贾小龙,李崇银,凌健. 谱模式 SAMIL 对南亚季风区大气季节内振荡向北传播的模拟. 大气科学, 2008, **32** (5): 1037~1050 Jia Xiaolong, Li Chongyin, Ling Jian. GCM simulation of the northward propagating intraseasonal oscillation in the South Asian summer monsoon region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1037~1050

谱模式 SAMIL 对南亚季风区大气 季节内振荡向北传播的模拟

贾小龙^{1,2} 李崇银^{2,3} 凌健^{2,4}

1国家气候中心,北京 100081

2 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

3 解放军理工大学气象学院,南京 211101

4 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 基于与 NCEP 资料结果的比较,研究了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 国家重点实验室发展的大气环流模式 SAMIL 对夏季南亚季风区季节内振荡 (ISO) 向北传播特征的模拟,并结合 目前对 ISO 北传机制的理解对模拟结果进行了分析讨论。SAMIL 在夏季南亚地区模拟出相当强度的季节内振荡 的活动,并且模拟的 ISO 也表现出与 NCEP 资料相似的从赤道向北传播的特征,但传播的速度要慢于 NCEP 资料 的结果。模拟的北传 ISO 具有与 NCEP 资料相似的结构特征,涡度和水汽场明显的呈经向不对称,涡度和水汽的 正异常位于 ISO 对流的北面,最大的上升运动和最强的行星边界层辐合也位于 ISO 对流的北面。ISO 结构的经向 不对称性正是模式模拟的 ISO 具有向北传播特征的原因;而模式对夏季南亚季风区高低层风场和行星边界层水 汽的合理模拟起了关键的作用。同时,根据关于 ISO 北传机理的已有研究,模式的结果也表明南亚地区夏季风场 的垂直结构是那里 ISO 向北传播的重要机制。

关键词 大气季节内振荡 北传 大气环流模式 模拟 经向不对称
 文章编号 1006 - 9895 (2008) 05 - 1037 - 14
 中图分类号 P433
 文献标识码 A

GCM Simulation of the Northward Propagating Intraseasonal Oscillation in the South Asian Summer Monsoon Region

JIA Xiaolong^{1, 2}, LI Chongyin^{2, 3}, and LING Jian^{2, 4}

1 National Climate Center, Beijing 100081

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

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

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The northward propagating intraseasonal oscillation (ISO) in the South Asian summer monsoon region simulated by general circulation model SAMIL developed in the State Key Laboratory for Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences is examined and compared with that from NCEP reanalysis data, SAMIL simulates this oscilla-

收稿日期 2007-03-06, 2007-10-22 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575027, 中国科学院创新项目 KZCX3-SW-226

作者简介 贾小龙, 男, 1977年出生, 博士, 主要从事气候动力学研究。E-mail: jiaxl@cma.gov.cn

tion with comparable strength in the South Asia region, and northward propagation of this oscillation from the equator is also simulated though the propagation is slightly slower than that from observations. The simulated northward propagating ISO shows similar vertical structure to observations. The vorticity and the specific humidity fields are obviously meridionally asymmetric with the positive vorticity and specific humidity anomalies lying over the north of the ISO convective center. The maximum ascending motion and convergence in the planetary boundary layer also lie over the north of the ISO convection center. Reasonable simulation of this meridional asymmetric structure leads to well simulation of the northward propagating ISO for the SAMIL model. Key factors associated with the good performance in simulating northward propagating ISO are the reasonable simulations of summer wind fields in South Asia and distribution of specific humidity in the planetary boundary layer. Meanwhile, the modeling result also suggests that the vertical structure of summer winds in South Asia plays a key role in the northward propagation of ISO there, which is consistent with previous studies.

Key words intraseasonal oscillation, northward propagation, general circulation model, simulation, meridional asymmetry

