

文章编号: 1000-2022(2001)01-0083-09

热带环流演变与南海季风爆发

江 静 钱永甫

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘要: 利用 1958 ~ 1997 年的 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了南、北半球中低纬环流的气候特征, 并讨论了南海夏季风爆发与大尺度环流的关系。研究发现阿拉伯海经向环流管的上升气流和南半球纬向环流管的上升气流在 5 月份同时到达南海, 经向环流管低层的偏西风和纬向环流管低层的偏南风共同组成西南风, 于是 5 月份西南季风在南海地区首先爆发。此外, 由于青藏高原地形及各经度海陆分布的影响, 造成太阳辐射加热不均, 是热带夏季风爆发的直接原因, 也是南海季风早于印度季风爆发的重要原因。

关键词: 南海季风; 季风爆发; 热带环流; 环流管

中图分类号: P461 **文献标识码:** A

亚洲是世界上季风最明显的地区, 亚洲夏季西南季风的爆发与大气环流的季节转变有关。为了解亚洲夏季风爆发的机制, 国内外气象工作者作了大量的工作。何金海等^[1]指出, 南海季风最早建立, 其建立过程与西太平洋副高的东撤直接相关。陶诗言等^[2]也指出, 当东亚及西太平洋地区大气环流发生季节性转变时, 南半球高低空流场也有显著变化。他们认为, 南半球大气环流的变化对东亚地区夏季风的建立及其向北推进起着触发作用。张耀存等^[3]分析了 1979 ~ 1995 年 17 年平均的表面感热通量的季节变化及空间变化, 认为南海季风的爆发可能与中南半岛表面感热通量的变化有关。王世玉等^[4]分析了 1998 年南海季风爆发前后区域加热场的基本特征, 指出中南半岛与南海之间的热力差异是叠加于大范围海陆热力差异背景上的一种附加的热力作用, 对南海季风爆发起着促发作用。Shao 等^[5]则分析了 1998 年南海季风爆发前后风场 u 、 v 分量及垂直速度的变化, 发现南海季风爆发时水平风场及垂直速度场发生了强烈的变化。

亚洲夏季风最早在南海地区建立的原因及其爆发和维持的机理一直是人们关注的焦点, 但至今没有较为一致的结论。本文利用 1958 ~ 1997 年的 NCEP/NCAR 2.5° × 2.5° 再分析资料(其中表面气温资料为 1979 ~ 1995 年 17 年平均的候平均资料), 从纬圈环流和经圈环流演变出发, 对上述问题作了一些探讨, 以期揭示南海季风爆发的机理。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 49735170)和 高等学校骨干教师资助计划项目“南海季风的年际变化及其对我国旱涝的影响”联合资助

收稿日期: 2000-04-06; 修订日期: 2000-09-11

作者简介: 江 静, 女, 1962 年 10 月生, 硕士, 副教授

1 纬向环流和经向环流管

为了分析影响南海季风爆发的低纬环流特征,首先分析了低纬和赤道地区 4、5 月份的纬向垂直环流(图 1)。由图 1c, g 可见,在赤道印度洋到阿拉伯海、孟加拉湾的上空各纬度均有一个强大的纬向环流圈,环流圈高层是偏东气流,低层是偏西气流,西面是下沉气流,东面是上升气流,环流底部的偏西气流与环流东侧的偏东气流在环流圈的东部边界约 110°E 处辐合,形

