

# 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系

黄荣辉<sup>1</sup> 顾 雷<sup>1</sup> 徐予红<sup>1</sup> 张启龙<sup>2</sup> 吴尚森<sup>3</sup> 曹 杰<sup>4</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

2 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

4 云南大学大气科学系, 昆明 650091

**摘 要** 利用我国测站的降水资料、卫星测得的 OLR 和高云量资料、SST 和 137°E 次表层海温资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了东亚夏季风的爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系。分析结果表明: 当春季热带西太平洋处于暖状态, 菲律宾周围对流活动强, 在这种情况下, 南海上空对流层下层有气旋性距平环流, 西太平洋副热带高压偏东, 从而使得南海夏季风爆发早; 并且, 当夏季热带西太平洋也处于暖状态, 菲律宾周围对流活动也很强, 在这种情况下, 西太平洋副热带高压北进时, 在 6 月中旬和 7 月初存在明显的突跳, 从而使得东亚季风雨带在 6 月中旬明显由华南北跳到江淮流域, 并于 7 月初由江淮流域北跳到黄河流域、华北和东北地区。这将引起江淮流域和长江中、下游夏季风降水偏少, 并往往发生干旱, 而黄河流域、华北和东北地区的夏季降水正常或偏多。相反, 当春季热带西太平洋处于冷状态, 菲律宾周围对流活动弱, 在这种情况下, 南海上空对流层下层有反气旋性距平环流, 西太平洋副热带高压偏西, 从而使得南海夏季风爆发晚; 并且, 当夏季热带西太平洋也处于冷状态, 菲律宾周围对流活动也很弱, 在这种情况下, 西太平洋副热带高压北进时, 在 6 月中旬或 7 月初向北突跳并不明显, 而是以渐进式向北移动, 从而使得东亚季风雨带一直维持在长江流域和淮河流域。这将引起此两流域夏季风降水偏多, 并往往发生洪涝, 而黄河流域、华北和东北地区的夏季降水偏少, 发生干旱。作者还从非线性多平衡态动力理论说明了菲律宾周围对流活动强弱对西太平洋副热带高压北进时以突跳或渐进式向北移动起到重要作用。

**关键词** 夏季风 年际变化 热带西太平洋 对流活动

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0020-17

中图分类号 P461

文献标识码 A

## Characteristics of the Interannual Variations of Onset and Advance of the East Asian Summer Monsoon and Their Associations with Thermal States of the Tropical Western Pacific

HUANG Rong-Hui<sup>1</sup>, GU Lei<sup>1</sup>, XU Yu-Hong<sup>1</sup>, ZHANG Qi-Long<sup>2</sup>,  
WU Shang-Sen<sup>3</sup>, and CAO Jie<sup>4</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

2 *Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*

3 *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080*

4 *Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091*

**Abstract** Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific are analyzed by using the precipitation data at observational stations of China, data of OLR and high cloud amount observed by satellite, data set of SST and ST in subsurface of the

收稿日期 2004-11-01

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40231005 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 中国气象学会副理事长, 主要从事行星波动力学、大气环流和气候动力学的研究工作。E-mail: hrh@lasg.iap.ac.cn

western Pacific along 137°E and the NCEP/NCAR reanalysis data. The results show that when the tropical western Pacific is in a warming state in spring, convective activities are intensified around the Philippines. In this case, there is a cyclonic anomaly circulation in the lower troposphere over the South China Sea, and the western Pacific subtropical high shifts eastward, thus, the early onset of the South China Sea summer monsoon (SCSM) can be caused. Moreover, when the tropical western Pacific is also in a warming state, convective activities around the Philippines are also strong in summer, since the western Pacific subtropical high abruptly shifts northward in mid-June and early July during its northward advance in this case, the abrupt northward-shift of the East Asian summer monsoon rainband from South China to the Yangtze River and the Huaihe River valleys is obvious in mid-June and this monsoon rainband again jumps northward from the Yangtze River and the Huaihe River valleys to the Yellow River valley, North China and Northeast China in early July. This can cause that summer monsoon rainfall is below normal and drought may occur in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and the middle and lower reaches of the Yangtze River, but summer rainfall is normal or above normal in the Yellow River valley, North China and Northeast China. On the other hand, when the tropical western Pacific is in a cooling state in spring, convective activities are weakened around the Philippines. In this case, there is an anticyclonic anomaly circulation in the lower troposphere over the South China Sea, and the western Pacific subtropical high shifts westward, thus, the late onset of the SCSM can be caused. Moreover, when the tropical western Pacific is also in a cooling state, convective activities around the Philippines are also weak in summer, since the abrupt northward-shift of the western Pacific subtropical high is not obvious in mid-June and early July and it gradually shifts northward during its northward advance in this case, the East Asian summer monsoon rainband can be maintained in the Yangtze River and the Huaihe River valleys. This can cause that the summer monsoon rainfall is above normal and flood may occur in these two valleys, but summer rainfall is below normal and drought may occur in the Yellow River valley, North China and Northeast China. It is also explained by using the dynamical theory of nonlinear multiple equilibrium that the strong or weak convective activities around the Philippines play an important role in the abrupt or gradual northward shift of the western Pacific subtropical high.

**Key words** summer monsoon, interannual variation, the tropical western Pacific subtropical high, convective activity

## 1 引言

今年 2 月 21 日是叶笃正院士的 90 华诞。叶笃正院士是世界著名的气象学家，也是中国现代大气科学主要奠基人之一。他在 Rossby 波的能量频散、大气运动的适应过程、东亚大气环流的演变特征与机理、青藏高原的动力、热力作用以及全球气候变化和可持续性发展等研究领域作出了系统而开创性贡献。

我国地处东亚季风区，东亚季风的变异严重影响着我国旱涝气候灾害的发生，从而给我国带来严重的经济损失，为此，中国气象学者很早就重视对东亚季风的研究。早在 60 年前，我国著名气象学家竺可桢<sup>[1]</sup>首先提出东亚夏季风对中国降水的影响，之后，涂长望和黄仕松<sup>[2]</sup>研究了东亚夏季风的进退对中国降水季节内变化的影响。为了改进中国的天气预报，提高其预报水平，叶笃正院士继竺可桢、涂长望和赵九章先生之后，对东亚大气环流的变化特征和机理作了系统而开创性的研究<sup>[3~11]</sup>。叶笃正等<sup>[12]</sup>早在 20 世纪 50 年代就指出东亚上空在 6 月中旬存在着行星尺度环流的突变，这个突变将带来东亚夏季风在长江流域

和淮河流域的爆发。在叶笃正发现东亚季风季节转换存在突变之后，在 20 世纪 80 年代，Krishnamurti 和 Ramanathan<sup>[13]</sup>以及 McBride<sup>[14]</sup>也发现印度夏季风和澳大利亚季风环流也同样存在着这种突变。叶笃正和他的合作者<sup>[10]</sup>在 20 世纪 60 年代初所撰写的《大气环流的若干基本问题》，系统地总结了他和合作者关于东亚和全球大气环流的研究成果，被国际气象学家公认为世界上最早的大气环流动力学的著作之一。此书不仅系统地讨论了北半球大气环流的特征、演变过程和基本原理，而且指出：大气环流的基本要素都不是独立的，它们是相互关联的，并形成一个内在的整体。这个概念不仅对于当时大气环流动力学的发展起到重要作用，而且对于当今气候系统动力学的研究也有重要的启迪。

作为叶笃正院士的学生，长期受到叶笃正院士亲自指导和启发，我和我的学生从 20 世纪 80 年代中后期起，对于东亚夏季风的季节内、年际和年代际变化作了一些研究<sup>[15~19]</sup>，其部分研究结果也已总结在叶笃正院士和我以及其他专家共同撰写的《长江黄河流域规律和成因研究》的专著<sup>[20]</sup>中。近几年来，我们

在东亚季风爆发和进退的年际变化作了进一步的研究,表明东亚夏季风的爆发和进退有很大的年际变化,并且从观测事实和动力理论分析了东亚夏季风爆发和进退与热带西太平洋热力状态的关系。因此,本文就作者最近关于东亚季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热力状态的关系方面的研究进展作一概述,并以此文来庆贺我的恩师叶笃正院士的90华诞。

## 2 南海夏季风爆发日期的年际变化及其对长江、淮河流域梅雨的影响

Tao 和 Chen<sup>[21]</sup>指出亚洲季风首先在南海地区爆发,一般平均在5月中旬,比印度季风要早一个月。在中国,往往把发生在南海地区的夏季风称为南海季风。南海季风的爆发标志着东亚季风的来临和中国华南前汛期即将开始,因而它具有重要的预报意义<sup>[22,23]</sup>。亚洲季风在南海爆发之后,它将经过二次阶段性北进和二次停滞,最后在7月中旬,夏季风可以到达华北和东北一带,并在这两地区停滞一段时间,于8月中旬又南撤。

如何衡量亚洲夏季风在南海地区的爆发?这是近年来许多学者所关注的问题,因此,不同研究者从不同角度出发,从而定义出不同的季风指数。正如 Wang 等<sup>[24]</sup>所回顾的,约有20种之多,有的指数从动力要素出发,有的从动力和热力要素相结合出发来定义亚洲季风的爆发。从不同角度出发来定义的季风指数,其所描述的南海夏季风爆发日期有很大不同。正如 Wang 等<sup>[24]</sup>所指出,利用南海区域候平均850 hPa的纬向风出现西风来定义季风爆发,这不仅简单,而且与南海区域降水有一定的相关性。但 Wang 等<sup>[24]</sup>所定义的南海季风爆发日期只能是候,因此,本文应用

梁建茵和吴尚森<sup>[25]</sup>所提出的南海季风爆发的定义:在(5°N~20°N, 110°E~120°E)区域平均的850 hPa面上连续出现西风的天数大于5天,并且,之后在此区域出现的西南风中断的天数不得超过前西南风持续时期的三倍。

图1是按照梁建茵和吴尚森<sup>[25]</sup>所定义的南海夏季风1950~1999年的爆发日期。从图1可以看到,南海夏季风的爆发日期有很显著的年际变化,它最早爆发于4月下旬,最晚爆发于6月初,平均为5月19日(即5月第4候)。考虑到从1978年起才能得到高云量的卫星观测资料,因此,本文重点分析20世纪80~90年代南海夏季风的爆发及其与热带西太平洋热力状态的关系。若把南海季风爆发日期早于5月19日2天以上的年份定义为南海季风早爆发年,这样,1979, 1981, 1984, 1985, 1986, 1994, 1996和1999年为南海季风早爆发年;而把爆发日期晚于5月19日2天以上的年份定义为南海季风晚爆发年,这样,1982, 1983, 1987, 1988, 1991, 1993和1998年为南海季风晚爆发年。