1 引言

热带大气季节内振荡(简称 ISO) 是热带大气 的主要模态之一,自从 Madden 和 Julian^[1,2]在 20 世纪70年代发现以来,国内外对其进行了大量的 研究^[3~10]。就其基本特征而言,可以概括为:热带 大气 ISO 具有纬向一波为主的行星尺度空间结构; 没有严格的周期, 表现为 30~70 天的宽频带振荡 周期; 纬向上主要以向东传播为主; 垂直结构上表 现为对流层上、下反相的"斜压"结构;季节上表现 为冬春较强而夏秋较弱的季节性变化。热带大气 ISO 明显的向东传播主要在北半球的冬春季节,夏 秋季节纬向上的东传要弱得多。除了向东传播,夏 季热带 ISO 的一个最主要的传播模态是在南亚季 风区从赤道向北的传播。最早, Yasunari 的研 究^[10]就发现印度季风区的云量和对流有 30~40 天 的季节内振荡,并且振荡有从赤道地区向北传播的 特征。随后, Krishnamurity 等^[11]也指出南亚季风 槽脊的季节内振荡也有缓慢向北传播的特征。夏季 南亚季风区向北传播的热带 ISO 的观测特征也被 其他很多研究所揭示[12, 13]。

目前,热带大气季节内振荡的数值模拟引起国 内外的广泛重视,一方面是因为数值天气预报结果 清楚地表明模式对大气 ISO 的描写(预报)如何对 预报效果有重要影响。对 5 个动力延伸预报的分析 表明,无论对三天还是十几天的预报,大气 ISO 的 预报误差对整个预报起着重要作用^[14]。另一方面, 目前大气环流模式(AGCM)对热带大气季节内振 荡的模拟并不理想,大气环流模式比较计划 (AMIP) 用各国 15 个 GCM 就热带大气季节内振 荡的模拟进行了比较^[15],其结果表明,虽然大多数 模式能够反映大气季节内时间尺度的振荡信号,再 现对流层上层速度势异常的向东传播;但严格来 说,没有一个模式能够抓住观测到的热带季节内振 荡的主要特征。但 AMIP 更多的是比较分析北半 球冬季向东传播的热带 ISO。关于热带大气季节内 振荡的数值模拟研究国内也有一些新的研究进 展^[16~19],主要关注热带东传的季节内振荡(MJO)。 董敏等^[20]最近也对国内外关于季节内振荡数值模 拟的研究成果进行了总结和评述。

国外有一些针对南亚季风区北传 ISO 的模拟 分析,但很多对 GCM 模拟的分析是注重亚洲夏季 风的季节动力预测[21]或是南亚夏季风季节内变化 的气候态的模拟^[22]。最近, Waliser 等^[23]分析了 CLIVER 计划-亚奥季风组发起的 MONSOON-GCM 比较计划的 10 个 GCM 对亚洲夏季风季节内 变化的模拟。他们分析的重点是季节内降水的空间 和季节变化,结果表明部分模式可以模拟出类似观 测的季节内变化的空间模态。我们前期的一个研究 工作[24]分析了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发展的 大气环流谱模式 SAMIL-R42L9 模拟的热带 ISO 的 基本特征,表明该模式在热带地区可以模拟出较强 的 ISO 信号以及合理的传播方向和传播速度,因此 该模式对热带地区东传 ISO 有较好的模拟能力,而 夏季南亚季风区热带大气季节内振荡的另外一个重 要模态就是向北传播的 ISO, 因此, 本文的目的是 在与观测结果对比的基础上,分析该模式对夏季南

亚地区热带 ISO 的模拟,重点是关注其向北传播特 征和结构的模拟。同时,也希望通过对观测资料和 模拟结果两方面的分析加深目前对夏季南亚季风区 北传 ISO 的认识,并在此基础上对其传播机制进行 一些有益的讨论。

2 模式和资料

本文使用的 SAMIL-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),纬向方向有128个格点,经向有108个高斯 格点,相当于2.8125°经度×1.66°纬度。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 分钟; 耦合了 Xue 等^[25]提出的简化生物 圈 (SSIB) 路面过程参数化方案,引入 Slingo 等^[26] 提出的云量诊断参数化方案。还充分考虑了其他重 要的次网格物理过程,如 Manabe 等^[27]提出的湿对 流调整方案以及垂直、水平扩散等。模式的其他具 体介绍可参考文献[28]。模式积分时间为 1978 年 1月1日~1989年12月31日,海温使用的是观测 逐月海温, 文中取后 11 年的积分结果作为分析数 据,包括模式输出的逐日降水、涡度、散度和比湿。

NCEP/NCAR^[29]的逐日再分析资料作为对比 资料,包括向外长波辐射(OLR)、涡度、散度和比 湿,时间为1979年1月1日~1989年12月31日。 另外,还用到了Xie/Arkin的逐候降水资料^[30]。在 分析季节内时间尺度的变化时,对日或候(降水) 资料去除了气候平均,得到日(候)距平序列,然 后进行 30~60 天的带通滤波,得到季节内尺度的 时间序列。