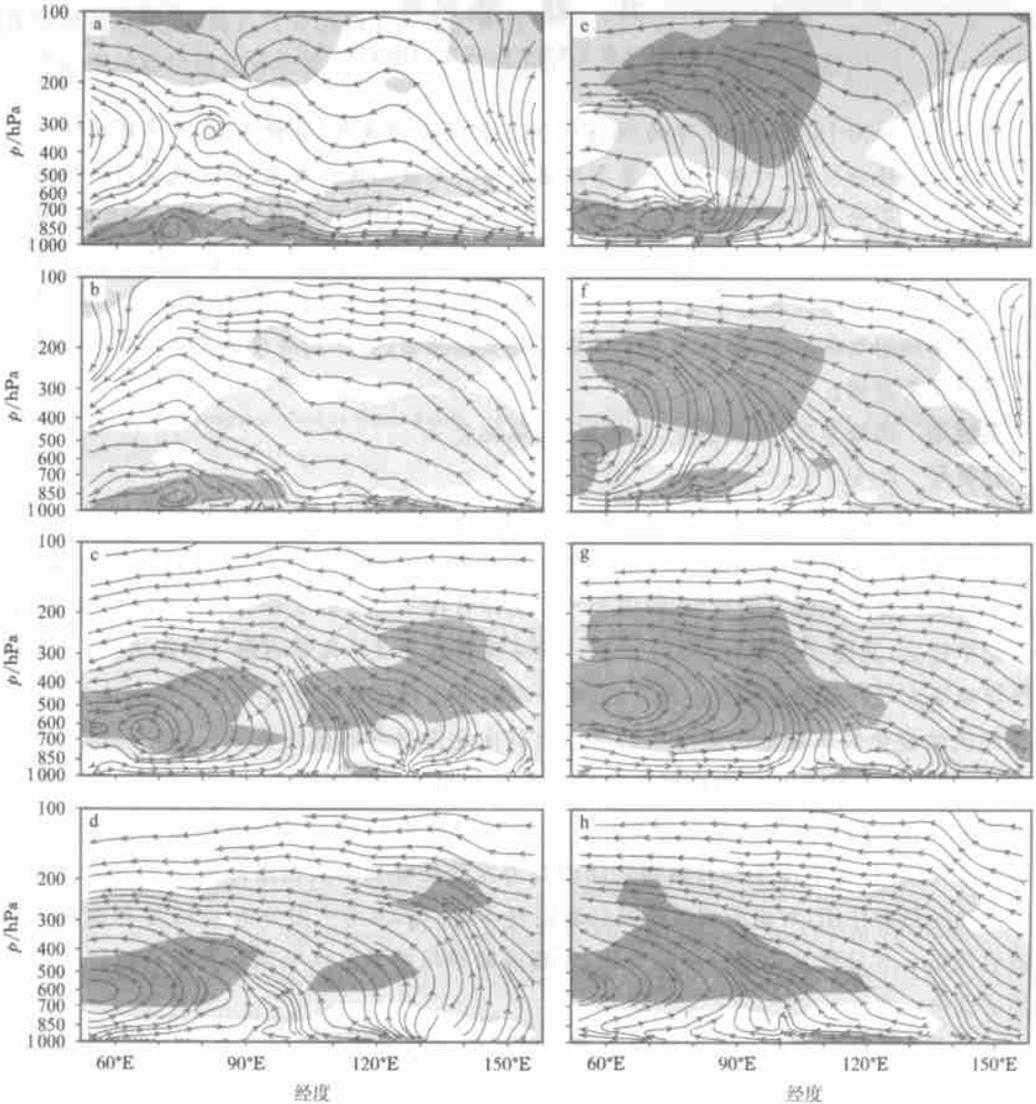


图 1 热带各纬度的纬圈环流(垂直速度扩大 50 倍)

浅阴影区为 $\omega < 0.000 \text{ s}^{-1}$ 的区域,深阴影区为 $\omega < -0.001 \text{ s}^{-1}$ 的区域

a. 4 月, 10°N; b. 4 月, 5°N; c. 4 月, EQ; d. 4 月, 5°S;

e. 5 月, 10°N; f. 5 月, 5°N; g. 5 月, EQ; h. 5 月, 5°S

Fig. 1 Zonal circulation cells at the tropics latitudes.

Light shaded is the area of $\omega < 0.000 \text{ s}^{-1}$, dark shaded is the area of $\omega < -0.001 \text{ s}^{-1}$

a. April, 10°N; b. April, 5°N; c. April, EQ; d. April, 5°S; e. May, 10°N; f. May, 5°N; g. May, EQ; h. May, 5°S

成明显的上升运动。各纬度环流圈形成一个南北向的经向环流管, 环流管南端中心(图 1d, h)位置稍高, 在 500~600 hPa 处, 北端中心(图 1a, b, e, f)位置较低, 大约在 800~900 hPa, 环流管以东直至中太平洋从高层到低层是一致的偏东风, 环流管东部边界则是低层东西风的分界线, 东西风在环流管东部边界处辐合形成强烈的上升运动。为了定量地描述环流管的强度及其季节变化, 我们计算了经圈方向的涡度分量 ($\omega = \partial u/\partial x - \partial v/\partial y$), 叠加在图 1 的流场上(阴影区)。其中, 浅阴影区为 $\omega < 0.000 \text{ s}^{-1}$ 的区域, 深阴影区为 $\omega < -0.001 \text{ s}^{-1}$ 的区域。可以看出, 经向涡度中心与环流管中心基本吻合。在 4 月份(图 1a~d), 环流管横跨赤道, 在赤道附近环流最强(图 1c), 环流管南端偏西(图 1d), 大约在 55°E, 中心位于 600 hPa 上, 北端中心略偏东(图 1a), 在 70°E 附近, 中心位于 900 hPa。赤道以北地区环流较弱。5 月份(图 1e~h), 赤道附近环流依然很强(图 1g), 中心在 60~70°E, 位于 500 hPa, 而赤道以北地区环流较 4 月份有很大的增强, 环流管东侧有很强的上升运动, 环流中心在 5°N 位于 600 hPa, 到 10°N 则下降到 800 hPa。可见, 随着经向环流管位置抬高, 强度增强, 且向北发展, 低层西风区也随之加厚北移, 甚至在 10°N, 较强的偏西气流和上升运动也能到达 110°E, 从而使南海大部分地区为偏西风所控制。