南海季风爆发的早晚不仅对位于中国的长江、淮河流域、日本和朝鲜半岛的东亚夏季风爆发的早晚和夏季风降水有很大影响,而且对印度夏季风爆发早晚和季风降水也有重要影响<sup>[26]</sup>。图2是1950~1999年中国夏季(6~8月)降水和南海夏季风爆发日期的相关系数分布图。从图2可以清楚地看到,一个超过95%显著性检验的正相关区位于江淮流域和长江下游,而一个弱的负相关位于东北南部、华北东部以及黄河的上游地区。这表明:若南海季风爆发是早的(即早于5月第4候),则江淮流域、长江上游地区的夏季风降水偏弱,如1981, 1984, 1985, 1994和1999年的春季南海夏季风爆发日期偏早,则这些年的夏

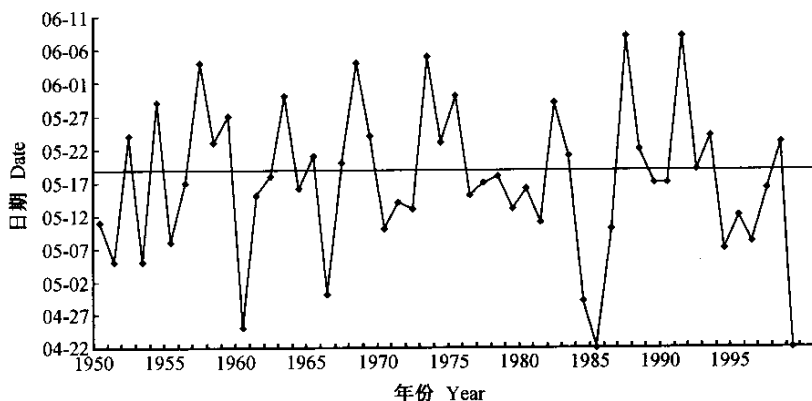


图1 1950~1999年南海夏季风爆发日期的年际变化(南海季风爆发日期引自文献[25])

Fig. 1 The onset dates of the South China Sea summer monsoon (SCSM) during 1950-1999. The onset dates of the SCSM are quoted from reference [25]

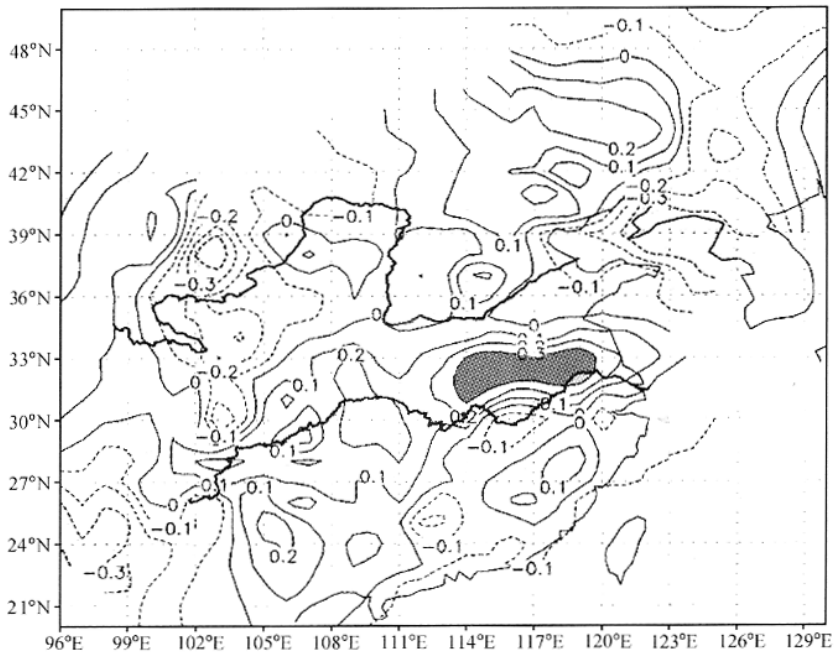


图 2 1950~1999 年中国夏季降水和南海夏季风爆发日期的相关系数分布图 (南海季风爆发日期引自文献 [ 25 ]) 实线：正相关，虚线：负相关；阴影区：超过 95% 显著性检验的正相关区域

Fig. 2 Distribution of the correlation coefficients between the onset dates of the South China Sea summer monsoon and the summer rainfall in China. The onset dates of the SCSM are quoted from reference [ 25 ]. The solid and dashed lines indicate positive and negative correlation, respectively, and the positive correlation areas over the 95% significance level are shaded

季，江淮流域的降水偏少，而东北南部、华北东部和黄河上游地区降水偏多；相反，若南海夏季风爆发是晚的（即晚于 5 月第 4 候），则江淮流域、长江上游地区的夏季风降水偏强，如 1982, 1983, 1987, 1991 和 1998 年，南海夏季风爆发偏晚，则这些年的夏季，江淮流域和长江流域上游地区夏季风降水偏多，并引起严重的洪涝灾害。这些事实表明：在南海夏季风爆发较早的年份，亚洲夏季风一般偏强，并可以推进到华北和东北一带；相反，在南海夏季风爆发较晚的年份，亚洲夏季风一般偏弱，东亚夏季风一般较迟爆发，并且往往不能推进到华北和东北地区，而在江淮流域停滞较长时间。这说明在南海夏季风爆发晚的夏季，由于北方得不到充足的水汽供应而南方又频繁受到夏季风扰动的影响，这就很容易使江淮流域夏季风降水偏多，并引起洪涝。然而，虽然有个别年份南海夏季风爆发偏早，但由于北方冷空气活动较强，东亚夏季风也较迟推进到北方，从而引起南涝北旱的异常降水分布，如 1999 年夏季，虽然南海夏季风爆发较早，但由于东亚夏季风在 8 月中旬才到达华北且停滞在此区域很短时间就迅速南撤了，使得从江淮流域到华北地区发生了严重干旱<sup>[27]</sup>。这些事实都表明南海季风爆发的早晚可以作为我国东部夏季降水的季节预

测的一个物理因子。

### 3 热带西太平洋的热力状态对南海夏季风爆发的影响

热带西太平洋是全球高温区域，故此海域又称西太平洋暖池（The warm pool）。许多研究已表明热带西太平洋海域的热状态对于热带和东亚地区气候的年际变化有很大影响<sup>[28, 29]</sup>。由于南海临近于热带西太平洋，热带西太平洋的热力变化直接影响着南海上空的大气环流和对流活动，因此，热带西太平洋的热力状态将严重影响着南海季风的爆发。为此，本节利用 NCEP/NCAR 再分析的 SST 资料和日本气象厅“凌风丸”海洋考察船所观测的 137°E 的次表层海温资料，分析热带西太平洋的热力状态对南海夏季风爆发的影响。图 3 是 NINO.west (0°~14°N, 130°E~150°E) 区域春季 (3~5 月) 平均的 SST 距平和南海夏季风爆发日期的年际变化曲线。比较图 3 中虚线所示的南海季风爆发日期与实线所示的 NINO.west 区域的春季 SST 距平的年际变化，可以发现这两者是反位相的。图 3 表明，一般当春季西太平洋暖池处于暖状态，南海夏季风爆发早，而当春季西太平洋暖池处于冷状态，则南海夏季风爆发日期就晚。

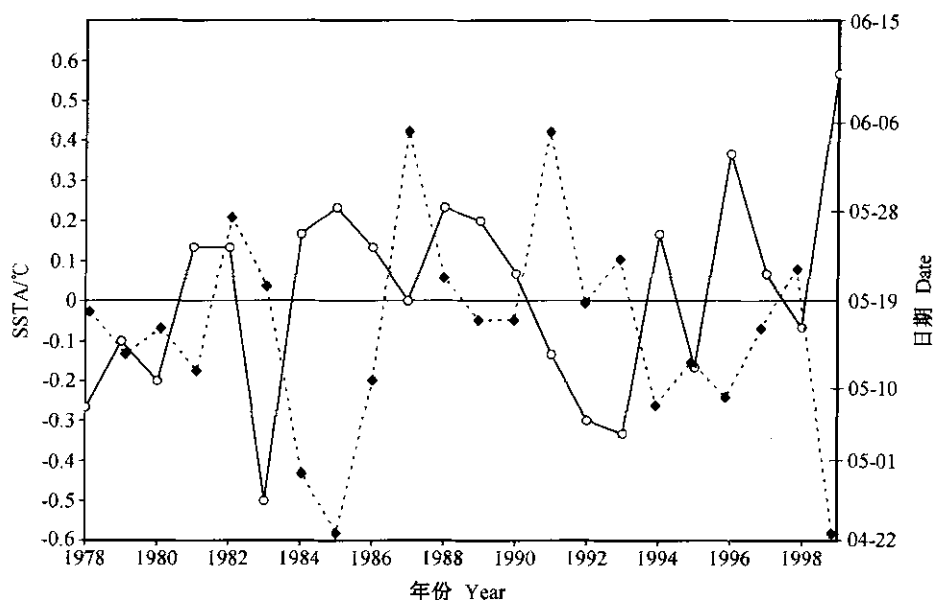


图3 1978~1999年 NINO.west ( $0^{\circ} \sim 14^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ ) 区域的春季平均 SST 距平 (实线) 和南海季风爆发日期 (虚线) 的 annual 变化曲线 (SST 距平资料来源于 NCEP/NCAR 再分析资料, 南海季风爆发日期引自文献 [25])

Fig. 3 The SST anomalies in NINO.west (i.e.,  $0^{\circ} \sim 14^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ ) (solid line) and the onset dates of the South China Sea summer monsoon (dashed line) during 1978–1999. The data of SST are derived from NCEP/NCAR reanalysis data, and the onset dates of the SCSM are quoted from reference [25]

