

南海夏季风经向环流的 20 年 平均 4~6 月演变机制*

陈桂兴¹⁾ 袁卓建¹⁾ 梁建茵²⁾ 覃慧玲¹⁾ 温之平¹⁾

1) (中山大学大气科学系季风与环境研究中心, 广州 510275)

2) (中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要 用 NCEP 再分析资料和纬向平均的局地经向环流线性诊断模式, 模拟了 1980~1999 年 4~6 月南海夏季风经向环流的建立和演变过程, 并结合统计方法分析了模式输出的各物理因子和外界影响 (主要为越赤道气流) 在激发南海夏季风经向环流过程中的作用和贡献。结果表明: (1) 依 1980~1999 年 4~6 月经向环流指数的逐日演变情况判断得出, 南海地区 4~6 月经向风中有 48% 为地转成分, 非地转成分占 52%; 若从 20 年平均的经向环流指数逐候演变情况来看, 4 月 1 候到 6 候南海地区经向风中有 94% 为非地转成分, 而且 5 月份非地转经向环流指数与总经向环流指数的变化趋势也比较一致。因此表明, 引起经向风地转偏差的因子在南海夏季风的酝酿和爆发过程中的作用尤其重要。(2) 对南海地区非地转经向环流指数的贡献, 主要来自外界影响 (主要由越赤道气流体现) 和 4 个物理因子, 即与温度层结和垂直运动有关的热量垂直输送, 纬向温度平流, 潜热加热作用以及西风动量经向输送, 其余 12 个物理因子贡献较小。(3) 20 年中有 15 年与外界影响有关的经向环流指数在南海夏季风爆发前一周内出现最明显的突变性加强, 剩下的 5 年则是与热量垂直输送作用有关的经向环流指数出现较明显的突变性加强, 其余 3 个主要物理因子在多数年份也有类似特征, 这些结果具有预报参考价值。

关键词: 南海夏季风; 经向环流; 演变机制; 诊断分析

文章编号 1006-9585 (2004) 04-0605-14 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

1 引言

南海夏季风活动与中国东南部夏季降雨紧密联系^[1,2], 也对华南地区 4~6 月前汛期降雨有重要影响^[3], 因此, 南海夏季风的建立以及强弱变化受到广泛关注。研究南海季风季节内变化机制有利于提高华南前汛期降雨预报以及汛情监测。许多研究^[4~7]表明, 南海夏季风环流的建立和维持与海陆热力差异及其相关因子相联系。赵永平等^[4]从海气相互作用的角度分析了中南半岛南部的海区海温对南海夏季风爆发的影响, 指出赤道东印度洋异常海表温度通过作用于越赤道气流从而对东亚夏季风环流产生影响。王世玉等^[5]则侧重于研究中南半岛与南海之间的纬向热力差异对季风的影响, 认为海陆的感热加热差异是季风爆发的重要背景场。不少研究^[6,7]则强调了青藏高原的强加热作用, 认为大陆对大气的强热源在夏季风环流的形成以及维持过程中起着重要作用。

2003-06-27 收到, 2004-10-14 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 40275026 和 40175018 资助

以上研究分别揭示了不同热力和动力因子对南海夏季风环流演变的影响,表明夏季风环流的演变与多种因子作用有关。因此,为在同一标准下定量地比较各种因子在南海夏季风演变过程中的作用及贡献,并找出起重要作用的因子,本文运用1980~1999年4~6月NCEP资料和纬向平均的局地经向环流线性诊断方程^[8],将在激发南海夏季风过程中起作用的各种影响因子分离出来,并计算其贡献。这些独立因子包括气压梯度力,科里奥利力,摩擦力,惯性力,感热和潜热输送,水平温度平流,与对流和温度层结调节过程相联系的热量垂直输送作用,长短波辐射,大气稳定度等18个因子以及外界影响。最后将这些计算结果作统计分析,以便找到与南海夏季风经向环流演变密切相关并且带有明确物理意义的因子。

本文内容安排如下:第2节为资料来源以及处理过程的介绍,模式简介见第3节,第4节给出经向环流定义以及模式性能检验,南海夏季风经向环流的季节演变和模式输出的影响因子贡献的统计分析结果安排在第5节,第6节则是经向环流指数及主要因子贡献在南海夏季风爆发前发生突变的分析,结论和讨论安排在最后一节。

2 资料来源及处理

输入模式的资料是1980~1999年4~6月NCEP逐日再分析资料,该资料经过了中国科学院大气物理研究所资料中心的处理。资料时间为每天的0000 UTC和1200 UTC两个时次,高空资料空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬格距。本研究将17层水平风场、位势高度场和温度场资料,12层垂直速度资料及8层比湿资料,线性插值到本模式的19层上(950~50 hPa,间距为50 hPa)。地面资料为高斯网格点再分析资料,包括水平风场、气压场、温度场和湿度场资料。

模式的模拟区域为($5^{\circ} \sim 52.5^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$),其覆盖了南海区域($5^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)。模拟区的北边界取在 52.5°N ,旨在减小北边界效应对南海地区流场的影响,从而更大限度地突出南边界越赤道气流的作用。运用模式对该区域上逐日的0000 UTC和1200 UTC两个时次的经向环流进行模拟,取得20年(1980~1999年)从4月2日到6月29日共3560个时次的模拟结果。为消除日变化的影响,更好地反映数天到数月的环流变化,将同一天的两个时次模拟结果作平均,并对得到的时间序列作5点3次方平滑以滤去杂波。

本文根据何金海等^[9]给出的南海夏季风爆发时间表来确定1980~1999年各年南海夏季风爆发的具体时间,并统一把南海夏季风爆发候的第一天作为夏季风爆发分界点。

3 模式简介

由地球 P 坐标系方程组(连续方程、纬向运动方程简化为梯度平衡的经向运动方程、静力平衡方程以及热力学方程)推导得到经向环流流函数 ψ 的椭圆型线性诊断方程^[8]:

$$\left[\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\bar{A} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \bar{B} \frac{\partial}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\bar{B} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \bar{C} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \bar{\psi} = F, \quad (1)$$

其中系数 \bar{A} 、 \bar{B} 、 \bar{C} 分别与静力稳定度、斜压稳定度和惯性稳定度有关，即

$$\bar{A} = \frac{\bar{\sigma}_s}{\cos\varphi}, \quad \bar{B} = \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \varphi}, \quad \bar{C} = \frac{\bar{f}_A \bar{f}_B}{\cos\varphi}, \quad f_B = f - \frac{\partial (u\cos\varphi)}{a\cos\varphi \partial \varphi}, \quad (2)$$

σ_s 为静力稳定度， α 为比容。然后从连续方程得出^[10]

$$\frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial (v_\psi \cos\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial \omega_\psi}{\partial p} = 0, \quad (3)$$

其中与经向环流流函数有关的风场（即被诊断的量）为 v_ψ ($v_\psi = v - v_\chi$) 和 ω_ψ ($\omega_\psi = \omega - \omega_\chi$)，且经向速度 v_ψ 和垂直运动 ω_ψ 与流函数 ψ 关系为

$$v_\psi = -\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial p}, \quad \omega_\psi = \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}. \quad (4)$$