环流管常年维持在阿拉伯海的上空, 但随着大尺度环流的进退, 其位置和强度有很大的季节变化。图 2 给出了环流管中心位置和强度以及南北端位置的季节变化。其中, 环流管中心强度是环流管中心纬度处 50~80°E 间平均的经向涡度, 环流管南、北端位置根据 1~12 月各纬度的纬圈环流图确定, 其距离代表环流管长度。3 月份以前, 环流管主体位于南半球, 中心位于 5°S 以南, 强度偏弱, 南端在 10°S 以南, 北端在 5°N 附近; 4 月份环流管开始向北推进, 中心位于赤道附近, 强度变化不大, 南端移至 10°S 以北, 北端稍有北移; 从 5 月份开始环流管逐渐增强, 并继续北进, 其主体移至北半球, 中心在 5°N 附近, 并大幅度向北伸展, 北端约北移 10 个纬距, 到达 17°N 附近; 6 月份环流管中心继续北移, 强度迅速增强, 北端移到了 25°N 附近; 7~8 月到达最北位置, 且达到最大强度, 9 月份, 环流管开始迅速减弱并南撤。环流管的北进南撤, 带动其底部偏西气流在东亚地区进退。由图可见, 经向环流管在 5 月份有一次突变, 环流管长度突然增加, 且迅速向北半球副热带地区推进。

为了了解环流管的垂直结构, 图 3 给出了环流管中心所在的经度 50~80°E 平均的经向涡度。3 月份, 环流管高层中心在 600 hPa, 位于赤道以南, 低层中心在近地面, 处于 10°N 以南。4 月份, 高层中心位置变化不大, 但强度稍有增加, 低层中心除了强度增强外, 位置变化较大, 抬升至 850 hPa, 且北移至 10°N 附近。5 月份, 环流管强度迅速增强, 高层中心略有北移, 位于赤道附近, 而低层中心则北移至 10°N 以北。6 月份, 低层中心变化不大, 只是强度稍有增加, 中心抬升至 700 hPa 附近, 而高层中心强度迅速增大, 中心上升至 200 hPa, 且北移到了

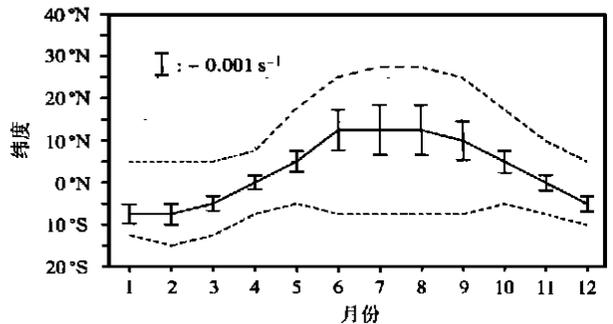


图 2 环流管位置及强度的季节变化
实线为中心位置, “I” 的长度代表中心强度,
两侧的虚线为环流管的南北端位置

Fig. 2 Seasonal variations in location and intensity of cell tube, middle line is the center position, short vertical line “I” indicates the center intensity, the dashed lines at both sides are south and north ends of cell tube, the distance between them is the length of tube

