

亚洲夏季风的爆发及推进特征

吕俊梅 张庆云 陶诗言 琚建华

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 云南大学大气科学系, 昆明 650091; 中国气象局培训中心, 北京 100081; 中国科学院研究生院, 北京 100049. E-mail: lujunmei@ynu.edu.cn)

摘要 根据美国 NOAA 向外长波辐射逐日资料以及 CMAP 降水和 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用功率谱和带通滤波等方法, 探讨在气候平均状况下亚洲季风区各子系统的季节内演变特征; 研究中南半岛南部、孟加拉湾东岸、南海以及印度次大陆各地区夏季风的爆发、推进过程, 给出在亚洲夏季风爆发、推进过程中 OLR、降水及风场突变的物理图像. 指出亚洲夏季风平均于 5 月第 2 候首先在中南半岛南端及其毗邻的安达曼海爆发.

关键词 亚洲夏季风 季节内变化 爆发 推进

亚洲季风由冬到夏的季节转换以环流的突变为特征, 尽管已经有很多关于亚洲夏季风季节内变化的研究, 然而对于亚洲夏季风爆发和推进过程中的一些问题尚未完全搞清楚. Tao 和 Chen^[1]指出, 亚洲夏季风最早在南海爆发, 平均于 5 月中旬爆发, 然后分阶段向西北和北方逐渐推进. 随着观测资料和再分析资料的增加, 人们对于亚洲夏季风的季节内演变过程有了新的认识. 何金海和朱乾根等人^[2]发现 5 月份苏门答腊的 TBB 低中心向西北移动到中南半岛, 表明中南半岛和孟加拉湾地区的夏季风对流已充分建立. 有人提出 5 月上旬孟加拉湾东岸夏季风首先爆发, 然后东传到南海地区, 引起南海季风爆发^[3-6]. 近几年来人们也注意到, 夏季风最早的爆发通常于 5 月初在中南半岛西部的南端开始^[7-10]. 丁一汇和李崇银等人^[11]综合各种研究结果指出, 亚洲夏季风的首先爆发可能发生在中南半岛邻近的广大区域. 但是, 对亚洲夏季风最早爆发的地点人们尚未取得较为一致的看法.

人们对于南海夏季风爆发的过程同样有着不同的观点, Chang 等人^[12]认为 5 月初到 5 月中旬, 当有强冷锋侵入南海时, 副热带高压东撤, 南海盛行西风, 标志着南海季风开始. Yan^[13]认为季风先在南海北部出现, 以后南海中部和南部开始盛行西风. 李崇银和屈昕^[14]认为南海季风在南海的北部和南部同时爆发. 过去由于南海地区观测资料较少, 这些结论需要进一步的证实. 1998 年南海季风外场试验为深入研究南海季风爆发过程提供了大量的资料, 利用这些资料研究发现, 孟加拉湾季风气旋的对流凝结潜热释放以及中南半岛上空对流的强弱对副热带高压带在

孟加拉湾上空断裂, 以致最终撤出南海有着重要的影响作用^[15,16,6]. 丁一汇和李崇银等人^[11]在对南海季风试验进行总结时, 将南海季风爆发过程描述为: 热带西南季风从热带东印度洋东扩, 孟加拉湾和中南半岛的雨季来临及中纬度影响, 西南季风进一步东扩至南海区域, 副高主体显著减弱并东撤, 随着对流云、降水、低空西南风和高空东北风在南海区域内的突然发展, 南海夏季风最终爆发.

在确定亚洲夏季风的最早爆发时间时, 气象学家还注意到, 4 月底到 5 月初南海北部以及中南半岛的内陆地区雨季就已经开始, 因此也有人将其视为亚洲夏季风爆发的标志, 但是 Matsumoto^[17]把这种降水称为“季风前期降水(Pre-monsoon rain)”. 很多研究表明, 出现比较早的华南前汛期降水不能视为是南海夏季风降水. 金祖辉和陶诗言^[18]指出, 4 月下旬到 5 月初南海北部地区往往会出现西南风和对流性降水, 这是由于北方冷空气南下或者副高变化引起的, 是锋面降水带, 不能视作南海季风爆发. 李崇银和屈昕^[14]的研究也指出, 不能简单地将华南前汛期锋面降水视为南海夏季风降水, 西南气流和降水虽然是夏季风的重要标志, 但必须同跨赤道气流相联系. 尽管在南海夏季风爆发前中国华南沿海已有西南气流, 但这支西南气流是由印巴地区强的西北气流在孟加拉湾转向形成的, 不能以此认为南海夏季风已先在那儿爆发; 只有当南海夏季风爆发后, 南海北部及华南的西南气流才是由跨赤道气流汇合而成的.