确定作为已知量处理的 v_χ 和 ω_χ 有两种方法^[10]，第一种方法：用“实测”风场求出与经向环流有关的“实测”涡度，再根据“实测”涡度求解关于“实测”流函数的球坐标系泊松方程，然后由“实测”流函数求解“实测” v_ψ （其可用于检验模拟结果），最后用 $v_\chi = v - v_\psi$ 和连续方程就可以得到 v_χ 和 ω_χ 。用这种方法来确定已知量 v_χ 和 ω_χ 的值并没有包含任何近似，但因计算涉及用差分方法求解高阶偏微分方程和大量小差等问题，所以计算误差会很大且无法估计。第二种方法的依据是连续方程，当科里奥利参数 f 不变时，从连续方程可知只有非地转成分 v_{ag} 对垂直经向环流有贡献^[10]，故有

$$v_\chi = v_g \text{ (或 } v_\psi = v_{ag}), \quad (5)$$

这种确定已知量 v_χ 的方法产生的误差仅由常数 f 引起。本研究采用第二种方法计算（作为已知量处理） v_χ 的值。

诊断方程 (1) 右边的总强迫项 F 可由以下各项的线性组合给出：

$$F = \frac{\partial}{\partial p} \left[\underbrace{\bar{f}_A}_{(I)} \left(-\frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \lambda} + \bar{F}_\lambda \right) - \underbrace{\frac{\bar{u}}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \lambda}}_{(III)} + \underbrace{\bar{f}_B v_\chi}_{(IV)} - \underbrace{\omega_\chi \frac{\partial \bar{u}}{\partial p}}_{(V)} - \underbrace{\frac{\bar{u}'}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \lambda}}_{(VI)} + \underbrace{\frac{\bar{v}'}{a} \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \varphi}}_{(VII)} - \underbrace{\omega_\chi' \frac{\partial \bar{u}'}{\partial p}}_{(VIII)} \right] \\ - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\underbrace{\frac{\bar{R}Q}{pc_p}}_{(IX)} - \underbrace{\frac{\bar{u}}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \lambda}}_{(X)} - \underbrace{\frac{\bar{v}_\chi}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \varphi}}_{(XI)} + \underbrace{\bar{\sigma}_s \omega_\chi}_{(XII)} - \underbrace{\frac{\bar{u}'}{a\cos\varphi} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \lambda}}_{(XIII)} - \underbrace{\frac{\bar{v}'}{a} \frac{\partial \bar{\alpha}'}{\partial \varphi}}_{(XIV)} + \underbrace{\bar{\sigma}_s' \omega_\chi'}_{(XV)} \right), \quad (6)$$

方程中 $(\bar{\quad})$ 量代表局地纬向平均量， $(\quad)' = (\quad) - (\bar{\quad})$ 代表涡动量。总强迫项 F 分为两类，动力因子和热力因子。其中，动力因子有气压梯度力（第 I 项），摩擦力（第 II 项），西风动量的纬向输送作用（第 III、VI 项），地转科里奥利力与平均西风角动量的经向输送（第 IV 项），涡动西风角动量的经向输送（第 VII 项）以及西风动量垂直输送（第 V、VIII 项）；热力因子有凝结潜热 Q_L ，地面感热通量 Q_{LS} ，潜热通量 Q_{LF} ，长短波辐射 Q_R （第 IX 项的 Q 为这些因子的叠加，由于没有各层的辐射资料，本研究暂时没有考虑辐射加热的影响），水平温度平流（第 X、XI、XIII 和 XIV 项）以及热量垂直输送项（第 XII、XV 项）。

当流体处于稳定状态时 $AC - B^2 > 0$ ，方程 (1) 为椭圆型偏微分方程。根据理论分析^[8]得知，方程 (1) 可表示为

$$-\psi \propto \frac{\partial (D_F)}{\partial p} - \frac{\partial (Q_F)}{\partial \varphi}, \quad (7)$$

其中 D_F 和 Q_F 分别代表动力和热力强迫因子。运用超松弛迭代法^[11]求解椭圆型偏微分

方程(1),得到经向环流流函数 ψ ,再联合方程(3)和(4)就可得到由所有因子共同驱动的或由单个因子所激发的非地转经向风 v_{ag} 。为了考虑越赤道气流的影响,模式区域的南、北边界(5°N 和 52.5°N)作开边界处理,边界处的流函数值 ψ 由 $v_{\psi} \cong v_{ag} = v_{obs} - v_g$ 和(4)式反算得出(其中 v_{obs} 代表 v 的观测值)。迭代开始时模式区域除了南北边界的流函数值不为零外,其余的流函数值全部为零。因此,在无任何内力作用下模式模拟出的 v_{ψ} 场纯粹由边界效应导致^[11]。

4 季风经向环流定义以及模式性能检验

本研究从经向环流角度探讨南海夏季风演变主要是考虑到夏季东亚季风区的水汽输送以经向输送为主^[12],虽然用经向环流来研究南海夏季风没有对西南风和东南风进行区分,但从南风会给华南地区带来丰富的水汽这一点出发,用经向环流来研究影响华南汛期的南海夏季风环流还是很有意义的。此外,南海夏(冬)季风的特征之一是低层盛行西南风(东北风),高层盛行东北风(西南风)^[9]。这意味着水平风的垂直切变在南海夏季风建立过程中将发生显著变化,而经向环流必然能捕获其变化的信号。基于这一推理,本文选取南海区域($10 \sim 20^{\circ}\text{N}$, $100 \sim 125^{\circ}\text{E}$) 850 hPa 平均经向风和 250 hPa 平均经向风之差(即 $V_{850} - V_{250}$)作为经向环流强度指标^[13],强度指数为正(负)表示南海地区的经向环流呈夏(冬)季型,强度指数的绝对值大小则对应于相应环流的强弱。需要说明的是,经向环流指数从冬季型(指数为负)转为夏季型(指数为正)并不代表夏季风爆发,因为夏季风爆发要求夏季型经向环流指数达到一定强度。本文运用这一指标分别计算了南海上空经向风场(包括地转和非地转成分)的总经向环流指数,由气压梯度力独自激发的地转经向环流指数(从环流定义来看,水平地转风与经向环流关系不密切),由除气压梯度力以外的其他影响因子共同激起的非地转经向环流指数,以及由模式模拟出的各个影响因子独自激发的非地转经向环流指数。

由于模式用了 50 hPa 作为大气层顶的假设,在计算南、北边界上的流函数时,由 NCEP 风场资料算出的非地转经向风 v_{ag} 必须按上下边界条件作相应的调整,这样算出的侧边界流函数值才能与上下边界流函数值匹配。不失代表性,图 1 给出 1994 年 5 月 1 日(0000 UTC 和 1200 UTC 平均)南北边界处的垂直风廓线。由于赤道附近地区的整个大气层内地转关系不严格成立(即风不沿等高线吹),风场应该以非地转风为主。以该天赤道附近地区 500 hPa 的水平风场为例(图 2),在南边界(5°N)的实测风向与等高线走向几乎正交,说明南边界实测风几乎全部为非地转风。然而用实测风减去地转风所得的 v_{ag} (图 1 长虚线)明显偏离实测风(图 1 实线),原因是计算地转风 v_g 所用的科里奥利参数 f 在赤道地区太小,这使得赤道附近地区从低层到高层的 v_g 被放大,因而由 $v_{ag} = v_{obs} - v_g$ 算出的 v_{ag} 变小,但经模式上下界为刚体的边界条件及质量连续条件的调整后, v_{ag} 廓线与 v 廓线基本一致。另外,图 1a 反映经调整后低层非地转南风及高层北风强度均比实测风大,为考察这种偏大是否会造成南边界贡献最大的假象,本研究进行了针对性试验:假设南边界的实测风全部为非地转风,并以此计算与边界效应(外界影响)有关的经向环流指数。将试验结果与原结果相比较,发现外界影响和内力的贡献大小排序保持不变,故仍采用原方案计算南北边界的流函数。由于模式