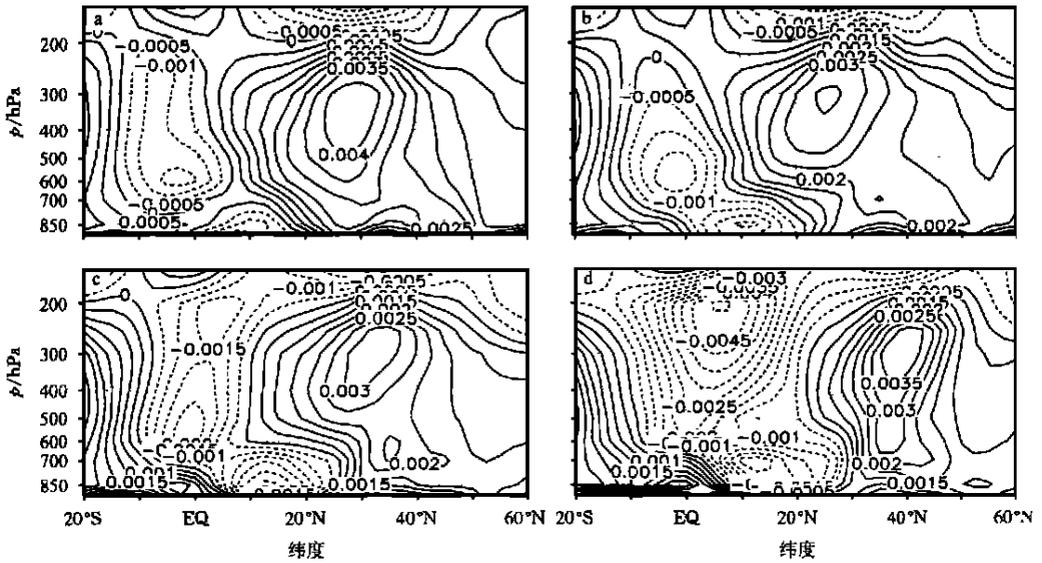


图3 环流管中心(50~80 E 平均) ω 的纬度-高度剖面图

a. 3月; b. 4月; c. 5月; d. 6月

Fig. 3 Latitude-altitude sections of ω at cell tube centers (average of 50~80 E)

a. March; b. April; c. May; d. June

5°N 附近。由图可见,从4月份开始,环流管低层中心首先增强、抬升,且向北发展,而高层中心则到6月份才有较大幅度的增强和北移。

2 经向环流和纬向环流管

图4给出了1月和5月不同经度上的经向环流。由图可见,在北半球冬季从70~140 E 的各经度均存在一个非常强的经向环流圈(图4a~d),气流在赤道附近上升,在北半球中低纬下沉,高层是偏南风,低层是偏北风。在不同经度上中心位置不同,70 E 上在5°N 左右,90 E 上在10°N 附近,120 E 上有两个中心,一个位于12°N 附近,另一个处于20°N,140 E 上位于15°N 处,这就是北半球 Hadley 环流。各经度上的 Hadley 环流组成了一个西南-东北走向的纬向环流管。在其南面,南半球 Hadley 环流组成另一个纬向环流管(图略),该环流管低层为偏南风,高层为偏北风。5月份,北半球纬向环流管西段减弱(图4e, f),环流管中心北移到10°N 以北,青藏高原南侧的印度地区形成一个与北半球 Hadley 环流反向的环流,该环流位于对流层中下层,中心在800 hPa 上。此时,北半球纬向环流管东段已消失(图4g, h)。与此同时,南半球纬向环流管则迅速向北推进,尤其在东亚大陆东岸及西太平洋地区北推更甚,较强的上升气流已到达南海地区(图4g),高层甚至到达更北一些的东亚大陆,此时,南海地区高层为偏北气流控制,低层则是南半球纬向环流管低层的偏南风,形成南海季风的爆发。南半球纬向环流管的北进带动北半球低层偏南风的向北推移。

根据各经度的经向环流,我们给出了3~6月北半球纬向环流管中心位置变化图(图5)。3月份,以70 E 为界,北半球纬向环流管西段在南半球,东段在北半球。4月份环流管向西收缩,而中心位置变化不大,仅在70~86 E 之间向北移动较大,这与阿拉伯海环流管4月份的北移一致。5月份,整个环流管迅速北移,东端收缩至95 E 附近。6月份,环流管再一次北移,其中北移最明显的是位于60~80 E 的阿拉伯海和印度次大陆,环流管中心达到20°N 甚至

