

大气季节内振荡及其重要作用^{*}

李崇银 龙振夏 穆明权

(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)

摘 要 大气季节内振荡 (ISO) 是上世纪 80 年代以来大气科学的重要前沿研究课题。作者系统地回顾和总结了十多年来在大气季节内振荡 (ISO) 及其对其他气候系统的重要作用方面的主要研究工作和成果, 尤其是新近的研究成果。主要包括热带大气 ISO 的基本特征和主要活动规律; 中高纬度大气 ISO 的基本特征和活动规律, 以及与热带大气 ISO 的主要差别; 全球大气低频 (30~60 天) 遥相关特征; 大气季节内振荡的动力学机制; 大气季节内振荡对南海 (亚洲) 夏季风爆发, 以及对南海 (东亚) 夏季风异常的重要作用; 热带大气季节内振荡与 El Niño (La Niña) 的相互作用关系。

关键词: 大气季节内振荡; 动力学机制; 季风爆发; 季风活动及异常; ENSO

1 前言

大气季节内 (30~60 天) 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 年代被发现以来^[1, 2], 国际上对其进行了一系列研究, 有关热带大气季节内振荡 (也称 MJO) 的结构特征和基本活动规律已被揭露得较为清楚^[3~6]。但就是热带大气季节内振荡的活动也仍有不少问题还有待分析搞清楚, 而中高纬度大气季节内振荡以及它与热带大气 ISO 的联系和差异都需进一步研究。中国学者的研究^[7~11] 不仅进一步揭示了热带大气季节内振荡的一些新事实, 还系统地回答了中高纬度大气季节内振荡的存在、特征以及与热带大气 ISO 的关系等一系列重要问题。

要了解大气 ISO, 其动力学机制是极重要的一环。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 CISK 机制是激发产生热带大气 ISO 的重要机制^[12], 并指出了 CISK—Rossby 波的重要作用, 从而完善了热带大气 ISO 的 CISK 波理论^[13, 14]。进一步的动力学研究还同时考虑了波动—CISK 和国外提出的蒸发—风反馈机制, 并从理论上指出了蒸发—风反馈的缺陷和实际作用^[15~17]。通过数值模拟研究, 我们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中高纬度和热带大气 ISO 产生的重要动力学机制^[18, 19]; 指出海—气耦合对于更好地描写和模拟大气季节内振荡有一定的作用^[20]。同时, 中国学者的研究^[21~23] 还指出了波—流相互作用, 以及波共振相互作用等非线性过程对激发产生中高纬度大气 ISO 的重要作用。

季风活动存在明显的季节内振荡, 而我们最近的研究又清楚表明, 热带大气 ISO

的活动对亚洲季风的建立和异常都有重要的作用^[24,25]。另外，我们的研究也已指出，大气 ISO 活动的异常同厄尔尼诺有着明显的相互作用关系^[26~29]，而且这种相互关系还有随时间变化（尤其是年代际变化）的特征^[30]。

总之，中国学者在大气 ISO 的研究中取得了不少创新性成果，本文将对此进行概括性的介绍。但因时间和篇幅所限，本文只能论及主要工作，难以介绍全部研究和结果，而且论述中只能给出少数图表，若有需要还请参阅原来的论文。

2 大气季节内振荡的结构及活动特征

2.1 大气季节内振荡的垂直结构特征

一系列的分析研究都一致表明，热带大气季节内振荡在垂直方向主要表现为“斜压”结构特征，其纬向风和温度场随高度明显西倾，以至对流层上层与对流层下层呈反相特征。然而，中高纬度的大气 ISO 却有典型的正压垂直结构特征，其高度场（温度场）和风场扰动在对流层上层和下层有一致的分布形势。

2.2 大气季节内振荡的水平结构特征

由于热带大气 ISO 实际上是多尺度的，但主要为 1 波扰动，其水平结构也就主要表现为东西向“偶极子”特征。中高纬度的 ISO 不仅主要为 2 波和 3 波的扰动，而且其水平结构更多地表现为 Rossby 波列（即低频波列）的特征。

2.3 大气季节内振荡的水平传播特征

赤道地区的大气季节内振荡主要表现为向东传播，但也有西传的情况；赤道以外的热带大气 ISO 却主要表现为向西传播。中高纬度的 ISO 主要表现为向西传播，但在高纬度地区的夏季，大气 ISO 也有东传的情况。

开始，人们较一致地认为向北传播是热带大气 ISO 的经向传播特征。但从我们的进一步分析发现，在不同地区及不同季节，热带大气 ISO 的经向传播特征却是不一样的。例如，西北太平洋地区（130°E 左右），在冬季，30°N 以南的大气 ISO 基本上是向南传播的；在夏季，大气季节内振荡在 15°N 以南是向北传播，而在 15°N 以北却明显向南传播。

2.4 大气季节内振荡的地域性特征

大气季节内振荡在全球都存在，但各地并不一样，表现出明显的地域特征。南亚地区和赤道西太平洋地区较早就被人们认为是热带大气 ISO 的主要活动区。但根据热带大气 ISO 的动能分布，赤道东太平洋地区（160~100°W）也是持续的动能大值区，表明那里也是热带大气 ISO 的主要活动区。

纬向平均的总扰动动能与纬向平均的 30~60 天振荡的动能的比较清楚地表明（图 1），热带地区和高纬度地区的大气 ISO 振荡动能相对很重要，是 ISO 的最强活动地区；中纬度的 ISO 虽有较大的动能绝对值，但在总扰动动能中的比例并不大，因此相对来讲，中纬度地区（30°~50°纬带）并不是大气 ISO 的重要活动地区。

2.5 大气季节内振荡的时间变化

全球大气中一年四季都存在 ISO，但并非时时都一样，即有明显的时间变化，而且

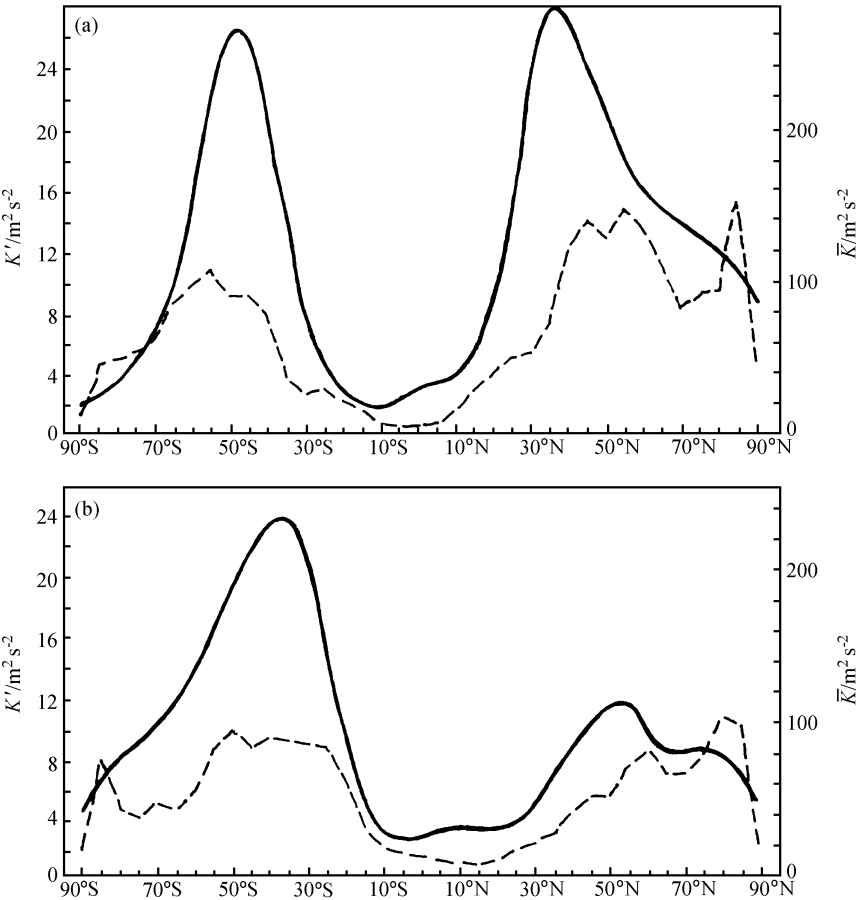


图 1 1 月份 (a) 和 7 月份 (b) 500 hPa 纬向平均扰动动能的分布 (引自文献 [10])
实线: 1963~1973 年平均的总扰动动能 $\bar{K}$; 虚线: 1984 年的 ISO 动能 K'