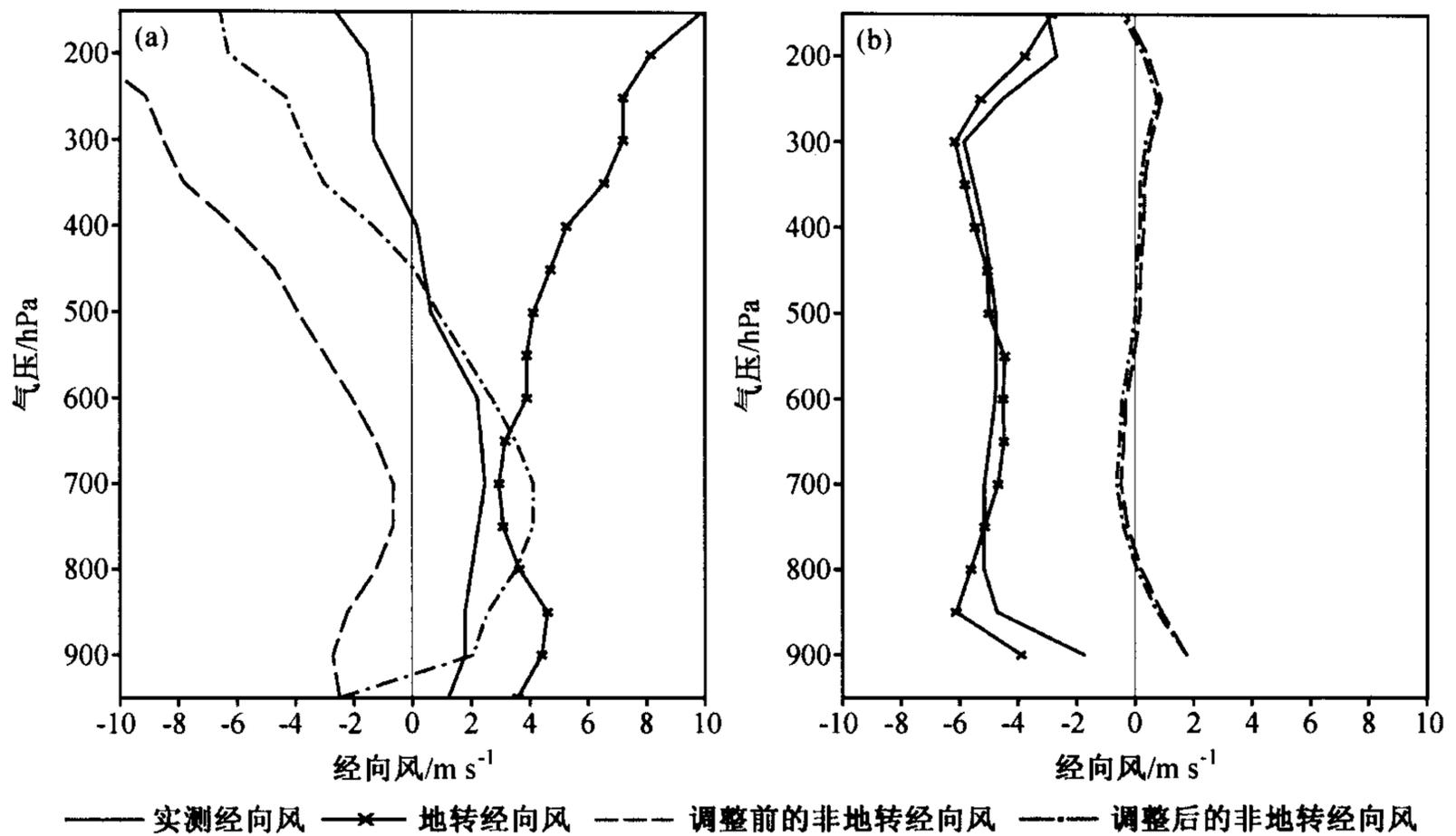


图 1 1994 年 5 月 1 日南北边界处经向风的垂直廓线
(a) 5°N; (b) 52.5°N

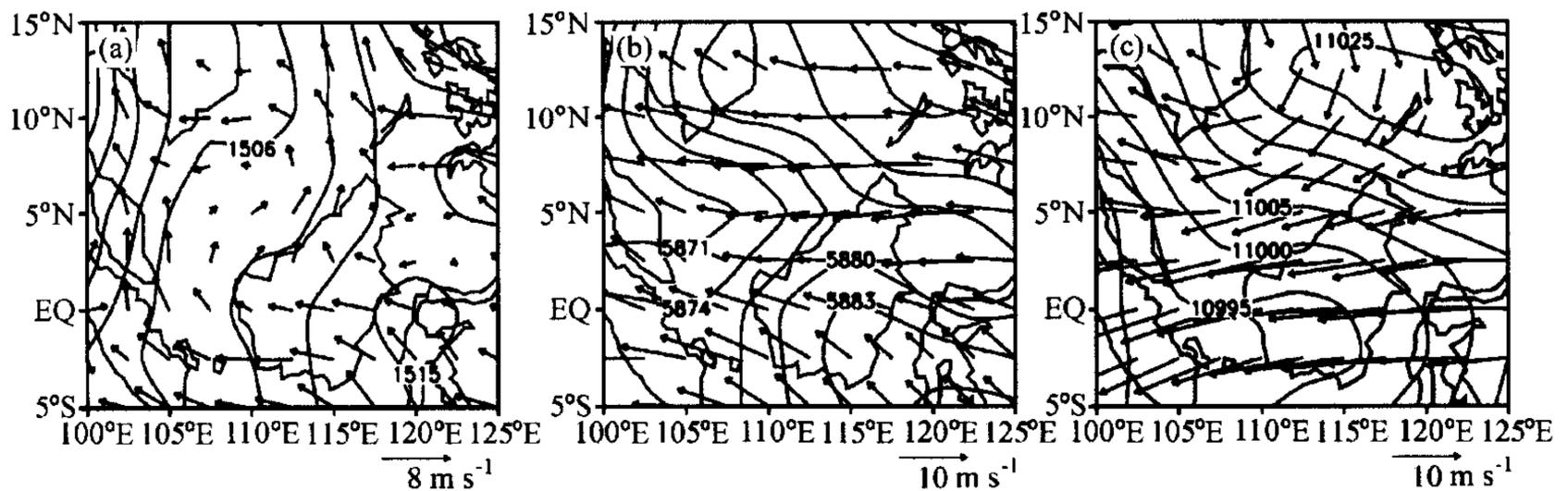


图 2 1994 年 5 月 1 日的高度场 (单位: gpm) 及水平风场
(a) 850 hPa; (b) 500 hPa; (c) 250 hPa

北边界 (52.5°N) 纬度高, 实测风以地转风为主, 所以计算结果不存在类似南边界的问题 (图 1b)。

为进一步检验南北边界调整过程以及上下边界约束假设对本文所用环流指数的影响, 本研究将 1994 年 4 月 2 日~6 月 29 日南海夏季风实测经向环流指数 (调整前总经向环流指数), 与经过调整的非地转经向环流部分及地转“经向环流”部分之和 (调整后总经向环流指数) 进行比较 (图 3), 发现调整前后的总经向环流指数变化不大 (相关系数为 +0.994, 相对误差为 8.25%), 而且地转“经向环流”指数和调整前后的非地转经向环流指数比例变化也不大。对 20 年的总体情况而言, 调整前后的总经向环流平均相关系数也达到 +0.988, 平均相对误差仅为 5.87%。因为调整后的资料能够较好地反映实际大气环流情况, 为与模拟结果匹配, 以下的分析用调整后 v_{ag} 作为“实际”

v_{ag} , 以便在同一标准下 (满足上下边界约束) 对由各因子独立激发的非地转经向环流作定量分析和排序。

为检验模式诊断方程、数值格式以及边界条件等设置和方案的合理性, 将模式输出的 (在外界影响下由所有引起地转偏差的内力驱动) 非地转经向环流指数与直接由实测风算出的 (经上下边界调整) 非地转经向环流指数进行对比 (图 4)。结果表明, 在 1994 年 4 月 2 日~6 月 29 日时段内无论是各天的模拟数值, 还是整体的演变情况,