亚洲夏季风系统包括多个子系统, Wang 和 Lin^[19], Tanaka^[19]等人研究表明, 南亚夏季风(印度夏季风)、东亚夏季风以及西北太平洋夏季风的季节内变化具

有明显的差异. 以往有关亚洲夏季风季节内变化的研究多数是针对某个季风子系统进行, 对亚洲夏季风各子系统成员爆发和推进的演变特征及时空配置进行全面分析的研究并不多. 本文结合新的资料, 在综合前人的研究工作基础上, 重点分析气候平均态下亚洲夏季风各子系统季节内推进特征, 给出在季风爆发和推进过程中 OLR、降水及风场突变的物理图像, 并对亚洲夏季风最早爆发地点和时间提出新看法.

1 资料

本文选用的资料包括: () 美国 NOAA 的逐日向长波辐射资料(OLR); () 美国气候预测中心(CPC) 的侯平均 CMAP 降水资料^[20]; () NCEP/NCAR 的侯平均再分析资料^[21]. 所有资料的水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度网格. NCEP/NCAR 再分析资料和降水是 1979~1999 年的侯平均资料, 对它们做多年平均(1979~1999 年), 可以得到 73 侯的多年气候平均值. OLR 资料是 1979~1995 年的多年气候平均逐日资料, 对其进行 5 d 平均处理即得到逐侯资料.

2 亚洲夏季风季节内的阶段性变化

亚洲夏季风爆发时间的确定, 多数研究通常选用能反映季风变化特征的参数, 如降水、OLR、TBB、温度、散度、涡度以及风等作为指标. 由于亚洲夏季风降水以对流降水为主, OLR 不仅能够很好的表示低纬度对流活动的强弱, 还可以代表季风降水的强度. 因此本文在研究亚洲夏季风季节内变化过程时, 用 OLR 资料来表征季风强度的变化.

季风的季节内变化主要包括 MJO (Madden Julian Oscillation)^[22] 和其他大气低频变化. Lin 和 Wang^[23] 将亚洲夏季风的季节内变化分解为 7.5~60 d 内的快过程, 以及大于 60 d 的慢过程, 根据快过程循环得到亚洲夏季风季节内变化的主要关键阶段. 事实上 Lin 和 Wang 所定义的快过程与季风的低频振荡是类似的, 但是他们将 60 d 以上的信息过滤掉, 这些信息中也包括了季节内振荡时间尺度上的部分信息.

由于亚洲夏季风环流由不同时间尺度过程组成, 直接用多年气候平均(1979~1995 年) 的逐侯 OLR 资料来确定季风季节内变化的关键阶段不是很容易. 因此需要对 OLR 资料做带通滤波处理, 滤掉非季节内变化时间尺度的信息, 使季风季节内变化的特征更明显的体现出来. 本文运用离散功率谱^[24] 和带通滤

波^[25] 方法, 确定季风季节内变化的几个关键阶段.

为了更客观地确定带通滤波的波段范围, 在对多年气候平均的逐日 OLR 资料进行带通滤波之前, 我们首先在亚洲季风区 ($10^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$) 每一个网格点上, 将多年气候平均(1979~1995 年) 的逐日 OLR 资料做离散功率谱分析, 发现最显著的周期为 365 d, 这是一个年循环周期, 在此周期下整个亚洲季风区 OLR 的离散功率谱都超过 0.05 的信度检验. 因为资料样本长度为 365 d, 这显然是一个虚假周期. 当 $T=182, 122, 91$ 和 73 d 时, 在亚洲季风区的大部分关键地区, 例如, 印度季风区、南海季风区、东亚副热带季风区和西北太平洋季风区, OLR 的离散功率谱通过显著性检验. 在其他的一些周期上, 离散功率谱的分布也有类似特征(图略). 如果求出整个亚洲季风区所有网格点上 OLR 的离散功率谱的平均值, 再来做显著性检验, 发现仅仅 1~4 波(365~91 d) 超过 0.05 的信度检验(图 1). 我们以离散功率谱的 F 值大于 1.0 为标准, 选定 2~12 波(30~182 d) 为 OLR 变化的主要周期, 也就是说在亚洲季风区 OLR 的主要变化周期为 30~182 d.

根据功率谱分析的结果对 OLR 进行带通滤波分析, 由于 182 d 周期与气候变化的半年周期是一致的, 所以我们将此周期也舍去, 将带通滤波的波段取为 30~122 d. 这个时间跨度远大于人们所公认的低频振荡的 30~60 d 周期, 但仍然属于季节内变化时间尺度. 对亚洲季风区每个网格点上多年平均的逐日 OLR 资料进行 30~122 d 滤波, 滤波后的逐日 OLR 资料再求 5 d 平均, 得到 30~122 d 滤波的侯平均 OLR 资料.

