亚 洲大陆是一个显著负相关区,而中国大陆以东的西 太平洋区域则是一个正相关区的东西向反相分布, 这是有利于南海夏季风建立的一种海陆热力差异的 分布形势。再由 500 hPa 垂直速度场相关(图 10) 可发现,与海温正距平相对应的区域是一片显著负 相关区, 表示有明显的上升运动, 南海区域相关系 数为负,表示也有上升运动。结合高低层的速度势 场相关(图 11)可知,与上述 500 hPa 垂直速度场 相关图中的显著负相关区对应的是低层辐合(显著 正相关区) 高层辐散(显著负相关区) 的分布形势。 南海同样位于低层辐合高层辐散的区域,这是有利 于南海夏季风建立的。

综上所述, SIODM 型的印度洋海温分布型主要通过影响海陆热力差异和关键区上空的对流活动 以及高低层的辐合辐散运动,进而对南海夏季风建 立的早晚产生影响。

4 结论

通过区分 ENSO 外部影响和偶极子内部局地 作用,探讨了前期春季的印度洋海温异常对南海夏



图 11 3~4 月印度洋 SST CEOF 分析第二模态时间系数与5月速度势的相关系数分布图(阴影区代表通过95%显著性检验的区域):(a) 与850 hPa 速度势场的相关;(b) 与 200 hPa 速度势场的相关

Fig. 11 Correlation coefficients between time coefficients of the second CEOF mode for the Indian Ocean SST in early spring and velocity potential fields at 850 hPa (a) and 200 hPa (b) in May. Regions with 95% confidence level are shaded

季风建立早晚的可能影响。主要结论有:

(1) 在没有去除 ENSO 信号(外部作用)的情况下,前期春季印度洋海温的"ENSO 循环年际变化"叠加在"年代际线性增暖背景"趋势上的异常 主要通过影响热带印度洋上空的垂直运动和高低层 辐散辐合,进而影响季风纬向环流的强弱来影响南 海夏季风建立的早晚。

(2) 去除 ENSO 信号后,前期春季印度洋海温 的"年代际线性增暖"异常则主要通过影响低层东 西向的气压差异和对流层中上层的南北温度梯度的 转变对南海夏季风建立的早晚产生影响。

(3) SIODM 型的海温分布则主要通过影响亚 洲大陆热低压、西太平洋高压和高低层的辐合辐散 运动进而影响南海夏季风建立的迟早。

值得一提的是,本文只是通过分析前期初春印 度洋海温异常的不同分布型的时间变化与后期5月 亚洲地区一些要素场的相关关系,进而分析印度洋 海温异常对南海夏季风建立迟早的可能影响,所得 结果还有待于数值模拟等方法的进一步验证。

致谢 感谢美国 NOAA 杨崧博士对本文提出了很好的建议。

参考文献 (References)

[1] 梁肇宁, 温之平. 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: 619~634
Liang Zhaoning, Wen Zhiping. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of the South China Sea summer monsoon. I. Coupling analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, 30: 619~634

- [2] 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(4):363~373
 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(4): 363~373
- [3] 陈永利,白学志,赵永平. 南海夏季风爆发与热带海洋海温和大气环流异常变化关系的研究. 2000, 5 (4): 388~399
 Chen Yongli, Bai Xuezhi, Zhao Yongping. A study on the relationships between the onset of the south China sea summer monsoon and the anomalies of tropical ocean and atmospheric circulations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, 5 (4): 388~399
- [4] 晏红明,肖子牛.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.热带气象学报,2000,16(1):18~27
 Yan Hongming, Xiao Ziniu. The numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on climatic variations over Asian monsoon region. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, 16(1):18~27
- [5] 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
- [6] 屈述军,张铭.西南印度洋海温异常影响亚洲夏季风爆发的 数值试验.解放军理工大学学报(自然科学版),2003,4 (2):83~86

Qu Shujun, Zhang Ming. Numerical experiments for the influences of SST anomalies over the Southwest tropical Indian Ocean on the South China Sea summer monsoon. *Journal of PLA University of Science and Technology* (in Chinese), 2003,4(2):83~86

- [7] Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. J. Climate, 1994, 7: 929~948
- [8] Soon-Il A N. Conditional maximum covariance analysis and its application to the tropical Indian Ocean SST and surface wind stress anomalies. J. Climate, 2003, 16: 2932~2938
- [9] 吴国雄, 孟文.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,1998,22 (4): 470~480

Wu Guoxiong, Meng Wen. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 470~480 [10] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式 耦合和 ENSO 事件 II. 数值模拟. 大气科学, 2000, **24** (1): 15~25

Wu Guoxiong, Meng Wen. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part II: Numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 2000, **24** (1): $15\sim25$

[11] 简茂球, 贺海晏. 亚洲夏季风建立前后对流层温度场演变特征及其热力成因. 热带气象学报, 2000, 16 (2): 98~105
Jan Maoqiu, He Haiyan. Evolution of temperature fields in troposphere and corresponding thermal mechanisms during the pre- and post-onset periods of Asian summer monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, 16 (2): 98~105