

关于东亚副热带季风和热带季风的再认识

何金海¹ 祁莉^{1*} 韦晋¹ 池艳珍^{1,2}

1 江苏省气象灾害重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044

2 福建省气候中心, 福州 350001

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析数据集和 CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 降水资料, 分析了东亚副热带夏季风与热带夏季风的区别和联系, 以及两者相互作用问题, 深入讨论了东亚副热带季风的本质。分析发现东亚副热带夏季风建立早于热带夏季风, 于 3 月中旬已经开始建立。两者是相互独立的两个过程, 前者并非后者向北推进的结果; 相反, 前者建立后的突然南压有利于后者的爆发。副热带夏季风为渐进式建立, 但撤退迅速; 热带夏季风爆发突然, 但撤退缓慢。副热带夏季风的建立以偏南风的建立为特征, 而热带夏季风的建立以偏东风向偏西风转变为特征。热带夏季风的建立时间取决于经向海陆热力差异转向, 而东亚副热带夏季风则更依赖于纬向海陆热力差异的逆转。亚洲大陆 (含青藏高原) 与西太平洋之间的纬向海陆热力差异的季节逆转无论对东亚副热带夏季风还是热带夏季风均有重要作用。

关键词 东亚副热带夏季风 热带夏季风 青藏高原 纬向海陆热力差异

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1257-09

中图分类号 P462

文献标识码 A

Reinvestigations on the East Asian Subtropical Monsoon and Tropical Monsoon

HE Jin-Hai¹, QI Li¹, WEI Jin¹, and CHI Yan-Zhen^{1,2}

1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044

2 Fujian Climate Center, Fuzhou 350001

Abstract The East Asian monsoon consists of the subtropical monsoon and the tropical monsoon, whose interaction has not been paid attention to. NCEP/NCAR reanalysis dataset and CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) rain data are used to investigate differences and relationship between the East Asian subtropical monsoon and the tropical monsoon in order to discuss the essence of the subtropical monsoon. Analyses find that the onset of the subtropical monsoon is in middle March, earlier than that of the tropical monsoon. They are independent on each other, the subtropical monsoon is not the northward branch of the tropical monsoon, by contraries, the former onset is propitious to the latter breakout. The subtropical monsoon sets up step by step but retreats rapidly, while the tropical monsoon breaks out suddenly but withdraws slowly. The subtropical/tropical monsoon onset is characterized by southerly/westerly beginning, which lies on zonal/meridional land-sea thermal contrast reverse. Heating source over the Tibetan Plateau and zonal land-sea thermal difference play important roles not only in the subtropical monsoon, but also in the tropical monsoon.

收稿日期 2007-05-30, 2007-07-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403607、国家自然科学基金重点项目 40633018 和南海季风试验项目 (SCSMEX)

作者简介 何金海, 男, 1941 年出生, 教授, 主要从事季风、低频振荡和海陆气相互作用研究。E-mail: hejhnew@jssmail.com.cn

* 通讯作者 E-mail: qili82@126.com

Key words the East Asian subtropical monsoon, the tropical monsoon, the Tibetan Plateau, zonal land-sea thermal contrast

1 引言

东亚季风既包含热带季风又包含副热带季风,它们之间存在相互作用,并直接影响我国大范围的旱涝。朱乾根等^[1]明确提出东亚季风系统分为南海热带季风与副热带季风。陶诗言先生在给《东亚季风》一书^[2]作序时写到“东亚季风与印度季风主要不同之一是东亚季风包括有热带季风和副热带季风的两个子系统,而印度季风是热带季风性质”。李建平和曾庆存^[3,4]构造动态标准化季节变率指数,划分了全球季风系统的地理分布,指出东亚季风从南至北由“热带季风”、“副热带季风”和“温寒带季风”组成。不少学者^[5~7]通过建立季风指数来讨论夏季东亚副热带季风与东亚降水的关系。但东亚副热带季风本质及其与热带季风的相互关系仍是一个尚未引起重视的科学问题。究竟什么是副热带季风?或者说副热带季风的本质是什么?人们通常有两方面的含混:一是基于地域的考虑,认为东亚副热带地区盛行的季风即称“东亚副热带季风”,而不问究竟是什么机制形成了副热带季风。二是将东亚地区热带季风的向北延伸看成副热带季风,同样是忽视了副热带季风自身存在的原因。

东亚地域纵跨高、中、低纬,且广袤的大陆濒临最宽广的太平洋,海陆热力差异季节变化的影响十分突出。欧亚大陆(包括青藏高原)对亚洲夏季风的爆发和强度有重要影响。吴国雄等^[8,9]和梁潇云等^[10]提出高原的“热力滑轮”对亚洲夏季风的爆发地点有“锚定”作用。由于海陆热力差异是形成季风的关键因子,大多季风的研究^[2~4,11~17]强调东亚地区经向海陆(包括青藏高原)热力差异是形成热带季风的重要推动力。然而,在副热带地区,高原作为抬高的热源(或冷源),增强了纬向海陆(亚洲大陆—太平洋)热力差异,使其季节转换更具敏感性和特殊性。张艳等^[18]和钱永甫等^[19]首先讨论了纬向海陆热力差异对夏季风的影响,但没有与副热带季风相联系。祁莉等^[20]首次讨论了东亚副热带季风环流与纬向海陆热力差异的关系,得到了一些新的认识。然而很多问题仍然未知,例如,纬向海陆热力差异的转向对东亚副热带夏季风的建