图 2 为 30~122 d 滤波后的 OLR 逐侯演变, 主要给出亚洲夏季风期间 4 月第 5 侯至 9 月第 2 侯的情况. 在 4 月的第 5、第 6 侯, 亚洲季风区没有夏季风开始的迹象. 5 月第 1 侯, 苏门答腊北部地区开始有较小范围的对流活跃区出现, 随后对流加强并向西北方向扩展. 5 月 2 侯, 在中南半岛南端、马来西亚及其毗邻的安达曼海域出现一片强对流区(见图 2, May P2). 何金海和朱乾根等人^[2] 认为 5 月份中南半岛夏季风对流的充分建立是由于苏门答腊附近的 TBB 低值区向西北移动, 这与本文的分析结果一致. 在安达曼群岛印度气象局有 6 个观测站^[26], 根据资料发现在群岛南部 (10°N 以南) 5 月 5 日夏季风已开始, 在群岛北部 ($12^{\circ} \sim 14^{\circ}\text{N}$) 5 月 8 日夏季风开始出现, 这时候位于安达曼海以北的孟加拉湾仍然是对流不活跃区域. 有

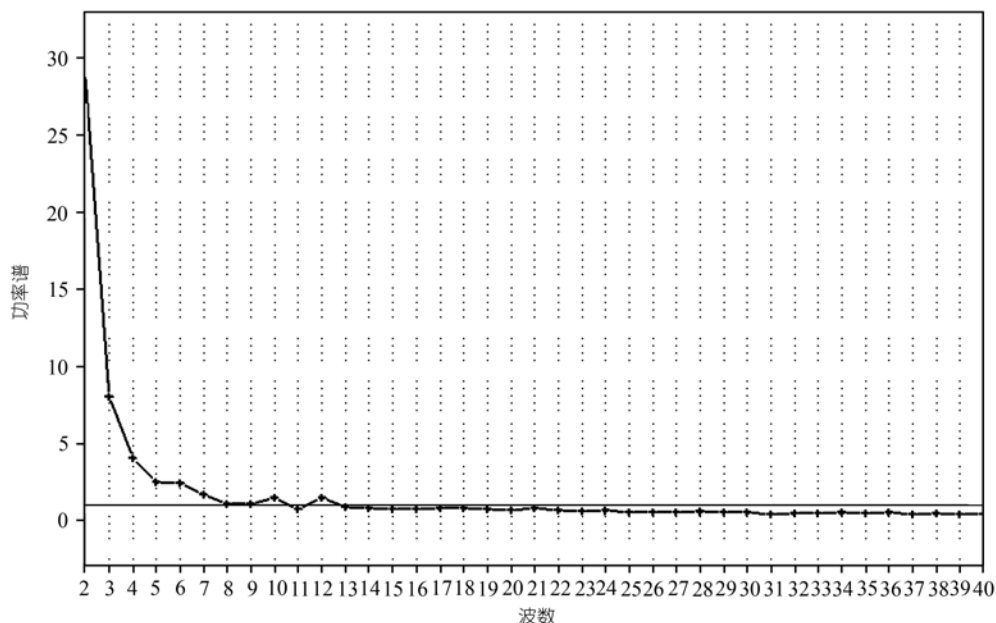


图1 气候平均 OLR 离散功率谱在亚洲季风区(10°S~40°N, 40°~150°E)平均值的显著性检验结果
横坐标表示波数(2~40 个波), 纵坐标为功率谱的 F 值, 水平的实线表示 $F=1.0$

关亚洲夏季风爆发最早的地域, 目前有争论. 根据本文(见图 2, May P2)的分析, 可以看到最早爆发区域出现在中南半岛南端及其毗邻的安达曼海域, 开始时间为 5 月第 2 候. 对此本文将在第 4 节做进一步的讨论.

图 2 中的 OLR 逐候时间变化表明: 5 月中旬南海季风爆发, 这时强对流带从阿拉伯海以南的印度洋向东经过安达曼海一直伸到南海至西太平洋地区, 强对流带中心分别位于西印度洋、安达曼海和菲律宾北部. 随着这条强对流带向北推进, 对流强度加强, 华南和台湾进入前汛期暴雨期. 6 月第 1 候强对流带进入阿拉伯海和孟加拉湾及印度半岛南端, 这时印度半岛的夏季风开始. 6 月第 3 候对流活跃带伸到 20°N 以北的印度次大陆、中国长江流域以及日本以南的洋面, 这时印度次大陆的季风槽和 ITCZ 活跃, 长江流域梅雨期开始. 这正是叶笃正和陶诗言等人^[27]所指出在 6 月大气环流的一次突变现象时期. Lin 和 Wang^[23]称这次过程为亚洲夏季风的大爆发. 这个时期也是热带西北太平洋夏季风开始活跃的阶段. 从 6 月第 3 候以后, OLR 的对流活动抑制区(虚线)的扩充表明, 西太平洋副热带高压系统迅速发展并逐渐西伸. 7 月第 2 候到第 3 候副热带高压脊线伸入长江中游, 强对流带推进到黄河流域, 长江中下游梅雨结束, 日本和韩国处于梅雨的全盛期. 7 月下旬以后,