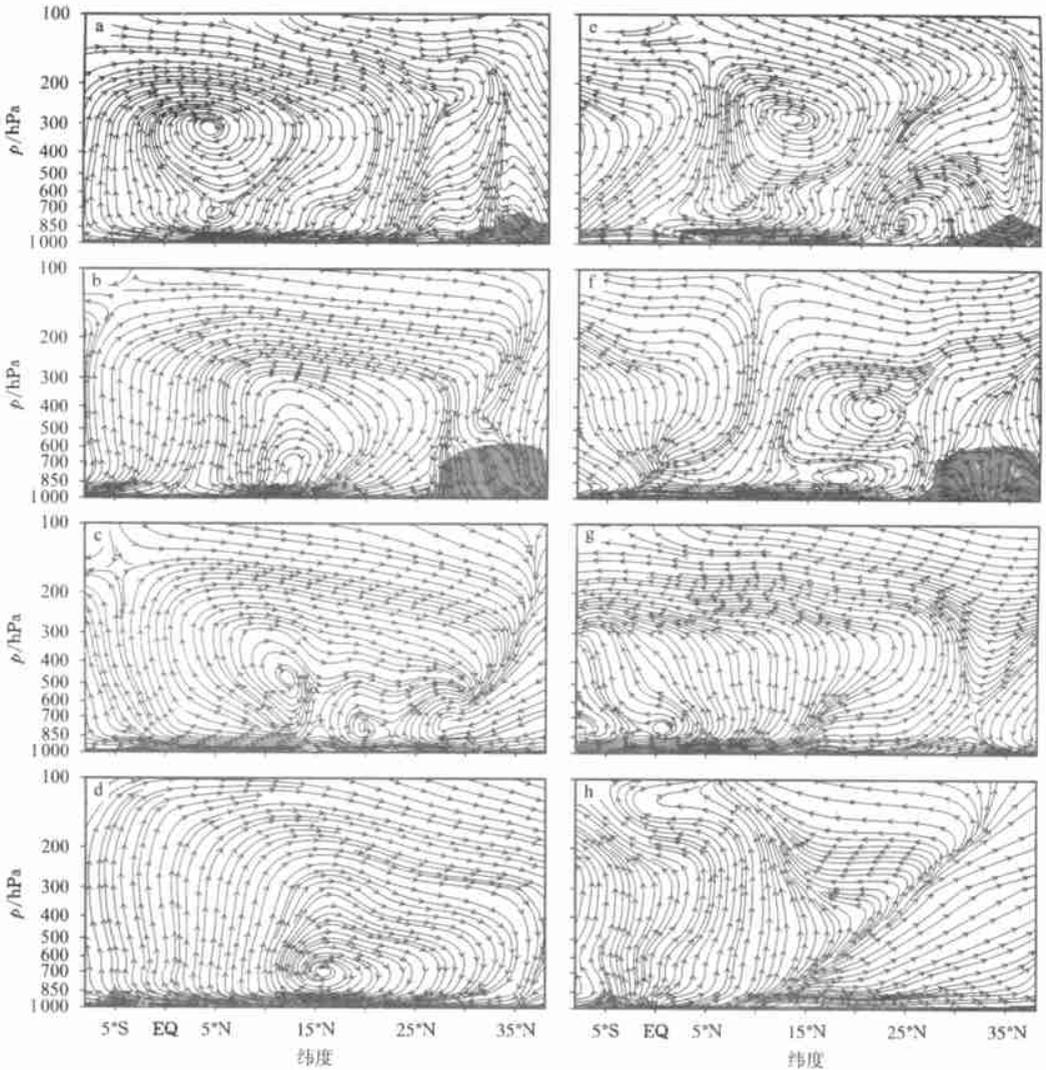


图4 各经度的经向环流(垂直速度已扩大50倍)

- a. 1月, 70°E; b. 1月, 90°E; c. 1月, 120°E; d. 1月, 140°E;
 e. 5月, 70°E; f. 5月, 90°E; g. 5月, 120°E; h. 5月, 140°E

Fig. 4 Meridional circulation cells at different longitudes (vertical velocity has been multiplied by 50)

- a. January, 70°E; b. January, 90°E; c. January, 120°E; d. January, 140°E;
 e. May, 70°E; f. May, 90°E; g. May, 120°E; h. May, 140°E

更北的纬度。

与北半球纬向环流管的减弱、收缩相反, 南半球纬向环流管则从3月到6月逐渐发展加强, 这从南半球纬向环流管北边界的向北推进可以清楚地看出(图6)。3月以前, 环流管完全处于南半球。4月份开始向北扩展, 中南半岛以东地区环流管上升气流已处于北半球上空, 但仍位于10°N以南。5月份环流管大举北进, 尤其是100°E以东至135°E的南海及西太平洋地区北进幅度最大, 其北界已到了25°N以北, 此时南海季风爆发。而100°E以西由于高原的阻碍作用, 环流管虽然也向北推进, 但比西太平洋地区少得多。6月份, 环流管再一次北进, 但此次北进只限于100°E以西的地区, 这对应着印度季风爆发。

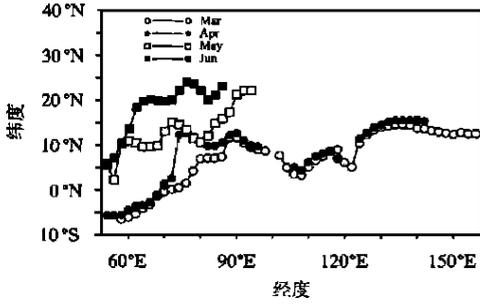


图 5 北半球纬向环流管中心位置的变化
Fig. 5 Variation of the center locations of the North Hemisphere zonal cell tube

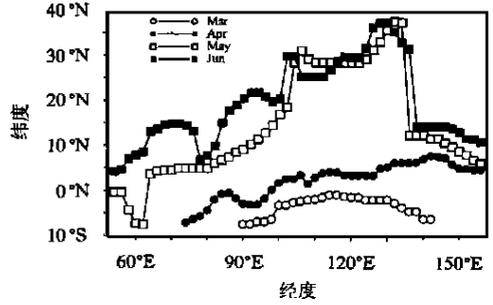


图 6 南半球纬向环流管北界位置的变化
Fig. 6 Variation of the north boundary of the South Hemisphere zonal cell tube