立十分关键,其在热带夏季风的建立过程中起何作用?东亚副热带夏季风与热带夏季风的建立特征有什么不同?两者如何相互作用?本文拟就上述相关问题展开讨论,进一步探讨东亚副热带夏季风的本质。

2 资料与方法

本文使用 1950~2000 年 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) 再分析数据集^[21]及 1979~2000 年 CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation)^[22]降水资料,分析讨论东亚副热带夏季风和热带夏季风的区别和联系。

3 纬向海陆热力差异季节逆转的特征

图 1 给出了气候平均场上北半球中低纬度各纬带上 500 hPa 温度纬向偏差(定义为各经度上的温度与 80°E~150°E 平均温度之差,引自文献^[20])逐候的演变。可见,温度纬向偏差的量值随纬度从南至北增大;除 35°N 外各纬度上其东西向差异的季节转换特征明显:西太平洋地区冬春为暖区,春末夏初转为冷区;而西侧东亚大陆上冬春为冷区,春末夏初转为暖区;即冬春季节为西冷东暖,夏秋季节则转变为西暖东冷。但各纬带发生季节逆转的时间及特征有所不同。

15°N 纬带上,温度纬向偏差以南海经度(115°E,图 1 中竖线所示)为界,东西向截然相反;24 候左右南海以东(以西)几乎同时由暖转冷(由冷转暖),各经度上几乎同步发生季节逆转,具有爆发性和同时性。20°N 上也基本以南海经度为分界线;南海以东大洋上 24 候后转为冷区,以西地区最早增温的为中南半岛,约 18 候左右,后逐渐向西推进,印度半岛东部 30 候以后才转为暖区。25°N 纬带的特征与 20°N 相似,所不同的是其分界线东移至 120°E(我国东部海岸线附近);120°E 以西增暖最早的是大陆东侧(华南地区),14 候后已转为暖区。相比较而言,30°N 上青藏高原热源的加热作用造成该纬带上温度纬向偏差量值最大,此处