随着日本梅雨期结束, 西太平洋副高(日本气象人员称作小笠原高压)伸展到日本, 日本进入酷热季节. 这时在热带西太平洋季风(WNPM)^[28]的核心区(130°~150°E, 10°~20°N)ITCZ 突然向北推进到 20°N, 热带西北太平洋上对流活动活跃区也随之北上, 西北太平洋上的台风活动也进入最频繁的时期. Ueda 和 Yasunari^[29]也发现, 在 7 月下旬西太平洋上出现一次大范围对流活动突然向北推进到(20°N, 150°E)附近, 并且在这个地区出现强的季风槽. 在 8 月第 3、第 4 候是热带西北太平洋夏季风达到最活跃时期. 8 月第 5、第 6 候中国北方地区夏季风开始撤退, 但在印度季风区和热带西北太平洋季风区对流活动仍很活跃. 印度夏季风在 8 月底、9 月初开始撤退, 而热带西北太平洋夏季风要到 10 月初才撤退.

综上所述, 气候平均状况下亚洲夏季风季节内演变过程的 8 个关键阶段代表了亚洲夏季风系统季节内变化的主要特征: () 5 月第 1 候为亚洲夏季风爆发前; () 5 月第 2 候夏季风在中南半岛南端爆发; () 5 月第 4 候南海季风爆发; () 6 月第 1 候印度夏季风爆发; () 6 月第 3 候长江流域梅雨期开始; () 7 月第 3 候江淮流域梅雨结束; () 7 月第 6 候日本的梅雨结束, 华北雨季开始; () 8 月第 4 候热带西太平洋季风槽(ITCZ)加深并北移至 20°N 以北.