由此可见, 亚洲夏季风的爆发与南半球纬向环流管的进退有密切的联系, 南半球纬向环流管 5 月份首先在南海地区大举北进, 造成亚洲夏季风最先在南海地区爆发。6 月份, 南半球纬向环流管在印度地区大举增强北进, 导致了印度季风的爆发。

3 大尺度环流演变与南海季风爆发

经向环流和纬向环流演变的同时, 水平流场也出现了一系列的变化。首先是赤道辐合带 (ITCZ) 的变化(略图), 3 月份, 赤道地区出现双赤道辐合带, 一条在赤道附近, 一条位于 10°S, 阿拉伯海环流管处于两条 ITCZ 之间。南海地区处于反气旋带的南侧, 为东风气流。4 月份, 10°S 以南的 ITCZ 移至 0~10°S 之间, 赤道附近 ITCZ 的东端收缩西移。5 月份, 南半球 ITCZ 的西端发展, 中心在 (85°E, 5°S) 附近, 东端由于偏东气流的加强而消失, 北半球中低纬 110°E 以西 0~20°N 的偏东气流被强大的偏西气流所替代, 赤道附近的 ITCZ 消失, 西南气流与东南气流在 110°E 处汇合, 南海大部分地区为西南气流, 形成了南海季风的爆发。6 月份, 南半球 ITCZ 北进到赤道附近, 中心东移至 95°E, 整个东亚为西南气流控制, 这就是东亚季风的全面爆发。

对流层中上层的反气旋也发生了很大的变化。图 7 给出了东亚热带地区对流层中上层反气旋中心位置随时间的变化。由图 7a 可见, 在南海季风爆发前, 反气旋中心向东倾斜, 5 月份突然转成向西倾斜, 而早在 4 月份高层中心就开始西移, 低层 700 hPa 也开始东移。5 月份高

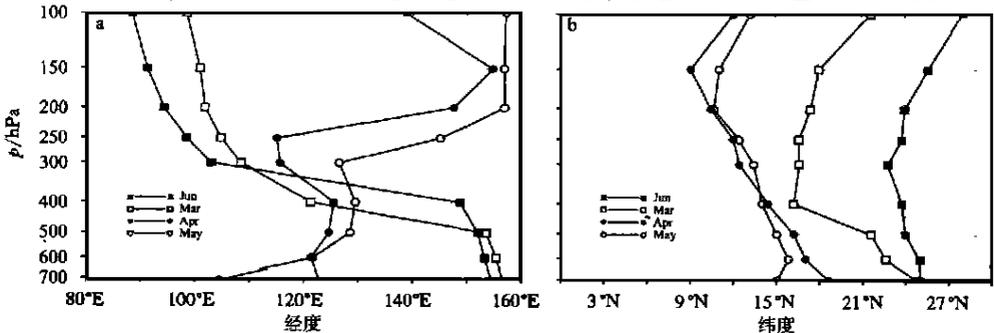


图 7 东亚热带地区反气旋中心的垂直分布的时间变化
a. 随经度变化; b. 随纬度变化

Fig. 7 Variations of anticyclone centers in the Northern Hemisphere with (a) longitudes, (b) latitudes

层中心大幅度西移, 而低层中心则大幅度东撤, 这也就是人们通常所提到的南亚高压在青藏高原上建立以及 500 hPa 上西太平洋副高东撤。至于反气旋中心随纬度的变化(图 7b), 对流层低层 4 月份就已开始北移, 5 月份高空反气旋和低层副高大幅北移, 对流层中层北移幅度较小, 6 月份高层中心继续大幅度北移, 低层北移不大。

分析经向环流管中心所在高度 500 hPa 的经向涡度 ω (图略) 可以发现, 从 3 月到 6 月, 赤道西太平洋上空经向涡度的绝对值逐渐减小。而在经向环流管所在的经度(50~80 E), 经向涡度的绝对值逐渐增大, 其南边界变化不大, 只是稍微北移, 但环流管中心及北边界有较大的北移, 负涡度区域向北向东发展, 对应着经向环流管从 3 月到 6 月向北向东发展。5 月份, 伴随着南半球纬向环流管在南海及西太平洋地区的大幅度北推, 负涡度区域在中南半岛及南海地区率先北进, 到 6 月份负涡度区才向印度地区扩展。200 hPa 反气旋的变化也与大尺度环流的变化一致。反气旋中心位于北半球 500 hPa 经向涡度零值线上空, 并随着负涡度区的北进而向西向北移动。

将图 7 与图 5 和图 6 比较可见, 高空反气旋的东西变动与北半球纬向环流管的变化一致, 反气旋中心位于北半球纬向环流管东端中心以东, 随着北半球纬向环流管的向西收缩而西移。至于低层西太平洋副高的东撤则与南半球纬向环流管在南海附近大幅度北进有关。

