

大气季节内振荡研究的新进展^{*}

李崇银

中国科学院大气物理研究所大气数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 大气季节内振荡(ISO)在长期天气和短期气候变化中有重要作用, 20世纪80年代以来一直是大气科学的重要前沿研究课题. 文中在简要回顾大气季节内振荡的主要研究成果的基础上, 论述了新近的研究进展. 主要包括热带大气ISO的传播规律; 大气季节内振荡对南海夏季风爆发及对南海(东亚)夏季风活动异常的重要作用; 热带大气季节内振荡与El Niño(La Niña)的相互作用关系; 以及大气季节内振荡的数值模拟等.

关键词 季节内振荡(ISO) 动力学机制 夏季风活动及异常 恩索(ENSO)

大气季节内(30~60 d)振荡已被视为重要的大气环流系统之一, 它的活动及其异常对不少地区的天气和气候都有重大影响. 因此, 自大气季节内振荡(ISO)在20世纪70年代初被发现以来^[1, 2], 国际上对其进行了一系列研究. 但是, 大气ISO的活动及其影响等不少问题还在深入研究, 近几年又进一步揭示了有关大气ISO的一些新事实, 以及大气ISO对一些气候系统的重要作用, 大气ISO的数值模式研究更引起大家的重视. 本文针对大气ISO领域的发展趋势, 结合作者近年的研究成果, 综合评述大气ISO研究的新进展.

1 大气季节内振荡研究简史

在Madden和Julian发现热带大气季节内振荡(故也有人称其为MJO)之后, 开始并未引起人们的多大注意. 到上世纪80年代初, 先后发现印度季风区的云量有30~40 d的周期变化^[3]、印度季风区的槽脊活动也有30~50 d的振荡和向北传播^[4], 而分析200 hPa的辐散场也发现有30~50 d振荡的东传^[5]. 这样, 大气季节内振荡的研究便得到蓬勃开展, 有关热带大气季节内振荡的结构特征和基本活动规律研究较多, 它们也被揭露得较为清楚^[6~11].

认为热带大气ISO主要表现为对流层上、下呈反相的“斜压”结构, 有纬向东传和经向北传的活动特征. 但在赤道以外的热带, 尤其是在副热带地区, 大气ISO的西传也十分明显^[12]; 并发现即使在赤道地区, 大气季ISO也存在西传的情况^[13].

同热带大气一样, 在中高纬度大气中也存在季节内振荡^[14, 15], 但热带大气ISO与中高纬度大气ISO在结构和活动方面有着显著差异^[16]; 全球大气中以热带地区和高纬度地区的大气ISO相对最为显著和重要, 而热带大气ISO和中高纬度大气ISO的联系及相互影响主要通过大气低频遥相关波列^[17, 18]. 资料分析清楚地表明, 全球大气ISO存在着明显的4个遥相关型(波列), 而这些波列可以呈不同方式彼此相互衔接和影响. 南北半球的大气ISO也可以通过低频波列而实现跨赤道相互影响. 这种跨赤道相互作用主要在中太平洋和中大西洋地区发生, 尤其是在中太平洋地区. 另外, 资料分析清楚地表明, 全球大气ISO的时间变化在不同纬度带有所不同, 热带大气ISO在冬季和夏季的强度没有很明显的差别, 但却有极为清楚的年际变化; 而中高纬度的大气ISO有极显著的年变化(冬季强而夏季弱), 但年际变化相对其年变化却显得弱一些.

2003-10-08 收稿, 2003-12-26 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40233033)和中国科学院创新项目(ZK CX2-SW-210)共同资助

李崇银^[19]曾系统地讨论了大气 ISO 结构特征、移动规律、时间变化以及动力学机制等。

关于大气 ISO 的动力学机制, 我们最先将积云对流加热反馈引入热带大气 ISO 的动力学研究, 指出了 CISK 是激发产生热带大气 ISO 的重要机制^[20], 其后国外也开展了一系列相关研究^[21~23], 后来我们又指出 CISK-Rossby 波的重要作用, 从而完善了热带大气 ISO 的 CISK 波理论^[24~26]. 虽然有人提出了大气 ISO 的蒸发-风反馈机制^[27, 28], 但人们还是把它同积云对流加热反馈一起考虑成大气 ISO 的动力学机制^[29]. 进一步的动力学研究表明单独的蒸发-风反馈作用不能激发大气 ISO, 但与 CISK 机制相结合可以使激发波不稳定^[30, 31], 从而能更全面解释热带大气 ISO 的活动. 通过数值模拟研究, 还揭示了大气对外强迫的低频响应特征, 提出大气的低频遥响应也是大气 ISO 产生的重要动力学机制^[32, 33]. 波-流相互作用, 以及波共振相互作用等也被研究表明对激发产生中高纬度大气 ISO 有重要作用, 从而大气非线性过程也被视为大气 ISO 的动力学机制^[34~38].