为了更进一步说明西太平洋暖池春季的热力状态对南海夏季风爆发的影响, 本研究分别对南海季风早爆发与晚爆发年份的春季热带太平洋 SST 距平作合成分析。图 4a 和图 4b 分别是对 1978~1999 年南海季风早爆发年份 (1979, 1981, 1984, 1985, 1986, 1994, 1996 和 1999 年) 和晚爆发年份 (1982, 1983, 1987, 1988, 1991, 1993 和 1998 年) 春季热带太平洋 SST 距平的合成图。从图 4a 可以看到: 在南海季风爆发早的春季, 在热带西太平洋有正的 SST 距平, 而在热带中、东太平洋有负的 SST 距平, 这类似于 La Niña 事件发展阶段的 SST 距平分布; 相反, 在南海季风爆发晚的春季 (图 4b), 在热带西太平洋有负的 SST 距平, 而在热带中、东太平洋有正的 SST 距平, 这类似于 El Niño 事件发展阶段的 SST 距平分布。因此, 从热带太平洋春季的 SST 距平合成分布可以清楚地看到, 一般当春季热带西太平洋处于暖状态, 南海季风早爆发, 而当春季热带西太平洋处于冷状态, 则南海季风爆发就晚。

春季, 西太平洋暖池的热状态还可以进一步从次表层海温的状态来表述。与热带东太平洋海温垂直结构相比, 热带西太平洋的斜温层顶的深度是深的, 因此, 在此海域的热容量异常是与此海域次表层的海温异常密切相关<sup>[28]</sup>, 因此, 热带西太平洋春季次表层海温的热状态可能是南海夏季风爆发早晚的很好信

号。图 5 是 1967~1999 年期间南海夏季风爆发早和爆发晚年的 1 月份沿  $137^{\circ}\text{E}$  热带和副热带太平洋次表层海温距平的合成图。把图 5a 和图 5b 相比较, 可以明显看到, 在热带海域两者有很大差别。正如图 5a 所示, 对于那些南海夏季风早爆发的年份, 1 月份在  $2^{\circ}\text{N} \sim 15^{\circ}\text{N}$  区域沿  $137^{\circ}\text{E}$  的次表层的合成海温距平是正的, 最大合成距平值可达到  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 它位于  $5^{\circ}\text{N}$  附近赤道西太平洋的 150 m 深处; 相反, 对于那些南海夏季风晚爆发的年份 (图 5b), 1 月份在  $2^{\circ}\text{N} \sim 15^{\circ}\text{N}$  区域沿  $137^{\circ}\text{E}$  的次表层的合成海温距平是负的, 最大合成距平值可达到  $-1.0^{\circ}\text{C}$ , 它同样位于  $5^{\circ}\text{N}$  附近赤道西太平洋的 150 m 深处。

上述分析事实充分表明热带西太平洋的热状态对南海夏季风爆发有很大的影响。

#### 4 热带西太平洋对流活动对南海夏季风爆发的影响

为什么热带西太平洋热力状态对南海夏季风爆发会有如此大的影响, 这是值得进一步深入研究的问题。正如上节所述, 热带西太平洋是全球高海温的区域, 由于此海域很暖, 这里的海气相互作用非常强, 并且 Walker 环流的上升支也位于此海域上空<sup>[28]</sup>, 因此, 在此海域上空强的气流和水汽的辐合导致了强的对流活动和强降水。正如 Nitta<sup>[30]</sup> 所指出, 此海域上

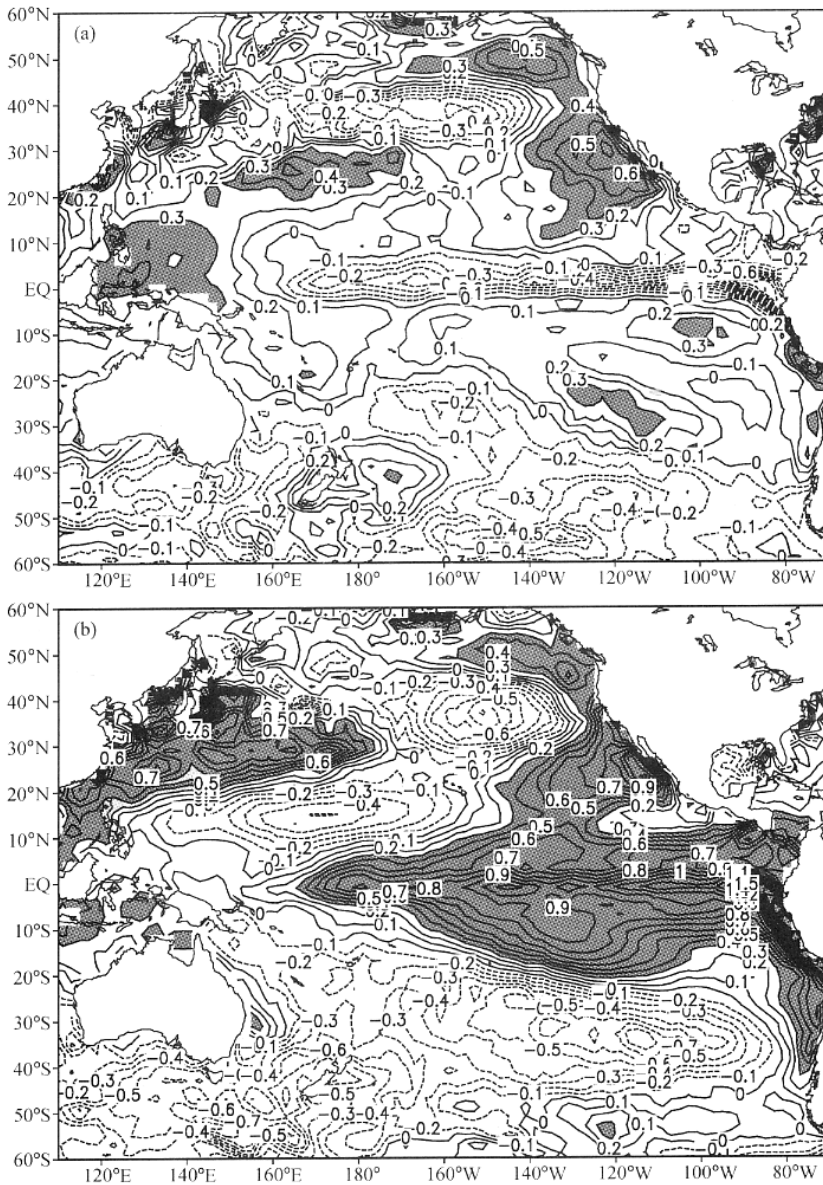


图 4 1978~1999 年期间南海季风爆发早 (a) 和爆发晚 (b) 年份的春季 (3~5 月) 热带太平洋 SST 距平的合成图 (单位 : $^{\circ}\text{C}$ , SST 资料来源于 NCEP/NCAR 再分析资料)。实线 : 正距平 ; 虚线 : 负距平 ; 阴影区 : SST 距平大于  $0.3^{\circ}\text{C}$  的正距平区

Fig. 4 The composite distributions of the SST in the tropical western Pacific in spring (March–May) for the cases of early onset (a) and the cases of late onset (b) of the SCSSM, respectively. Units :  $^{\circ}\text{C}$ . The data of SST is from NCEP/NCAR reanalysis data. The solid and dashed lines indicate the positive and negative anomalies, respectively, and the positive SST anomalies above  $0.3^{\circ}\text{C}$  are shaded

空的对流活动与此海域的海温密切相关, 当热带西太平洋 [ 特别是 ( $0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) 海域 ] 处于暖状态, 则菲律宾周围的对流活动就强; 相反, 当热带西太平洋处于冷状态, 则菲律宾周围的对流活动就弱。因此, 菲律宾周围的对流活动可以很好地表征热带西太平洋的海气相互作用状态。并且, 菲律宾周围的 TBB, OLR 或高云量变化方差要比 SST 变化的方差大得多, 所以可以用菲律宾周围的对流活动来讨论

热带西太平洋对南海季风爆发的影响过程会更清楚。为此, 本研究应用菲律宾周围 ( $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 的卫星测得的高云量 (HCA) 来分析热带海气相互作用对南海夏季季风爆发的影响。图 6 中实线与虚线分别表示春季菲律宾周围的高云量与南海季风爆发日期的年际变化, 它清楚地表明了这两者有很好的反相关, 它们的相关系数可以达到  $-0.76$ , 这超过了  $0.99$  的显著性检验。从这相关系数可以充分说明

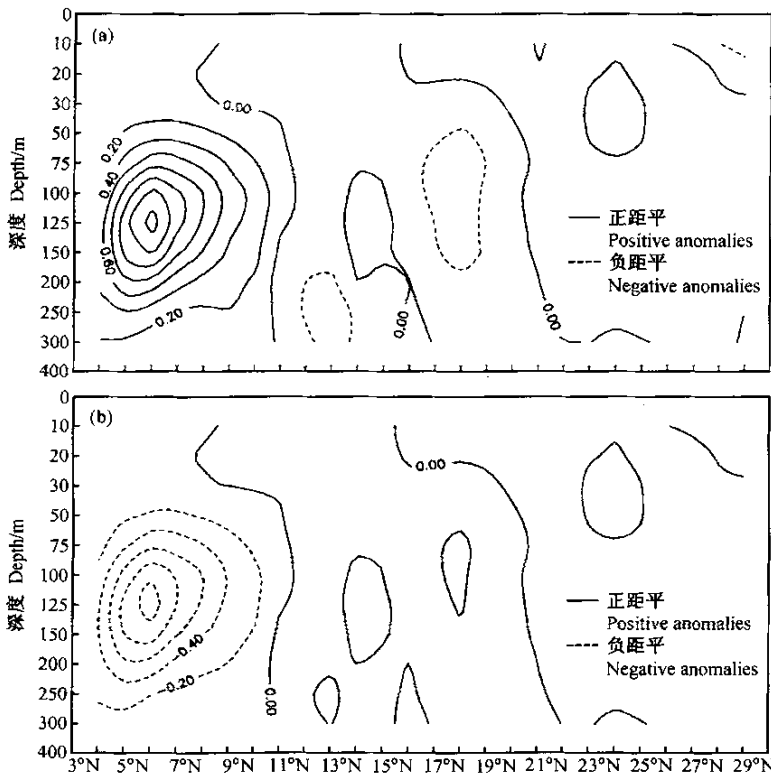


图 5 对 1967 ~ 1999 年期间南海夏季风爆发早 (a) 和爆发晚 (b) 年份的 1 月份沿 137°E 热带和副热带太平洋次表层海温距平 (单位 : °C) 合成的纬度—时间剖面图 [资料来源 : 日本气象厅“凌风丸”考察船沿 137°E 剖面的观测资料 (见 Monthly Report on Climate System, JMA)]