3 夏季南亚地区 ISO 的气候态分布

分析夏季南亚季风区 ISO 北传特征之前,首先 来看一下夏季南亚地区季节内振荡的气候态及模 拟。为了简单扼要,这里仅就季节内时间尺度的降 水进行分析,它可以基本反映整个气候分布特征。 图 1是 Xie/Arkin 资料和模式模拟的夏半年(5~ 10月)季节内降水(30~60 天带通滤波)的方差。 可以看到,观测的南亚地区 ISO 降水(图 1a)大值 区主要分布在印度洋上,有两个大值中心,一个在 70°E 的北印度洋,另外一个在 90°E 附近的孟加拉 湾。模式在南亚地区也模拟了比较强的季节内的降 水(图 1b),在空间分布上两个大值区也被模拟再 现了,只是 75°E 附近的大值区比观测的略为偏东, 100°E 附近的大值区也比观测的偏东。另外,模拟 的赤道西印度洋 ISO 降水比观测的要强。

4 夏季南亚季风区 ISO 的向北传播

4.1 ISO 北传特征的观测分析

本节将给出夏季南亚季风区 ISO 向北传播特征的资料分析结果。图 2 是由 NCEP 资料得到的南亚地区 (70°E~100°E 平均) 30~60 天带通滤波的降水的时间-纬度剖面图。为节省篇幅仅给出1979、1980、1981、1983、1984、1988 年的结果。可以看出南亚地区热带 ISO 降水存在明显的经向传播,但传播特征比较复杂,考虑所有的年份,经



图 1 Xie/Arkin 资料(a)和 SAMIL 模拟(b)的 30~60 天带通滤波的降水的方差分布。 阴影为大于 5 mm²/d²

Fig. 1 Mean variance of 30 - 60-day filtered precipitation for summer time (May – Oct) from (a) Xie/Arkin data and (b) SAMIL simulation. Shaded regions: $\geq 5 \text{ mm}^2/d^2$



图 2 Xie/Arkin 资料的南亚地区 (70°E~100°E平均) 30~60 天带通滤波降水的时间-纬度剖面图。阴影:正值区;等值线间隔: 2 mm/d Fig. 2 Time-latitude sections of 30-60-day band-pass filtered precipitation averaged over 70°E-100°E from Xie/Arkin data. Regions of positive values are shaded and the contour interval is 2 mm/d

向上主要以从赤道向北传播为主,但同时也有从赤 道向南的传播,以及两个半球之间传播的情况。还 可以注意到 ISO 的向北传播主要出现在北半球夏 半年(5~10月),此时正好是南亚夏季风期间,传 播一般从赤道附近地区向北最远传播到 25°N。另 外,ISO 降水的北传有明显的年际变化,有的年份 北传特征比较明显,比如 1979、1981、1984年,而 有的年份北传较弱,如 1980 和 1983年。

为了进一步分析夏季南亚季风区热带 ISO 北 传的空间演变过程,这里我们再对 OLR (对流)资 料进行分析。为此,根据 30~60 天滤波的 OLR 的 时间-经度剖面图选取了 11 年中夏季 (5~10 月)



图 3 合成的 NCEP 资料 30~60 天带通滤波的 OLR 从超前 16 天到滞后 16 天的空间演变(单位: W/m²)。阴影为负值区;0 天代表 (5°N, 70°E~100°E) 平均的 ISO 对流达到最强的时间(下同)

Fig. 3 Evolution of the 30 – 60-day band-pass filtered Outgoing Longwave Radiation (OLR) (W/m^2) from day -16 to day 16 from NCEP data. Regions of negative values are shaded; day 0 represents a reference time when the intraseasonal oscillation (ISO) convection averaged over ($5^{\circ}N$, $70^{\circ}E-100^{\circ}E$) is the strongest (the same below)