2 大气季节内振荡研究的近期主要进展

2.1 关于大气季节内振荡的传播

关于热带大气季节内振荡的传播已有不少的研究, 但仍有不少问题未被完全搞清楚, 以至在 2003 年的 IUGG 科学大会中^[1], 热带大气季节内振荡的传播仍成为一个专题研讨的内容。

热带大气 ISO 传播(尤其是纬向传播)的研究新进展, 有两个方面值得提出. 其一是关于热带大气 ISO 的传播与 ENSO 的关系, 其二是对流加热分布对热带大气 ISO 传播的影响。

一些个例的分析已表明, 赤道大气 ISO 的显著系统性东传与 El Niño 事件的发生有一定关系. 进一步分析 1955 年以来在 El Niño 年和 La Niña 年赤道大气 ISO 的主要纬向移动特征, 分别选择典型的 4 个 El Niño 年(1965, 1982, 1987 和 1997 年)和 4 个 La Niña 年(1967, 1970, 1988 和 1998 年)的形势进行对比, 发现各年虽有一些不同, 但分别在 El

Niño 年和 La Niña 年有大体相近的特征. 在 El Niño 年赤道大气 ISO 的系统东移不仅在冬半年十分显著, 而且在夏季也表现出明显的东移特征; 但在 La Niña 年, 200 hPa 上赤道大气 ISO 除了秋冬季的东移不如 El Niño 年明显之外, 最为突出的是夏季的纬向移动以西传为主, 尽管系统性没有东传那么清楚(图略). 也就是说, 大气 ISO 的明显系统性东传同 El Niño 的发生有一定关系。

在一个数值模拟试验中曾发现, 热带大气 ISO 的纬向传播与太平洋地区降水量(对流加热)的分布有关^[39]. 最近的资料分析也证实了这个结果, 以 1960 和 1990 年为例作对比分析, 1960 年赤道大气 ISO 的东传不太明显, 并可见西传情况; 而 1990 年赤道大气 ISO 的东传比较显著(图 1). 这两年的对流活动(对流加热)有显著的差异, 因 1960 年无 OLR 资料可用, 我们分析了 NCEP/NCAR 的降水率(mm/d)的演变, 以及计算了它们的潜热加热场(Q_2 ^[40])及其演变, 进而对比分析两年的差异. 图 2 是 10°S~10°N 纬带平均的可降水量距平的时间-经度剖面, 它十分清楚地表明 1960 年赤道太平洋区域的降水量是东边多、西边少; 而 1990 年是西边多、东边少. 也就是说, 对流加热在 1960 年(1990 年)是赤道东(西)太平洋强于赤道西(东)太平洋. 与之对应的大 ISO 的纬向移动情况也与 GCM 模拟结果相一致, 赤道东太平洋出现异常强降水(对流加热)不利于大气 ISO 的系统东传。

2.2 大气季节内振荡对亚洲夏季风活动的影响

中国学者对亚洲夏季风的季节内振荡特征已有不少研究^[19, 41, 42], 这里将就大气季节内振荡对亚洲夏季风活动的影响方面作简要介绍。

2.2.1 亚洲夏季风的建立和大气季节内振荡

中国学者早就指出亚洲夏季风最先在南海地区爆发, 然后分别向北和向西北推进而建立起东亚夏季风和南亚夏季风. 而根据风场资料和 TBB 资料的分析都表明, 1998 年南海夏季风于 5 月 21 日爆发^[43], 夏季风的爆发还与 30~60 d 低频振荡的活动有密切关系. 从南海地区(5°~20°N, 105°~120°E)850 hPa