Fig. 5 The composite distributions of latitude - time cross section of the subsurface sea temperature anomalies in the tropical and subtropical Pacific along 137°E in January for the cases of early onset (a) and the cases of late onset (b) of the SCSSM, respectively. The subsurface sea temperature data are derived from the Oceanographic Research Vessel. RYOYU-MARU ' of JMA

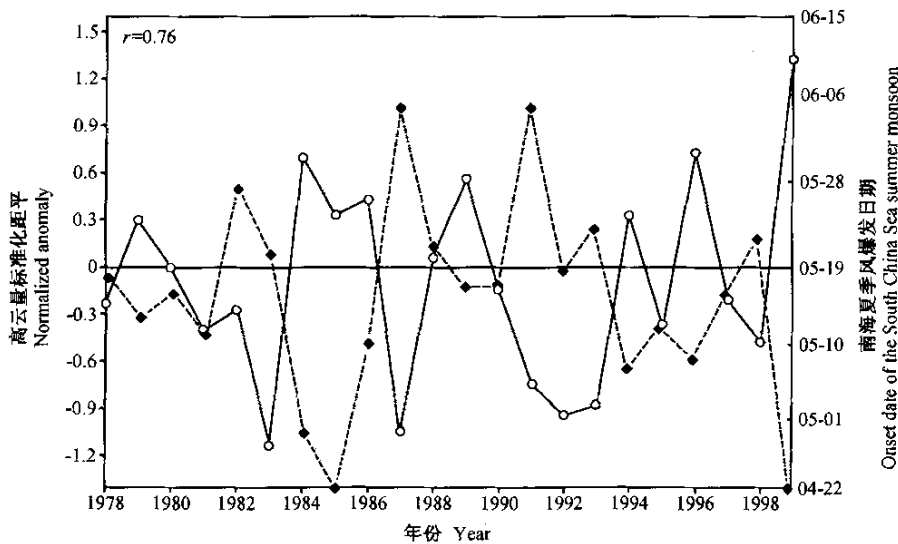


图 6 1978 ~ 1999 年春季 (3 ~ 5 月) 菲律宾周围 (10°N ~ 20°N, 110°E ~ 140°E) 平均高云量 (HCA) 的标准化距平 (实线) 与南海夏季风爆发日期 (虚线) 的年际变化曲线 [高云量资料来源于日本气象厅气候系统月报 (Monthly Report on Climate System, JAM)]

Fig. 6 The interannual variations of normalized anomaly of the high cloud amount (HCA) around the Philippines (i.e., 10°N - 20°N, 110°E - 140°E) in spring (solid line) and the onset dates of the South China Sea summer monsoon (dashed line) during 1978 - 1999. The data of the HCA are derived from Monthly Report on Climate System, JMA

菲律宾周围春季的对流活动强弱对南海夏季风的爆发有重要的影响。在菲律宾周围对流活动强的春季，南海夏季风爆发是早的；相反，在菲律宾周围对流活动弱的春季，南海夏季风爆发是晚的。

为了更清楚地表达热带西太平洋上空对流活动对南海季风爆发的影响，本研究分别对热带西太平洋海温处于暖状态和冷状态的 5~6 月份对流活动 (OLR) 和 700 hPa 气流距平作合成分析 (图 7)。由于 OLR 是往外长波辐射，在无云情况，OLR 值是地表面的往外的长波辐射，因此，在对流活动弱的区域，OLR 值将

偏高；反之，在云量多的区域，OLR 值是云顶的长波辐射值，因此，在对流活动强的区域，OLR 值偏低。从图 7a 可以看到，在热带西太平洋处于偏暖状态的 5~6 月份，从热带西太平洋经南海到中印半岛其 OLR 值偏低，这说明此区域对流活动是强的；并且，从 700 hPa 风场距平分布可以看到：在热带东印度洋与苏门答腊岛上空有西风距平气流，一个气旋性异常环流位于中印半岛、南海和华南上空的对流层低层，在南海中部和北部上空有强的西南风的距平气流，而反气旋性异常环流偏东。这些都表明：在热带西太平

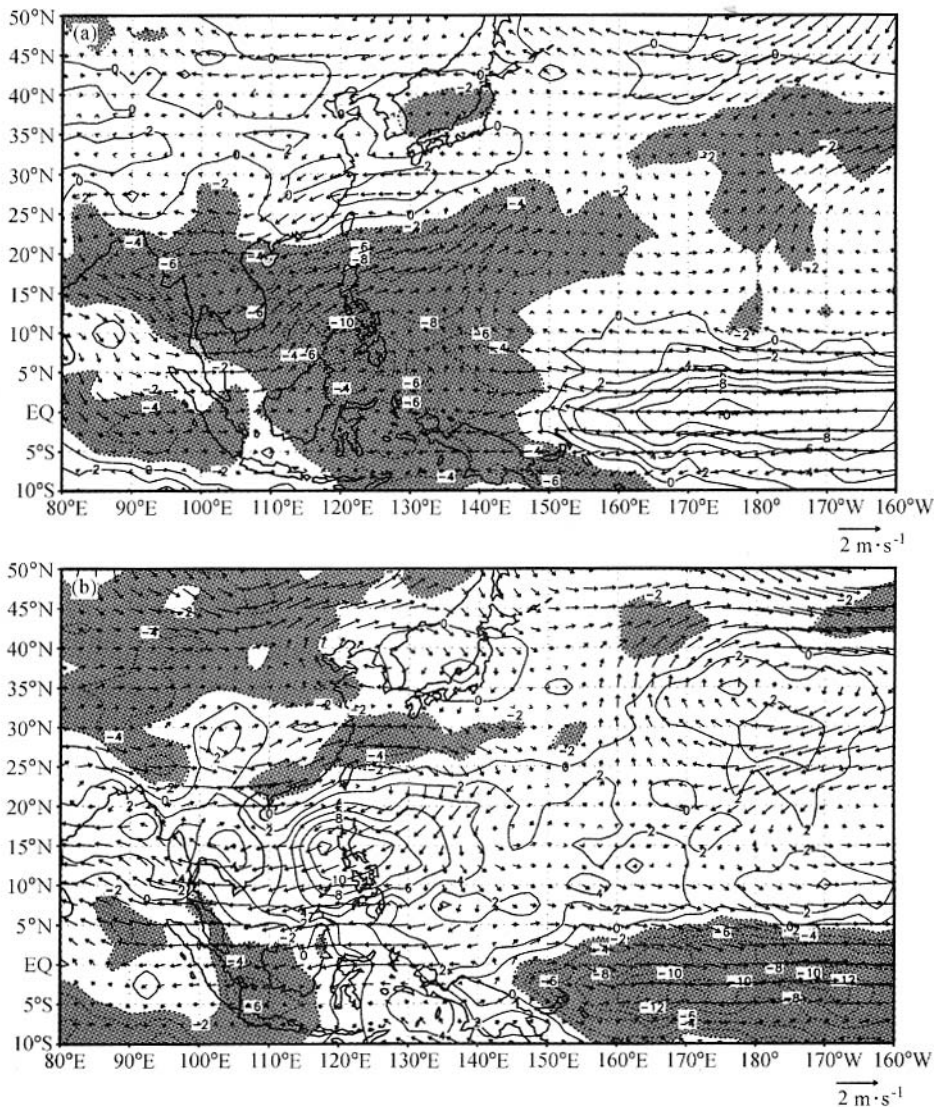


图 7 1978~1999 年期间热带西太平洋处于偏暖状态 (a) 和偏冷状态 (b) 的 5~6 月份热带西太平洋东亚和东亚上空 OLR 和 700 hPa 风场距平的合成分布 (OLR 取之于 NOAA 卫星资料集, 风场取于 NCEP/NCAR 再分析资料)。实线: 正 OLR 距平, 虚线: 负 OLR 距平 (单位:  $W \cdot m^{-2}$ ); 阴影: 低于  $-2 W \cdot m^{-2}$  的 OLR 距平值 (即强对流活动区)

Fig. 7 The composite distributions of OLR and wind anomaly field at 700 hPa averaged for the period from May to June for the warming states (a) and the cooling states (b) of the tropical western Pacific during 1978 - 1999. The OLR data are derived from NOAA, and the 700 hPa wind data are derived from NCEP/NCAR reanalysis data. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies, respectively. Units:  $W \cdot m^{-2}$ , the negative anomalies lower than  $-2 W \cdot m^{-2}$  (i.e., strong convection area) are shaded



洋处于偏暖状态, 由于菲律宾对流活动偏强, 强烈的上升运动引起了热带东印度洋、中印半岛上空西风气流很强, 出现强西风距平气流, 南海上空出现了气旋性环流, 而太平洋副热带高压偏东, 从而导致了南海夏季风早爆发。相反, 正如图 7b 所示, 在热带西太平洋处于偏冷状态的 5~6 月份, 从热带西太平洋经南海到中印半岛, 其 OLR 距平为正, 即 OLR 值偏高, 这说明此区域对流活动是弱的, 而强对流活动区域位于印度尼西亚以东的赤道中太平洋上空; 并且, 在热带东印度洋与印度尼西亚的苏门答腊岛上空有东风距平气流, 一个反气旋性异常环流位于中印半岛、南海和华南上空的对流层低层, 在南海中部和北部上空有强的东北风的距平气流。这些都表明: 在热带西太平洋处于偏冷状态, 由于菲律宾周围对流活动偏弱, 引起了热带东印度洋、中印半岛上空西风气流很弱, 并出现东风距平环流, 南海上空的反气旋环流很强, 从而导致了南海季风晚爆发。