为研究大气环流变化的形成原因, 我们利用 1979~1995 年 17 年平均的候平均表面气温资料, 给出了 70~80 E、110~120 E 以及 140~150 E 的表面增温随时间的变化(定义为各候与第一候的表面气温差, 图 8)。这种温差在一定程度上反映了中低纬温度梯度的反转过程, 避免了气温垂直插值可能带来的误差。

在 70~80 E 上(图 8a), 冬季大陆上特别是青藏高原地区温度很低, 使得低纬与中纬度有较大温差, 因此在该地区北半球 Hadley 环流非常强。2 月中、下旬开始, 青藏高原北侧迅速升温, 南侧的印度地区(25~30 N)也有较大的升温, 高原地区则升温缓慢。由于印度地区增温较其北面的高原地区迅速, 北半球纬向环流管位于高原南侧, 一直到 5 月份依然很强。到 6 月上旬, 高原北侧增温已达 30 °C, 于是北半球纬向环流管开始减弱, 南半球纬向环流管则增强北上, 印度季风爆发。在 110~120 E 上(图 8b), 冬季由于中低纬度较大的温差, 北半球 Hadley 环流也较强, 3 月份, 25 N 以北的大陆地区迅速

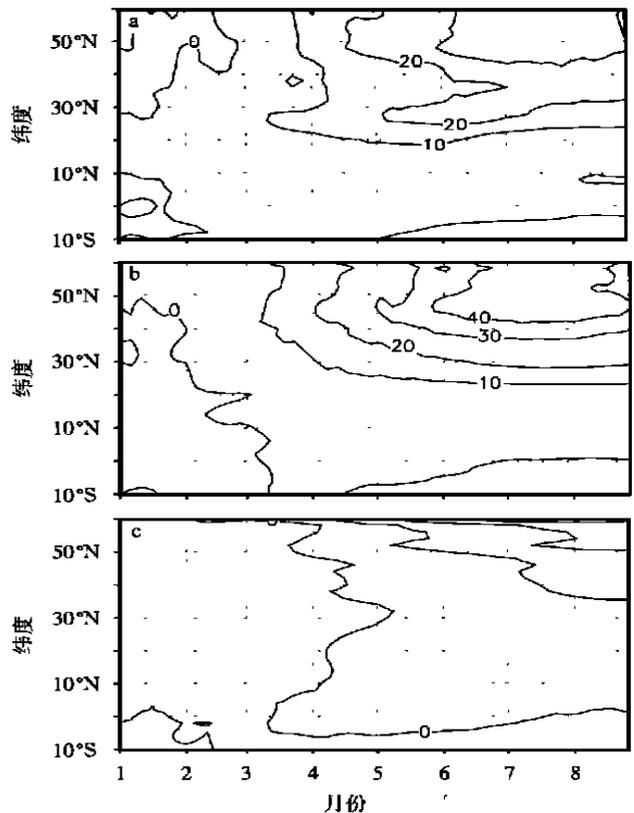


图 8 表面增温随时间的变化(单位: °C)

a. 70~80 E; b. 110~120 E; c. 140~150 E

Fig. 8 Time variation of the increased surface temperatures (unit: °C)

at (a) 70~80 E, (b) 110~120 E, (c) 140~150 E

增温,中低纬度温差变小,北半球 Hadley 环流开始减弱,到 5 月中旬,我国东部沿海地区累积增温就已达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,于是在该地区北半球纬向环流管逐渐消失,南半球纬向环流管北进并取而代之,南海季风爆发。与 $70\sim 80\text{ }^{\circ}\text{E}$ 相比, $110\sim 120\text{ }^{\circ}\text{E}$ 中纬度的增温要迅速得多,从而南海季风的爆发比印度季风早。至于 $140\sim 150\text{ }^{\circ}\text{E}$ 的西太平洋上(图 8c),冬季中低纬度温差较大,北半球 Hadley 环流也较强,3~4 月份开始增温,且高纬增温较低纬迅速,中低纬温差逐渐减小,北半球纬向环流管也逐渐减弱消失,南半球纬向环流管逐渐增强。