发生的 30 个较为明显的 ISO 向北传播的个例, 以 (5°N, 70°E~100°E) 平均的 ISO 对流达到最强时 作为 0 天, 然后依次得到从超前 16 天到滞后 16 天 OLR场的空间演变。图 3 是 30 个个例合成的季节 内时间尺度 OLR 的演变。可以看到, 超前 16 天热 带 ISO 对流中心位于赤道西印度洋(55°E 附近), 强度较弱。然后沿着赤道向东传播,强度不断加 强。到超前6天,最大的对流中心位于赤道中印度 洋 (80°E 附近), 中心强度达到了 16W/m², 其后向 东的传播基本停止,并开始向北传播,而且强度仍然 不断加强。到滞后0天对流中心向北传播到7.5°N, 强度达到最大(24 W/m²)。之后, ISO 对流区继续 向北移动,强度开始减弱。到滞后16天,ISO对流 达到最北,中心位于孟加拉湾北部(15°N)。另外, 可以注意到从超前6天对流位于中东印度洋开始, 主要的 ISO 对流区基本在向北传播,没有明显的东 传信号。从滞后6天开始,印度尼西亚到热带西太 平洋地区出现了逐渐增强的 ISO 对流信号, 但是可 以看到,一方面这些对流信号与向北传播的对流信 号是相互独立的,另一方面这些对流信号从滞后4 天出现单独闭合的中心开始,并没有明显的向东传 播的特征,只是在强度上逐渐增强。这些都说明, 这里所选取的个例基本描述热带 ISO 向北传播的 情况,同时也说明热带 ISO 向北传播的模态与向东 传播的模态存在一定的独立性。图 4 进一步给出了



图 4 合成的 NCEP 资料在南亚地区 (70°E~100°E) 平均的 30 ~60 天带通滤波 OLR 的纬度-滞后时间图 (单位: W/m²)。阴 影为负值区

Fig. 4 Latitude – lag time section of composite 30 - 60-day band-pass filtered OLR (W/m²) averaged over 70° E – 100° E from NCEP data. Regions of negative values are shaded

合成的 30~60 天带通滤波的 OLR 时间-纬度图, 可以看到热带 ISO 对流向北的传播非常清楚,传播 速度大概为每天1个纬度左右。另外,也可以注意 到在南半球也有向南传播的特征,但南传的特征不 如北传典型,而且振幅很弱,向南传播的范围也较 小。

4.2 SAMIL 对 ISO 向北传播的模拟

图 5 是模式模拟的南亚地区 30~60 天带通滤 波的降水时间-纬度剖面图,为节省篇幅同样仅给 出 1979、1980、1981、1983、1984、1988 年的情况。 从模拟来看,模式的结果同样存在明显的年际差 异,但在北半球夏季每一年基本都存在明显的向北 传播的情况,而冬季北传不明显。不过与 NCEP 资 料结果相比,模拟的降水经向传播特征不够规则。 其他年份的模拟也表现出了相似的特征,在夏季都 有不同程度的 ISO 北传过程的发生。

为了便干同 NCEP 资料的结果相对比, 基于与 图 3 同样的方法,图 6 给出了合成的模式模拟的南 亚季风区 ISO 降水从超前 16 天到滞后 16 天的演 变。可以看到, 超前16天弱的降水零星分布干赤 道印度洋地区, 而赤道以北的印度洋则为明显的干 区; 直到超前12天 ISO 降水区的空间分布没有明 显的变化,只是强度有所不同。从超前10天开始 赤道中东印度洋附近的 ISO 降水开始有一个明显 的向北移动。之后, ISO 降水继续向北缓慢移动, 且强度不断加强,到滞后2天强度达到最大;再其 后降水继续沿着孟加拉湾东岸和印度半岛向北传 播,到滞后 10 天中心到达 12°N;从滞后 12 天开 始,北传的 ISO 降水区范围开始减小,主要降水区 位置上没有明显的变化,即没有明显的进一步向北 传播。图 7 是进一步合成的 ISO 降水纬度-时间 图,展现了模式模拟的南亚地区 ISO 降水的向北传 播,可以看到整个传播过程与空间演变(图6)相 一致,北传的特征非常明显,但模拟的 ISO 向北传 播的速度要慢于 NCEP 资料的结果,约为每天 0.7 纬度。

5 北传 ISO 的结构特征

下面将进一步分析向北传播的热带 ISO 的垂直结构,这将有利于揭示向北传播的动力机制。图 8 是合成的 NCEP 资料向北传播的 ISO 的经向垂直结构。包括垂直速度、涡度、散度和比湿。ISO 对



图 5 SAMIL 模拟的南亚地区 (70°E~100°E) 平均 30~60 天带通滤波降水的时间-纬度剖面图。等值线间隔为 1 mm/d, 阴影区为正值 Fig. 5 Time - latitude sections of 30 - 60-day band-pass filtered precipitation averaged over 70°E - 100°E from the SAMIL model. Regions of positive values are shaded and the contour interval is 1 mm/d