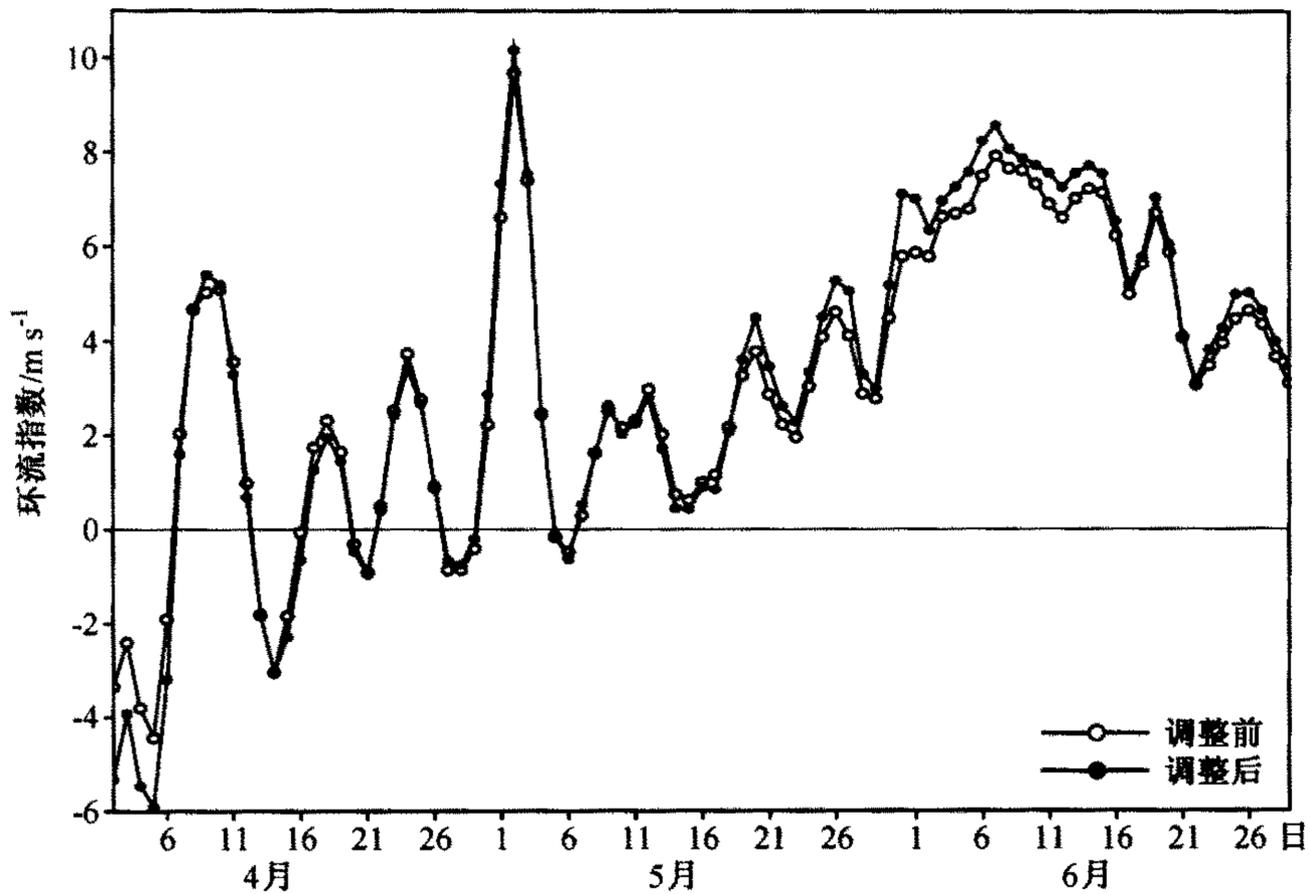


图 3 1994 年 4 月 2 日~6 月 29 日调整前后的总经向环流指数随时间的演变

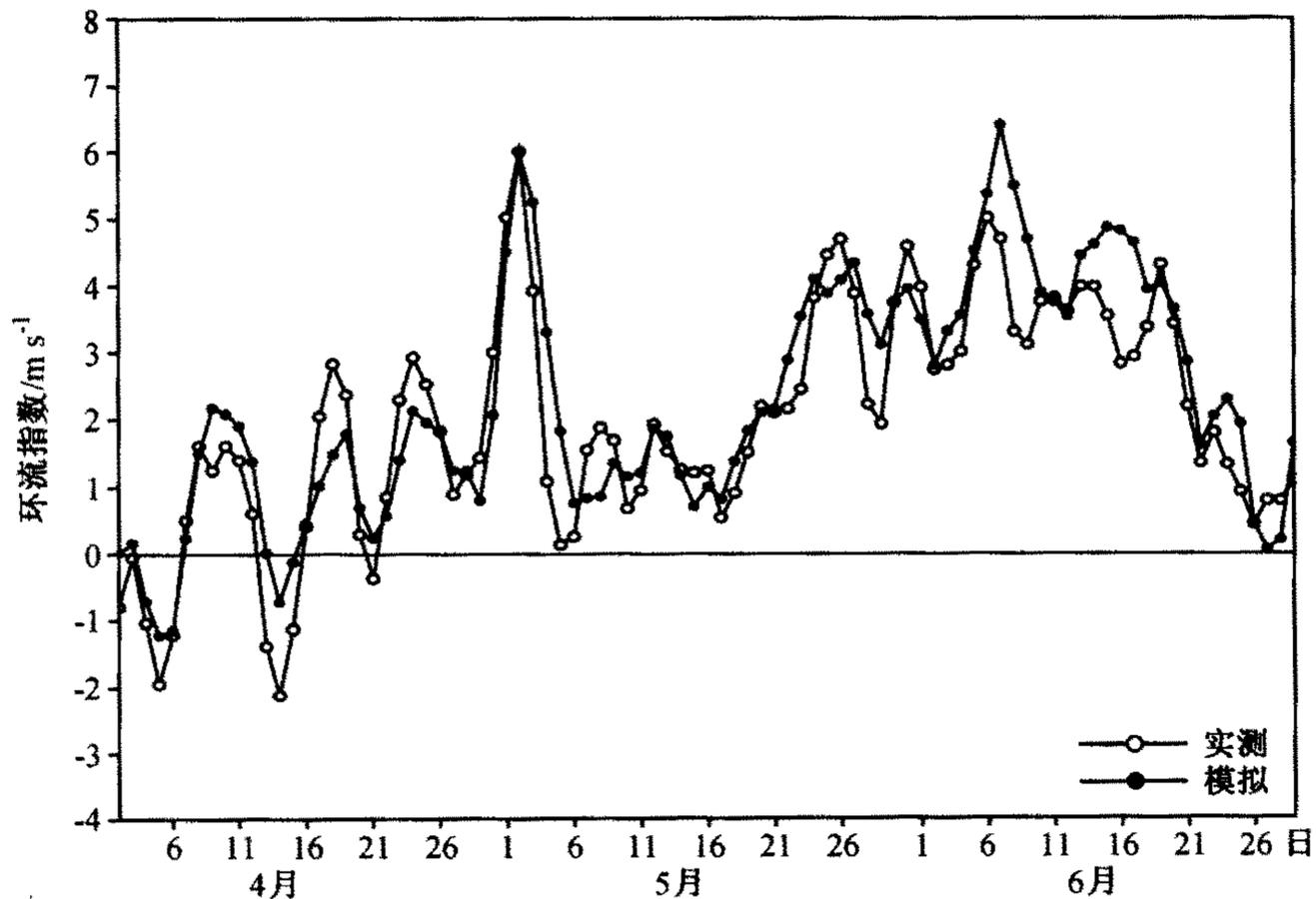


图 4 1994 年 4 月 2 日~6 月 29 日实测非地转经向环流指数以及用模式算出的 (包含所有引起地转偏差的强迫因子的) 非地转经向环流指数随时间的演变

非地转经向环流指数的模拟结果和实际情况都比较一致，两者的相关系数为+0.858。对 20 年总体而言，平均相关系数达到+0.912，平均相对误差为 8.56%。以上分析结果表明，模式能够很好地模拟各年南海夏季风经向环流的演变，因此下面对各个因子作用的分析和排序也具有一定的可信度。

5 季风经向环流的演变机制

5.1 从实际资料探讨总经向环流演变机理

先用实际资料分析比较（由气压梯度力独自驱动）地转经向环流和（由除气压梯度力以外的引起地转偏差的因子共同驱动）非地转经向环流分别对总经向环流的贡献。从 20 年平均的 4~6 月逐候总经向环流指数以及地转经向环流指数的演变情况来看（图 5），地转经向环流指数与总经向环流指数变化趋势一致，两种环流指数的强度都随着夏季的来临不断增加，这种季节性的加强显然由夏季型气压场形势的逐渐建立所致，即随着西太平洋副热带高压、大陆近地面热低压以及高层青藏高原高压的建立和加强，南海近地层地转南风和高空地转北风必然加强。图 5 还表明与正常情况一致，4 月份气压梯度力所驱动的还是冬季型经向环流（指数为负值）。直到 4 月 6 候气压梯度力才开始对夏季型经向环流有正贡献（即指数由负转正），并在 4 月底到 5 月初出现一次明显的增值过程。此后，气压场一直保持有利于夏季型经向环流维持的形势，而且正贡献在 5 月第 1~4 候处于比较稳定的阶段，这种背景场十分有利于 5 月中旬南海夏季风的爆发。