从亚洲夏季风季节内推进过程(图 2 中阴影区强

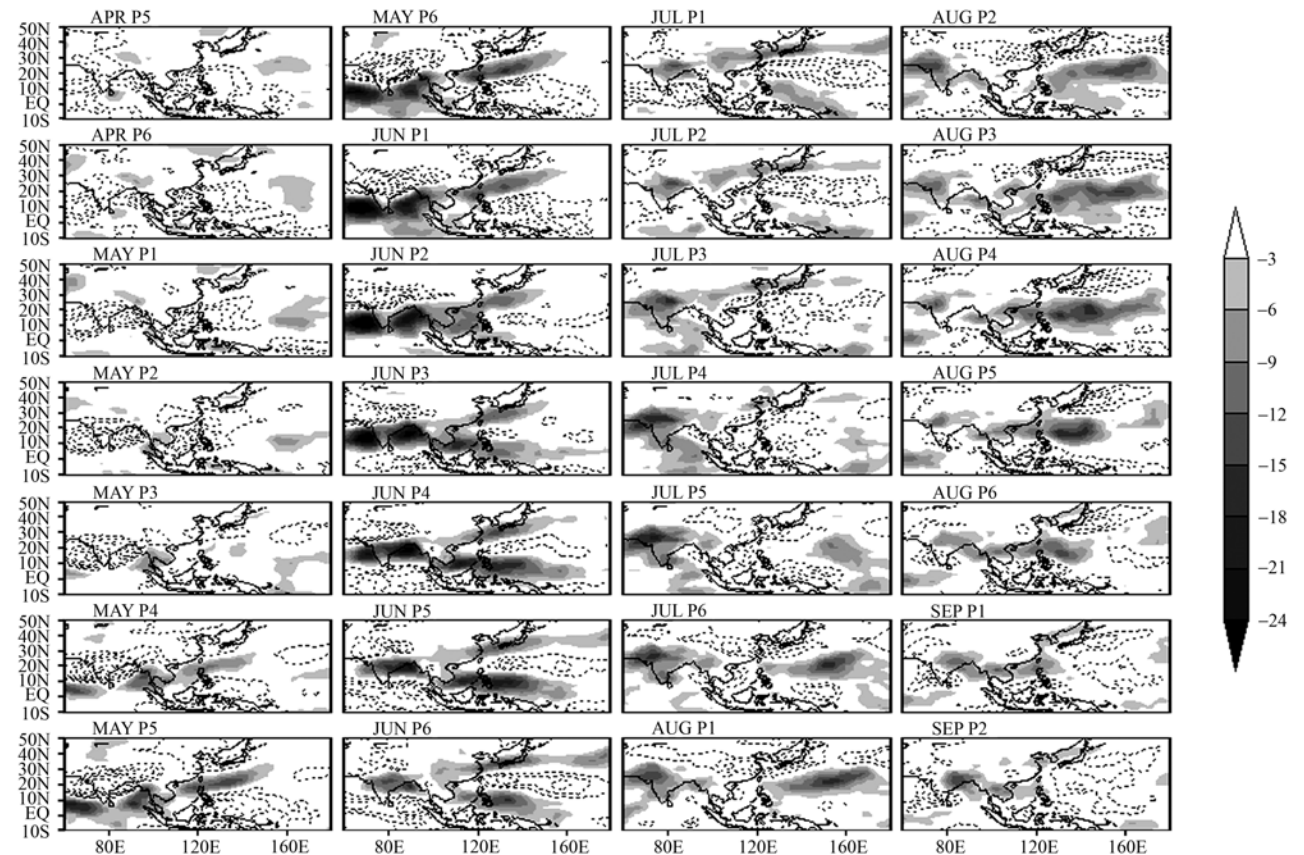


图 2 亚洲季风区 30~122 d 滤波的 OLR 逐候演变图, 4 月第 5 候至 9 月第 2 候
图中阴影区为 OLR 的值小于 -3W/m^2 的区域, 表示对流活跃区, 虚线代表 OLR 的值大于 3W/m^2 ,
也即对流不活跃区, 等值线的间隔为 3W/m^2

对流的时空演变)可以看出, 亚洲季风区强对流首先在中南半岛南端出现, 这可能是亚洲夏季风最早爆发的地点, 随后孟加拉湾夏季风、南海夏季风和印度夏季风先后依次爆发。

3 亚洲夏季风的爆发与推进

迄今为止, 有关亚洲夏季风最早爆发的地点有不同的看法。一种观点认为 5 月中旬亚洲夏季风最早在南海开始建立^[1,12], 另外的一种观点认为 5 月上旬孟加拉湾东岸夏季风首先爆发, 然后南海季风爆发^[3~6]。近几年来人们也注意到, 夏季风最早的爆发通常于 5 月初在中南半岛西部的南端开始^[7~10]。上节亚洲夏季风季节内变化分析也表明, 5 月第 2 候亚洲夏季风首先在中南半岛南端及其毗邻的安达曼海爆发, 这与近几年来人们注意到的夏季风爆发的地点比较一致。丁一汇和李崇银等人^[11]综合各种研究结果指出, 亚洲夏季风的首先爆发可能发生在中南半岛邻近的广大区域。然而对这个问题目前还没有工

作做详细的讨论。

本节将用 OLR、降水和 850 hPa 纬向风资料, 对亚洲季风区夏季风爆发与推进的过程进行分析。图 3 给出的是亚洲夏季风爆发的几个关键区域: 南中国

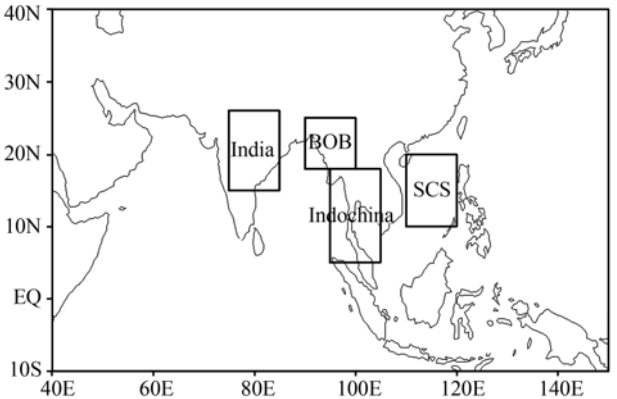


图 3 亚洲夏季风爆发的关键区
India 表示印度次大陆, BOB 表示孟加拉湾东部, Indochina 表示中南半岛南端及其毗邻的安达曼海域, SCS 表示南中国海

海(SCS)、孟加拉湾东部(BOB)、中南半岛南端(Indochina)和印度次大陆(India)。

将多年气候平均的逐候 OLR 资料分别在图 3 所示的 4 个关键区求平均,即得到区域平均 OLR 的时间演变序列(图 4),OLR 的强度变化可以反映夏季风的爆发和推进过程。图 4 中横坐标表示时间,单位为候,纵坐标表示区域平均 OLR 值的大小,单位为 W/m^2 。图中 4 条曲线都表现为两边高中间低的“漏斗”形。冬季到春季 OLR 的值较高,随着季节的转换,夏季来临时,OLR 的值逐渐减小,一直达到最小值。盛夏的 6 月下旬至 8 月上旬,4 条曲线持续稳定在极小值附近,表示夏季风期间,4 个关键区的对流活动较强。秋季以后,随着夏季风减弱撤退,OLR 的值逐渐上伸,4 个关键区的对流活动也随着减弱。