## 5 东亚夏季风北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系

亚洲夏季风在南海爆发以后, 它将经过阶段性的北进与停滞, 在 7 月初或中旬到达华北与东北地区。正如图 8 所示, 一般在 5 月份和 6 月上旬, 由于西太平洋副热带高压偏南, 因此, 季风达到华南和江南地区, 这正是华南和南岭一带的前汛期; 到了 6 月上、中旬, 西太平洋副热带高压的脊线北移到  $20^{\circ}\text{N}$  附近, 季风雨带北跳到长江、淮河流域, 这时长江和淮河流域的梅雨、日本的“Baiu”和韩国的“Changma”就开始了; 雨带在这些地区停滞一段以后, 到了 7 月中旬, 由于西太平洋副热带高压脊线又北移到  $30^{\circ}\text{N}$ , 使得季风雨带又北跳到华北、东北一带, 这时我国北方雨季开始, 而江淮流域梅雨结束; 到了 8 月中旬左右, 此雨带又迅速南撤到长江流域。然而, 由于西太平洋副热带高压的演变有很大的年际变化, 因而, 东亚夏季风的进退也有很大的年际变化。若西太平洋副热带高压的脊线在 6 月上旬就北跳到  $20^{\circ}\text{N}$  附近, 到了 7 月中旬它还不北移, 这样, 季风雨带就长期维持在江淮流域, 因而引起此地区严重洪涝灾害的发生, 而黄河流域、华北地区季风降水很弱, 往往发生干旱; 相反, 若西太平洋副热带高压在 6 月中旬之后才北跳  $20^{\circ}\text{N}$  附近, 而在 7 月中旬之前, 它又迅速北跳, 这样, 季风雨带在江淮流域停滞的时间就很短, 因而, 此地区就会发生少梅或空梅, 夏季风降水偏少, 从而造成此地区的高温、少雨天气, 并且, 由于季风

较早到达黄河流域、华北和东北地区, 使得这些地区降水正常或偏多。

上面所述的我国东部夏季风降水的季节内变化, 正如叶笃正等<sup>[12]</sup>所指出的, 在 6 月中旬发生突变, 这对气候平均意义上而言是正确的。然而, 正如作者在以前的研究<sup>[15~19]</sup>中所指出, 夏季西太平洋副热带高压和东亚季风雨带的北进有很大的年际变化, 它依赖于热带西太平洋的热状态, 特别是依赖于菲律宾周围的对流活动的情况。由于以前研究所用的观测资料的时期较短 (1978~1990 年), 故本文应用较长时期观测资料 (1978~2000 年), 进一步深入分析东亚夏季风进退的年际变化特征。

为了讨论热带西太平洋热状态、特别是菲律宾周围对流活动强弱对东亚夏季风北进年际变化的影响, 有必要分析菲律宾周围对流活动的年际变化。图 9 是菲律宾周围 ( $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 春、夏、秋、冬各季平均的标准化高云量距平的年际变化。正如上面所述, 若某夏季高云量距平是正的, 则可表示该夏季菲律宾周围对流活动是强的; 反之, 则表示该夏季菲律宾周围对流活动是弱的。从图 9 可以看到, 1978, 1981, 1984, 1985, 1988, 1994 和 1999 年的夏季, 菲律宾周围的对流活动是强的, 而 1980, 1982, 1983, 1991, 1992, 1996 和 1998 年的夏季, 菲律宾周围的对流活动是弱的。

为了讨论东亚夏季风进退的年际变化特征对热带西太平洋热力状态, 特别是对菲律宾周围对流活动强弱的依赖, 下面分别分析在菲律宾周围对流活动强和对流活动弱的年份, 东亚 3~10 月份沿  $115^{\circ}\text{E}$  (即  $110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$  平均) 的 5 天降水量季节内变化的合成情况。

### 5.1 在菲律宾周围对流强的夏季

图 10 是对 1978~2000 年期间菲律宾周围对流强的年份, 东亚 3~10 月份沿  $115^{\circ}\text{E}$  (即  $110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$  平均) 的 5 天降水量合成的纬度—时间剖面图。从图 10 可以看到, 在 6 月中旬季风雨带从江南北跳到江淮流域, 并在 7 月初北跳到华北地区, 在 8 月中旬雨带就迅速南撤到江淮流域。在这种情况下, 江淮流域夏季降水偏少, 发生干旱灾害。为了更清楚地说明在菲律宾对流活动强时夏季风北进的季内变化特征, 本研究分别取 1985 年和 1994 年东亚 3~10 月份, 沿  $115^{\circ}\text{E}$  (即  $110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$  平均) 的 5 天降水量的季节内变化作为例子。如图 11a 和 b 所示, 在 5 月和 6 月初季风雨带位于华南和江南, 并在 6 月中旬北跳到江淮流域, 7 月初又北跳到华北和东北一带, 此雨带于 8 月

中旬南撤到江淮流域。在这两个夏季，由于季风很快北进到华北，江淮流域夏季降水偏少，比正常值偏低 30% ~ 50%，出现了高温干旱的气候灾害。

从上述分析可以看到，在热带西太平洋处于偏暖状态时，菲律宾周围对流活动偏强，从而使南海夏季风爆发就偏早，它将于 5 月 19 日之前爆发；随后，

在 5 月和 6 月初夏季风北进并停滞在华南一带，并于 6 月中旬很快地从华南、江南一带北进到江淮流域，使得江淮流域梅雨开始。然而，在这种情形下，季风在江淮流域停滞时间不长，于 7 月初季风又很快地从江淮流域北进到黄河流域、华北和东北地区，使北方雨季较早开始；随后，季风在华北和东北地区停滞一

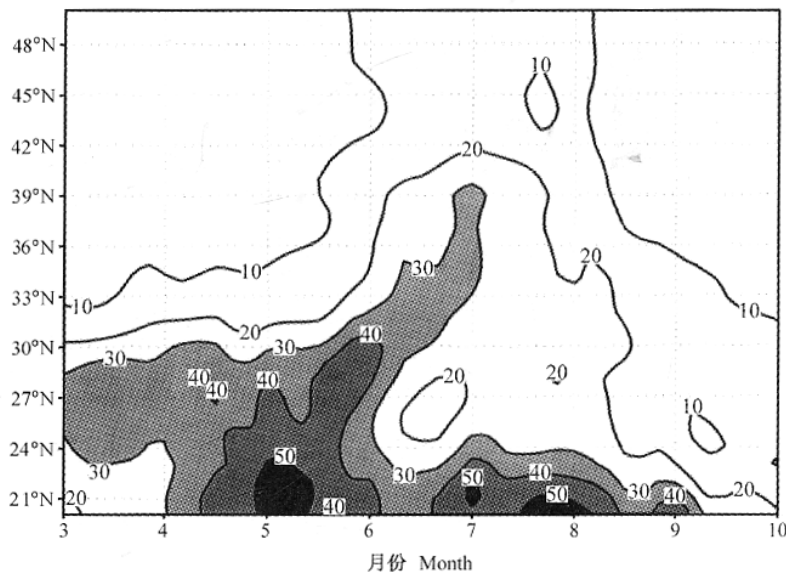


图 8 1961 ~ 1990 年东亚沿 115°E (即 110°E ~ 120°E 平均) 候降水量的 30 年气候平均值的纬度—时间剖面图 (单位: mm)。阴影: 候降水量大于 30 mm

Fig. 8 Latitude - time cross section of climatological mean of 5 days precipitation along 115°E (i.e., averaged between 110°E - 120°E) for 30 years from 1961 to 1990. Units: mm. The rainfalls above 30 mm are shaded

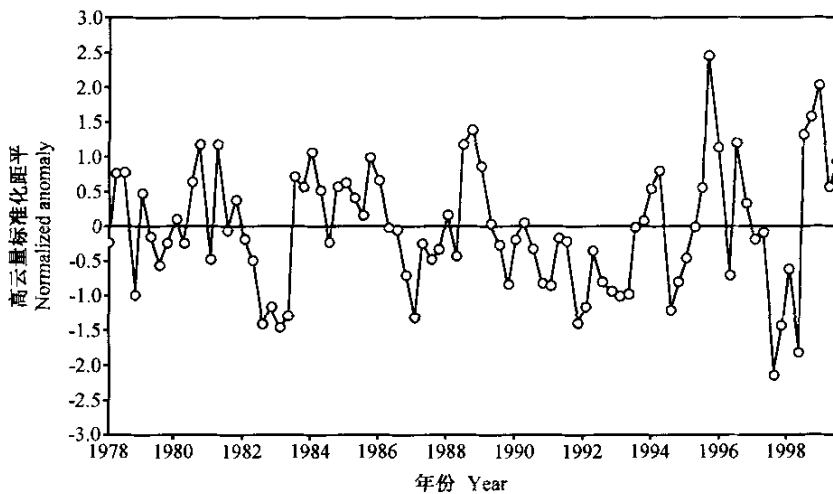


图 9 1978 ~ 2000 年菲律宾周围 (10°N ~ 20°N, 110°E ~ 140°E) 春、夏、秋、冬各季平均的标准化高云量距平的年际变化 [资料引自日本气象厅气候系统月报 (Monthly Report on Climate System, JMA)]

Fig. 9 The interannual variations of normalized anomaly of HCA in spring, summer, autumn and winter around the Philippines (i.e., 10°N - 20°N, 110°E - 140°E) from 1978 - 2000. The data of HCA are quoted from Monthly Report on Climate System of JMA

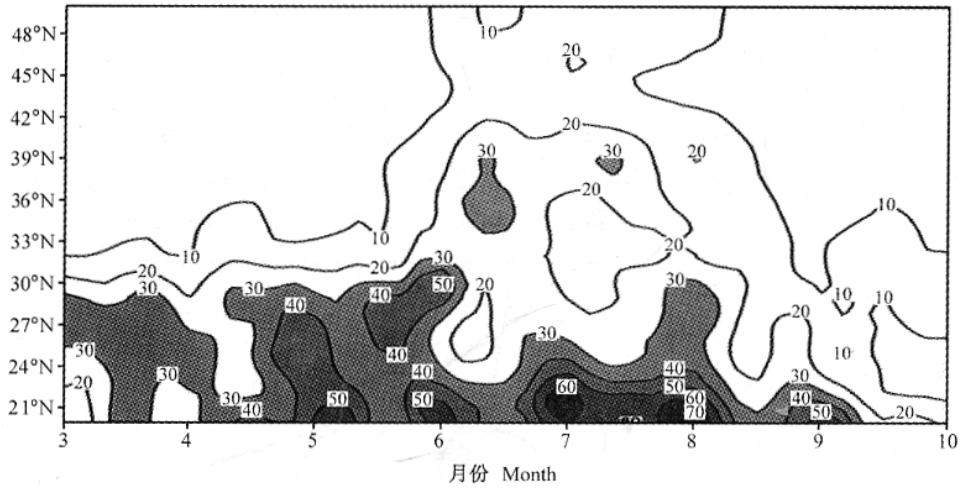


图 10 对 1978 ~ 2000 年期间菲律宾周围 (10° N ~ 20°N, 110°E ~ 140°E) 对流活动强的年份东亚 3 ~ 10 月份沿 115°E (即 110°E ~ 120°E 平均) 的 5 天降水量合成的纬度—时间剖面图 (单位: mm)。阴影: 降水量大于 30 mm