这种时间变化在不同纬度带还有所不同。资料分析清楚地表明，热带大气 ISO 在冬季时间和夏季时间的强度没有很明显的差别，但却有极为清楚的年际变化。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。

2.6 全球大气低频遥相关型

资料分析清楚地表明，全球大气季节内振荡存在着明显的联系，这种联系就是大气低频遥相关型（波列）。北半球有欧亚—太平洋（EUP）波列和太平洋—北美（PNA）波列，南半球有澳洲—南非（ASA）波列和环南美洲（RSA）波列。而这些波列可以呈不同方式彼此相衔接和影响（图 2）。例如，EUP 波列与南半球的 ASA 波列相联结，或者 EUP 波列与南半球的 RSA 波列相联结等等。

南北半球的大气季节内振荡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通过中太平洋和中大西洋地区而发生，尤其是通过中太平洋地区。

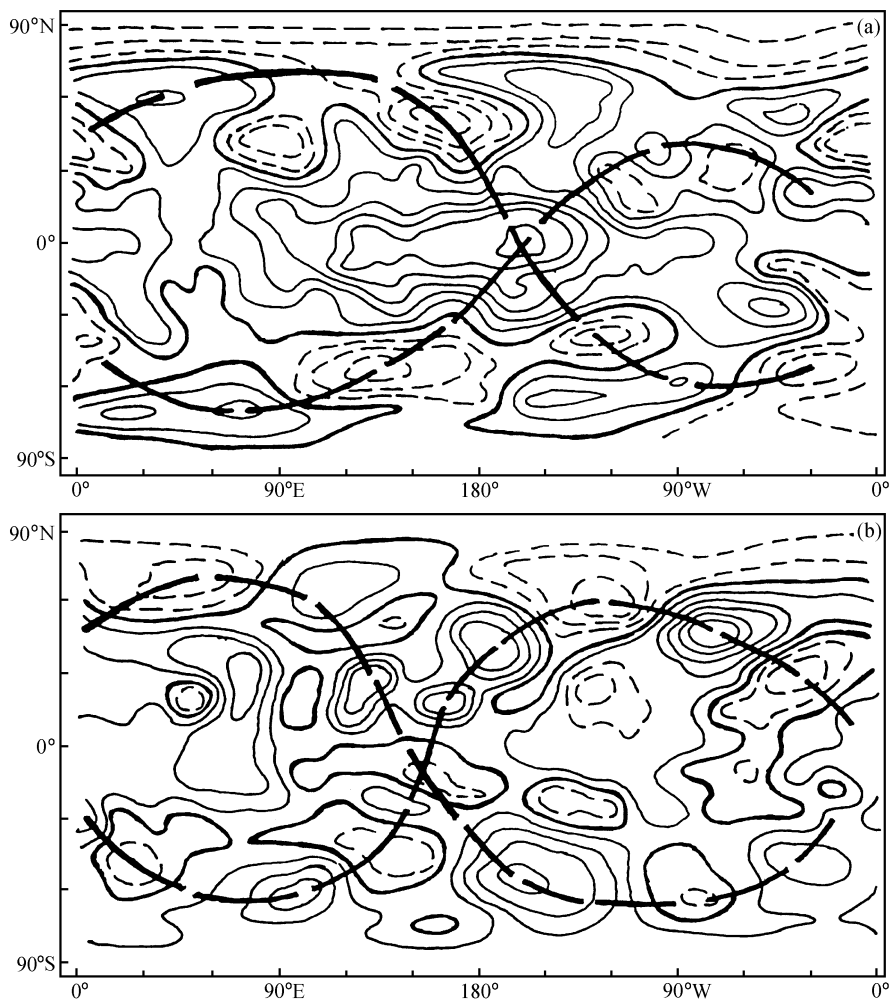


图2 30~60天带通滤波的500 hPa高度场的同时相关系数分布(引自文献 [10])
(a) 计算参考点在(160°W, 5°S); (b) 计算参考点在(70°W, 45°N)
等值线为 $\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 9$, 粗实线为0线

3 大气季节内振荡的动力学机制

3.1 积云对流加热反馈理论

在研究热带大气季节内振荡活动的同时,人们自然会考虑它的形成机制,较早的动力学研究认为热带大气低频振荡与大气内重力波有关^[31],也有人认为赤道附近地区大气运动的对称和非对称不稳定可以激发热带大气 ISO^[32,33]。但这些理论研究难以解释热带大气 ISO 的结构及活动特征。1985 年,李崇银^[12]最先将积云对流加热反馈引入热带大气 ISO 的动力学研究,提出积云对流加热反馈(CISK)是激发产生热带大气 ISO 的重要动力学机制。其后,考虑到 CISK-Kelvin 波还不能完全解释热带大气 ISO 的活动规律(例如热带大气 ISO 还同时存在西传的特征,尤其是在赤道以外地区西传

极为显著), 李崇银^[13]又研究指出积云对流加热反馈还能激发产生 CISK—Rossby 波, 它同 CISK—Kelvin 波一样均可驱动热带大气 ISO。进一步的研究更加完善了热带大气 ISO 的 CISK 波动力学理论^[14]。需要特别指出的是, 上述积云对流加流反馈理论的本质在于, 对流加热所造成的热带大气层结的改变, 将导致热带大气波动 (Kelvin 波和 Rossby 波) 减频, 从而可以激发驱动热带大气季节内振荡。

3.2 蒸发—风反馈的动力作用

为了从动力学上解释热带大气 ISO, 国外在 1987 年也提出了所谓蒸发—风反馈机制^[34]。我们将 CISK 机制和蒸发—风反馈机制同时引入一个动力学模式, 其结果表明, CISK 机制对于热带大气 ISO 的激发起着更为重要的作用^[15,16]。进一步的研究又表明, 仅有蒸发—风反馈机制并不利于激发产生大气 ISO; 但蒸发—风反馈作用可引起激发波的不稳定, 它同 CISK 机制一道考虑可以更好地解释热带大气 ISO 的特征和活动规律^[17]。在一个同时考虑上述两种反馈作用的描写热带大气 ISO 的动力学方程中, 可以将所激发的 Kelvin 波的增长率 (σ_i) 和东传速度 (C_x) 分别写成

$$\sigma_i = \frac{gE}{2C_x}, \quad (1)$$

$$C_x = \sqrt{\frac{g(D-\eta)}{2} [1 + \sqrt{1 + E^2/(D-\eta)^2 k^2}]}, \quad (2)$$

其中, g 是重力加速度, D 是大气等效厚度, η 是对流加热函数, E 是蒸发—风反馈参数, k 是扰动的东西向波数。

很显然, 如果没有对流加热和蒸发—风反馈作用, $E=0$, $\eta=0$, 那么 $\sigma_i=0$, $C_x=\sqrt{gD}\approx 50 \text{ m s}^{-1}$, 这是经典的热带 Kelvin 波。如果仅有对流加热反馈, $E=0$, $\eta\neq 0$, 那么 $\sigma_i=0$, $C_x=\sqrt{g(D-\eta)}\approx 10\sim 20 \text{ m s}^{-1}$, 这是 CISK—Kelvin 波, 因对流加热的影响, 它比经典 Kelvin 波慢得多。如果仅有蒸发风反馈, $\sigma_i\neq 0$, 波动是不稳定的, 但

$$C_x = \sqrt{gD \frac{(1+\sqrt{1+E^2/D^2 k^2})}{2}} > \sqrt{gD}, \text{ 波动东传较快, 与热带大气 ISO 有较大差异。}$$