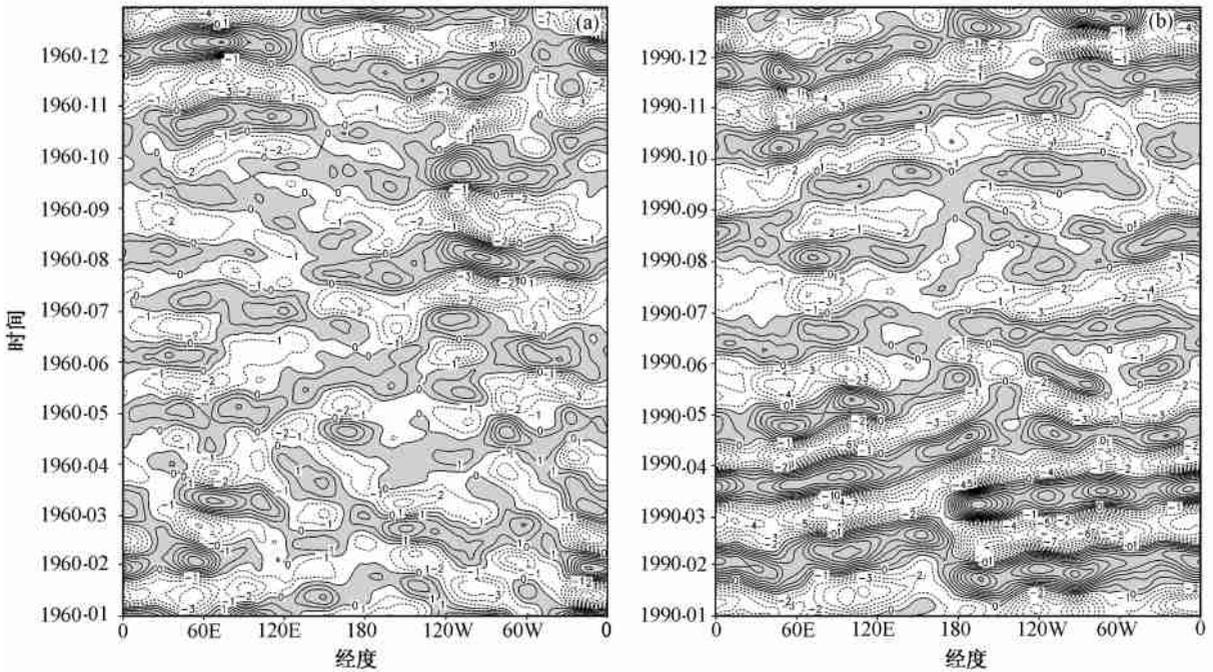


图 1 200 hPa 上赤道大气 ISO 纬向风分量(m/s)的时间-经度剖面

(a) 1960 年情况; (b) 1990 年情况

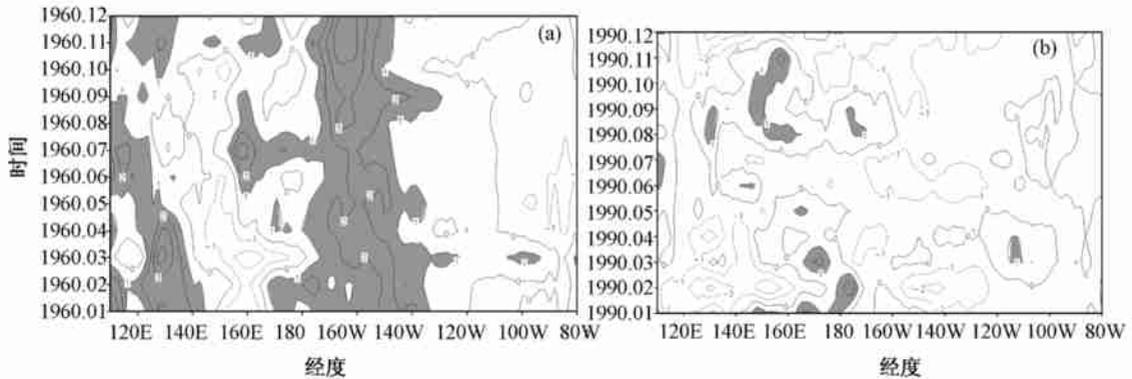


图 2 10°S~10°N 纬带平均的降水率距平(mm/d)的时间-经度剖面

(a) 1960 年情况; (b) 1990 年情况

纬向风、30~60 d 低频纬向风以及低频动能随时间的演变可以看到(图略), 不仅南海季风区存在明显的大气 30~60 d 低频振荡的活动, 而且南海夏季风爆发与该地区的大气季节内振荡的活动有密切关系; 而且, 低频纬向西风出现的时间比季风爆发时间(5月21日)约早 2 d。从南海夏季风爆发前后 850 hPa 上大气 ISO 的水平风场的演变可以明显看到, 5月18日或更前, 菲律宾以东洋面上一直存在一个

低频气旋, 其中心位于(20°N, 130°E), 该气旋随着时间在不断发展。这个低频气旋的存在、发展和向南海的扩展对南海夏季风爆发具有十分重要的作用, 因为在这个低频气旋的影响下, 其南侧低频纬向西风也在不断发展, 并不断向西扩展, 加强南海低频纬向西风, 从而最终激发南海夏季风的爆发^[44]。

分析其他年南海夏季风爆发前后大气 ISO 的活动情况, 其结果与 1998 年有类似的特征, 进一步

说明菲律宾东面大气 ISO 的强烈发展及其向西扩展对南海地区大气季节内振荡活动有重要作用, 并进而激发夏季风的爆发.