Fig. 10 The composite distribution of latitude - time cross section of 5 days rainfall along 115°E (i.e., averaged between 110°E - 120°E) for the cases of strong convective activities around the Philippines (i.e., 10°N - 20°N, 110°E - 140°E) from March to October. Units: mm. The rainfalls above 30 mm are shaded

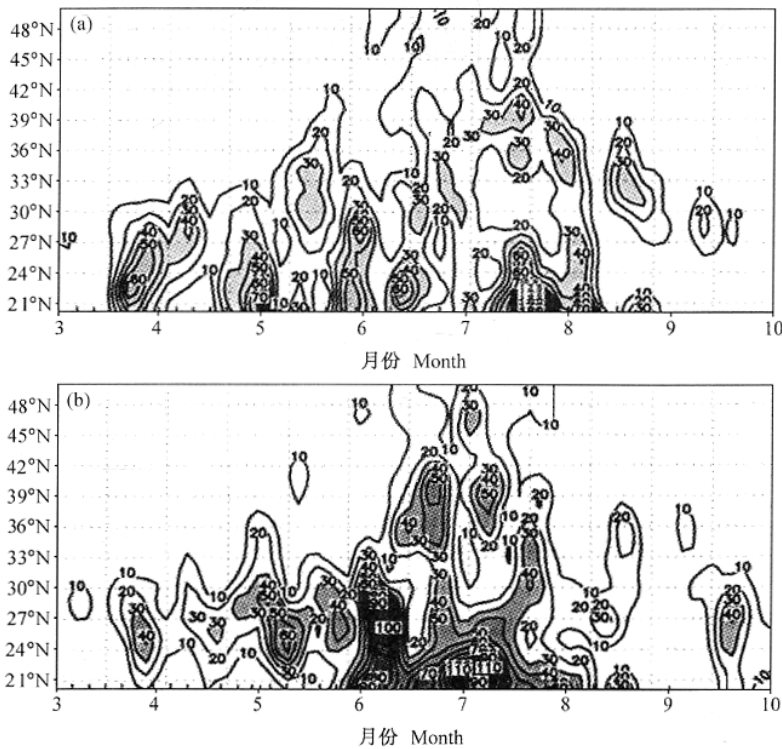


图 11 1985 年 (a) 和 1994 年 (b) 东亚 3 ~ 10 月份沿 115°E (即 110°E ~ 120°E 平均) 的 5 天降水量的纬度—时间剖面图 (单位: mm)。阴影: 降水量超过 30 mm

Fig. 11 Latitude - time cross section of 5 days rainfall along 115°E (i.e., averaged between 110°E - 120°E) from March to October in 1985 (a) and 1994 (b), respectively. Units: mm. The rainfalls over 30 mm are shaded

段时间, 于 8 月中旬迅速南撤到江淮流域。因此, 在这种情况下, 东亚夏季风经历了两次阶段性北进和三次停滞过程, 并于 8 月中旬迅速从华北地区南撤到江淮流域, 之后又南撤到华南地区。

### 5.2 在菲律宾对流活动弱的夏季

图 12 是对 1978 ~ 2000 年期间菲律宾周围对流活动弱的年份 (1980, 1982, 1983, 1987, 1991, 1992, 1993, 1996 和 1998 年) 东亚 3 ~ 10 月份沿 115°E (即

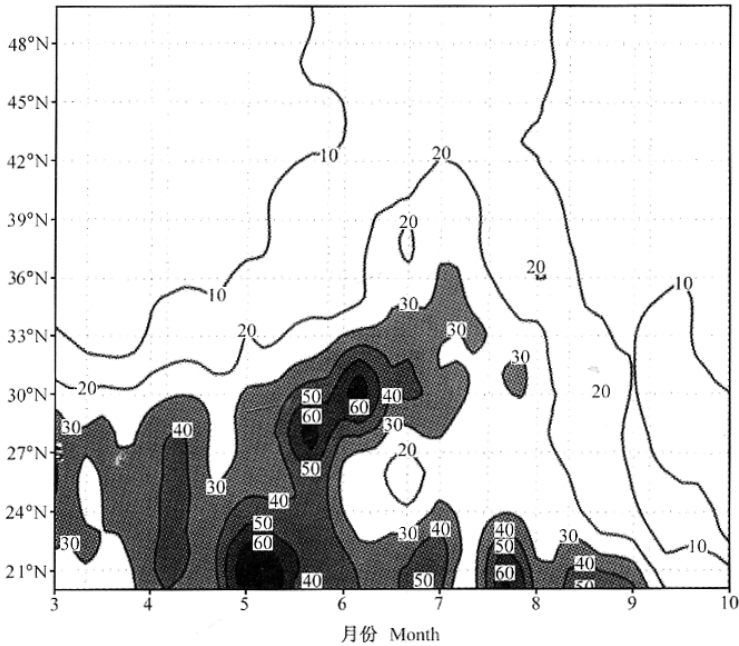


图 12 对 1978~2000 年期间菲律宾周围 (10°N~20°N, 110°E~140°E) 对流活动弱的年份东亚 3~10 月份沿 115°E (即 110°E~120°E 平均) 的 5 天降水量合成的纬度-时间剖面图 (单位: mm)。阴影: 降水量大于 30 mm

Fig. 12 The composite distributions of latitude-time cross section of 5 days rainfall along 115°E (i.e., averaged between 110°E-120°E) for the cases of weak convective activities around the Philippines (i.e., 10°N-20°N, 110°E-140°E) from March to October. Units: mm. The rainfalls above 30 mm are shaded

110°E~120°E 平均) 的 5 天降水量合成的纬度-时间剖面图。从图 12 可以看到, 东亚夏季风雨带并不经历二次北跳和三次停滞, 而是从 5 月到 6 月份一直维持在长江和淮河流域并逐渐北移, 到了 7 月初才北移到黄淮流域。由于雨带长时间维持在长江流域和江淮流域, 造成这两流域季风降水偏强, 从而致使此两流域发生严重洪涝, 并且, 由于在这种情况下, 季风到达华北偏晚并停滞很短时间, 在 8 月初就南撤到江淮流域, 故华北地区夏季降水偏弱, 从而导致华北地区发生干旱。为了更清楚地说明在菲律宾周围对流活动偏弱的年份季风北进的季内变化特征, 本研究分别取 1980 年和 1998 年东亚 3~10 月份沿 115°E (即 110°E~120°E 平均) 的 5 天降水量的季内变化作为例子。如图 13a 和 b 所示, 在 5~6 月份, 季风雨带位于长江流域, 之后渐渐北移到江淮流域, 并一直维持到 7 月中旬; 到了 7 月中旬, 弱的季风降水才在华北出现, 并于 8 月初季风雨带迅速南撤到江淮流域。在这两个夏季, 由于季风长期停滞在长江流域和江淮流域, 使得这两流域季风降水很强。1980 年夏季, 长江流域降水比正常值偏多了 30%~50%, 而 1998 年夏季, 长江流域降水比正常值偏多了 50%~100%,

造成了严重洪涝, 江淮流域降水比正常值也偏多了 30%。

从上述分析事实可以看到, 在热带西太平洋处于偏冷状态, 这引起了菲律宾周围对流活动偏弱, 从而使得南海夏季风爆发就偏晚, 它将于 5 月 19 日之后爆发, 随后季风渐渐北移到华南、长江流域和江淮流域一带。在这种情况下, 季风并不经历二次阶段性北进和三次停滞过程, 而是渐进式地北进, 并长时间维持在长江流域和江淮流域, 只是到了 7 月中旬, 弱的季风才北进到华北。因此, 在这种情形下, 在长江流域或江淮流域夏季风降水偏强, 并往往发生严重洪涝, 而华北地区降水偏少, 易发生干旱。

## 6 西太平洋副热带高压的进退及其与热带西太平洋热状态的关系

前面所述的分析事实清楚地表明, 热带西太平洋的热力状态对东亚夏季风及其雨带的进退有重要影响, 其机理是值得进一步深入研究的。黄荣辉和孙凤英<sup>[17~19]</sup>指出, 夏季西太平洋副热带高压的北进严重地影响着季风雨带的季节内变化, 并且它的北进特征是与热带西太平洋热力状态有关, 特别是与菲律宾对

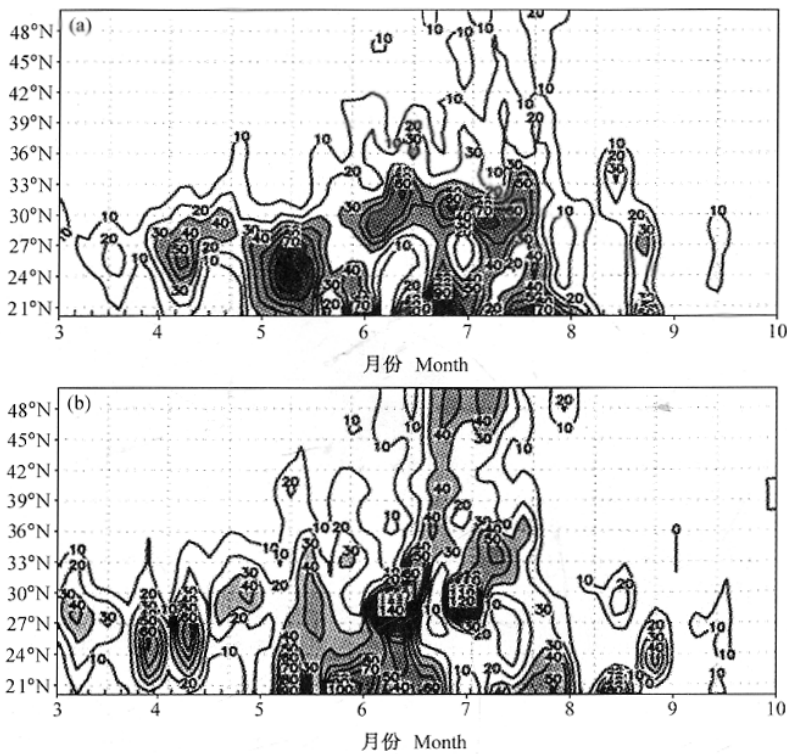


图 13 1980 年 (a) 和 1998 年 (b) 东亚 3~10 月份沿 115°E (即 110°E~120°E 平均) 的 5 天降水量的纬度—时间剖面图 (单位: mm)。阴影: 降水量大于 30 mm