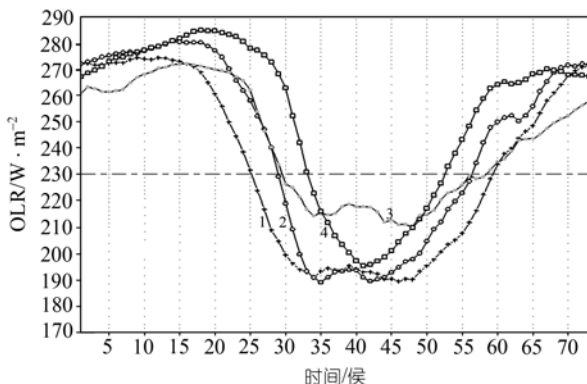


图 4 亚洲夏季风爆发关键区区域平均 OLR 的时间演变序列

横坐标表示候,水平的虚线表示 OLR 的值等于 230 W/m^2 , 1 表示中南半岛南端, 2 表示孟加拉湾东部, 3 表示南中国海, 4 表示印度次大陆

定义 OLR 小于 230 W/m^2 (如图中水平虚线所示) 为夏季风爆发的临界值,发现 4 条曲线与水平虚线相交的时间有显著的不同,这说明各个区域季风爆发时间有先后。从图可见,5 月第 2 候亚洲夏季风首先在中南半岛南端爆发,5 月第 5 候孟加拉湾夏季风爆发,5 月第 6 候南海夏季风爆发,6 月第 3 候印度季风爆发。此外还发现,各个区域夏季风结束撤退的时间与开始的顺序相反,印度夏季风首先撤退,然后是南海夏季风和孟加拉湾夏季风,中南半岛南端的夏季风最后撤离。这表明夏季风爆发最早、撤退最晚,夏季风爆发最晚、撤退最早。这与夏季风爆发由南向北推进,结束由北向南撤退有关。

为了佐证上述 OLR 资料分析的结果,我们用降水和 850 hPa 纬向风的变化做进一步的分析,因为这

两个要素都能很好地反映季风的爆发和推进特征。将多年气候平均的逐候降水和 850 hPa 纬向风沿亚洲夏季风爆发各个关键区所在的经度求平均,得到各个区域降水和 850 hPa 纬向风的时间-纬度剖面图。图 5(a)~(d)分别是中南半岛、孟加拉湾、南海和印度次大陆 4 个区的降水和 850 hPa 纬向风的时间-纬度剖面图,图中阴影代表降水大于 6 mm/d ,等值线代表 850 hPa 纬向风,粗的实线为零风速线。

冬季到春季中南半岛南部及其毗邻的海域(图 5(a))主要盛行东风,5 月 1 候,零风速线的斜率突然变为 90° ,中南半岛南部及其邻近地区的东风突然转为西风,同时强降水也在整个地区突然出现,降水和风场的季节内突变配合得很好,这也表示亚洲夏季风在中南半岛南部地区爆发。在 $7^\circ \sim 16^\circ \text{N}$ 的纬度带内强降水和西风一直持续到 10 月份。10 月份以后,随着季节的转换,该地区的西风由北向南逐渐变为东风,夏季风逐渐撤退。

从 1 月开始一直到 10 月初,孟加拉湾地区(图 5(b))主要为偏西风控制,11 月份孟加拉湾有弱的东风出现,此后又变为西风。这是由于冬季和春季孟加拉湾地区有印缅槽存在,因此在夏季风爆发之前孟湾一直盛行西风,在夏季风爆发以后西风有明显的增强,此时的西风为来自于跨越赤道的西风气流。5 月第 3 候强的降水突然在整个地区出现,孟加拉湾夏季风爆发,9 月底 10 月初强降水消失,孟加拉湾夏季风结束。

南海地区(图 5(c))西风和强降水的突然出现比中南半岛南部地区更明显,5 月第 4 候南海地区的盛行风突然由东风转为西风,此时强降水也在整个南海同时出现。这表明在气候平均状况下,南海夏季风是在南海南部和北部同时爆发的。李崇银和屈昕^[14]也曾指出南海季风在南海的北部和南部同时爆发。9 月底以后夏季风逐渐撤退,南海地区变为东风控制。南海夏季风爆发之前,赤道至 4°N 有强降水存在,这与 ITCZ 的活动有关。此外,4 月末至 5 月初中国华南和南海北部地区也有间歇性的强降水出现,表明华南前汛期雨季开始期较早。但是大量的研究表明,华南前汛期降水不属于南海夏季风降水^[14,17,18],目前人们公认的南海夏季风建立的平均日期为 5 月中旬,这与我们的工作得到的结果是一致的。