2.2.2 大气 ISO 活动对东亚夏季风异常的影响

东亚夏季风的异常直接影响东亚地区的天气和气候, 尤其是中国东部的夏季旱涝都与夏季风的异常活动有关. 强南海夏季风年和弱南海夏季风年分别合成得到的中国东部汛期降水距平(%)的分布表明, 在弱南海夏季风年长江中下游及江淮流域汛期降水明显偏多(平均达 20%~40%); 而华南及华北地区明显少雨(平均 10%~30%); 在强南海夏季风年, 我国东南沿海及河套到华北北部和东北南部一带多雨, 而长江中下游及华北南部地区都少雨(平均达 10%~20%). 因此, 东亚夏季风的变化和异常是十分重要的科学问题, 而研究大气 ISO 对东亚夏季风变化的影响对认识和预测东亚夏季风活动以及中国东部的夏季旱涝有重要意义.

在已有关于夏季风强弱研究的基础上, 对强、弱南海夏季风年分别进行合成分析表明, 无论在对流层中层(850 hPa)还是在对流层高层(200 hPa), 大气环流形势都有明显的异常特征^[45]. 在强、弱南海夏季风年合成的 6~8 月平均的 850 hPa 风场的差异形势图中表明, 其主要差别是: 强夏季风年在 5°~20°N 纬带有更强的西风, 在南海东北部地区强夏季风年有更强的气旋性环流存在(图略). 对应强、弱南海夏季风情况, 合成的 850 hPa 大气 ISO 的流场差异形势图表明, 强南海夏季风情况下, 在南海及西太平洋地区有强 ISO 流场, 弱南海夏季风情况下, 大气 ISO 流场相当弱; 而且对应强南海夏季风, 大气 ISO 流场在南海-西太平洋地区为强气旋性环流, 对应弱南海夏季风却为弱反气旋环流(图略). 因此可以认为, 大气季节内振荡在南海及附近地区的活动对于强东亚夏季风形势的建立起着重要的作用.

大家知道, 亚洲夏季风系统在对流层上层(200 hPa)也有其典型特征, 即有强大的青藏高原反气旋的存在. 分析也同样表明, 大气 ISO 的活动, 尤其是在青藏高原上空的低频反气旋环流对强东亚夏季风形势的建立和维持有重要作用.

2.3 大气季节内振荡对 El Niño 的激发作用

虽然 ENSO 循环和热带大气 ISO 在时间尺度上

具有很大的差异, 前者为年际时间尺度的变化, 而后者则属于季节内时间尺度的范围. 但比较早就有人推测, 通过增幅减频作用, 热带大气 ISO 可能对 El Niño 有激发^[46]. 进一步的分析研究表明, 在 El Niño 发生之前热带大气的 ISO 异常活跃, 而在 El Niño 期间, ISO 则相对偏弱, 两者有明显相互作用^[47]. 而且, 强的大气 ISO 可导致热带太平洋地区的西风爆发, 进而激发出异常的海洋 Kelvin 波和 El Niño 事件; 同时, 热带大气 ISO 的明显年际变化, 作为一种外部强迫, 可能是 ENSO 循环的非周期性的主要原因^[48, 49].

2.3.1 热带大气 ISO 的年际变化及与 ENSO 的关系

从动能角度研究热带大气 ISO 的年际变化与 ENSO 循环之间的关系表明, 热带大气 ISO 动能的年际变化的最强区域集中在热带西太平洋地区. 图 3 给出了热带大气 ISO 动能的标准方差(近似代表热带大气低频动能的年际变化)的分布^[50], 其中阴影部分代表标准方差大于 0.9 的区域, 从图中可以看出, 尽管在印度洋地区有零星的大于 0.9 的区域,

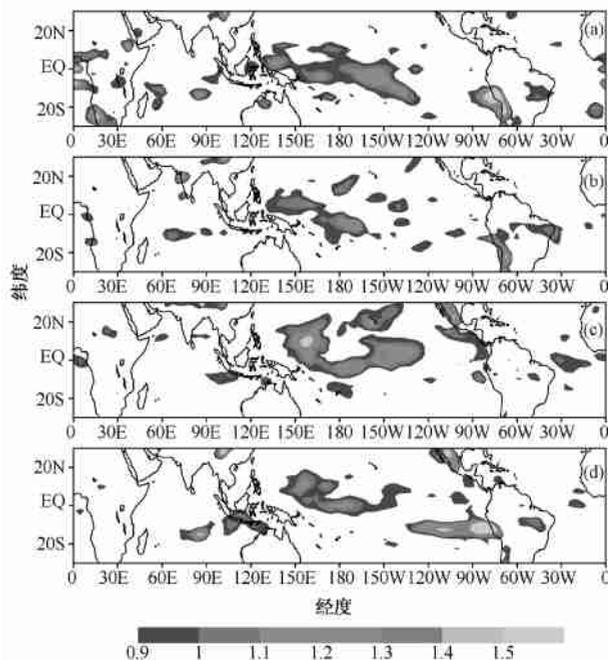


图 3 850 hPa 标准化热带大气季节内振荡动能的标准差分布^[50]