与地转经向环流指数演变不同的是，非地转经向环流指数（图 6，非地转经向风 $v_{ag} = v_{obs} - v_g$ ）早在 4 月 3 候就开始由冬季型（负指数）转为夏季型（正指数）。并且从 4 月 1 候到 4 月 6 候的演变情况来看，非地转经向环流指数与总经向环流指数的趋势和强度变化完全吻合，非地转经向环流指数对总经向环流指数的贡献达到 94%，表明非地转风驱动因子在南海夏季风的酝酿期扮演了最重要的角色。若从定性角度来究其原因，非地转经向环流指数的演变可能与 4 月的热力场变化有关，因为 4 月份亚洲东南

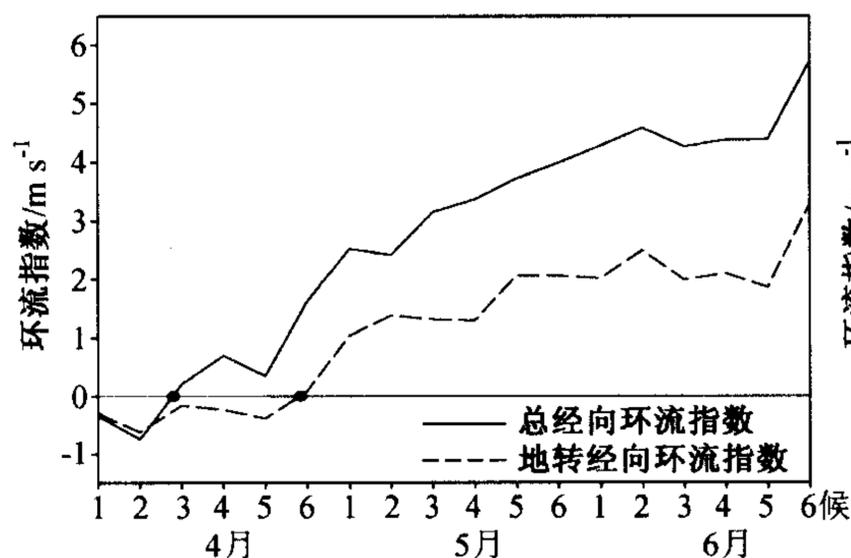


图 5 20 年平均实测经向环流指数和地转经向环流指数的逐候演变
正（负）指数代表夏（冬）季型经向环流，
“•”为经向环流冬季型到夏季型的转折点

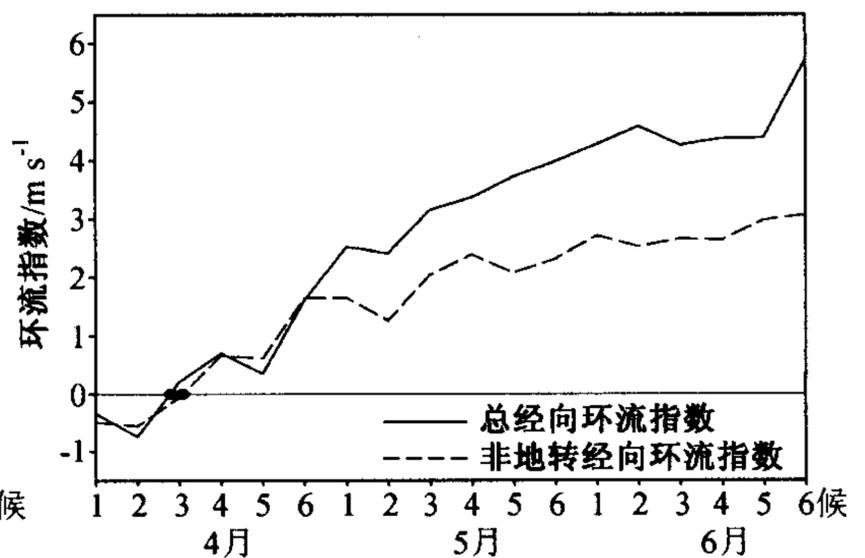


图 6 20 年平均实测经向环流指数和非地转经向环流指数的逐候演变
图注同图 5

部与南半球之间的南北温度梯度出现明显反转, 中南半岛上空的感热加热突增^[5,14], 与对流活动相联系的 TBB (黑体辐射云顶温度) 低值带开始出现在中南半岛, 并向北半球中纬度延伸^[15]。这种南北温度梯度和对流活动的变化有利于 $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 以北地区的暖平流和潜热加热等热力作用相对于以南地区逐渐增大。若用 (7) 式作定性分析, 则有 $\partial(Q_F)/\partial\varphi > 0$, 表明南海地区将出现 ψ 的正值中心, 在该中心下层 $\partial\psi/\partial p < 0$, 根据 (4) 式则有 $v_{\psi} > 0$ (吹南风); 中心上层 $\partial\psi/\partial p > 0$, 有 $v_{\psi} < 0$ (吹北风)。而在 ψ 正值中心的南部 $\partial\psi/\partial\varphi > 0$, 根据 (4) 式有 $\omega_{\psi} > 0$ (下沉); 而在其北部 $\partial\psi/\partial\varphi < 0$, 所以 $\omega_{\psi} < 0$ (上升), 这正是一个与南海以北地区加热强于南部地区相对应的直接环流 (夏季型经向环流)。本研究的前期工作^[10,16,17]曾运用 NCEP 逐日资料和超松弛迭代法求解 (1) 式, 算出 1984、1991 和 1994 年南海夏季风爆发前后逐日两个时刻由温度平流和潜热加热分别导致的经向平面非地转风, 并结合天气形势进行分析, 证实了以上的定性分析结果, 因此可认为, 图 6 所揭示的相关特征具有明确的物理意义。

与地转经向环流指数变化趋势一样, 非地转经向环流指数在 5 月继续加强。比较图 5 和图 6 还可以发现, 5 月的非地转经向环流指数变化趋势和强度与总经向环流指数变化趋势和强度吻合程度要比地转经向环流指数的好些, 这意味着非地转经向风驱动因子在实际季风环流发生突变过程中起着相当重要的作用 (需要说明的是, 由于近似地用经过边界调整后的 v_{ag} 取代“实际”的 v_{ag} , 图 5 和图 6 中的地转“经向环流”指数与非地转经向环流指数之和不严格等于总经向环流指数, 存在 5.87% 的平均相对误差)。此外, 对 1980~1999 年 4~6 月逐日演变总体情况的分析, 也可以得到非地转经向环流是经向环流重要成分的结果, 非地转经向环流指数对总经向环流指数的逐日贡献达到 52% (其余 48% 为地转成分), 两者的相关系数达到 +0.753 (通过 99.9% 的置信度检验)。因此, 要深入了解南海夏季风演变机制, 必须运用诊断方程 (1) 和数值分析方法对引起地转偏差因子的贡献作再分解和比较, 才能找到除气压梯度力外其他影响南海夏季风经向环流演变的主要因子。

5.2 从模拟结果探讨非地转经向环流演变机理

通过运用经向环流线性诊断方程 (1) 不但可以将引起地转偏差的因子分离开来, 还可以运用数值方法^[11] 求出各个因子独自对非地转经向环流的贡献, 经过分析比较, 找出那些对非地转经向环流演变起主要作用的因子。图 7 给出的是在外界影响 (开边界效应) 下由所有 (引起地转偏差的) 内力激发的非地转经向环流指数的时间序列, 将其与实际非地转经向环流指数进行对比得知, 4 月 1~5 候模拟的非地转经向环流指数比实际情况显著偏强。