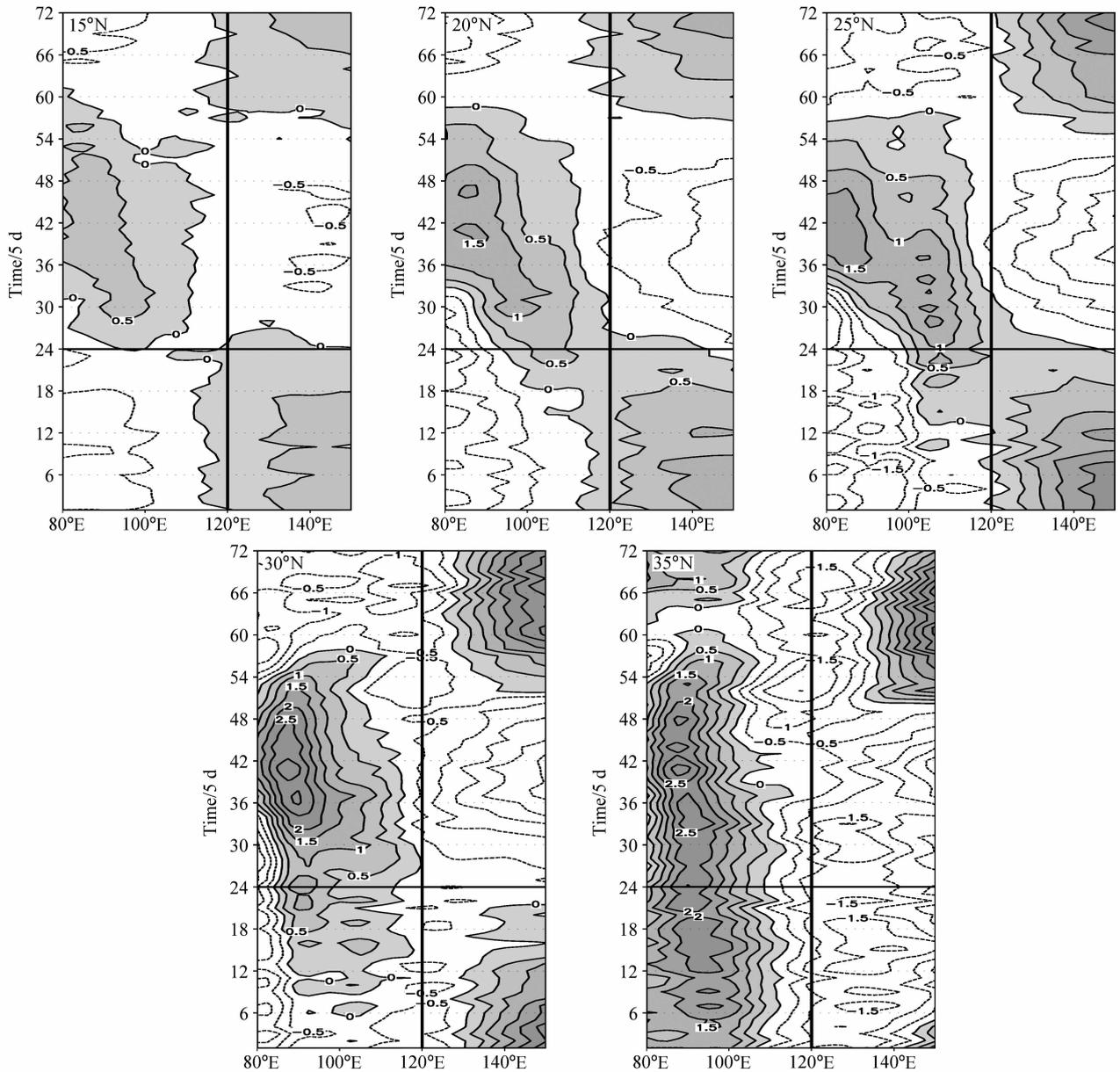


图1 500 hPa 各纬带温度纬向偏差 (单位: K) 随时间逐候的演变, 阴影为暖区 (引自文献[20])

Fig. 1 Evolutions of air temperature zonal deviation (K) at 500 hPa, warm zone is shaded (quoted from reference [20])

季节逆转也最早; 东海以东的大洋上 24 候前就已经转冷, 而高原东侧 (90°E 以东) 东亚大陆上空各处 12 候均转为暖区。35°N 纬带上西太平洋上 50 候前均为冷区, 50 候后转暖, 而 110°E 以西大陆上基本没有季节变化, 常年均为暖区。

由图 1 还可看出, 东亚各纬度基本以 120°E 附近为冷暖区分界线, 因此选取 120°E~150°E 代表西太平洋地区, 80°E~120°E 代表东亚大陆, 求得各纬带上的纬向海陆热力差异如图 2 所示。35°N 海陆热力差异基本维持负值, 仅 10~11 月转为正

值, 季节变化不明显, Zhao 等^[23] 提出该地区没有纬向风的季节逆转, 35°N 以南各个纬带海陆热力差异均有显著的季节变化, 春末夏初由正转负, 表明东亚大陆和西太平洋地区由东暖西冷转为东冷西暖, 形成向西的温度梯度; 秋季则由负转正, 温度梯度转向东。图 2 最显著的特征为各纬带相比转向最早的在副热带地区 (30°N), 3 月末 4 月初已经转负; 热带地区各纬度 24 候同时转向, 具有同时性和爆发性。热带和副热带地区相差一个月, 这一特点造成了副热带季风和热带季风建立时间的差异。