阴影区表其值大于 0.9 (a) 12 月~次年 2 月平均;

(b) 3~5 月平均; (c) 6~8 月平均; (d) 9~11 月平均

但整片大于 0.9 的区域却位于赤道中西太平洋, 这与热带大气 ISO 动能的气候分布有着明显的不同。因此, 热带中西太平洋地区可能在热带大气 ISO 的年际变化中起着十分重要的作用。

Niño3.4 区的 SSTA 常用来描述 ENSO 循环, 而 El Niño 的最强期在 11 月左右, 因此应分析 10 ~ 12 月平均的 Niño3.4 区的 SSTA 序列与全球 ISO 动能的相关, 从相关系数的分布(图略)可以看出, 在 El Niño 成熟之前的冬季, 大气 ISO 动能与 SSTA 相关的显著性较差, 而在 El Niño 成熟之前的春、夏季其相关较为明显, 且相关区随着 ISO 动能的正距平中心逐渐东移, 当 El Niño 成熟之后, 相关又明显减弱。这些结果显示, 春、夏季热带西太平洋大气 ISO 可能在 El Niño 的形成中起着重要的作用。图 4 给出了对五个强 El Niño 合成的 Niño3.4 区域 SSTA 和赤道西太平洋 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$) 大气 ISO 动能的演变图, 其中横坐标的(-1), (0) 和(+1)分别表示 El Niño 爆发的前一年, 当年和后一年。图中虚线为 Niño3.4 区域 SSTA 的变化, 清楚反映了 El Niño 的过程; 图中实线为赤道西太平洋大气 ISO 动能的演变。由图可以清楚看出, 在 El Niño 成熟之前的春、夏季, 赤道中西太平洋地区大气 ISO 动能出现明显正异常, 当 El Niño 成熟以后, ISO 动能又明显减弱。

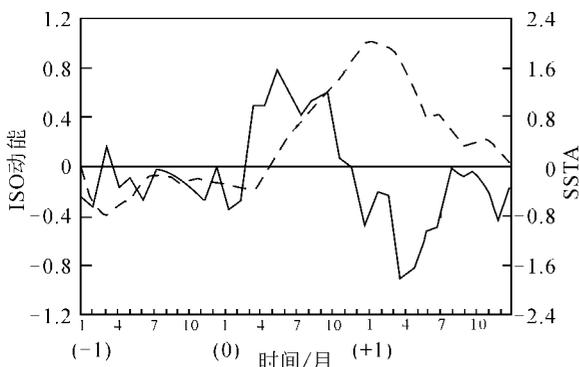


图 4 合成的 Niño3.4 区平均 SSTA(虚线)及赤道西太平洋大气 ISO 动能(实线)的时间演变^[50]

2.3.2 东亚冬季风异常与热带大气 ISO 的年际变化 已有研究表明, 异常强的东亚冬季风是激发产生 El Niño 的重要机制^[51, 52], 而其中一个重要的物理过程就是东亚冬季风所激发的较强大气 ISO 的活

动。因为冬季东亚地区的冷空活动偏强, 赤道西太平洋地区的积云对流也将加强, 而这种加强的积云对流会激发强的大气 30 ~ 60 d 低频振荡。从冬季风指数与同期 OLR 的相关系数的分布可以看到(图略), 如果东亚冬季风偏强, 赤道西太平洋地区积云对流也偏强; 反之, 如果冬季风偏弱, 则赤道西太平洋的积云对流也偏弱。这进一步证实了东亚冬季风对赤道西太平洋积云对流的激发作用, 当然也对那里的大气 ISO 有重要作用。从冬季风指数与赤道西太平洋地区大气 ISO 动能距平的时间演变也可以清楚的看出(图略), 冬季风指数与西太平洋地区大气 30 ~ 60 d 低频动能距平为负相关, 而后者略滞后前者。因此, 强(弱)东亚冬季风将可以在赤道中西太平洋地区激发出持续的强(弱)大气 ISO。