流中心位于(5°N,70°E~100°E)。从图 8a 可以看 出,与北传 ISO 相对应的垂直速度场表现为正压结 构,ISO 对流区基本为强的上升运动所控制,且最 大的上升运动发生在对流层中层(350 hPa 附近), 水平方向上最大的上升运动并不位于对流中心的上 空,而是位于对流区的前方(北面)3个纬距左右。 涡度场 (图 8b) 最明显的一个特征就是其相对于 ISO 对流中心的经向不对称性,对流中心以北为强 的正涡度区,正涡度中心位于 ISO 对流中心以北 2 ~3 个纬距,对流中心以南为弱的正涡度和负涡度 控制。另外,在垂直方向与北传 ISO 对应的涡度在 对流层表现出了相当正压的结构,大的涡度值主要



Fig. 6 Evolution of the 30-60-day band-pass filtered rainfall (mm/d) from day -16 to day 16 from the SAMIL model. The contour interval is 0.5 mm/d and regions with values greater than 0.5 mm/d are shaded



图 7 SAMIL 模拟的南亚地区 (70°E~100°E) 平均 30~60 天 带通降水的纬度-滞后时间图 (单位: mm/d)。阴影为大于 0.5 mm/d

Fig. 7 Latitude – lag time section of composite 30 - 60-day band-pass filtered rainfall (mm/d) averaged over $70^{\circ}E - 100^{\circ}E$ from the SAMIL model. Regions with values greater than 0.5 mm/d are shaded

分布在对流层中低层。散度场的结构(图 8c)表现 为低层辐合和高层辐散的"斜压"结构,同样对流 层低层尤其是行星边界层的辐合超前于对流,最大 的辐合位于对流中心的前方(北面),并且行星边 界层的辐合向南倾斜。从水汽场来看(图 8d),正 的水汽异常控制了ISO对流区,水平结构上也表现 出了经向不对称的特征,最大的水汽正异常中心并 不在对流区及其上空,而是位于对流中心以北3个 纬距左右,在垂直方向水汽异常的大值中心位于 700 hPa 附近。

图 9 是合成的模式模拟的向北传播 ISO 的经 向垂直结构。可以看出,模式模拟出了大部分观测 的北传 ISO 的垂直结构特征。上升运动(图 9a) 控 制了 ISO 的对流区,并且最大的上升运动位于 ISO 对流中心的前方(北面),这些与 NCEP 资料的结 果都比较一致。但上升运动的中心过于偏北(对流 中心前 5 个纬距),而且在垂直方向上升运动中心 位于对流层的中低层(600 hPa 附近),低于 NCEP 的高度(300 hPa)。模式模拟的北传 ISO 的涡度场 (图 9b)也有同 NCEP 资料相一致的经向不对称的 结构特征。对流区的北面有强的正涡度,南面为弱 的或负的涡度区。同样,与 NCEP 资料相比正的涡 度超前于对流的距离大于 NCEP 资料,正涡度中心 位于对流前方的 5 个纬距。散度场的结构(图 9c) 与 NCEP 资料的结果也有很好的一致性,对流层低 层到行星边界层的辐合超前于对流。同样,模拟的 水汽场(图 9d)的主要结构特征与 NCEP 资料的结 果也一致,强的水汽正异常分布在对流区前方(北 面),在垂直方向上水汽中心位于 850 hPa 附近,低 于 NCEP 资料的 700 hPa。

6 夏季南亚季风区 ISO 北传机制的 讨论

与热带 ISO 向东传播相比, 南亚夏季风期间 ISO向北传播的机制并没有得到完全的解释。最早 Webster^[31]基于一个海气耦合模式的模拟结果认为 地表进入行星边界层的热通量反馈造成了一个经向 的加热梯度,最大的加热总是位于上升运动的北 面,进而导致 ISO 的向北传播。然而,观测结果显 示最主要的向北传播并不是在陆地上,而是在北印 度洋上。由图 3 也可以看出, 向北传播的 ISO 对流 中心主要沿着孟加拉湾向北传播,到达陆地上之后 ISO 振幅明显减弱。另外,从 ISO 气候态上看(图 1a),北印度洋 ISO 的活动要明显强于陆地上。 Goswami 和 Shukla^[32]提出一个与 Webster^[26]不同 的观点,他们发现在一个纬向对称的模式中,热带 云团内部的对流动力反馈可以导致对流稳定和不稳 定之间的振荡。模式在对流层低层模拟出了一种从 南半球向北传播的扰动波,而且这种扰动波在干的 大陆上难以模拟出来,但是他们并没有提出 ISO 向 北传播的机制。后来, Wang 和 Xie^[33]又提出了一 种 Rossby 波频散假设,不过这个假设并不能对相 对独立的向北传播的 ISO 给出很好的解释。另外, 海气相互作用也可能是造成 ISO 向北传播的可能 机制^[34],然而,海气相互作用在 ISO 北传中是否是 主动的,并不十分清楚,海温变化也可能只是大气 强迫的响应。