Fig. 13 Latitude-time cross section of 5 days rainfall along 115°E (i.e., averaged between 110°E–120°E) from March to October in 1980 (a) and 1998 (b), respectively. Units: mm. The rainfalls over 30 mm are shaded

流活动有密切相关。Nitta<sup>[30]</sup>也指出菲律宾周围对流活动的年际变化严重影响着东亚夏季气候。由于以前研究所用的资料时间较短,有必要进一步利用更长时间的资料来分析夏季西太平洋副热带高压的季节内变化特征,因此,本研究分析了 1978~2000 年沿东亚 135°E 500hPa 高度的纬度—时间剖面图 (图 14)。

### 6.1 在菲律宾周围对流强的夏季

图 14a 是对菲律宾周围对流活动强的年份 (1978, 1981, 1984, 1985, 1988, 1994 和 1999 年) 东亚沿 135°E 500 hPa 高度合成的纬度—时间剖面图,从图中可以看到,在 6 月初,西太平洋副热带高压的脊线从 18°N 突跳到 25°N,这引起了季风雨带突然北跳到江淮流域,并且在 7 月初,它又从 25°N 北跳到 33°N,这引起了季风雨带北跳到黄河流域、华北和东北地区,并使江淮流域梅雨结束。此外,从图 14a 还可以看到,从 8 月中旬以后,西太平洋副热带高压又迅速南撤到长江以南,使得雨带又南撤到江淮流域。

### 6.2 在菲律宾周围对流弱的夏季

图 14b 是对菲律宾周围对流活动弱的年份 (1980, 1982, 1983, 1987, 1991, 1992, 1993, 1996 和 1998 年) 东亚沿 135°E 500 hPa 高度合成的纬度—

时间剖面图,如图所示,西太平洋副热带高压无论在 6 月中旬或 7 月上旬,其突然北跳并不明显。在 5 月份西太平洋副热带高压脊线一直停滞在 15°N 附近,于 6 月初渐渐北移到 20°N 附近,并一直维持到 7 月中旬,在这种情形下,西太平洋副热带高压的脊线于 7 月下旬南撤,于 8 月初才南撤到华南,这使得季风雨带长时间维持在长江流域和淮河流域。

从以上分析可以看到,在菲律宾周围对流活动弱的夏季,西太平洋副热带高压的季内变化特征与在菲律宾周围对流活动强的夏季的变化特征不同。这表明,夏季西太平洋副热带高压的北进特征是与菲律宾对流活动紧密相关。当菲律宾对流活动强,则西太平洋副热带高压在向北移动时,于 6 月上旬和 7 月中旬突跳就明显。这不仅使东亚季风雨带在长江、淮河流域停滞时间短,造成长江流域和淮河流域季风降水偏少,而且使季风较早到达华北、东北一带,并较晚从华北南撤到江淮流域,引起华北、东北地区降水正常或偏多;相反,当菲律宾活动弱,则西太平洋副热带高压在北进时,在 6 月中旬和 7 月上旬突跳并不明显,而是以渐进式向北移动。这不仅使东亚季风雨带长时间停滞在长江流域和江淮流域,造成此两流域季

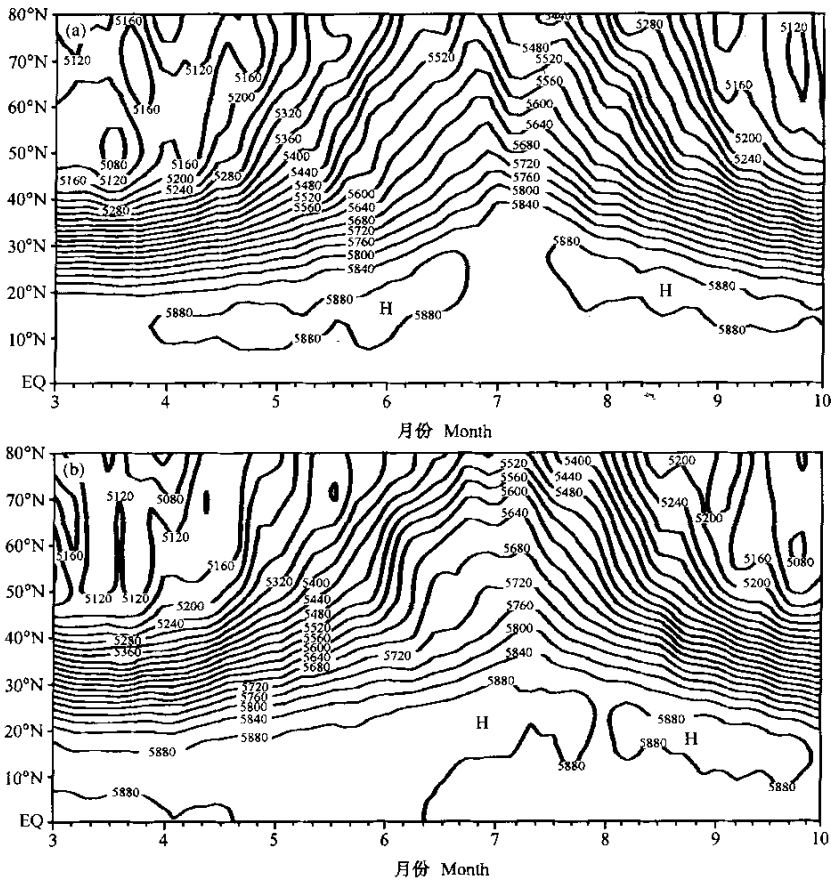


图 14 对于 1978 ~ 2000 年期间菲律宾周围对流活动强的年份 (a) 和对流弱的年份 (b) 东亚沿 135°E 500 hPa 高度合成的纬度—时间剖面图 (单位: gpm, 高度场资料来源于 NCEP/NCAR 再分析资料)。等值线间隔: 20 gpm

Fig. 14 The composite distributions of latitude - time cross section of 500 hPa along 135°E for the cases of strong convective activities (a) and weak convective activities (b) around the Philippines, respectively. Units: gpm. The data are from NCEP/NCAR reanalysis data, and contour interval is 20 gpm

风降水偏强, 引起洪涝灾害, 而且造成季风较晚到达华北、东北一带, 而又较早就南撤到江淮流域, 从而导致华北、东北地区季风降水偏少, 引起干旱灾害。

### 6.3 菲律宾周围对流活动所产生的热力强迫对西太平洋副热带高压非线性演变的动力作用

从以上分析可以看到, 标志着东亚季风的北进和南撤的东亚季风雨带的季节内演变, 与西太平洋副热带高压位置的季节内变化有密切关系, 而夏季西太平洋副热带高压位置的季节内变化是与热带西太平洋的热力状态, 特别是与菲律宾周围的对流活动紧密相关。当菲律宾对流活动强, 西太平洋副热带高压在北进时, 于 6 月中旬和 7 月上旬时发生突跳式北进, 而在菲律宾周围对流活动弱时, 西太平洋副热带高压在北进时, 并不发生突跳, 而是以渐进式向北移动, 这是什么原因引起? 为此, 我们应用 Chamey 和 Devore 所

提出的大气环流演变多平衡态理论<sup>[31]</sup>, 研究了西太平洋副热带高压的非线性演变过程<sup>[32]</sup>。研究结果<sup>[32]</sup>表明了西太平洋副热带高压北进时在 6 月中旬是否发生突跳, 这主要依赖于菲律宾周围对流活动引起的热力强迫。当菲律宾对流活动所引起的热力强迫是强的, 并超过某一临界值, 在这种情况下, 对此热力强迫所响应的波动之间以及波一流之间的相互作用相当强, 加之外部热力的作用, 从而引起西太平洋副热带高压在 6 月中旬发生突跳式的北进; 相反, 当菲律宾对流活动所引起的热力强迫是弱的, 在这种情况下, 对此热力强迫所响应的波动之间和波流之间的相互作用很弱, 甚至不存在, 其结果是西太平洋副热带高压只是随着外部热力强迫的振荡而振荡, 从而引起西太平洋副热带高压在 6 月中旬并不发生突跳式的北进, 而是以渐进式北进。

## 7 结论

本研究利用了我国测站的降水资料、NOAA 卫星测得的 OLR 资料、日本 GMS 卫星测得的高云量资料、日本“凌风丸”考察船测得的 137°E 次表层海温剖面资料以及 NCEP/NCAR 风场与 SST 的再分析资料,分析了东亚夏季风的爆发和进退的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系。分析结果表明:当春季热带西太平洋处于暖状态(图 15a),菲律宾周围对流活动强,在这种情况下,南海上空对流层下层有气旋性距平环流,西太平洋副热带高压偏东,从而使得南海夏季风爆发早;并且,当夏季热带西太平洋也处于暖状态,菲律宾周围对流活动也很强,在这种情况下,西太平洋副热带高压北进时,在 6 月中旬和 7 月初存在着明显的突跳,从而使得东亚季风雨带在 6

月中旬明显由华南北跳到江淮流域,并于 7 月初由江淮流域北跳到黄河流域、华北和东北地区。这将引起江淮流域和长江中、下游夏季风降水偏少,往往发生干旱,而黄河流域、华北和东北地区的夏季降水正常或偏多。相反,当春季热带西太平洋处于冷状态(图 15b),菲律宾周围对流活动弱,在这种情况下,南海上空对流层下层有反气旋性距平环流,西太平洋副热带高压偏西,从而使得南海夏季风爆发晚;并且,当夏季热带西太平洋处于冷状态,菲律宾周围对流活动也很弱的情况下,西太平洋副热带高压北进时,在 6 月中旬或 7 月初向北突跳并不明显,而是以渐进式向北移动,从而使得东亚季风雨带一直维持在长江流域和淮河流域。这将引起长江流域和江淮流域夏季风降水偏多,往往发生洪涝,而黄河流域、华北和东北地区的夏季降水偏少,发生干旱。