在印度次大陆上(图 5(d)), 20°N 以南地区夏季盛行西风,其余季节为东风, 20°N 以北地区主要盛行西

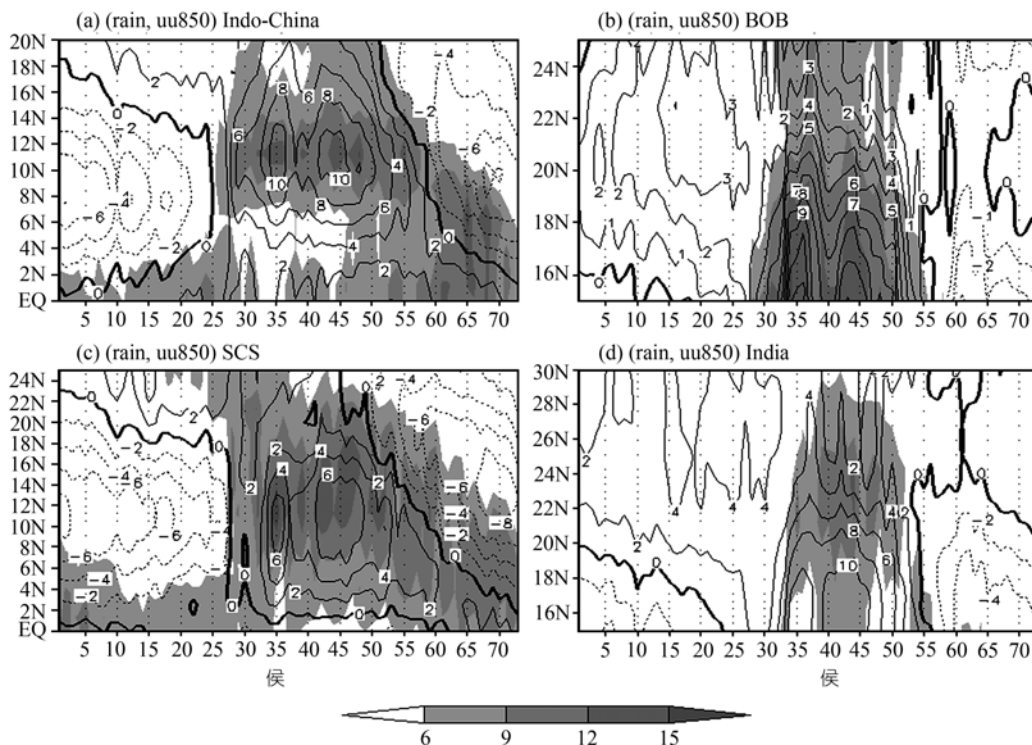


图 5 亚洲夏季风爆发各个关键区降水和 850 hPa 纬向风的时间-纬度剖面图

(a) 中南半岛; (b) 孟加拉湾; (c) 南海; (d) 印度次大陆. 图中阴影表示降水大于 6 mm/d, 等值线表示 850 hPa 纬向风(m/s), 粗的实线为零风速线

风. 这也与冬、春季印缅槽的活动有关. 6 月第 2 候强降雨开始在印度次大陆出现, 印度夏季风爆发. 在 20°N 以南地区, 由强降雨的出现和消失还可以看出印度夏季风活跃和中断的季节内变化特征, 9 月底印度夏季风减弱消退.

由降水和 850 hPa 纬向风的变化清楚地看出, 亚洲夏季风爆发顺序与用 OLR 资料分析得到的结果是一致的. 我们还用 Mann-Kendal 方法对图 4 中的 4 个时间序列分别做了突变点检验(图略), 结果表明 4 个关键区突变发生的先后顺序与亚洲夏季风爆发的先后顺序是一致的. 综合所有这些结果, 我们初步断定亚洲夏季风于 5 月第 2 候最先在中南半岛南端及其毗邻的安达曼海爆发.

4 结论和讨论

本文在综合性回顾前人研究结果的基础上, 结合新的资料研究了气候平均状况下亚洲夏季风的季节内演变过程. 4 月底, 亚洲季风区还没有夏季风开始的迹象. 5 月第 1 候, 苏门答腊北部地区开始有较小范围的对流活跃区出现. 对流活跃区向北扩张, 5 月 2 候中南半岛南部及其毗邻的安达曼海出现强对

流区, 亚洲夏季风开始爆发. 5 月 4 候南海季风爆发, 此时对流活跃带从阿拉伯海以南的印度洋向东经过安达曼海一直延伸到南海和西太平洋地区. 此后随着对流活跃带向北和向东、西方向扩展, 6 月 1 候印度夏季风爆发, 6 月 3 候长江流域梅雨期开始, 7 月 3 候江淮流域梅雨结束, 7 月 6 候日本的梅雨结束, 华北雨季开始, 8 月 4 候热带西太平洋季风槽(ITCZ)加深并北移至 20°N 以北.

我们还详细分析了中南半岛南端、孟加拉湾东岸、南海以及印度次大陆这几个地区中夏季风的爆发和推进特征, 给出不同地区夏季风爆发、推进过程中 OLR、降水和 850 hPa 纬向风突变的物理图像. 通过对上述各个地区季风的爆发时间和推进过程的比较, 我们认为亚洲夏季风可能于 5 月第 2 候首先在中南半岛南端及其毗邻的安达曼海域爆发, 然后是孟加拉湾季风、南海季风和印度季风依次开始.