2.4 海气耦合对大气季节内振荡的影响

关于热带大气 ISO 的动力学机制, 海气耦合作用的影响可视为近来的研究进展之一。较早的研究在一个海气耦合模式的数值模拟试验中, 既存在年际振荡也存在季节内振荡^[53]。其后, 用一个简单的非线性海气耦合模式进行理论分析, 也清楚地显现出大气 ISO 的存在和特征^[54]。利用大气与海洋混合层耦合模式讨论海气相互作用对维持 MJO 的作用发现, 海洋混合层热力过程与大气的相互作用对 MJO 起着一定的支撑作用; 其物理过程包括对大气湿 Kelvin 波的不稳定化、对长波的选择性以及激发波的减速特性(使其周期在 30 ~ 60 d 范围)^[55]。用 CGCM 所作的数值模拟表明, 海气耦合的引入能更好模拟和描写大气季节内振荡^[56, 57], 也就可以认为海气耦合作用对于大气 ISO 的生成和维持可能起着一定的作用。

最近, 在一个关于大气 ISO 的理论模式研究中, 既包含积云对流加热反馈(CISK), 也引入了蒸发-风反馈和海气耦合作用^[58]。其结果清楚地表明, 虽然积云对流加热反馈机制对热带大气 ISO 的激发产生起着最为重要的作用, 但海气耦合作用有利于降低激发波的频率, 从而对热带大气 ISO 的激发和维持也有相当作用。

2.5 大气季节内振荡的数值模拟

大气 ISO 的数值模拟不仅对揭示其特征和规律有重要作用, 对于改进气候预测也有重要意义。因

此,早在1988年就有人用英国气象局的大气环流模式(GCM)对全海星球条件下的数值积分,模拟研究了大气中的MJO^[59].其3个试验虽有不同方案,模拟却都显现有大气MJO的存在.但对3个格点分辨率相同的GCM(GLAS, UCLA和GLA)所作数值模拟结果的分析表明,只有GLAS-GCM能较好模拟出大气ISO及其东传,而其他两个模式模拟结果均不理想^[60].这是因为模式的参数化和计算格式存在差异,在积分过程中所产生的风场、湿度场和加热场等都会不同,从而使大气ISO有不同的模拟结果.用澳大利亚CSIRO-GCM所作的数值模拟,模拟了大气ISO的主要特征,而且模拟表明El Niño对大气ISO有削弱作用;而热带太平洋的不同对流加热分布对大气ISO的纬向传播有重要影响^[61].

在大气环流模式比较计划(AMIP)中,用各国15个GCM就大气ISO的模拟进行了比较^[62],其结果表明,只有少数模式能较好模拟出热带大气ISO,并认为对流参数化及海-气相互作用的处理可能是主要问题.其后,专门就海-气耦合作用的试验确实表明海温的季节内变化与大气中风场和云的季节内尺度变化有关^[63].另外的研究却又表明GCM的水平分辨率^[64]和垂直分辨率^[65]对MJO的模拟有重要影响.针对AMIP的模拟结果,一个数值模拟研究所进行的系统比较分析表明,模式中对流参数化所对应的相对湿度判据(RH_C)在热带大气ISO的模拟中起着关键的作用,较高的 RH_C 可使热带大气ISO模拟较好,而低的 RH_C 将使得模拟很差^[66].同时,试验也再次证明CISK机制对热带大气ISO是十分重要的.

数值天气预报结果清楚的表明,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3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^[67].这也表明大气ISO是一个主要模式,它在热带相当于加上了一个散度场强迫.NCEP的分析和预报也表明,动力延伸预报的主要误差来自模式得到的热带大气ISO比较弱,而且东传过快^[68].总之,热带大气ISO的模拟和预报十分重要,但目前还未完全解决好这个问题.进一步

的研究还有待进行.

3 结语

自上世纪80年代以来,大气季节内振荡,尤其是热带大气季节内振荡一直是大气科学研究的国际前沿之一.其研究结果不仅对于认识大气运动的特征和规律十分重要,而且对于提高和改进数值天气和短期气候预报有重要意义.但是,直到今天仍有不少科学问题尚未完全搞清楚,尤其是有关大气ISO的数值模拟,以及如何在GCM中很好描写大气ISO的活动仍是尚待继续研究的问题.本文只是就近期的主要研究进展进行了简要介绍,因篇幅关系也不能展开作深入论述,有兴趣的读者可参阅有关文献.

本文介绍的是关于大气季节内振荡的研究进展,这里需要顺便指出,近些年来有关海洋状况的季节内振荡的研究也相当多,虽然少数研究涉及到大气运动,但到底是有关海洋学的问题,故本文没有涉及.不过这方面的研究和进展也值得我们关注.

