

亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究

I. 夏季风流场结构

陈际龙 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

摘 要 利用 1979~2003 年的 NCEP/NCAR 再分析资料探讨了亚澳季风各夏季风子系统(南亚夏季风、东亚夏季风、北澳夏季风)流场结构及其季节演变的气候学特征。结果表明: 南亚夏季风和北澳夏季风纯属热带季风, 盛行纬向气流和纬向风垂直正切变, 即低层西风、高层东风, 但北澳夏季风的强度明显弱于南亚夏季风, 而东亚夏季风由热带季风和副热带季风组成, 盛行经向气流和经向风垂直正切变, 即低层南风、高层北风, 且纬向气流高低层配置相对复杂, 相对北澳夏季风而言, 南亚夏季风的低层西风强而深厚, 而东亚夏季风的低层南风强而深厚。从热带季风区流场结构的季节演变过程看, 这三个夏季风子系统均为垂直斜压结构。三者的共性还表现在热带季风区纬向气流高低层配置的季节性转向, 即夏季风爆发时从低层东风、高层西风转换为低层西风、高层东风, 夏季风撤退时从低层西风、高层东风转换为低层东风、高层西风。此外, 南亚夏季风的季内变化平稳, 而东亚夏季风和北澳夏季风的季内变化剧烈; 东亚夏季风的经向跨度大、维持时间最长, 而北澳夏季风的经向跨度小、维持时间最短。

关键词 南亚夏季风 东亚夏季风 北澳夏季风 流场结构 季节演变

文章编号 1006-9895(2006)06-1091-12

中图分类号 P425

文献标识码 A

The Comparison of Climatological Characteristics Among Asian and Australian Monsoon Subsystems. Part I. The Wind Structure of Summer Monsoon

CHEN Ji-Long and HUANG Rong-Hui

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract Using the NCEP/NCAR reanalysis data from 1979 to 2003, climatological characteristics of the wind structure and its seasonal evolution associated with various summer monsoon subsystems of the Asian-Australian monsoon, i. e., the South Asian summer monsoon (SASM) over the area (0° - 25° N, 60° E- 100° E) and the East Asian summer monsoon (EASM) over the area (0° - 45° N, 100° E- 140° E) in boreal summer, and the North Australian summer monsoon (NASM) over the area (0° - 15° S, 110° E- 150° E) in austral summer, are respectively investigated in this study. The results show that both SASM and NASM purely belong to the tropical summer monsoons with strong zonal flow and vertical westerly shear, i. e., low-level westerlies and high-level easterlies, and vertical westerly shear in the SASM region is distinctly stronger than that in the NASM region. EASM is composed of the tropical and subtropical summer monsoons with significant meridional flow and vertical southerly shear, i. e., low-level southerlies and high-level northerlies, but the vertical structure of zonal flow in the EASM region is complex, including the vertical westerly shear in the tropical monsoon region to the south of 25° N such as the South China Sea (SCS) and the western Pacific and the vertical easterly shear in the subtropical monsoon region to the north of

收稿日期 2005-12-27, 2006-02-27 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40231005, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600

作者简介 陈际龙, 男, 1974 年出生, 博士, 主要从事季风与海陆气相互作用的研究。E-mail: cjl@mail.iap.ac.cn

25°N such as the mainland of China and South Japan. As compared with zonal or meridional flow in the NASM region, low-level westerlies in the SASM region and low-level southerlies in the EASM region are strong and profound. Totally, both SASM and NASM act as the latitudinal monsoon system but EASM mainly acts as the longitudinal monsoon system. Moreover, these analyses also reveal that the common features of these summer monsoon subsystems lie in seasonal reverse of the baroclinic structure of zonal flows in the tropical monsoon region, characterized by a wind switch from low-level easterlies and high-level westerlies to low-level westerlies and high-level easterlies on the onset of the summer monsoon, but from low-level westerlies and high-level easterlies to low-level easterlies and high-level westerlies on the retreat of the summer monsoon. Otherwise, there are obvious differences in some aspects among SASM, EASM and NASM, thereinto, intraseasonal variation of SASM is more stable than that of EASM or NASM, and the meridional span of EASM is the largest but that of NASM is the smallest, and the maintaining time of EASM is the longest but that of NASM is the shortest. Seasonal reverse of the thermal gradient and its phase-locking with the intraseasonal oscillation are potential factors contributing to seasonal evolution of the wind structure associated with summer monsoon subsystems.