可见单独的蒸发—风反馈难以激发热带大气 ISO。如果同时有对流加热和蒸发—风反馈作用, 那么所激发的 CISK—Kelvin 波东移较慢, 又是不稳定的, 这更符合热带大气 ISO 的情况。

3.3 大气对外源强迫的低频响应

已有的研究虽然清楚表明大气对外源 (例如海温异常等) 强迫有极为明显的遥响应^[35,36], 但是并没有搞清楚这些遥响应的基本性质, 尤其是时间演变特征。通过数值模拟试验, 尤其是对大气响应场的时间变化的分析, 我们发现大气对外源强迫的遥响应主要 (60%~70%) 是低频 (30~60 天) 遥响应^[18,19]。这种大气低频遥响应场的形势同一般的大气遥相关型有些类似, 无论在热带还是在中高纬度地区, 这种低频响应的扰动结构及其移动特征都同实际大气中所观测的大气 ISO 十分相近。因此, 可以认为大气对外源强迫的低频响应也是大气中 ISO 产生的重要机制。

3.4 大气中非线性相互作用

国外有关大气非线性相互作用过程激发产生大气 ISO 的动力学研究并不多, 但大气非线性相互作用对阻塞形势影响的研究国外已有多年的系统研究。由于阻塞形势有

10~20 天的准周期特征，它也是中高纬度大气低频振荡（变化）的重要部分。大气 ISO 同大气 10~20 天振荡都属于大气低频振荡，时间域又比较接近，就其非线性机制来讲比较一致。因此，有关阻塞环流的非线性动力学也能适用于大气 ISO。

相对来讲，中国学者^[20~22,37~39]在大气非线性相互作用激发大气 ISO 方面做了不少研究工作，包括波与波的共振相互作用、基本气流的不稳定性、波和基本气流的相互作用、大气环流的多重平衡态以及平衡态的失稳和分叉。限于篇幅，这里将不详细介绍每种非线性过程，有兴趣的读者可参阅有关论著或文章。总之，大气非线性过程是激发产生中高纬度大气 ISO 的重要动力学机制。

3.5 海—气耦合作用

由于已发现在海洋中也存在季节内振荡，海—气耦合相互作用也被认为是大气 ISO 的动力学机制之一^[40,41]。对于大气来讲，海—气相互作用主要是海洋通过加热而影响大气，这种加热作用也可以使原来的大气层结发生改变，从而影响激发波的水平传播速度。恰当的海—气耦合作用也就可成为热带大气 ISO 的一种动力学机制。我们所作的进一步比较研究^[42]表明，海—气耦合作用虽然不及对流加热反馈作用，但比较强的海—气耦合作用可以成为热带大气 ISO 的动力学机制。海—气耦合模式的数值试验表明，大气季节内振荡在这种模式中可以较好地模拟出来^[20]。

4 大气季节内振荡对亚洲季风的影响

4.1 亚洲夏季风的建立和大气季节内振荡

观测资料的分析已较全面地讨论了伴随 1998 年南海夏季风爆发，对流层大气环流的突变特征，并指出对流层低层的西太平洋副高脊撤出南海、西南气流控制南海地区以及高层西风急流轴从 30°N 以南跳到 35°N 以北是 1998 年南海夏季风爆发的极为重要的特征。利用 1998 年 NCEP 再分析资料及 TBB（Temperature of Black Body）资料，这里将讨论大气季节内振荡的活动与 1998 年南海夏季风爆发的关系。

根据南海夏季风爆发的特征，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]，而夏季风的爆发与 30~60 天低频振荡的活动有密切关系。图 3 给出了南海地区（5~20°N，105~120°E）850 hPa 纬向风以及 30~60 天低频纬向风和低频动能随时间的演变，它不仅反映出南海季风区存在明显的 30~60 天低频振荡的活动，而且也反映出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。同时，从图 3 也可以看出，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 天。同时，从低频纬向风的演变可以看到，南海地区低频西风的加强主要是由于东边低频西风向西的扩展以及局地激发所造成（图略）。因为尽管在南海季风爆发之前印度洋上也有低频纬向风明显东传，但这支低频气流的东传在季风爆发后才到达南海地区。也就是说，印度洋低频纬向风的东传可能对南海夏季风爆发后的进一步发展有影响，但对南海夏季风爆发并无明显作用。

为了进一步说明南海夏季风爆发前后大气季节内振荡的活动特征，下面我们将给出 5 月 18 日至 23 日经 30~60 天带通滤波处理的 850 hPa 水平风场（图 4）。从图 4 可以明显地看出 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

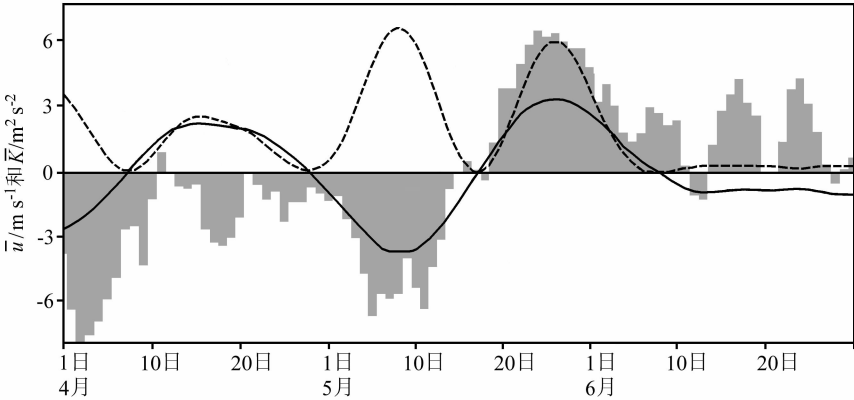


图 3 南海地区 (5~20°N, 105~120°E) 850 hPa 纬向风 (阴影) 及 30~60 天低频纬向风 (实线) 和 ISO 动能 (虚线) 随时间的演变