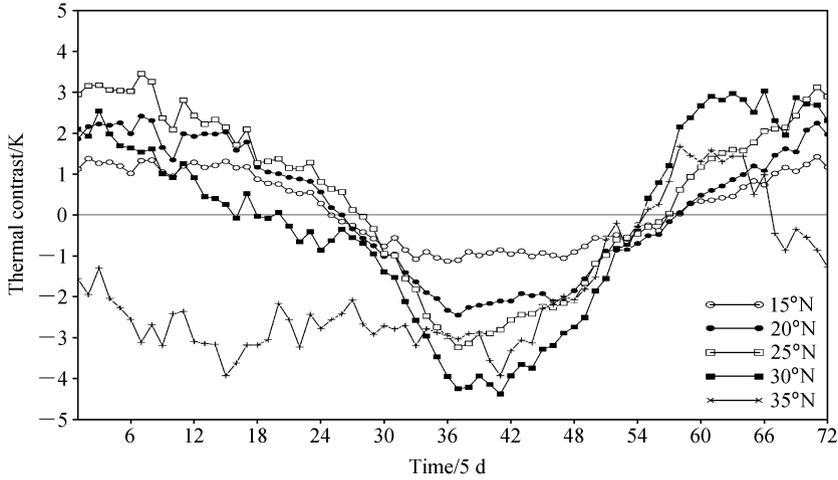


图2 500 hPa 纬向海陆热力差异逐候的演变

Fig. 2 Evolutions of zonal land-sea thermal contrast at 500 hPa

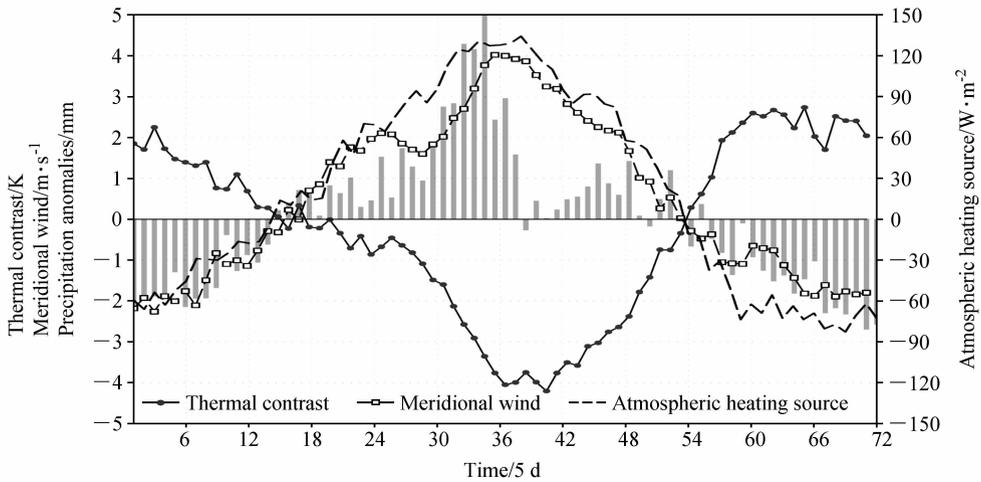


图3 气候平均场上副热带地区 (27.5°N~32.5°N 平均) 500 hPa 纬向海陆热力差异, 副热带地区 (27.5°N~32.5°N, 110°E~140°E 平均) 850 hPa 经向风、降水量距平 (去除年平均, 柱形图) 及青藏高原 (27.5°N~37.5°N, 80°E~100°E) 整层积分大气热源的逐候演变
Fig. 3 Climatological evolutions of zonal land-sea thermal contrast at 500 hPa averaged over the subtropics (27.5°N~32.5°N), meridional wind at 850 hPa and precipitation anomalies (removing annual mean, histogram) averaged over the subtropics (27.5°N~32.5°N, 110°E~140°E), integrated atmospheric heating source over the Tibetan Plateau (27.5°N~37.5°N, 80°E~100°E)

根据图1, 由春入夏西太平洋地区各纬度均于24候前后转冷, 但东亚大陆及孟加拉湾地区转暖时间差异较大。因此, 纬向海陆热力差异季节转向的早晚可能更多地取决于东亚大陆及其南侧地区增暖的早晚。钱永甫等^[19]指出由春入夏高原东侧(90°E以东)我国东部大陆地区迅速增温, 其中30°N纬带为增温和降压最快的地区。这使得纬向海陆热力差异最早于高原所在纬度的副热带地区(30°N)发生逆转。另一方面, 3月中旬高原热源开始加强^[2], 15候左右由冷源转为热源(图3), 作为

抬高的热源直接加热对流层中层大气, 加剧了该处的纬向海陆热力差异, 使其强度最强。因此, 副热带地区纬向海陆热力差异的季节转换不但具有其敏感性、独特性, 而且具有超前性。

不但如此, 东亚副热带纬向海陆热力差异的季节逆转还超前于东亚经向海陆热力差异的季节变化(图略)^[20]。经向海陆热力差异季节逆转最早发生在中南半岛地区(105°E), 约为27候由南暖北冷转为南冷北暖。此后, 季节逆转同时向东西两侧推进, 南海(115°E)与孟加拉湾(90°E)同时于30候

发生逆转(对流层低层更早些,约 28 候),印度次大陆(70°E~80°E)及 130°E 附近地区随后于 32 候逆转,最后为西北太平洋地区(150°E)。整个经向海陆热力差异的季节逆转过程与东亚热带夏季风的建立与推进的进程基本一致。

4 对流层低层环流

东亚经度平均(110°E~130°E)的 850 hPa 流场、涡度场及降水距平(去除年平均值)如图 4 所示。降水正距平最早出现在 25°N~32.5°N 的副热带地区,约 15 候左右(3 月中旬),与该区域纬向海陆热力差异季节逆转的时间一致(图 2),该地区相应的 850 hPa 风场由西北风转为西南风,涡度也转为气旋性涡度。祁莉等^[20]提出,基于海陆热力差异是形成季风的基本推动力的观点,上述副热带

地区从偏北风转为偏南风的过程表明东亚副热带夏季风已经建立(图 3)。因此,该雨带实为副热带季风雨带,相应正涡度带对应于副热带季风槽。与此同时,25°N 以南的热带地区均为较弱偏东风,涡度为负,降水为负距平,即热带夏季风仍未爆发,明显晚于东亚副热带夏季风。随后副热带季风雨带继续维持,偏南风也有所加强;热带地区风场基本没有变化。

随着热带地区纬向海陆热力差异于 24 候转向(图 2),副高南侧转向气流加强,热带地区南风分量也开始加强;副热带季风雨带加强并迅速地向南扩展,相应的异常南风分量也显著南压(去除年平均值,图略)。陈隆勋等^[24]和江志红等^[25]也发现南海夏季风爆发前副热带雨带有向南传播的特征,但其突然南传之原因还未有人给出合理解释。27 候