根据 1998 年南海夏季风试验的研究结果, 人们初步认为南海季风爆发的源地是热带东印度洋和中南半岛. 从本文的工作来看(图 2), 5 月 2 候亚洲夏季风首先在中南半岛南部爆发, 5 月 3 候南海并没有强对流带, 但此时菲律宾东侧已经出现强对流. 5 月 4

候南海季风爆发,南海至西太平洋突然出现强对流带,并且这条强对流带的中心位于菲律宾北部,与中南半岛附近的强对流中心是完全分开的。因此,我们很难推断南海夏季风爆发的源地是中南半岛还是菲律宾以东的西太平洋。南海夏季风爆发的源地是一个值得深入研究的问题。另外有关南海季风是否在南部和北部同时爆发,也有待于进一步研究。

由于本研究得到的结果是用多年气候平均资料分析得到的,在年与年的年际变化中,季风爆发和推进的时间和过程可能会有不同。本文的研究为亚洲夏季风的爆发、推进过程提供一个气候背景。有关亚洲夏季风爆发、推进过程的年际变化作者将在另文研究。

致谢 对评审专家所提的宝贵意见以及曹杰教授与作者有益的讨论和建议,特此致谢。本文得到中国科学院知识创新重要方向性项目“中高纬气候和两半球气候相互作用研究”(批准号:KZCX3-SW-221)、国家自然科学基金重点项目(批准号:40233033)和国家自然科学基金项目(批准号:40365001)资助。

参 考 文 献

- 1 Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the east Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60~92
- 2 何金海, 朱乾根, Murakami M. 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
- 3 吴国雄, 张永生. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I: 爆发地点. 大气科学, 1998, 22(6): 825~838
- 4 冯瑞权, 王安宇, 吴池胜, 等. 2001: 南海夏季风建立的气候特征——40 年平均. 热带气象学报, 17(4): 345~354
- 5 蒋尚城. 卫星观测揭示的热带大气环流的新事实. 见: 东亚季风和中国的暴雨. 北京: 气象出版社, 1998. 427~435
- 6 梁建茵, 吴尚森. 1998 年南海西南季风活动的初步分析. 热带气象学报, 2000, 16(1): 28~37
- 7 Lau K M, Yang S. Climatology and interannual variability of the southeast Asia summer monsoon. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2): 141~162
- 8 Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction. J Geophys Res, 1998, 103: 14451~14510[DOI]
- 9 Wang B, Lin H. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. J Climate, 2002, 15: 386~398[DOI]
- 10 Qian W, Yang S. Onset of the regional monsoon over Southeast Asia. Meteor Atmos Phys, 2000, 75: 29~38[DOI]
- 11 丁一汇, 李崇银, 何金海, 等. 南海季风试验与东亚夏季风. 气象学报, 2004, 62(5): 561~585
- 12 Chang C P, Chen T C. Tropical circulations associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. Mon Wea Rev, 1995, 123: 3254~3267[DOI]
- 13 Yan J. Observational study on the onset of the South China Sea southwest Monsoon. Adv Atmos Sci, 1997, 14: 277~287
- 14 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): 1~14
- 15 温敏, 何金海, 肖子牛. 中南半岛对流对南海夏季风建立过程的影响. 大气科学, 2004, 28(6): 864~875
- 16 刘屹岷, 陈仲良, 毛江玉, 等. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I: 个例分析. 气象学报, 2003, 61(1): 1~9
- 17 Matsumoto J. Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2): 231~245
- 18 金祖辉, 陶诗言. 南海夏季风建立、活跃和中断期的特征. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 267~278
- 19 Tanaka M. Intraseasonal oscillation and the onset and retreat dates of the summer monsoon over east, southeast Asia and the western Pacific region using GMS high cloud amount data. J Meteor Soc Japan, 1992, 70(1): 613~629
- 20 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[DOI]
- 21 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Am Meteor Soc, 1996, 77: 437~471[DOI]
- 22 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
- 23 Lin H, Wang B. The time-space structure of the Asian-Pacific summer monsoon: a fast annual cycle view. J Climate, 2002, 15(15): 2001~2019
- 24 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 1999. 225~233
- 25 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1991. 15~16
- 26 Mooley D A, Shukla J. Variability and forecasting of the summer monsoon rainfall over India. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 26~59
- 27 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在 6 月和 10 月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29: 249~263
- 28 Murakami T, Matsumoto J. Summer monsoon over the Asian continent and western north Pacific. J Meteor Soc Japan, 1994, 72(5): 719~745
- 29 Ueda H, Yasunari T. Abrupt seasonal change of large-scale convective activity over the Western Pacific in the northern summer. J Meteor Soc Japan, 1995, 73(4): 795~809

(2005-06-27 收稿, 2005-08-18 接受)