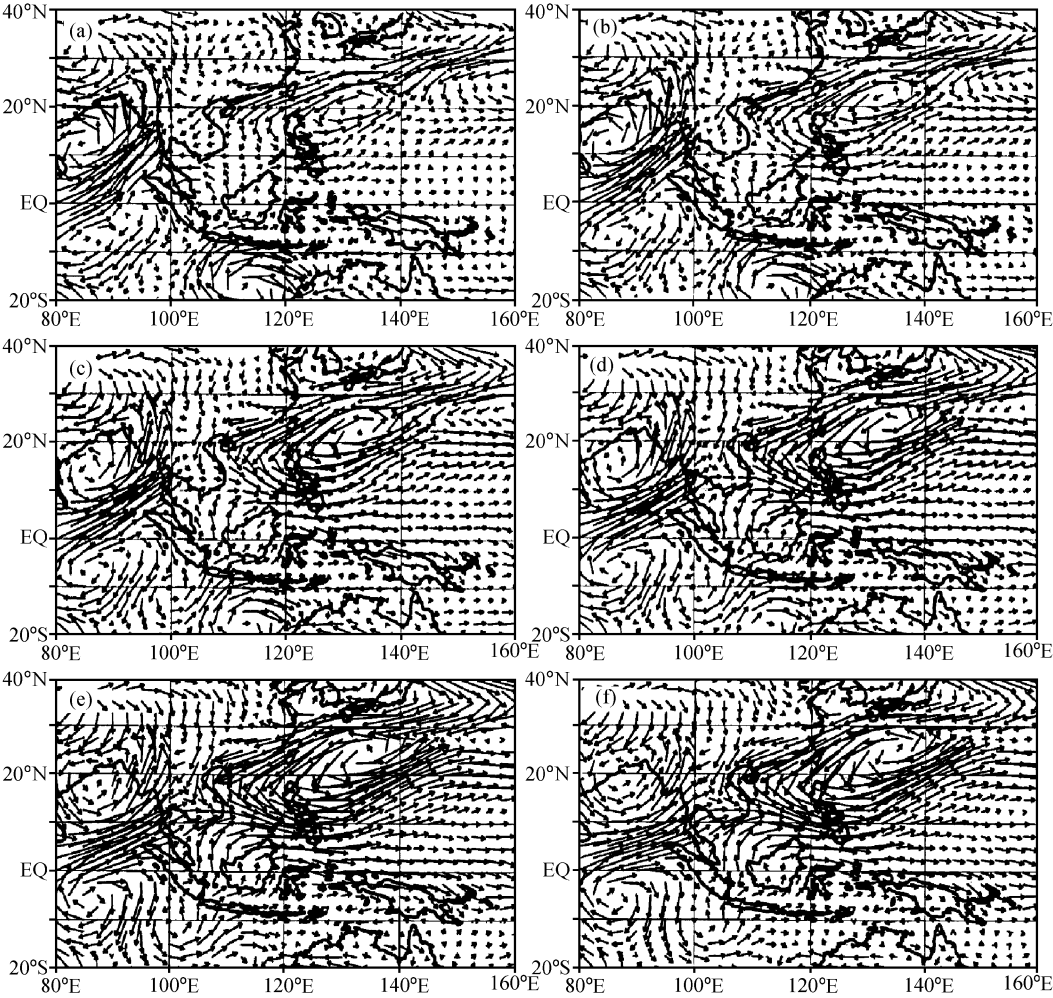


图 4 1998 年南海夏季风爆发前后 30~60 天 850 hPa 低频风场的水平分布
(a) 5 月 18 日; (b) 5 月 19 日; (c) 5 月 20 日; (d) 5 月 21 日; (e) 5 月 22 日; (f) 5 月 23 日

于 (20°N, 130°E), 该气旋随着时间在不断发展。从其时间演变上不难看出这个低频气旋的存在和发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。其实, 这个低频气旋还是以气旋对的形式存在, 它关于赤道对称的另一个气旋中心位于澳大利亚北部近赤道洋面上, 相对于其北面的气旋, 它的强度要弱得多, 5 月 18 日到 22 日它的强度随着南海低频气旋的发展而发展。另外, 印度洋上也存在一对气旋对, 与南海气旋对不同的是该气旋对在南海季风爆发前后强度少变、位置少动, 只是在季风爆发后, 其东侧的低频风才向东稍稍扩展, 从这点也可以说明孟加拉湾低频振荡的活动对 1998 年南海夏季风爆发并无明显作用。

针对 1980~1996 年 7 个南海夏季风爆发年的合成分析结果已经表明, 在南海夏季风爆发前, 850hPa 流场存在关于赤道对称的气旋对的活动^[44]。通过上面对 1998 年南海夏季风爆发期间 850hPa 低频流场的分析进一步表明, 其原来所指出的气旋对主要是

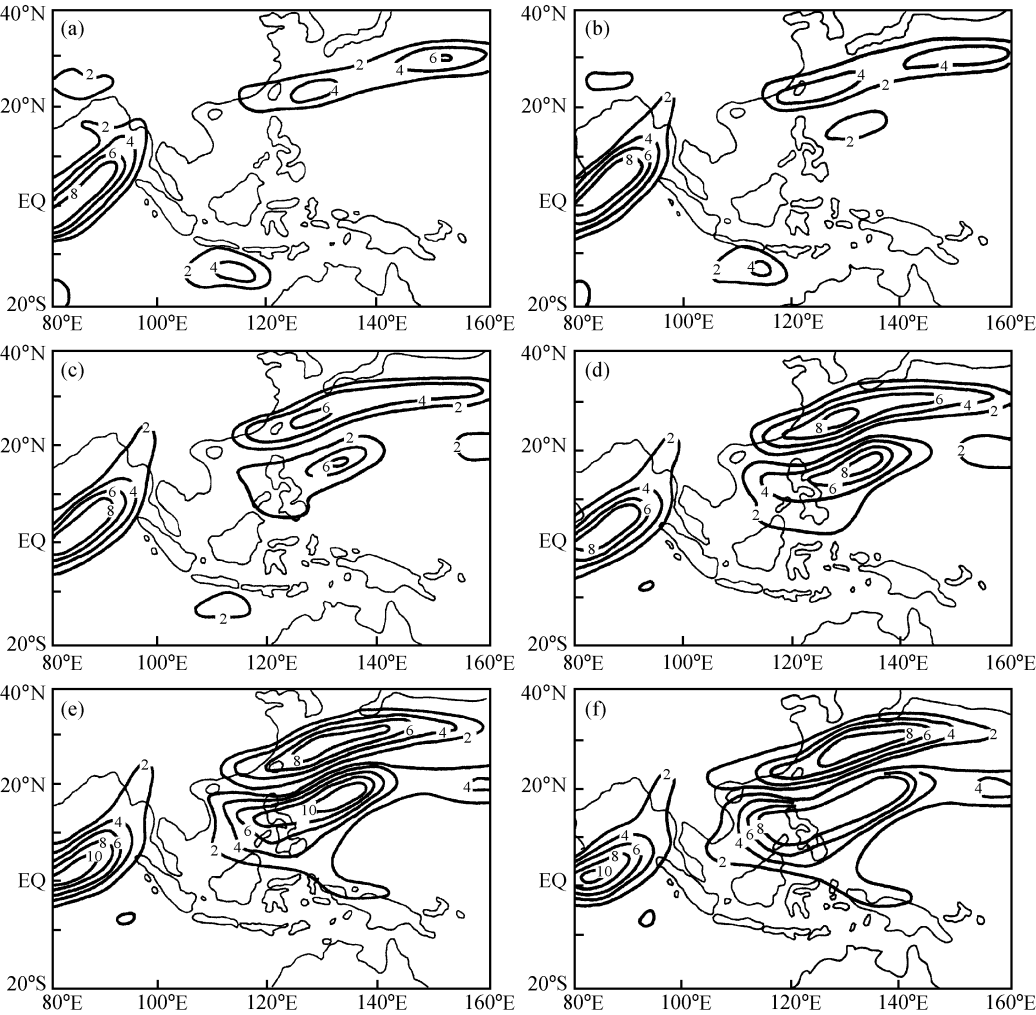


图 5 1998 年南海夏季风爆发前后 850 hPa 上 30~60 天低频动能的水平分布

(a) 5 月 18 日; (b) 5 月 19 日; (c) 5 月 20 日; (d) 5 月 21 日; (e) 5 月 22 日; (f) 5 月 23 日

以 30~60 天低频波的形式活动。

下面将从低频动能的角度,进一步分析 30~60 天低频振荡活动对南海夏季风爆发的作用。图 5 为 1998 年南海夏季风爆发前后(5 月 18 日至 23 日)850 hPa 30~60 天低频动能的逐日水平分布。可以非常清楚地看出,图 5 有三个主要低频动能活动中心,一个位于孟加拉湾附近,该中心强度及位置在南海夏季风爆发前后少变,进一步反映了孟加拉湾低频波的活动与 1998 年南海夏季风爆发关系不大。第二个低频动能中心位于临近中国及日本岛的西北太平洋上,呈西南—东北的带状分布,该中心与前一个中心在季风爆发前后始终存在,所不同的是它的位置在季风爆发前后有向北偏移的倾向,强度上也有相当的发展。第三个中心位于菲律宾以东洋面上,这个低频动能中心明显的特征是随着临近季风爆发,中心强度强烈发展,虽然中心位置少动,但活动区不断向西、并在南海地区猛烈扩展,这与图 4 的结果是一致的,反映了南海临近(菲律宾以东)地区 30~60 天低频振荡活动的强烈发展及其向西扩展对南海地区大气季节内振荡的活动及夏季风爆发有重要作用。另外,将图 5 与图 4 进行对比,不难看出一个有意思的现象,图 5 中后两个低频动能活动区分别对应着图 4 中的一个低频反气旋和一个气旋,这是 Rossby 波的结构,反映了低频 Rossby 波在季风区的活动特征。同时,由图 5 我们可以推测南海地区低频气旋的发展与其北侧低频反气旋的活动密不可分。