从上面的分析可知,亚洲夏季风的爆发与热带环流的演变有密切的关系。由于太阳辐射加热作用,4 月份,高原东侧的大陆地区迅速增温,中低纬度温差变小,南半球纬向环流管首先向北半球发展,北半球纬向环流管减弱收缩,高空反气旋向西移动,同时阿拉伯海环流管增强,低层中心北移,又使得其东面的西太平洋副高北移。5 月份,我国东部沿海地区温度迅速升高,中低纬度温差进一步减小,南半球纬向环流管在南海及西太平洋地区大幅度向北推进,北半球纬向环流管迅速北移,东段已消失,高空反气旋中心大幅度西移,而低层中心则大幅度东撤。同时经向环流管迅速增强北移,负涡度区域在中南半岛及南海地区率先北进。北半球高低空反气旋北跳。于是,西南季风在南海地区首先爆发。6 月份,高原地区继续升温,而印度地区则开始降温, $70\text{ }^{\circ}\text{E}$ 附近南北温差减小。南半球纬向环流管在印度地区增强北上,北半球纬向环流管西段开始减弱,高空反气旋中心略有西移。经向环流管中心继续北移,强度迅速增强,负涡度区向印度地区发展。高空反气旋中心继续大幅度北移。于是,印度季风爆发。

4 结 论

(1) 在赤道印度洋到阿拉伯海、孟加拉湾的上空有一个强大的纬向环流圈,该环流圈西部下沉,东部上升,并且在低纬形成一个南北长约 20 个纬距的经向环流管,该环流管常年维持在阿拉伯海的上空,但其位置和强度有很大的季节变化。位于环流管东面的偏东气流则从冬到夏逐渐减弱。

(2) 北半球 Hadley 环流构成一个东西向即纬向的环流管,此环流管由冬到夏逐渐减弱,并向西收缩。南半球 Hadley 环流则构成另一个纬向环流管,此环流管从 4 月份开始由南半球向北推进,5 月份 $100\text{ }^{\circ}\text{E}$ 以东的南海及西太平洋地区北进幅度较大,在南海及西太平洋地区形成大范围的偏南风, $90\text{ }^{\circ}\text{E}$ 以西的地区则在 6 月份继续北进,到达印度地区。

(3) 在南海季风爆发前,北半球反气旋中心自低层至高层向东倾斜,5 月份突然转成向西倾斜,也就是说高层中心大幅度西移,而低层中心则大幅度东撤,同时高低空反气旋大幅北移。高空反气旋的西移与北半球纬向环流管向西收缩有关,低层西太平洋副高的东撤则与南半球纬向环流管在南海附近大幅度北进有关,而反气旋的北跳则是因为环流管的整体北进。

(4) 在 5 月份,经向环流管的上升气流和南半球纬向环流管的上升气流同时到达南海地区,在南海形成较强的对流性降水,经向环流管低层的偏西风和纬向环流管低层的偏南风共同组成西南风,造成了 5 月份西南季风在南海地区首先爆发。

(5) 由于青藏高原地形及各经度海陆分布的影响,造成太阳辐射加热不均,是南海季风和印度季风爆发时间有差异的直接原因。高原东侧春夏的增温最迅速,因此亚洲夏季风最早在南海地区爆发。

参考文献:

- [1] 何金海, 罗京佳. 南海季风爆发和亚洲夏季风推进特征及其形成机制的探讨[C]. 见: 何金海主编. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996. 74 ~ 81
- [2] 陶诗言, 何诗秀. 1979 年季风试验期间东亚地区夏季风爆发时期的观测研究[J]. 大气科学, 1983, 7(4): 347 ~ 355
- [3] Zhang Yaocun, Qian Yongfu. Characteristics of 10-day mean surface sensible heat flux variations in the SCS monsoon region and possible connections with the SCS summer monsoon onset[J]. A M S, 1999, 13(1): 11 ~ 20
- [4] Wang Shiyu, Qian Yongfu. Diagnostic study of apparent heat sources and moisture sinks in the South China Sea and its adjacent areas during the onset of 1998 SCS monsoon[J]. A A S, 2000, 17(2): 285 ~ 298
- [5] Shao Hui, Qian Yongfu. Main features of regional circulation variation during onset of the South China Sea monsoon in 1998[J]. A A S, 2000, 17(2): 322 ~ 338

Tropical Circulation Evolution and the Onset of the South China Sea Monsoon

JIANG Jing, QIAN Yong-fu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: By using the NCEP/NCAR reanalysis data averaged over 40 years from 1958 to 1997, the climatic characteristics of the tropical circulation in the two Hemispheres are analyzed. The relations between the onset of the South China Sea (SCS) monsoon and the large-scale circulation are discussed. It is indicated that the updrafts of the Arabian Sea meridional cell tube and the south zonal cell tube arrive in the SCS at the same time in May, which brings strong convective precipitation. Meanwhile, the westerly of the meridional cell tube and the southerly of the south zonal cell tube combine together to form the southwesterly at the low levels, resulting in the onset of the SCS monsoon. The influences of the Tibetan Plateau and the land-sea distribution at different longitudes cause the heating differences of solar radiation, which is the direct cause of the summer monsoon onset, as well as, the cause of the earlier onset in the SCS than in the Indian region.

Keywords: South China Sea monsoon, monsoon onset, tropical circulation, cell tubes