参 考 文 献

- 1 Madden R A, et al. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 702
- 2 Madden R A, et al. Description of global scale circulation cells in the tropics with 40-50 day period. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1109
- 3 Yasunari T. A quasi-stationary appearance of 30-40 day period in the cloudiness fluctuations during the summer monsoon over India. *J Meteor Soc Japan*, 1980, 58: 225
- 4 Krishnamurti T N, et al. The 30-50 day mode at 850mb during MONEX. *J Atmos Sci*, 1982, 39: 2088
- 5 Lorenç A C. The evolution of planetary scale 200mb divergence flow during the FGGE year. *Quar J Roy Meteor Soc*, 1984, 110: 427
- 6 Murakami M. 30-40 day global atmospheric changes during the northern summer 1979. GARP Special Report, 1984, 44: 11
- 7 Murakami T, 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
- 8 Lau K M, et al. Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern winter as inferred from outgoing longwave radiation. *Mon Wea Rev*, 1985, 113: 1889
- 9 Lau N C, et al. The structure and propagation of 40-50 day oscillations appearing in a GFDL general circulation model. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 2023
- 10 Knutson T R, et al. 30-60 day atmospheric oscillation: Composite

- life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1407
- 11 Li C Y. Intraseasonal (30-50 day) oscillation in the atmosphere. Summer School on Large-Scale Dynamics of the Atmosphere, Beijing, 5-20 August 1988. 361
 - 12 Chen L X. et al. Westward propagation low-frequency oscillation and its teleconnection in the eastern hemisphere. *Acta Meteor Sin*, 1988, 2: 300
 - 13 Li C Y. et al. An observational study of 30-50 day atmospheric oscillations. Part 1: Structure and propagation. *Advances in Atmos Sci* 1990, 7: 294
 - 14 Anderson J R. et al. The latitude-height structure of 40-50 day variation in atmospheric angular momentum. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1584
 - 15 张可苏. 40~50天的纬向基流低频振荡及其失稳效应. *大气科学*, 1987, 11: 227
 - 16 Li C Y. Intraseasonal oscillation in the atmosphere. *Chinese J Atmos Sci* 1990, 14: 35
 - 17 李崇银, 等. 北半球大气环流30-60天振荡的一些特征. *中国科学*, 1990, 7: 764
 - 18 李崇银, 等. 全球大气低频遥相关. *自然科学进展* 1991, 1: 330
 - 19 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1990, 1993
 - 20 Li C Y. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclone over South Asia and moving CISK mode. *Scientia Sinica Ser B*, 1985, 28: 1197
 - 21 Lau K M. et al. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory. *J Atmos Sci* 1987, 44: 950
 - 22 Takahashi M. A theory of the slow phase speed of the intraseasonal oscillation using the wave-CISK. *J Meteor Soc Japan*, 1987, 65: 43
 - 23 Chang C P. et al. Kelvin wave-CISK: A possible mechanism for 30-50 day oscillations. *J Atmos Sci* 1988, 45: 1709
 - 24 Li C Y. A dynamical study on the 30-50 day oscillation in the tropical atmosphere outside the equator. *Chinese J Atmos Sci*, 1990, 14: 101
 - 25 刘式适. CISK-Kelvin波、CISK-Rosby波和低频振荡. *北京大学学报*, 1990, 26(3): 106
 - 26 Li C Y. A further inquiry on the mechanism of 30-60 day oscillation in the tropical atmosphere. *Advances in Atmos Sci* 1993, 10: 41
 - 27 Emanuel K A. An air-sea interaction model of intraseasonal oscillation in the tropics. *J Atmos Sci* 1987, 44: 2324
 - 28 Neelin J D. et al. Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere. *J Atmos Sci* 1987, 44: 2341
 - 29 李桂龙, 等. Wave-CISK、蒸发-风反馈和低频振荡. *大气科学*, 1993, 17: 403
 - 30 李崇银. 蒸发-风反馈的进一步研究. *热带气象学报*, 1996, 12: 193
 - 31 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2000. 132~135
 - 32 李崇银, 等. 赤道太平洋增暖对全球大气30~60天振荡的激发. *科学通报*, 1991, 36: 1157
 - 33 Li C Y. et al. On low-frequency remote responses in the atmosphere to external forcings and their influences on climate. *Climate Variability*, Beijing: China Meteorological Press, 1993. 177~190
 - 34 Wallace J M. et al. Observations of low frequency atmospheric variability. *Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere*, London: Academic Press, 1983
 - 35 Gihl M. et al. Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics. New York: Springer-Verlag, 1987
 - 36 朱抱真, 等. 大气和海洋的非线性动力学. 北京: 海洋出版社, 1991
 - 37 Luo D H. et al. The resonant interaction of forced Rossby wave and 30-60 day oscillation in extratropics. *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 111~122
 - 38 李崇银, 等. 基本气流对中高纬度大气季节内振荡的影响. *中国科学, B辑*, 1995, 25: 979
 - 39 Li C Y. et al. Numerical simulation of the tropical intraseasonal oscillation and the effect of warm SSTs. *Acta Meteor Sin*, 1995, 9: 1
 - 40 Yanai M. et al. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J Atmos Sci* 1973, 30: 611
 - 41 陈隆勋, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991
 - 42 何金海, 等. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996
 - 43 Li C Y. et al. On the onset of the South China Sea summer monsoon in 1998. *Advances in Atmos Sci*, 2000, 17: 193
 - 44 穆明权, 等. 1998年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动. *气候与环境研究*, 2000, 5: 375
 - 45 Li C Y. et al. Strong/weak summer monsoon activity over the South China Sea and atmospheric intraseasonal oscillation. *Advances in Atmos Sci* 2001, 18: 1146
 - 46 Lau K M. et al. The 40-50 day oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: A new perspective. *Bulletin Amer Meteor Soc*, 1986, 67: 533
 - 47 李崇银, 等. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系. *地球物理学报*, 1994, 37: 17
 - 48 李崇银, 等. 热带大气季节内振荡激发 El Niño 的机制. *热带气象学报*, 1998, 14: 97
 - 49 李崇银, 等. 热带低层大气季节内振荡的异常与 1997 年 El Niño 事件的发生. *大气科学*, 2001, 25: 589
 - 50 龙振夏, 等. 热带低层大气 30-60 天低频动能的年际变化与 ENSO 循环. *大气科学*, 2001, 25: 798
 - 51 李崇银. 频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 的发生. *中国科学, B辑*, 1988, 28(6): 667