为了进一步分析南海地区低频振荡自身发展对南海夏季风爆发的作用所具有的普遍性特征,我们也分析了 1980 和 1986 年南海夏季风爆发前后低频动能的水平分布,结果与图 5 有类似的特征,即菲律宾东面 30~60 天低频动能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的重要作用,进而激发夏季风的爆发。

4.2 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亚洲地区的天气和气候,尤其是中国东部的夏季洪涝和干旱都与夏季风的异常活动有关。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都有重要意义。

根据已有研究工作,我们以 1981、1984、1985、1986、1990、1992 和 1997 年为强南海(东亚)夏季风年的代表,而以 1980、1983、1987、1989、1991、1993 和 1998 年为弱南海夏季风年的代表。对上述强、弱南海夏季风年分别进行合成分析表明,无论在对流层低层(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。图 6 分别给出了强弱南海夏季风年合成的 6~8 月平均的 850 hPa 风场及其差异的形势。可以看到,强夏季风年(图 6a)和弱夏季风年(图 6b)在 850 hPa 流场上有基本一致的形势;但也有显著的差异,图 6c 表明的主要差别在于:强夏季风年在 5~20°N 纬带有更强的西风,而在 5~20°S 有更强的东风;在南海东北部地区强夏季风年有更强的气旋性环流存在。对纬向和经向风分别进行 30~60 天带通滤波处理,不难得到大气季节内振荡的流场形势。由对应的强弱南海夏季风情况所合成的 850 hPa 大气季节内振荡的流场形势及其差异场可以看到(图略),对应强南海夏季风情况,在南海及西太平洋地区有强 ISO 流场,对应弱南海夏季风情况大气 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。因此可以认为,对于强南海夏季风重要特征之一的强气旋

性环流的形成，大气强 ISO 的活动及低频气旋性环流有重要贡献。或者说，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。

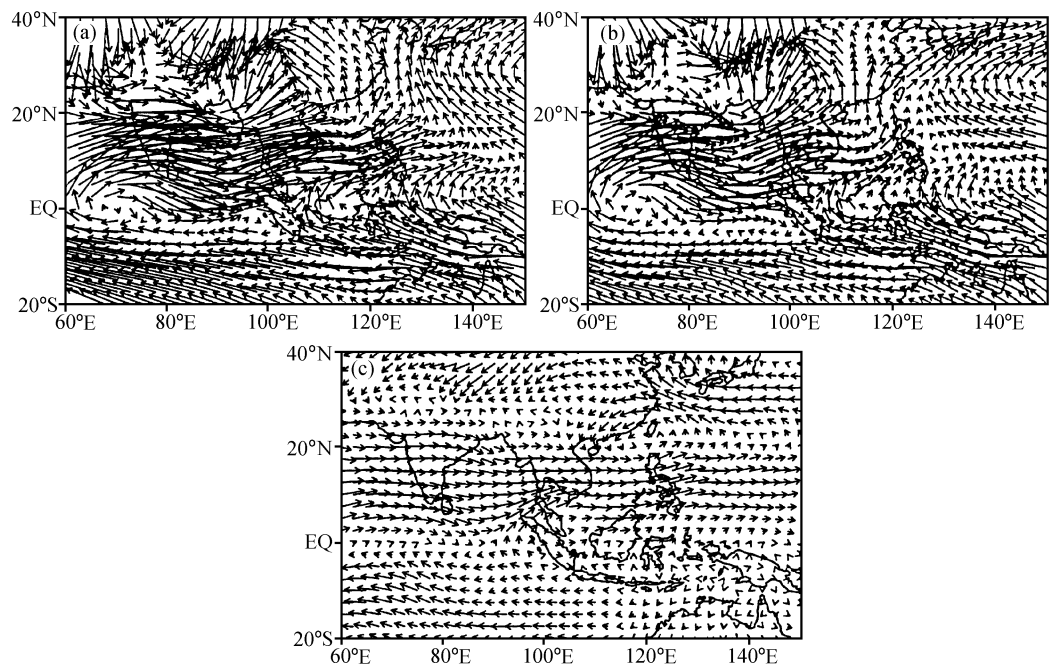


图 6 强南海夏季风年 (a) 和弱南海夏季风年 (b) 6~8 月平均的 850hPa 流场合成形势及其差值图 (c)

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。比较强南海夏季风情况和弱南海夏季风情况合成的 200 hPa 流场形势 (图略) 不难发现，虽说对应强或弱夏季风在青藏高原上空都有强反气旋环流存在，但对于强南海夏季风情况，青藏反气旋不仅偏强，而且中心位置偏西偏北。同样有趣的是，对应南海强、弱夏季风情况，200 hPa 上大气 ISO 的流场形势也有其显著的差异，且最大差异也在青藏高原上空 (图略)。对应强夏季风，青藏高原上空有更强的季节内振荡性反气旋流场形势。可以认为，大气季节内振荡的活动，尤其是在青藏高原上空的低频反气旋环流同样对强东亚夏季形势的建立和维持有重要作用。

图 7 是强南海夏季风年和弱南海夏季风年平均的 850 hPa 上季节内振荡动能的水平分布及其差异场。可以清楚看到对应强南海夏季风年，850 hPa 上有较强的 ISO 的活动，最强动能中心就位于南海中部到菲律宾一带；对应弱南海夏季风年，大气 ISO 比较弱 (差异可以达到一倍)，而且强动能中心位于 (20°N, 140°E) 的西北太平洋。这种强 (弱) 南海夏季风与强 (弱) 大气 ISO 的对应关系，也可以从另一个角度说明大气 ISO 在南海及附近地区的活动对夏季风有重要作用。

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%)。我们再以 1985 年 (强夏季风) 和 1991 年 (弱夏季风)

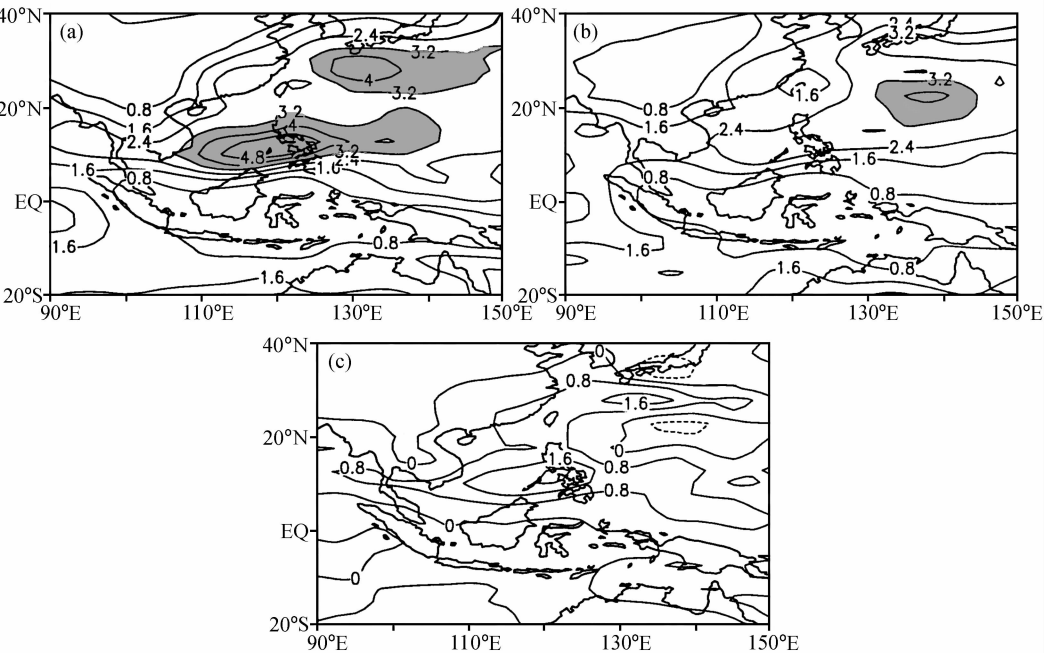


图 7 夏季 (6~8 月) 平均的大气 ISO 动能的分布
(a) 强南海夏季风年的合成; (b) 弱南海夏季风年的合成; (c) 强、弱夏季风年的差值

为例, 对比分析大气 ISO 活动的影响。作为强夏季风年代表的 1985 年的环流形势以及作为弱夏季风年代表的 1991 年的环流形势都与前面提到的特征十分类似, 我们不必再给出它们的流场形势图。从 1985 年汛期和 1991 年汛期中国东部的降水距平分布图可以清楚看到, 两个不同夏季风年所造成的气候影响是非常不一样的 (图略)。对应 1985 年的强夏季风, 南海地区大气 ISO 也比较强; 而对应 1991 年的弱夏季风, 大气 ISO 在南海地区也比较弱。可见, 南海地区大气 ISO 的活动及异常对中国东部的夏季降水有明显的影 响。