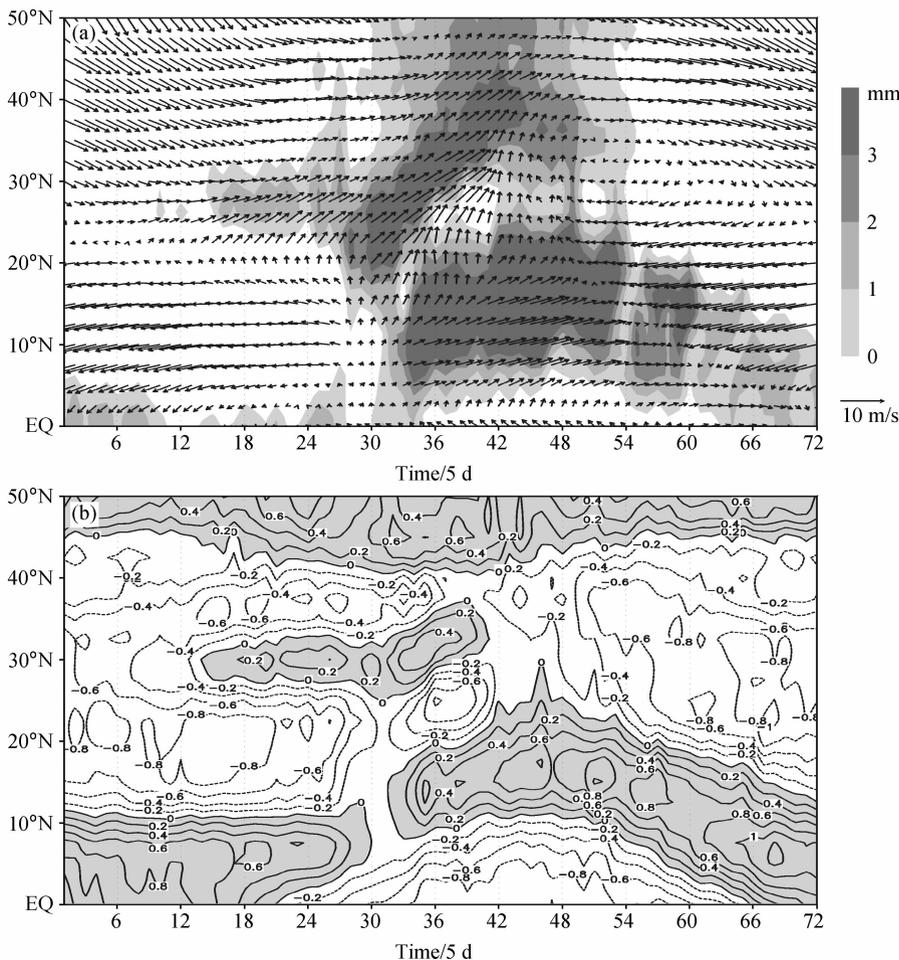


图 4 气候平均东亚地区(110°E~130°E 平均) 850 hPa 风场和降水距平(去除年平均值,阴影)(a)及 850 hPa 涡度(b,单位: $10^{-5} s^{-1}$, 阴影为气旋性涡度)的逐候演变

Fig. 4 Climatological evolutions of (a) wind at 850 hPa and precipitation anomalies removing annual mean (shaded), (b) vorticity at 850 hPa (units: $10^{-5} s^{-1}$, positive is shaded) over East Asian region (110°E~130°E)

副热带季风雨带到达 20°N 以南地区, 该地区已由较弱南风控制; 28 候 $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 的南海地区降水同时转为正距平, 对流层低层由偏东风转为偏西风, 表明南海夏季风爆发, 具有爆发性。

随后, 副热带季风雨带及相应正涡度带迅速加强北抬, 6 月到达长江中下游, 正涡度达到最强, 表明此时进入梅雨期。7 月底 8 月初, 副热带季风雨带抵达华北, 华北雨季开始, 正涡度带减弱转为负值, $25^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 地区均由较强的负涡度带控制, 相应降水带和偏南风也开始减弱, 表明副热带夏季风开始撤退。随着副热带纬向海陆热力差异于 54 候由负转正 (图 2), 25°N 以北的广大副热带地区的降水同时由正距平转为负距平, 相应的偏南风也减弱转为偏北风。这意味着东亚副热带夏季风已经完全撤退, 秋高气爽天气来临。与上述特征相比较, 在 20°N 以南的热带地区, 随着南海夏季风于 28 候建立, 热带地区出现降水正距平, 低层 850 hPa 风场由偏东风转为偏西风。30 候后热带季风雨带发展加强, 偏西风大大加强, 涡度场上也出现了相应的正涡度带。值得注意的是, 此时东亚地区从南至北显著存在两条正涡度带, 两者由一较强的负涡度带隔离; 相应的降水场上也出现两支降水大值带, 分别对应于副热带季风雨带和热带季风雨带, 这表明副热带夏季风与热带夏季风是相互独立的, 前者并非是后者向北延伸的结果。相反, 热带夏季风 (南海夏季风) 的建立与副热带季风雨带的突然南压密切相关。1995 年, Chang^[26] 就曾提出华南静止锋的南压对南海夏季风的建立有促发作用。54 候后, 热带地区各纬度上纬向海陆热力差异相继由负转正 (图 2), 热带季风雨带也明显减弱, 并缓慢南退, 相应的对流层低层风场也由偏西风转为偏东风, 热带夏季风开始撤退。但其撤退是缓慢的, 10 月后雨带已撤至较南纬度。

因此, (1) 东亚副热带夏季风建立早于热带夏季风。(2) 东亚副热带夏季风与热带夏季风是两个独立的过程, 这在涡度场上表现得更为明显些 (图 4b)。前者不是后者向北推进的结果。相反, 热带夏季风的爆发可能与副热带夏季风建立后突然南压密切相关。(3) 副热带夏季风为渐进式建立, 但撤退迅速; 热带夏季风爆发突然, 但撤退缓慢。这与王黎娟等^[27] 的分析结果一致。(4) 副热带夏季风的建立以偏南风的建立为特征, 而热带夏季风主要

表现为偏东风向偏西风的转变。(5) 南海夏季风爆发于 28 候, 恰好对应于南海地区经向海陆热力差异转向^[20]。可见, 热带夏季风的建立时间取决于经向海陆热力差异转向的早晚, 而东亚副热带夏季风则更依赖于纬向海陆热力差异的逆转。

5 对流层高层环流

南海夏季风建立的大尺度特征在对流层高层表现为, 南亚高压自菲律宾以东迅速向西移动, 在到达中南半岛南部后沿中南半岛西北行最终上高原。其中的西移过程发生在 24 候前后。事实上, 南亚高压中心的位置变化并非简单的西进, 而是一个重建和替代的过程^[28]。