最近, Jiang 等^[35]基于 NCEP 再分析资料和模 式结果的分析,提出一个南亚季风区 ISO 北传的机 制。他们认为,南亚季风区夏季北传 ISO 的结构表 现为明显的经向不对称的特征,正如前文所分析的 结果(图 8),正的涡度和水汽总是位于 ISO 对流的 前方(北面),并认为这种经向不对称性对于 ISO 向北传播起着关键的作用。从 SAMIL 模拟的结果 来看(图 9),模式也很好地模拟出与观测相似的 ISO 的这些结构特征,这也可能就是该模式能够模



图 8 NCEP 资料得到的向北传播 ISO 的经向垂直结构: (a) 垂直速度 (单位: Pa/s); (b) 涡度 (单位: 10⁶ s⁻¹); (c) 散度 (单位: 10⁶ s⁻¹); (d) 比湿 (单位: kg/kg)

Fig. 8 Meridional – vertical structures of the northward propagating ISO from NCEP data: (a) Vertical velocity (Pa/s); (b) vorticity (10^6 s⁻¹); (c) divergence (10^6 s⁻¹); (d) specific humidity (kg/kg)

拟出 ISO 向北传播的一个关键之处。根据他们提 出的机制,正是由于 ISO 对流前方正的正压涡度的 产生才进而造成前方行星边界层的水汽辐合(图 8c、d),进而造成 ISO 对流的向北移动。而正的正 压涡度产生所需要的一个关键条件则是风的垂直切 变的存在。如图 10a、b 所示,南亚夏季对流层低层 (850 hPa) 平均为西风,高层(200 hPa)平均为东 风,平均气流存在垂直东风切变,正是在有风的垂 直切变的平均气流中,自由大气中的正压和斜压模 的耦合导致了正的正压涡度的产生。这一机制他们 称为"垂直切变机制"。而关于这一点,在李崇银 很早的一个研究^[36]中就已明确指出,南亚地区风 场的垂直结构特征是那里 ISO 向北传播的重要机 制。SAMIL 对南亚夏季风场的模拟比较真实,风



图 9 同图 8, 但为 SAMIL 模拟的结果 Fig. 9 Same as Fig. 8, but for SAMIL simulation

的垂直切变特征的模拟又很好(图 10c、d),说明风场的垂直切变对模拟 ISO 的向北传播有重要作用。

另外一个关键的问题是行星边界层水汽的向北 移动,这其中重要的是夏季南亚季风区平均的水汽 分布形势。图 11a 给出了由 NCEP 资料得到的夏 季南亚地区行星边界层水汽的经向分布,可以看到 最大的水汽分布在 20°N 附近,向南逐渐减小,因 此从赤道到 20°N 为正的水汽梯度。这样,与对流 活动的北面行星边界层为北风异常(v_B<0)相对 应,有正的水汽输送,在 ISO 对流的北面会形成正 的水汽异常,也就造成了图 8d 所示的水汽经向不 对称结构,不对称的水汽扰动进一步导致对流加热 的向北移动,产生 ISO 的向北移动。从 SAMIL 模 式模拟的结果看,夏季南亚行星边界层水汽的经向 分布与 NCEP 资料的结果也有很好的一致性(图 11b)。因此从模式模拟的结果来看,行星边界层水 汽的不对称分布及其向北移动,也是 SAMIL 能模 拟出 ISO 向北传播的原因之一。



图 10 NCEP 资料 (a、b) 和 SAMIL 模拟 (c、d) 的夏季 (6~8月) 850 hPa (a、c) 和 200 hPa (b、d) 平均风场 Fig. 10 Summer mean (Jun-Aug) (a, c) 850-hPa and (b, d) 200-hPa wind from (a, b) NCEP data and (c, d) the SAMIL model