5 大气季节内振荡与厄尔尼诺

虽然 ENSO 循环和热带大气 30~60 天低频振荡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, 但是一些研究表明, 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。强的大气 ISO 可导致热带太平洋地区的西风爆发, 进而激发出异常海洋的 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。

5.1 热带大气 ISO 的年际变化及与 ENSO 的关系

在本节中我们将首先从动能角度研究热带大气 30~60 天低频振荡的年际变化及其与 ENSO 循环之间的关系。在低频动能的气候平均图上, 在热带印度洋为一纬向带状大值中心, 从冬到夏由南印度洋向北印度洋移动, 且其位置与气候的纬向偏西风的位置

置相一致（图略）。但是，热带大气的低频动能的年际变化最强的区域则主要集中在热带太平洋地区。图 8 给出了热带大气标准化低频动能的标准差（近似代表热带大气低频动能的年际变化）的分布，其中阴影部分代表标准差大于 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，但整片的大于 0.9 的区域却位于赤道中西太平洋，这与热带大气的低频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低频振荡的年际变化中起着十分重要的作用。

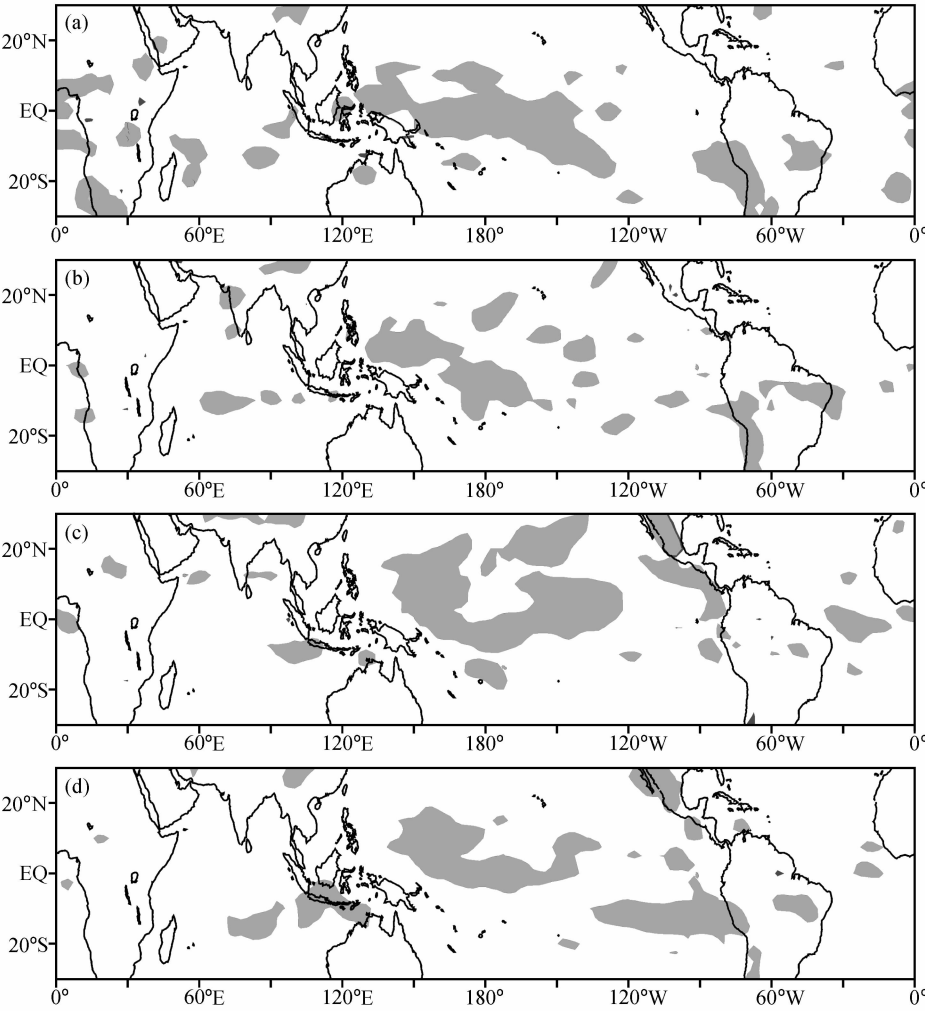


图 8 850 hPa 标准化热带大气季节内振荡动能的标准差分布（阴影：标准差大于 0.9）
(a) 12~2 月平均；(b) 3~5 月平均；(c) 6~8 月平均；(d) 9~11 月平均

由于 Niño 3.4 区域的 SSTa 常用来描述 ENSO 循环，而 El Niño 的最强时间在 11 月左右。因此，我们首先计算 10~12 月平均的 Niño 3.4 区域的 SSTa，这样就得到 40 年 SSTa 的时间序列，然后以此时间序列与全球低频动能计算其相关。从相关系数的分布（图略）可以看出，在 El Niño 成熟之前的冬季，低频动能与 SSTa 的相关显著性较差，而在 El Niño 成熟之前的春、夏季相关较为明显，且相关区随着低频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 30~60 天低频振荡可能在 El Niño 的形成中起着重要的作用。

为了更进一步说明赤道西太平洋大气 30~30 天低频动能与 El Niño 的关系，我们选择 1965~1966、1972~1973、1982~1983、1986~1987、1997~1998 年 5 个强 El Niño 事件，对低频动能进行了合成分析（本文的合成图均取自这几个 El Niño 事件）。图 9 给出了 Niño 3.4 区域 SSTA 与赤道西太平洋（10°S~10°N，130°E~180°）大气 30~60 天低频动能的合成演变图，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；图中虚线所示的 Niño 3.4 区域 SSTA 清楚反映了 El Niño 的过程，而与图中实线所示的赤道西太平洋大气 ISO 动能的演变相比较可以清楚看出，在 El Niño 成熟之前的春、夏季，赤道中西太平洋地区低频动能出现明显正异常，当 El Niño 成熟以后，低频动能明显减弱。这里的结果与我们利用欧洲中心的资料分析 20 世纪 80 年代 El Niño 与热带大气 ISO 之间的关系的结论相一致^[25]。因此可以认为，热带大气 30~60 天低频振荡的年际变化与 ENSO 循环之间确实存在着明显的相互作用关系。