- 52 Li C Y. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. *Advances in Atmos Sci* 1990, 7: 36
- 53 Hirst A C, et al. Intraseasonal and interannual oscillation in coupled ocean-atmosphere models. *J Climate* 1990, 3: 713
- 54 Li C Y, et al. Behaviour of coupled modes in a simple nonlinear air-sea interaction model. *Advances in Atmos Sci* 1996, 13: 183
- 55 Wang B, et al. Coupled modes in the warm pool climate system. Part I: The role of air-sea interaction in maintaining Madden-Julian oscillation. *J Climate*, 1998, 11: 2116
- 56 Li W, et al. Intraseasonal oscillation in a coupled general circulation model. *Chinese J Atmos Sci* 2001, 25: 132
- 57 Waliser D E, et al. The influence of coupled sea surface temperature on the Madden-Julian oscillation: A model perturbation experiment. *J Atmos Sci* 1999, 56: 333
- 58 Li C Y, et al. CISK Kelvin wave with evaporation-wind feedback and air-sea interaction-A further study of tropical intraseasonal oscillation mechanism. *Advances in Atmos Sci* 2002, 19: 379
- 59 Swinbank R, et al. Numerical simulations of the Madden and Julian oscillation. *J Atmos Sci* 1988, 45: 774
- 60 Park C K, et al. An evolution of the structure of tropical intraseasonal oscillations in three general circulation models. *J Meteor Soc Japan*, 1990, 68: 403
- 61 Li C Y, et al. Numerical simulation of the tropical intraseasonal oscillation and the effect of warm SSTA. *Acta Meteor Sin* 1995, 9: 1
- 62 Slingo J M, et al. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: Results from an AMIP diagnostic subproject. *Climate Dyn*, 1996, 13: 325
- 63 Flatau M, et al. The feedback between equatorial convection and local radiative and evaporative processes: The implications for intraseasonal oscillations. *J Atmos Sci* 54: 2373
- 64 Gualdi S, et al. Tropical intraseasonal oscillation appearing in operational analyses and in a family of general circulation models. *J Atmos Sci* 1997, 54: 1185
- 65 Inness P M, et al. Organization of tropical convection in a GCM with varying vertical resolution: implications for the simulation of the Madden-Julian Oscillation. *Climate Dyn*, 2001, 17: 777
- 66 Wang W Q, et al. The dependence on convection parameterization of the tropical intraseasonal oscillation simulated by the UIUC 11-layer atmospheric GCM. *J Climate* 1999, 12: 1423
- 67 Hendon H H, et al. Medium range forecasts errors associated with active episodes of the Madden-Julian Oscillation. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 69
- 68 Jones C, et al. Prediction skill of the Madden-Julian Oscillation in dynamical extended range forecasts. *Climate Dyn*, 2000, 16: 273