图 11 NCEP 资料 (a) 和 SAMIL 模拟 (b) 的夏季南亚地区 (70°E~100°E) 平均的 925 hPa 水汽的经向分布 Fig. 11 Meridional distribution of the summer mean 925-hPa specific humidity averaged over South Asia region (70°E - 100°E) from (a) NCEP data and (b) the SAMIL model

7 结论

本文在与 NCEP 再分析资料对比的基础上,研究了大气环流模式 SAMIL 对夏季南亚季风区 ISO

向北传播的模拟,并结合目前对 ISO 北传的理解, 对模拟结果进行了分析讨论。得到以下几点主要结论:

(1) 夏季南亚季风区季节内的对流活动主要分

布在北印度洋,空间上有两个大值中心,一个位于 70°E的北印度洋,另外一个在 90°E 附近的孟加拉 湾。SAMIL 模式在夏季南亚地区也产生了比较强 的季节内振荡活动,也有两个大值区,只是其位置 比观测结果略偏东。

(2) 夏季南亚季风区 ISO 表现出明显的从赤道 向北传播的特征,最远可以到达 25°N,并且向北的 传播与向东的传播有一定的独立性。SAMIL 也模 拟出了 ISO 从赤道地区向北传播的过程,尽管 ISO 降水的空间尺度比观测的要小,而且速度要略慢于 NCEP 资料的结果。

(3) SAMIL 模拟的北传 ISO 的结构特征与 NCEP 资料的结果有很好的一致性。与北传 ISO 相对应的涡度和水汽场的结构表现为明显的经向不 对称,正的涡度和水汽位于 ISO 对流的前方(北 面)。最强的上升运动和最大的行星边界层的辐合 也位于 ISO 对流的北面。

(4) 夏季南亚季风区风场垂直结构和行星边界 层水汽分布的真实模拟是造成其模拟的北传 ISO 有类似观测结构特征的关键因素,这进一步从一个 侧面证实南亚季风区风场的垂直切变和 ISO 涡度 和水汽场的经向不对称性是 ISO 北传的重要原因。

参考文献 (References)

- Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J. Atmos. Sci., 1971, 28: 702~708
- Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with 40 50 day period. J. Atmos. Sci., 1972, 29: 1109~1123
- Murakami T, Nakazawa T, He J, et al. On the 40 50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer. Part I: Phase propagation. J. Meteor. Soc. Japan, 1984, 62: 440~468
- Li Chongyin, Wu Peili. An observational study of 30-50 day atmospheric oscillations. Part I: Structure and propagation. Advances in Atmospheric Sciences, 1990, 7: 294~304
- [5] Sperber K R. Propagation and the vertical structure of the Madden-Julian Oscillation. Mon. Wea. Rev., 2003, 131: 3018~3037
- [6] 李崇银,龙振夏,穆明权.大气季节内振荡及其重要作用. 大气科学,2003,27(4):518~535
 Li Chongyin, Long Zhenxia, Mu Mingquan. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect. *Chinese J*.