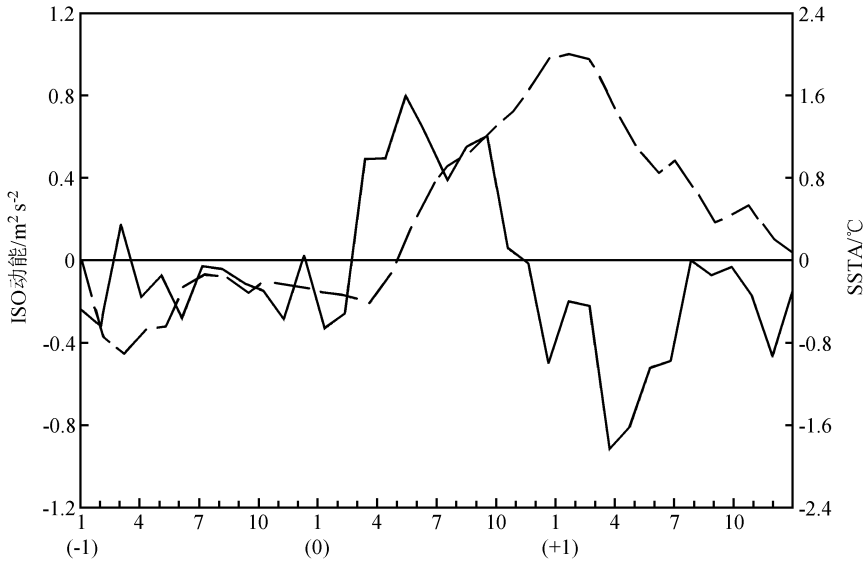


图 9 合成的 Niño 3.4 区平均 SSTA（虚线）及赤道西太平洋大气 ISO 动能（实线）的时间演变

5.2 东亚冬季风异常与热带大气 ISO 的年际变化

已有研究表明，东亚冬季风是激发产生 El Niño 的重要机制^[45,46]，而其中的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；而从热带大气 30~60 天低频振荡的产生机制可以推测，这种加强的积云对流会激发强的大气 30~60 天低频振荡。图 10 给出了冬季风指数 [定义为 11~4 月份 850 hPa 经向风在 (120~150°E，20~35°N)地区的平均] 与同期 OLR 的相关系数的分布，其中阴影部分为显著性超过 99% 的区域。从图中可以看出，如果冬季风偏强，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 天低频动能距平为负相关，而后者略滞后前者。因此，强（弱）的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。

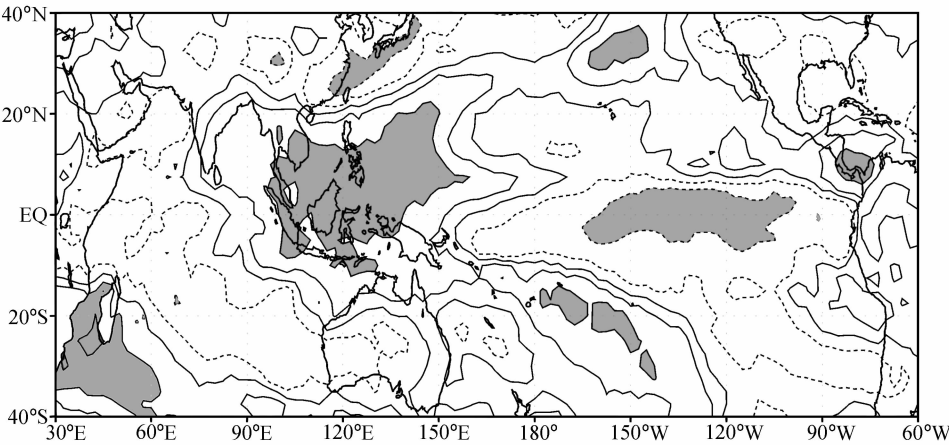


图 10 冬季风指数与同期 OLR 的相关系数的分布（阴影：显著性超过 99% 的区域）

还须指出，积云对流（湿过程）与热带大气 30~60 天低频振荡是相互作用的。如果积云对流偏强，热带大气 30~60 天低频振荡也将偏强；而这种异常的 30~60 天低频振荡对周围的大气环流有正反馈作用，从而导致积云对流的进一步加强，强的积云对流又会引起赤道西风异常，并导致 Walker 环流的异常，有利于 El Niño 的形成。分析 850hPa 纬向风异常与 ISO 动能距平的合成（图略），可以看到，较大的 ISO 动能正距平在冬季首先出现在热带西太平洋地区，随后逐渐加强并缓慢沿赤道东移；与赤道西太平洋 ISO 动能距平中心相对应，在赤道西太平洋地区有西风异常、以及异常西风的加强和向东扩展。

基于上面的讨论，可以初步认为，热带大气 30~60 天低频振荡的年际变化作为一种外强迫，可能在 El Niño 的形成过程中起着十分重要的作用；热带大气 30~60 天低频振荡与周围环境的相互作用使赤道西太平洋地区的西风异常得以维持、加强并向东扩展，从而对 El Niño 的形成有重要作用。

6 结论

通过以上有关大气季节内振荡的分析、讨论，不仅对大气季节内振荡的特征和规律有较为系统的认识，而且还了解了大气季节内振荡与季风以及与 ENSO 的关系，归结起来可以有如下结论：

（1）热带大气季节内振荡虽具有多尺度特征，但主要表现为纬向 1 波扰动；在垂直方向主要表现为“斜压”结构特征；在赤道地区主要为东传、但也有西传情况，在赤道以外的热带地区却主要为西传。中高纬度地区的大气 ISO 主要表现为纬向 2 波和 3 波扰动；在垂直方向主要表现为正压结构特征；缓慢西传是其主要特征。动能的全球

分布表明, 热带和高纬度地区大气 ISO 在扰动中占有较重要的地位; 赤道东太平洋与赤道西太平洋和南亚季风区一样是热带大气 ISO 的主要活动地区。

(2) 全球大气 ISO 存在着极明显的低频遥相关型(波列), 北半球有欧亚—太平洋(EUP)波列和太平洋—北美(PNA)波列, 南半球有澳洲—南非(ASA)波列和环南美洲(RSA)波列; 而上述低频波列可以有不同形式的相互联系和相互影响, 南北半球的低频相互作用也主要通过低频波列。热带大气 ISO 在冬季时间和夏季时间的强度没有很明显的差别, 即季节变化较小, 但却有极为清楚的年际变化。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。

(3) 一系列的动力学研究表明, 积云对流加热反馈、大气对外强迫的低频响应和大气非线性相互作用是激发和驱动热带大气 ISO 的主要机制。大气对外强迫的低频响应、基本气流的不稳定和大气非线性相互作用是激发和驱动中高纬度大气 ISO 的主要机制。海—气耦合相互作用对激发产生热带大气 ISO 有利。单独的蒸发—风反馈机制并不利于激发产生热带大气 ISO; 但蒸发—风反馈作用可引起激发波的不稳定, 它同 CISK 机制一道考虑可以更好解释热带大气 ISO 的特征和活动规律。

(4) 亚洲夏季风的爆发与南海地区 30~60 天低频振荡的活动有着密切关系, 夏季风爆发前大气季节内振荡的活动在南海地区有显著加强; 这里大气 ISO 的加强主要是其临近地区(尤其是菲律宾以东)的 30~60 天低频气旋发展及其向西扩展的结果, 而与孟加拉湾地区低频气旋的活动关系不明显。菲律宾以东地区的大气 30~60 天低频气旋的发展及其向西扩展对亚洲夏季风的爆发有重要作用。

(5) 对应强南海夏季风和弱南海夏季风, 在 850 hPa 和 200 hPa 上都有着十分相似的大气环流形势; 却又有显著的差异。强南海夏季风的主要特征是: 在 850 hPa 上, 5~20°N 纬带有强西风, 南海北部有异常气旋性环流存在, 在 200 hPa 上青藏反气旋偏强、位置偏西北。强、弱南海夏季风在中国东部所造成的汛期降水分布有非常大的差别, 甚至有相反形势。强(弱)南海夏季风年, 中国长江中下游和淮河流域降水偏少(多), 而华南地区以及河套到华北北部和东北南部一带降水偏多(少)。

(6) 对应强南海夏季风年, 850 hPa 上有强 ISO 的活动, 其最强动能中心位于南海中部和菲律宾一带; 对应弱南海夏季风年, 大气 ISO 比较弱, 而较强的动能中心位于(20°N, 140°E)附近的西太平洋。大气季节内振荡的流场分析清楚表明, 与强(弱)南海夏季风相对应, 850 hPa 的大气 ISO 流场也比较强(弱), 而且在南海和西太平洋地区为强气旋性(弱反气旋性)低频环流。而在 200 hPa 上, 与强(弱)南海夏季风对应的大气 ISO 流场在青藏高原上空为反气旋(气旋)性环流。因此, 大气 ISO 在南海及附近地区的活动对南海夏季风异常形势的形成有重要作用。