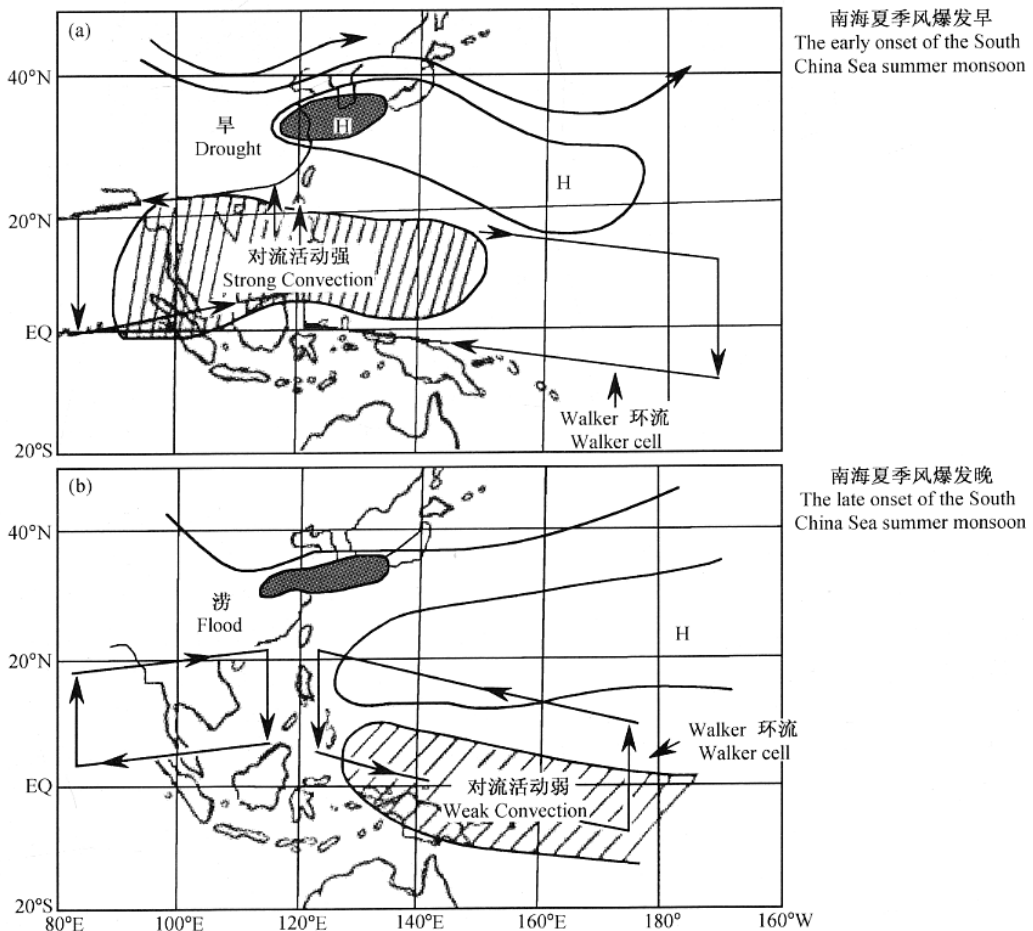


图 15 热带西太平洋(暖池)的热力状态、菲律宾周围对流活动、南海季风爆发早晚、西太平洋副热带高压与江淮流域旱涝分布的关系示意图:(a)暖池处于暖状态;(b)暖池处于冷状态

Fig. 15 Schematic map of the relationships among the SST in the tropical western Pacific (TWP), the convective activities around the Philippines, the western Pacific subtropical high, the onset of the South China Sea summer monsoon (SCSM) and the summer rainfall in the Yangtze River and the Huaihe River valleys. (a) In the warming state of the TWP; (b) In the cooling state of the TWP

本文还指出，在菲律宾周围不同对流活动所产生的热力强迫对西太平洋副热带高压演变的动力作用，从非线性动力理论说明了菲律宾周围对流活动强弱对西太平洋副热带高压北进以突跳或渐进式向北移动起到重要作用。

### 参考文献

- [ 1 ] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1: 1 ~ 26  
Zhu Kezhen. Southeast monsoon and rainfall in China. *J. Chinese Geogr. Soc.* ( in Chinese ), 1934, 1: 1 ~ 26
- [ 2 ] 涂长望, 黄仕松. 夏季风进退. 气象杂志, 1944, 18: 1 ~ 20  
Tu Changwang, Huang Shisong. The advance and retreat of the summer monsoon. *Meteor. May.* ( in Chinese ), 1944, 18: 1 ~ 20
- [ 3 ] 叶笃正, 杨大升. 北半球大气中角动量的年变化和输送的机制. 气象学报, 1955, 26: 281 ~ 294  
Yeh Tu-Cheng, Yang Da-Sheng. The mechanism of the annual variation and transfer of the angular momentum of the atmosphere in the Northern Hemisphere. *Acta Meteor. Sinica* ( in Chinese ), 1955, 26: 281 ~ 294
- [ 4 ] 叶笃正, 朱抱真. 从大气环流看远东地区过渡季节的开始. 气象学报, 1955, 26: 71 ~ 87  
Yeh Tu-Cheng, Chu Pao-Chen. The onset of transitional seasons of Far East from the view-point of general circulation. *Acta Meteor. Sinica* ( in Chinese ), 1955, 26: 71 ~ 87
- [ 5 ] Yeh Tu-Cheng. On the mechanism of maintenance of zonal circulation. *Geophysica* ( Finland ), 1957, 6: 607 ~ 620
- [ 6 ] Yeh Tu-Cheng, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over Eastern Asia, (I). *Tellus*, 1957, 9: 432 ~ 446
- [ 7 ] Yeh Tu-Cheng, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over Eastern Asia, (II). *Tellus*, 1958, 10: 58 ~ 75
- [ 8 ] Yeh Tu-Cheng, Staff Members of Academia Sinica. On the general circulation over Eastern Asia, (III). *Tellus*, 1958, 10: 299 ~ 312
- [ 9 ] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29: 249 ~ 263  
Yeh Tu-Cheng, Dao Shih-Yen, Li Mei-Tsun. The abrupt change of the atmospheric circulation during June and October. *Acta Meteor. Sinica* ( in Chinese ), 1958, 29: 249 ~ 263
- [ 10 ] 叶笃正, 朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958, 159pp  
Yeh Tu-Cheng, Chu Pao-Chen. *Some Fundamental Problem of the General Circulation of the Atmosphere* ( in Chinese ), Beijing: Science Press, 1958, 159pp
- [ 11 ] 叶笃正, 陶诗言, 朱抱真, 等. 北半球冬季阻塞形势的研究. 北京: 科学出版社, 1962,  
Yeh Tu-Cheng, Dao Shih-Yen, Chu Pao-Chen, et al. *Studies on the Blocking Situation in the Northern Hemisphere Winter* ( in Chinese ), Beijing: Science Press, 1962, 128pp
- [ 12 ] Yeh Tu-Cheng, Dao Shih-Yen, Li Mei-Tsun. The abrupt change of circulation over the Northern Hemisphere during June and October. *The Atmosphere and the Ocean in Motion*, New York: Rockefeller Institute Press in Association with Oxford University Press, 1959, 249 ~ 267
- [ 13 ] Krishnamurti T N, Ramanathan Y. Sensitivity of monsoon onset to differential heating. *J. Atmos. Sci.*, 1982, 39: 1290 ~ 1306
- [ 14 ] McBride J J. The Australian summer monsoon. *Monsoon Meteorology*. Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987, 203 ~ 232
- [ 15 ] 黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. 大气科学, 1988, 特刊: 95 ~ 107  
Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism. *Chinese J. Atmos. Sci.* ( in Chinese ), 1988, special Issue: 95 ~ 107
- [ 16 ] Huang Ronghui, Sun Fongying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, 70 ( 1B ): 243 ~ 256
- [ 17 ] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 1994, 18: 141 ~ 151  
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western Pacific warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.* ( in Chinese ), 1994, 18: 141 ~ 151
- [ 18 ] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响. 大气科学, 1994, 18: 456 ~ 465  
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the convective activities over the West Pacific warm pool on the intraseasonal variability of summer climate in East Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.* ( in Chinese ), 1994, 18: 456 ~ 465
- [ 19 ] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, 20: 55 ~ 69
- [ 20 ] 叶笃正, 黄荣辉, 等. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科技出版社, 1992, 387pp  
Ye Duzheng, Huang Ronghui, et al. *Studies on the Regularity and cause of Droughts and Floods in the Yangtze River Valley and the Yellow River Valley* ( in Chinese ). Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1992, 387pp
- [ 21 ] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*. Chang C P, and Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987, 60 ~ 92
- [ 22 ] Ding Yihui. Summer monsoon rainfalls in China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, 70: 373 ~ 396
- [ 23 ] Ding Yihui, Wang Qiyi, Yan Junyue. Some aspects of climatology of the summer monsoon over the South China Sea. *From Atmospheric Circulation to Global Change*. Edited by IAP/CAS, China Meteorological Press, 1996, 107 ~ 117
- [ 24 ] Wang B, Lin H, Zhang Y S, et al. Definition of South China sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon. *J. Climate*, 2004, 17: 699 ~ 710
- [ 25 ] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风爆发日期及其影响因子. 大气科学, 2002, 26: 829 ~ 844  
Liang Jianyin, Wu Shangsen. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors. *Chinese J. Atmos.*



- Sci.* ( in Chinese ), 2002 , **26** : 844 ~ 855
- [ 26 ] 丁一汇, 马鹤年. 东亚季风的研究现状. 见: 何金海编. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996, 1 ~ 14  
Ding Yihui, Ma Henian. The present status and future of research of the East Asian monsoon. *The Recent Advances in Asian monsoon Research* ( in Chinese ). He Jinhai, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 237pp
- [ 27 ] Ding Yihui, Sun Ying. A study on anomalous activities of East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79** : 1119 ~ 1137
- [ 28 ] Comejo-Garrido A G, Stone P H. On the heat balance of the Walker circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34** : 1155 ~ 1162
- [ 29 ] Huang Ronghui, Lu Li. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of the subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6** : 202 ~ 214
- [ 30 ] Nitta Ts. Long-term variations of cloud amount in the western Pacific region. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, **64** : 373 ~ 380
- [ 31 ] Charney J G, Devore J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36** : 1205 ~ 1216
- [ 32 ] 曹杰, 黄荣辉, 谢应齐, 等. 西太平洋副热带高压演变物理机制的研究. 中国科学 ( B 辑 ), 2002, **32** : 659 ~ 666  
Cao Jie, Huang Ronghui, Xie Yingqi, et al. Research on the evolution mechanism of the western Pacific subtropical high. *Science in China* ( Series B, in Chinese ), 2002, **45** : 659 ~ 666