Atmos. Sci. (in Chinese), 2003, 27 (4): 518~535

- [7] 董敏,张兴强,何金海. 热带季节内振荡时空特征的诊断研究. 气象学报, 2004, 62 (6): 821~830
 Dong Min, Zhang Xingqiang, He Jinhai. A diagnostic study on the temporal and spatial characteristics of the tropical intraseasonal oscillation. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2004, 62 (6): 821~830
- [8] 杨辉,李崇银. 热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究. 气候与环境研究, 2005, 10 (2): 145~156 Yang Hui, Li Chongyin. A study of propagation of tropical intraseasonal oscillation and its influence mechanism. *Climatic and Enviromental Research* (in Chinese), 2005, 10 (2): 145~156
- [9] 董敏, Zhang Chidong, 何金海. 外强迫对热带季节内振荡影 响的模拟研究. 大气科学, 2006, **30** (3): 413~422 Dong Min, Zhang Chidong, He Jinhai. A simulation study of the influence of external forcing on the tropical intraseasonal oscillation. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (3): 413~422
- [10] Yasunari T. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon. J. Meteor. Soc. Japan, 1979, 57: 227~242
- [11] Krishinamurti T N, Subrahmann D. The 30 50 day mode at 850 mb during MONEX. J. Atmos. Sci., 1982, 39: 2088~ 2095
- Sikka D R, Gadgil S. On the maximum cloud zone and the ITCZ over Indian, longitudes during the southwest monsoon. Mon. Wea. Rev., 1980, 108: 1840~1853
- [13] Lorenc A C. The evaluation of planetary-scale 200 mb divergence during the FGGE year. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1984, 110: 427~441
- [14] Hendon H H, Liebmann B, Newman M, et al. Mediumrange forecast errors associated with active episodes of the Madden-Julian Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 69 ~86
- [15] Slingo J M, Sperber K R, Boyle J S, et al. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: Results from an AMIP diagnostic subproject. *Climate Dyn.*, 1996, **12**: 325~357
- [16] 贾小龙,李崇银.热带大气季节内振荡数值模拟对积云对流参数化方案的敏感性. 气象学报, 2007, 65 (6): 837~855
 Jia Xiaolong, Li Chongyin. Sensitivity of numerically simulated tropical intraseasonal oscillations to cumulus schemes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, 65 (6): 837~855
- [17] Jia Xiaolong, Li Chongyin, Ling Jian, et al. Impacts of a GCM's resolution on MJO simulation. Adv. Atmos. Sci., 2008, 25 (1): 139~156
- [18] 蒋国荣, 俞永强, 何金海.季节内振荡的数值模拟 I. 模拟的 自然变率. 大气科学, 2007, 31 (3): 536~546
 Jiang Guorong, Yu Yongqiang, He Jinhai. Numerical simu-

lation of the intraseasonal oscillation. Part I: Simulative natural variability. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 2007, **31** (3): $536\sim546$

- [19] 俞永强,蒋国荣,何金海.大气季节内振荡的数值模拟 II. 全球变暖的影响.大气科学,2007,31(4):577~585
 Yu Yongqiang, Jiang Guorong, He Jinhai. Numerical simulation of the intraseasonal oscillation. Part II: Impact of global warming. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, 31 (4): 577~585
- [20] 董敏,李崇银.热带季节内振荡模拟研究的若干进展.大气科 学,2007,31(6):1113~1122
 Dong Min, Li Chongyin. Some progress in the simulation study of the intraseasonal oscillation of the tropical atmosphere. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007,31(6): 1113~1122
- [21] Sperber K R, Brankovic C, Déqué M, et al. Dynamical seasonal predictability of the Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 2226~2248
- [22] Kang I S, Jin K, Wang B, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs. *Climate Dyn.*, 2002, **19**: 383~395
- [23] Waliser D E, Jin K, Kang I S, et al. AGCM simulations of intraseasonal variability associated with the Asian summer monsoon. *Climate Dyn.*, 2003, 21: 423~448
- [24] 贾小龙,李崇银,周宁芳. 热带大气季节内振荡的一个数值 模拟研究. 气象学报, 2004, 62: 725~739
 Jia Xiaolong, Li Chongyin, Zhou Ningfang. A GCM study on the tropical intraseasonal oscillation. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2004, 62: 725~739
- [25] Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. J. Climate, 1991, 4 (3): 345~364
- [26] Slingo J M. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1987, 113 (7): 899~927

- [27] Manabe S, Smagorinsky J, Strickler R F. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. Mon. Wea. Rev., 1965, 93 (12): 769~798
- [28] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦 合模式 FGOALS-s. 北京: 气象出版社, 2005. 288pp Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. General Circulation Model-SAMIL and the Coupled Model FGOALS-s (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 288pp
- [29] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77: 437~471
- [30] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, 78: 2539~2558
- [31] Webster P J. Mechanisms of monsoon low-frequency variability: Surface hydrological effects. J. Atmos. Sci., 1983, 40: 2110~2124
- [32] Gyoswami B N, Shukla J. Quasi-periodic oscillations in a symmetric general circulation model. J. Atmos. Sci., 1984, 41: 20~37
- [33] Wang B, Xie X. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation. J. Atmos. Sci., 1997, 54: 72~86
- [34] Kemball-Cook S, Wang B. Equatorial waves and air sea interaction in the boreal summer intraseasonal oscillation. J. Climate, 2001, 14: 2923~2942
- [35] Jiang Xianan, Li Tim, Wang Bin. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. J. Climate, 2004, 17: 1022~1039
- [36] 李崇银.南亚夏季风槽脊和热带气旋活动与移动性 CISK 波. 中国科学, 1985, 15: 668~675
 Li Chongyin. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclones over South Asia and the moving CISK mode. Science in China (Series B), 1985, 28: 1197~1206