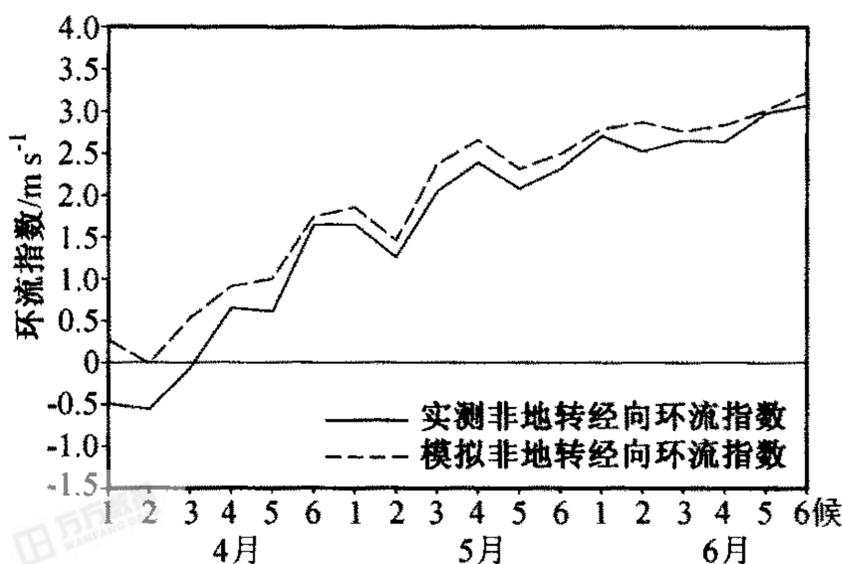


图 7 20 年平均的“实测”与模拟的非地转经向环流指数的逐候演变
图注同图 5

偏差出现的可能原因除了资料误差, 模式的梯度风平衡假设误差, 由数值格式和计算造成的截断、离散和舍入等误差外, 还有模式的研究对象是大气稳定条件下由强迫力驱动的经向环流, 若大气层结不稳定则模式所用的超松弛迭代

法^[11]失灵，计算结果发散，且稳定度越低，计算结果偏差越大。由于 4 月的稳定度相对于 5、6 月偏低（图略），所以模拟结果的偏差相对也大些。尽管如此，仍可看到非地转经向环流指数的模拟结果与实际情况是比较相近的。下面以模拟的非地转经向环流指数为参考标准，分别对引起地转偏差的各因子（包括外界影响和内力）的贡献和排序进行比较分析。

5.2.1 外界影响

外界影响（开边界效应）在本数值研究中具体体现为将经向平面的南北边界作为开边界处理，即允许模拟区域通过南北边界与外界进行物理量交换。为了突出越赤道气流对南海夏季风建立的影响，模式北边界的纬度为 52.5°N 。1994 年的计算结果（图 8）表明，边界效应在南海区域所激发的 850 hPa 非地转经向风与南边界实测经向风的演变趋势是基本一致的，正相关系数达到 0.648（通过 99.9% 的置信度检验）；而与北边界实测经向风（图略）不存在密切关系（相关系数仅为 -0.045 ），并且北边界大多数时间为北风所控制，北边界的北风对南海地区南风的形成是不利的。因此，可以认为边界效应对南海地区夏季非地转南风的影响主要由南边界条件（与越赤道气流相联系）来体现。观测资料（图 2a）也表明，南海夏季风爆发前后 850 hPa 实测风场 $100\sim 105^{\circ}\text{E}$ 越赤道气流明显加强。从逐日演变情况来看，外界影响对非地转经向环流指数的平均贡献达到 60.6%（逐候平均情况见图 9），两者的相关系数也达到 $+0.736$ （通过 99.9% 的置信度检验）。这些结果证明，与南北半球海陆热力差异所致的越赤道气流是南海夏季风环流的重要成员^[18]。