多年平均的 150 hPa 流场上 (图 5), 18 候南亚高压中心位于 160°E 以东的洋面上, 21 候高压缓慢西扩, 与之相对应的南半球的高压也相应西扩。22 候南亚高压中心仍在 150°E 附近。有意思的是在 23 候, 南亚高压在 120°E 附近发生分裂, 生成两个反气旋环流中心, 分别位于 105°E 以东 (中南半岛东岸) 和 135°E ; 到 24 候南亚高压偏西中心继续西移, 移上中南半岛南部, 23 候时位于 135°E 的南亚高压中心强度大大减弱, 已基本消失不见。随后, 南亚高压沿中南半岛逐步西北行, 26 候移至 15°N 以北, 最终登上高原。

可见南海夏季风建立前 (22 候~24 候) 存在南亚高压分裂为两个中心, 随后西侧中心增强, 东侧中心消亡的这样一个过程, 可以称之为南亚高压的分裂重建过程。这个过程是流场的重新调整, 整体表现为南亚高压中心迅速由菲律宾以东移动到中南半岛南部, 其移动具有突发性。

胡鹏等^[28] 提出, 南亚高压中心分裂重建与苏门达腊地区对流北推有密切联系, 深对流引发的凝结潜热释放可能是造成南亚高压重建的重要原因。值得注意的是, 24 候热带地区纬向海陆热力差异发生了季节性逆转 (图 2), 15°N 南海以东 (以西) 几乎同时由暖转冷 (由冷转暖) (图 1), 其爆发性和同时性显然与南亚高压的分裂重建和迅速西移密切相关。但两者孰因孰果? 是纬向海陆热力差异的逆转触发了南亚高压的重建西移, 还是南亚高压的西移加速了纬向海陆热力差异的季节逆转? 抑或是其中存在某种正反馈机制? 这需要我们进一步深入分析。

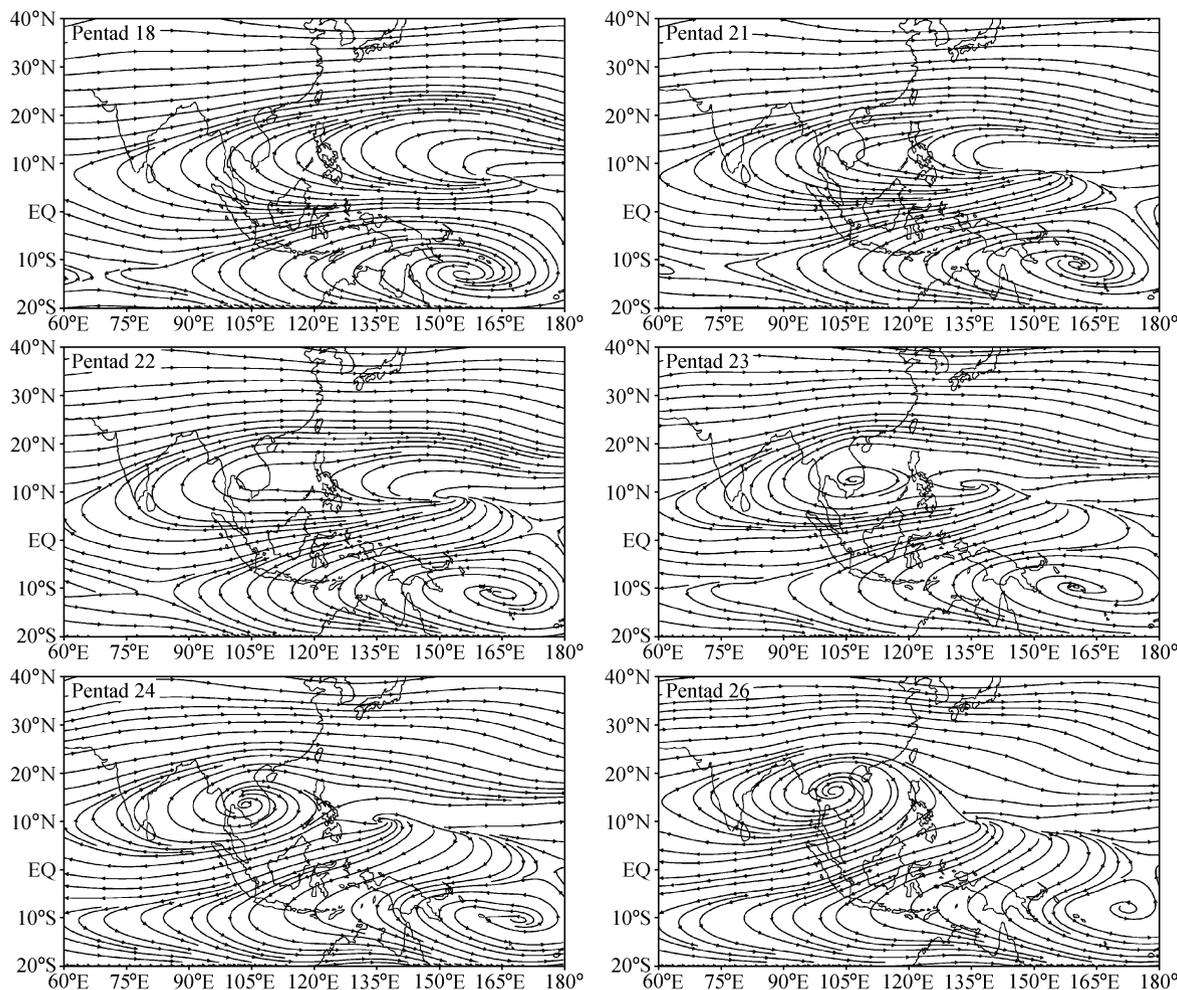


图 5 气候平均场 150 hPa 流场的演变
Fig. 5 Evolutions of climatological stream fields at 150 hPa