(7) 赤道西太平洋大气 30~60 天低频振荡有明显的年际变化特征, 并与 ENSO 循环有较好的相关关系: 在 El Niño 爆发之前, 赤道西太平洋出现大气 ISO 动能正距平, 大气 ISO 异常偏强, 且缓慢东移; 而在 El Niño 爆发之后, 西太平洋上大气 ISO 便逐渐减弱。相反, 在 La Niña 爆发之前, 赤道西太平洋的大气 30~60 天低频振荡偏弱。

(8) 东亚冬季风的年际异常是造成赤道西太平洋大气 30~60 天低频振荡年际变化的重要原因, 强东亚冬季风将导致赤道西太平洋积云对流加强, 从而激发出较强的大气 30~60 天低频振荡; 反之, 如果东亚冬季风偏弱, 则赤道西太平洋地区的积云对流

和大气 30~60 天低频振荡也都偏弱。由于赤道西太平洋大气 30~60 天低频振荡与周围环境场的相互作用，还可以导致赤道西太平洋上空纬向风的持续异常和向东扩展，对 Walker 环流异常和 ENSO (El Niño 和 La Niña) 的发生起着重要作用。

参 考 文 献

- 1 Madden, R. A., and P. R. Julian, Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**, 702~708.
- 2 Madden, R. A., and P. R. Julian, Description of global scale circulation cells in the tropics with 40–50 day period, *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**, 1109~1123.
- 3 Krishnamurti, T. N., and D. Subrahmanyam, The 30–50 day mode at 850mb during MONEX, *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**, 2088~2095.
- 4 Murakami, M., 30–40 day global atmospheric changes during the northern summer 1979, GARP Special Report, 1984, No. 44, 113~116.
- 5 Lau, N. C., and K. M. Lau, The structure and propagation of 40–50 day oscillations appearing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**, 2023~2047.
- 6 Knuston, T. R., and K. M. Weickmann, 30–60 day atmospheric oscillation: composite life cycles of convection and circulation anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**, 1407~1436.
- 7 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**, 227~236.
- 8 Li Chongyin, Intraseasonal (30–50 day) oscillation in the atmosphere, *Summer School on Large-Scale Dynamics of the Atmosphere*, Beijing, 5–20 August, 1988, 361~393.
- 9 李崇银, 大气中的季节内振荡, *大气科学*, 1990, **14**, 32~45.
- 10 李崇银, 大气低频振荡, 北京: 气象出版社, 1991, 276pp.
- 11 陈兴跃、王会军、曾庆存, 大气季节内振荡及其年际变化, 北京: 气象出版社, 2000, 176pp.
- 12 Li Chongyin, Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclone over South Asia and moving CISK mode, *Scientia Sinica (B)*, 1985, **28**, 1197~1206.
- 13 Li Chongyin, A dynamical study on the 30–50 day oscillation in the tropical atmosphere outside the equator, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1990, **14**, 101~112.
- 14 Li Chongyin, A further inquiry on the mechanism of 30–60 day oscillation in the tropical atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1993, **10**, 41~53.
- 15 李桂龙、刘式适, Wave—CISK、蒸发—风反馈和低频振荡, *大气科学*, 1993, **17**, 403~414.
- 16 李崇银, 蒸发—风反馈的进一步研究, *热带气象学报*, 1996, **12**, 193~199.
- 17 李崇银, 气候动力学引论, 北京: 气象出版社, 2000, 132~135.
- 18 李崇银、肖子牛, 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**, 1157~1160.
- 19 Li Chongyin, Long Zhenxia, and Xiao Ziniu, On low-frequency remote responses in the atmosphere to external forcings and their influences on climate, *Climate Variability*, China Meteorological Press, 1993, 77~190.
- 20 Li Wei, and Yu Yongqiang, Intraseasonal oscillation in a coupled general circulation model, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2001, **25**, 132~140.
- 21 罗德海、李崇银, 地形强迫 Rossby 波的不稳定和中高纬度地区 30–60 天低频振荡, 气候变化若干问题研究, 北京: 科学出版社, 1992, 82~86.
- 22 Luo Dehai, and Li Chongyin, The resonant interaction of forced Rossby wave and 30–60 day oscillation in extratropics, *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*, China Meteorological Press, 1993, 111~122.
- 23 李崇银、曹文忠、李桂龙, 基本气流对中高纬度大气季节内振荡的影响, *中国科学 (B)*, 1995, **25**, 979~985.
- 24 穆明权、李崇银, 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~

- 387.
- 25 李崇银、龙振夏, 热带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**, 589~595.
- 26 李崇银、周亚萍, 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系, 地球物理学报, 1994, **37**, 17~26.
- 27 李崇银、李桂龙, El Niño 影响热带大气季节内振荡的动力学研究, 大气科学, 1996, **20**, 159~168.
- 28 李崇银、廖清海, 热带大气季节内振荡激发 El Niño 的机制, 热带气象学报, 1998, **14**, 97~105.
- 29 李崇银, 气候动力学引论 (第二版), 北京: 气象出版社, 2000, 287~297.
- 30 Chen Xingyue, Wang Huijun and Xue Feng, Intraseasonal Oscillation: the global coincidence and its relationship with ENSO cycle, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 445~453.
- 31 Chang, C. P., Viscous internal gravity waves and low-frequency oscillation in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**, 901~910.
- 32 Dunkerton, T. T., A nonsymmetric equatorial inertial instability, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 807~813.
- 33 Stevens, D. E., On symmetric stability and instability of zonal mean flow near the equator, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 882~893.
- 34 Neelin, J. D., I. M. Held, and K. H. Cook., Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**, 2341~2348.
- 35 Blackmon, M. L., J. E. Geisler, and E. J. Pitcher, A general circulation model study of January climate anomaly pattern associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperature, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 1410~1425.
- 36 Shukla, J., and J. M. Wallace, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 1613~1630.
- 37 朱抱真、金飞飞、刘征宇, 大气和海洋的非线性动力学概论, 北京: 海洋出版社, 1991, 199~243.
- 38 徐祥德、高守亭, 外源强迫与波流作用的动力学原理, 北京: 海洋出版社, 1999, 245pp.
- 39 罗德海, 阻塞非线性动力学, 北京: 气象出版社, 2000, 248pp.
- 40 Hirst, A. C., and K. M. Lau, Intraseasonal and interannual oscillation in coupled ocean-atmosphere models, *J. Climate*, 1990, **3**, 713~725.
- 41 Wang, B., and X. Xie, 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**, 2116~2135.
- 42 Li Chongyin, H. R. Cho, and J. T. Wang, CISK Kelvin wave with evaporation-wind feedback and air-sea interaction-A further study of tropical intraseasonal oscillation mechanism, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 379~390.
- 43 Li Chongyin, and Wu Jingbo, On the onset of the South China Sea summer monsoon in 1998, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 193~204.
- 44 李崇银、屈昕, 伴随南海夏季风爆发的大尺度大气环流演变, 大气科学, 2000, **24**, 1~14.
- 45 李崇银, 频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 的发生, 中国科学 (B), 1988, (6), 667~674.
- 46 Li Chongyin, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**, 36~46.

Atmospheric Intraseasonal Oscillation and Its Important Effect

Li Chongyin, Long Zhenxia, and Mu Mingquan

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

Abstract Atmospheric intraseasonal oscillation (ISO) or 30~60 day oscillation has been an important frontier project in the atmospheric science since the 1980s. Some major studies and research achievements on the atmospheric intraseasonal oscillation and its important effects to other climate systems completed in the Institute of Atmospheric Physics during the last 10 years are reviewed and summarized systematically in this paper, particularly some new scientific achievements. They include the fundamental features and main active regulars of the tropical ISO; the fundamental features and main active regulars of the ISO in middle-high latitudes and its differences from the tropical ISO; atmospheric low-frequency teleconnection in the globe; the dynamical mechanism of the ISO; the influences of the ISO on summer monsoon onset over the South China Sea (Asia) and on summer monsoon anomaly over the South China Sea (East Asia); the interaction between the tropical ISO and El Niño (La Niña) .

Key words: atmospheric intraseasonal oscillation; dynamical mechanism; the onset of monsoon; activity and anomaly of monsoon; ENSO