5.2.2 主要内力的贡献

比较数值计算结果可见，在（6）式给出的十几个内力中（气压梯度力和科里奥利力除外）热量垂直输送、纬向温度平流、潜热加热以及西风动量经向输送对南海地区

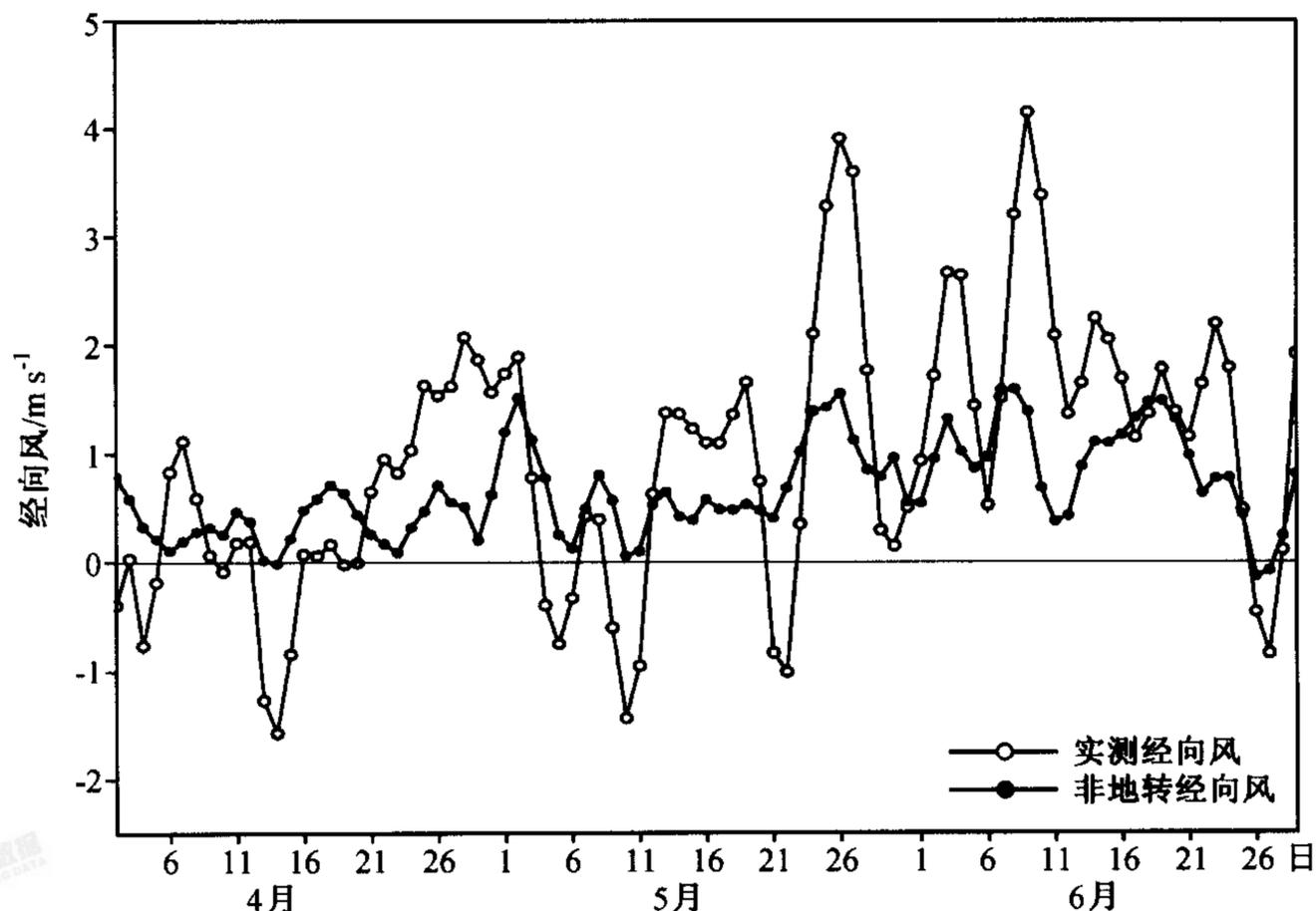


图 8 1994 年 4 月 2 日~6 月 29 日南边界处 (5°N) 的 850 hPa 经向风以及边界作用在南海区域导致的 850 hPa 非地转经向风

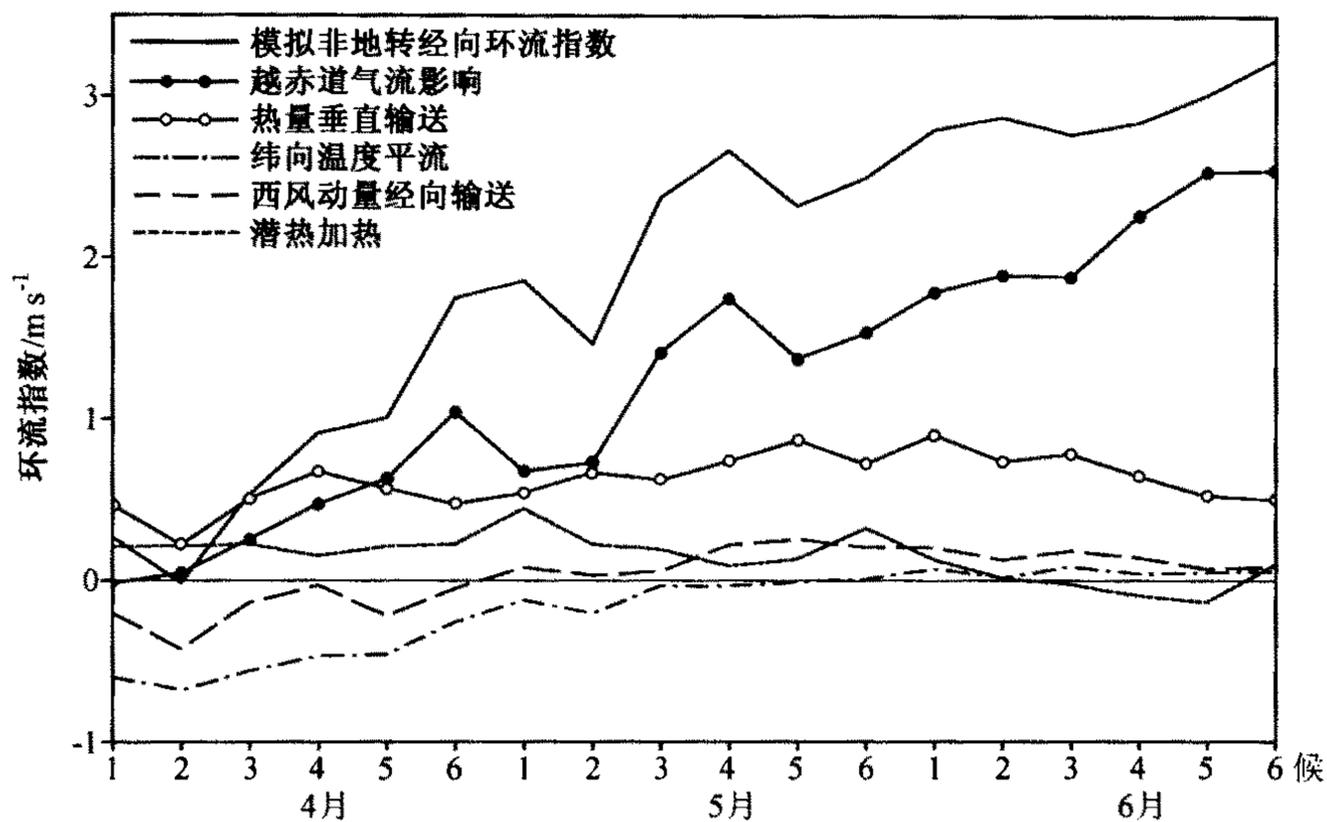


图9 模拟的非地转经向环流指数及各个主要因子导致的非地转经向环流指数的(逐候平均)演变

非地转经向环流指数的贡献相对较大,故以下仅对这4个内力作详细分析。

根据逐日计算结果可知,温度层结和垂直运动共同作用导致的热量垂直输送对非地转经向环流指数的平均贡献为21.8% (逐候平均情况见图9),相关系数为+0.213 (没有通过95%的置信度检验),但在外界影响突变不明显的5个年份(1982、1986、1992、1996和1998年)里,热量垂直输送作用的突变却成为南海经向环流指数突变的主要指标(见下一节分析)。

纬向温度平流对非地转经向环流指数的平均贡献达到8.2%,相关系数为+0.476 (通过95%的置信度检验)。可见,纬向温度平流也是激发非地转经向环流的重要影响因素之一(逐候平均情况见图9)。纬向温度平流的正贡献可以结合天气实况来理解^[10,16,17],因为5~6月南海以北地区的暖平流强于以南地区的暖(或冷)平流,这种温度平流的分布将导致南海以北地区加热强于以南地区,由此造成的直接环流正是一个夏季风经向环流。

潜热加热作用对非地转经向环流指数的平均贡献为5.8%,作用相对较小(逐候平均情况见图9),主要是由于潜热加热过程的时间尺度和空间尺度相对较小,经过平均后信号出现明显衰减的缘故。但这并不代表潜热加热作用是可忽视的,特别在考察时间尺度较短的经向环流演变时,这种作用往往是举足轻重的^[16,17]。

西风动量经向输送对非地转经向环流指数的平均贡献为3.6%,两者相关系数达到+0.551 (通过99%的置信度检验),与这种正相关关系对应的是南海地区西南风的加强。逐候平均情况还反映西风动量经向输送作用有随季节不断加强的趋势(图9)。

图9表明在外界影响(主要是越赤道气流影响)下,由这4个内力(热量垂直输送、纬向温度平流、潜热加热以及西风动量经向输送)激发的南海夏季风非地转经向环流,几乎与由所有引起地转偏差的因子激发的南海夏季风非地转经向环流一致。换句话说,外界影响(主要为越赤道气流)以及4个内力对南海夏季风非地转经向环流指数的总贡献几乎达100%。

6 季风爆发过程中主要影响因子的突变情况

南海夏季风的爆发伴随着环流场和要素场的突变^[9,19]，突变情况也应该在经向环流指数上有一定的反映。为了找出各种经向环流指数发生突然性加强的时间，本研究对各指数时间序列作了滑动 t 检验，试验考虑的滑动长度为 5~15 天不等，但由于滑动长度为 5~10 天的结果与 7 天的相差无几，而滑动长度为 15 天的结果过于平滑，并且突变性加强的极值点和出现时段都与 7 天的无大出入，考虑到因子贡献分布存在波动，所以这里仅给出滑动长度为 7 天的结果。若用于检验的统计量通过一定的显著水平检验，则表明相应经向环流指数的平均状态在相应时段内（时间尺度为候或更长）发生了突变。

参考何金海等^[9]统计的南海夏季风爆发时间得出，总经向环流指数，地转、非地转经向环流指数，以及其由各个引起地转偏差的主要因子造成的经向环流指数，均在南海夏季风爆发前 1 周内出现不同程度的突变性加强（表 1）。例如：20 年有 12 年的总经向环流指数在南海夏季风爆发前出现明显的突变性加强，地转经向环流指数有 9 个年份在夏季风爆发前出现突变性加强，非地转经向环流指数则在 14 个年份的夏季风爆发前发生突变加强，而且在南海夏季风爆发有明显经向特征的 12 个年份里均有较大的突变值（表略）。此外值得注意的是，非地转经向环流指数发生突变的时间也比总经向环流的突变一般要早 1~4 天（表略）。与地转经向环流指数相比，非地转经向环流指数和总经向环流指数的突变幅度的对应关系也好一些，所以非地转经向环流指数具有预报南海夏季风爆发的参考价值，这个结果和前面对 20 年平均逐候演变情况的分析结果一致。

表 1 环流指数在南海夏季风爆发前 1 周内的突变情况

环流指数	发生突变性加强的年份								年份数目
实测经向环流	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1987	1988	12
	1991	1996	1997	1999					
地转经向环流	1981	1982	1983	1984	1985	1986			9
	1991	1996	1999						
非地转经向环流	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1987	1988	14
	1991	1993	1996	1997	1998	1999			
外界影响（越赤道气流）	1980	1981	1983	1984	1985	1987	1988	1989	15
	1990	1991	1993	1994	1995	1997	1999		
热量垂直输送	1980	1981	1982	1983	1986	1987			13
	1991	1992	1994	1995	1996	1997	1998		
纬向温度平流	1980	1981	1983	1984	1985	1988			11
	1991	1993	1994	1995	1997				
潜热加热	1981	1982	1984	1985					9
	1991	1995	1996	1998	1999				
西风动量经向输送	1981	1983	1984	1985	1987	1988			10
	1994	1996	1997	1999					