6 结果和讨论

东亚季风既包含热带季风又包含副热带季风, 它们之间存在相互作用, 并直接影响我国大范围的旱涝。然而, 副热带季风由于仍存在很多未知而一直颇受争议, 尤其是其本质问题及其与热带季风的相互作用是一个尚未引起重视的科学问题。本文立足于气候平均场, 以文献[20]对纬向海陆热力差异季节逆转与东亚副热带夏季风环流关系的分析为基础, 通过进一步分析东亚副热带夏季风与热带夏季风的区别和联系以及两者的相互作用, 深入讨论东亚副热带季风的本质。

分析发现, 东亚副热带夏季风建立早于热带夏季风, 3月中旬已经建立。两者是相互独立的两个过程, 前者并非后者向北推进的结果; 相反, 前者

建立后的南压促发了后者的爆发。副热带夏季风为渐进式建立, 但撤退迅速; 热带夏季风爆发突然, 但撤退缓慢。副热带夏季风的建立以偏南风的建立为特征, 而热带夏季风主要表现为偏东风向偏西风的突然转变。

南海夏季风爆发于 28 候, 恰好对应于南海地区经向海陆热力差异转向^[20]。可见热带夏季风的建立时间取决于经向海陆热力差异转向的早晚, 而东亚副热带夏季风则更依赖于纬向海陆热力差异的逆转。但无论是副热带夏季风还是热带夏季风, 纬向海陆热力的重要影响是不言而喻的。东亚纬向海陆热力差异的影响并非局地性的。在中纬度地区, 其影响主要表现在对流层低层, 偏南风的增强和对流降水的出现预示着东亚副热带夏季风的建立(图 6)。而在热带地区, 其影响主要体现在对流层

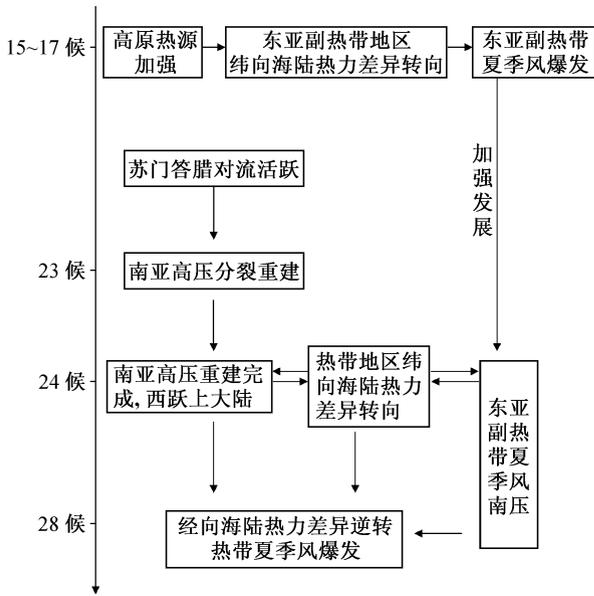


图6 东亚副热带夏季风与热带夏季风爆发过程中的关键事件
Fig. 6 Key events during the onset of the East Asian subtropical summer monsoon and the tropical summer monsoon

高层, 南亚高压分裂重建, 西跃上大陆 (图6), 这一特征已经成为南海夏季风建立前的重要征兆^[29]。此时还伴有副热带夏季风的突然南压。因此, 亚洲大陆 (含青藏高原) 与西太平洋之间的纬向海陆热力差异对东亚夏季风的影响贯穿于整个对流层, 更涉及到两支夏季风——副热带夏季风和热带夏季风的爆发和传播进程。吴国雄等^[30, 31]通过数值模拟发现, 高原的存在加强了欧亚大陆东南部的西南气流, 使东亚夏季风向北发展至 50°N 。结合本文的研究结果, 这可能表明东亚季风的向北推进正是东亚热带季风和东亚副热带季风相互配合, 相互作用的结果。

同时, 根据图6我们发现, 24候前后东亚地区中低纬度纬向海陆热力差异均已发生季节逆转, 东亚副热带夏季风建立并加强南压, 南亚高压分裂重建并抵达中南半岛南端。大气环流从对流层高层至高层均发生了调整。这可能意味着东亚地区夏季环流开始建立。

参考文献 (References)

[1] Zhu Qian'gen, He Jinhai, Wang Panxing. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, **3** (4): 466~477
[2] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991

Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon*. Beijing: China Meteorological Press, 1991
[3] 曾庆存, 李建平. 南北半球相互作用和季风的本质. *大气科学*, 2002, **26** (4): 433~448
Zeng Qingcun, Li Jianping. Interactions between the Northern and Southern Hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 433~448
[4] Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (2): 299~302
[5] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水. *应用气象学报*, 1998, **9** (增刊): 17~23
Zhang Qingyun, Tao Shiyun. Tropical and subtropical monsoon over East Asia and its influence on the rainfall over eastern China in summer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (Suppl.), 17~23
[6] 周兵, 何金海, 吴国雄, 等. 东亚副热带季风特征及其指数的建立. *大气科学*, 2003, **27** (1): 123~135
Zhou Bing, He Jinhai, Wu Guoxiong, et al. Characteristics of East Asian subtropical monsoon index and its definition. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 123~135
[7] 赵平, 周自江. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系. *气象学报*, 2005, **63** (6): 933~941
Zhao Ping, Zhou Zijiang. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6), 933~941
[8] 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
Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asian monsoon onset. Part I: Situating of the onset. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (6), 825~838
[9] 吴国雄, 王军, 刘新, 等. 欧亚地形对不同季节大气环流影响的数值模拟研究. *气象学报*, 2005, **63** (5): 603~612
Wu Guoxiong, Wang Jun, Liu Xin, et al. Numerical modeling of the influence of Eurasian orography on the atmospheric circulation in different seasons. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 603~612
[10] 梁潇云, 刘屹岷, 吴国雄. 青藏高原对亚洲夏季风爆发位置及强度的影响. *气象学报*, 2005, **63** (5): 799~805
Liang Xiaoyun, Liu Yimin, Wu Guoxiong. Effect of Tibetan Plateau on the site of onset and intensity of the Asian summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 799~805.
[11] Tao Shiyun, Chen Longxun. A review of recent research on

- the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*. Chang C-P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, Oxford, 1987. 60~92
- [12] 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
He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, et al. *The South China Sea Summer Monsoon Onset Date and Monsoon Index* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001
- [13] Qian Yongfu, Wang Shiyu, Shao Hui. A possible mechanism affecting the earlier onset of South westerly monsoon in the South China Sea compared to the Indian monsoon. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2001, **76** (3-4): 237~250
- [14] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progress of recent studies on the variability of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1): 55~69
- [15] He Haiyan, Sui Chung-Hsiung, Jian Maoqiu, et al. The evolution of tropospheric temperature field and its relationship with the onset of Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2003, **81** (5): 1201~1223
- [16] Zhang Zuqiang, Chan J C L, Ding Yihui. Characteristics, evolution and mechanisms of the summer monsoon onset over Southeast Asia. *Int. J. Climatol.*, 2004, **24**: 1461~1482
- [17] 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): 561~586
Ding Yihui, Li Chongyin, He Jinhai, et al. South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 561~586
- [18] 张艳, 钱永甫. 青藏高原地面热源对亚洲季风爆发的热力影响. 南京气象学院学报, 2002, **25** (3): 298~306
Zhang Yan, Qian Yongfu. Thermal effect of surface heat source over the Tibetan Plateau on the onset of Asian summer monsoon. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25** (3): 298~306
- [19] 钱永甫, 江静, 张艳, 等. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究. 气象学报, 2004, **62** (2): 129~139
Qian Yongfu, Jiang Jing, Zhang Yan, et al. The earliest onset area of the tropical Asian summer monsoon and its mechanism. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (2): 129~139
- [20] 祁莉, 何金海, 张祖强. 纬向海陆热力差异的季节转换与东亚副热带季风环流. 2007, 已投《科学通报》
Qi Li, He Jinhai, Zhang Zuqiang. Seasonal cycle of the zonal land-sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation. 2007, submitted to *Chinese Science Bulletin*
- [21] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [22] 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
- [23] Zhao Ping, Zhang Renhe, Liu Jiping, et al. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall. *Climate Dyn.*, 2006, doi: 10.1007/s00382-006-0212-y
- [24] 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等. 东亚地区夏季风爆发过程. 气候与环境研究, 2000, **5** (4): 345~355
Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. On the process of summer monsoon onset over East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (4): 345~355
- [25] 江志红, 何金海, 李建平, 等. 东亚夏季风推进进程的气候特征及其年代际变化. 地理学报, 2006, **61** (7): 675~686
Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping et al. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2006, **61** (7): 675~686
- [26] Chang C P, Chen G T J. Tropical circulation associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 3254~3267
- [27] 王黎娟, 何金海, 管兆勇. 东亚副热带夏季风槽的气候特征及其与南海夏季风槽的比较. 气象学报, 2006, **64** (5): 583~593
Wang Lijuan, He Jinhai, Guan Zhaoyong. Climatological features of East Asian subtropical summer monsoon trough and its comparison with South China Sea summer monsoon trough. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (5): 583~593
- [28] 胡鹏. 南海夏季风建立和南亚高压重建及其数值模拟. 南京信息工程大学博士学位论文, 2005
Hu Peng. Research on the onset of South China Sea monsoon and the reconstructure of South Asia high. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Sciences & Technology, 2005
- [29] He Jinhai, Wen Min, Wang Lijuan, et al. Characteristics of the onset of the Asian summer monsoon and the importance of Asian-Australian "Land Bridge". *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, **23** (6): 951~963
- [30] Wu Guoxiong, Mao Jianguy, Duan Anmin, et al. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **62** (5): 528~540
- [31] 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局. 大气科学, 2005, **29** (1): 47~56
Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 47~56