与前面分析结果一致,外界影响对南海经向环流的贡献(以越赤道气流影响为主)存在显著突变,这里的滑动 t 检验表明:20 年中有 15 年外界影响在南海夏季风爆发候前 1 周内已经出现突变性增强,且在南海夏季风爆发有明显经向环流突变特征的 12 个年份中,外界影响有 10 个年份在南海夏季风爆发前已出现突变性增强。在外界影响突变性增强不明显的 5 年中,有 3 年(1986、1992 和 1998 年)是因为越赤道气流作用早,在南海夏季风爆发前就处于强度大且稳定的状态,因而突变不明显。在剩余的 2 年(1982、1996 年)越赤道气流是在南海夏季风爆发后才出现突变性加强的,这 2 年中引起南海夏季风爆发前总经向环流指数突变增强的主要因子是热量垂直输送和潜热加热。热量垂直输送在南海夏季风爆发前出现突变性增强的特征,在外界影响(越赤道气流)突变不明显的 5 年尤其显著。另外,对于多数年份而言,纬向温度平流、潜热加热和西风动量经向输送在南海夏季风爆发前均有突变性增强。

以上两节从不同角度分析了各个影响因子对经向环流的贡献,结果均一致。由于资料的限制(粗网格和有待完善的数值模式的降水预报),数模假设误差,差分格式及数值运算造成的截断、舍入和离散误差,会使突变时间与实际时间有所出入,故本文的因子突变分析结果仅作预报参考。

7 结论与讨论

基于观测资料和模拟结果,对比总经向环流指数、地转经向环流指数(只由气压梯度力驱动)、非地转经向环流指数(在外界影响下由气压梯度力以外的其他真实力共同驱动)以及与各个因子有关的非地转经向环流指数,在 1980~1999 年 20 年平均的 4~6 月逐日逐候演变情况,得到以下结果:

(1) 从逐日演变情况来看,所有引起地转偏差的因子对总经向环流指数的总体贡献达到 52%。若从 20 年平均的逐候演变情况来看,4 月 1~6 候(经边界调整)非地转经向环流指数对总经向环流指数的贡献达 94%,两者在 5 月的变化趋势也比较一致,表明,激发非地转经向环流的因子在南海夏季风的酝酿和爆发过程中起尤其重要的作用。

(2) 对南海地区非地转经向环流演变而言,外界影响(主要为越赤道气流影响)的贡献最为突出。

(3) 在引起经向风地转偏差的 16 个内力中,与大气层结和垂直运动有关的热量垂直输送、纬向温度平流、潜热加热以及西风动量经向输送,对南海地区非地转经向环流指数的贡献相对较大;其余物理因子贡献较小。

(4) 南海地区 4~6 月经向环流指数在 20 年中有 12 年在爆发前出现明显的突变特征。20 年中有 15 年,与越赤道气流有关的经向环流指数在南海夏季风爆发前一周内出现突变性增强,剩下 5 年则以与热量垂直输送有关的经向环流指数的突变增强最明显。故越赤道气流和温度场变化具有预报南海夏季风爆发的参考价值。

由于本文从 20 年平均的 4~6 月逐候演变情况来研究南海夏季风的演变机制,因此,某些影响因子(如潜热加热等)的短期作用还有待于进一步的探讨。我们将在接下来的工作中分析各个影响因子在夏季风活跃或中断阶段中的贡献作用,了解引起季

风振荡现象的机制。

参 考 文 献

- 1 史学丽、丁一汇, 1994 年中国华南大范围暴雨过程的成与夏季风活动的研究, 气象学报, 2000, **58** (6), 666~678.
- 2 陈隆勋、李薇、赵平、陶诗言, 东亚地区夏季风爆发过程, 气候与环境研究, 2000, **5** (4), 345~355.
- 3 梁建茵、吴尚森, 夏季广东降雨异常变化与夏季风, 热带气象学报, 1999, **15** (1), 38~47.
- 4 赵永平、陈永利, 白学志等, 南海—热带东印度洋海温年际变化与南海季风爆发关系的初步分析, 热带气象学报, 2000, **16** (2), 115~122.
- 5 王世玉、钱永甫, 1998 年地面加热场的基本特征及其与南海夏季风爆发的可能联系, 气象学报, 1999, **59** (1), 31~40.
- 6 Ueda, H., and T. Yasunari, Role of warming over the Tibetan Plateau in early onset of the summer monsoon over the Bay of Bengal and the South China Sea, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1998, **76** (1), 1~12.
- 7 张永生、吴国雄, 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析 II: 青藏高原及邻近地区地表感热加热的作用, 气象学报, 1999, **57** (1), 56~73.
- 8 袁卓建、王同美, 局地经向环流的诊断方程, 东亚季风和中国暴雨, 北京: 气象出版社, 1998, 496~505.
- 9 何金海、丁一汇、高辉等, 南海夏季风建立日期的确定与季风指数, 北京: 气象出版社, 2001.
- 10 Yuan Zhuojian, Wang Tongmei, He Haiyan et al, A Comparison between Numerical Simulation of Forced Local Hadley (Anti-Hadley) Circulation in East Asia and Indian Monsoon Regions, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (4), 538~554.
- 11 袁卓建、王同美、郭裕福, 东亚季风经向环流数值模拟及结果分析 I: 算法设计, 中山大学学报 (自然科学版), 2000, **39** (6), 112~116.
- 12 黄荣辉、张振洲、黄刚等, 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别, 大气科学, 1998, **22** (4), 460~469.
- 13 Goswami, B. N., V. Krishnamurthy, and H. Annamalai, A broad-scale circulation index for the interannual variability of the Indian summer monsoon, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**, 611~633.
- 14 何金海、朱乾根、M. Murakami, TBB 资料揭示的亚澳季风区季节转换及亚洲夏季风建立的特征, 热带气象学报, 1996, **12** (1), 34~42.
- 15 何金海、徐海明、周兵、王黎娟, 关于南海夏季风建立的大尺度特征及其机制的讨论, 气候与环境研究, 2000, **5** (4), 333~344.
- 16 覃慧玲、简茂球、袁卓建、王东晓, 西太平洋—中国边缘海局地海气相互作用系统的揭示, 热带气象学报, 2004, **20** (1), 39~50.
- 17 梁肇宁、温之平、袁卓建、覃慧玲, 影响 1991 年和 1994 年南海夏季风爆发迟早的物理因子探讨, 大气科学, 2004, **28** (2), 216~230.
- 18 曾庆存、李建平, 南北两半球大气的相互作用和季风的本质, 大气科学, 2002, **26** (4), 433~448.
- 19 简茂球、乔云亭、罗会邦, 南海夏季风爆发前后低纬大气环流突变特征, 气候与环境研究, 2000, **5** (4), 356~362.

The Mechanism for the Evolution of the Monsoon Meridional Circulation over the South China Sea from (20-Year Mean) April to June

Chen Guixing¹⁾, Yuan Zhuojian¹⁾, Liang Jianyin²⁾,
Qin Huiling¹⁾, and Wen Zhiping¹⁾

1) (*Department of Atmospheric Science, Research Center for Monsoon and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510275*)

2) (*Guangzhou Institute of Tropical and oceanic Meteorology, Guangzhou, 510080*)

Abstract Based on the NCEP reanalysis data, the monsoon meridional circulations over the South China Sea (SCS) from April to June in 20 years (1980—1999) are simulated with the local meridional circulation model. The physical factors' contributions to the circulation are analyzed with the linear model outputs and the index representing the intensity of the monsoon circulation. The results show that geostrophic component (pressure gradient force) accounts for 48% and ageostrophic component for 52% of the intensity of the monsoon circulation in terms of the index. The open boundary effect (or the effect of cross-equatorial flow) on the SCS monsoon meridional circulation is crucial according to the numerical outputs. Among the 16 physical factors responsible for the ageostrophic component of meridional wind, the main factors are the vertical transport of heat, the zonal transport of the heat, the latent heating and the meridional transport of the westerly momentum. The suddenly increasing influences of these factors are closely related to the onset of SCS summer monsoon. Fifteen years out of twenty years, the rapidly enhancement of cross-equatorial flow is prior to the SCS summer monsoon onset. In the other five years, the vertical transport of heat plays the main role.

Key words: South China Sea summer monsoon; meridional circulation; evolution mechanism; diagnostic study of monsoon