Key words the South Asian summer monsoon, the East Asian summer monsoon, the North Australian summer monsoon, the wind structure, seasonal evolution

1 引言

季风是一种能带来不同雨型的盛行风向随季节强烈变化的环流系统, 主要分布在东半球的热带和副热带大陆, 以及毗邻的海洋地区, 其中亚洲季风和澳洲季风最为显著^[1, 2]。通过南北半球的季节性相互作用^[3], 亚洲季风和澳洲季风紧密联系在一起, 构成全球最大的季风系统, 即亚澳季风(A-A季风)系统。作为全球大气环流的重要组成部分, 亚澳季风在全球气候变化中扮演着重要的角色^[4~6]。因此, 亚澳季风的研究一直为国内外学者所关注, 是国际“气候变率与可预报性(CLIVAR)”研究计划的重要内容之一。

亚澳季风, 尤其是夏季风, 从太平洋和印度洋携带充沛的水汽到陆地并形成降水, 而降水的多寡可引起大范围的旱涝灾害, 从而给季风区经济带来严重损失。早在 70 多年前, 竺可桢^[7]首先提出东亚夏季风与中国降水的可能关系, 之后, 涂长望等^[8]研究了东亚夏季风的进退对中国夏季气候季节内变化的影响, 这些工作开辟了亚洲夏季风的研究之路。近二十多年来, 亚洲夏季风的研究取得重大进展, 不仅表现在亚洲夏季风的变异及其成因方面^[9], 而且涉及亚洲季风系统的结构方面^[10~13]。由于海陆配置的差异和青藏高原的影响, 南亚和东亚地区的夏季风有明显的差异, 各自形成一个相对独立的系统^[11, 12], 并在热对流、水汽输送和扰动源地等方面存在较大差别^[14~16]。从流场结构来看,

南亚夏季风以纬向气流为主, 且高低空反位相^[13]。然而, 受西太平洋副高的影响, 东亚夏季风具有副热带季风特征^[10], 并伴有很强的经向气流。显然, 东亚夏季风的流场动力结构比南亚夏季风复杂, 还有待进一步探讨。另一方面, 从更大的空间尺度看, 当亚洲地区盛行夏季风时, 澳洲北部盛行冬季风, 而亚洲地区盛行冬季风时, 澳洲北部盛行夏季风^[12]。由于北澳夏季风和亚洲夏季风位于不同半球, 从属于不同季节, 各夏季风子系统的流场动力结构特征有何异同? 目前, 相关工作并不多但值得关注, 为了更全面地认识亚澳季风系统的构成本质, 本文利用 1979~2003 年的 NCEP/NCAR 再分析资料^[17]对各夏季风子系统(即南亚夏季风、东亚夏季风、北澳夏季风)流场结构的气候学特征进行对比研究。

2 亚澳季风区的季节性流场

由于亚澳季风区高低层气流的深浅厚薄程度不完全一致, 为消除不同高度上的气候差异, 较准确地反映季风气流的总体动力特征, 本研究把对流层近似分为三层, 以 1000~700 hPa 的等压面平均代表对流层低层, 600~400 hPa 的等压面平均代表对流层中层, 而 300~100 hPa 的等压面平均代表对流层高层。北半球夏季为 6、7、8 三个月(JJA)平均, 南半球夏季为 12、1、2 三个月(DJF)平均。但应当注意, 在对流层低层, 青藏高原地区的某些数值是虚假的, 因此, 分析时应不予考虑。

2.1 低层大尺度环流

在对流层低层, 亚澳季风区的流场有显著的季节性反转。北半球夏季 (JJA), 亚洲地区盛行夏季风, 澳洲北部盛行冬季风 (如图 1a 所示)。马斯克林高压北侧的偏东气流在索马里附近转向北越赤道, 并与来自红海和波斯湾的西北风在阿拉伯海汇合成强大的偏西气流, 经印度半岛、孟加拉湾、中南半岛流向东亚; 与此同时, 澳大利亚高压北侧东南气流在海洋大陆越赤道转向成偏南气流; 这两支气流在南海地区汇合成西南气流在东亚沿岸向北流, 最终汇入到西太平洋副高西侧的偏南气流中。

南半球夏季 (DJF), 亚洲地区盛行冬季风, 澳洲北部盛行夏季风 (图 1b)。由蒙古、西伯利亚等地寒潮爆发所带来的强西北风自中国东北经黄海, 于 25°N 处转向南下与热带西太平洋的偏东气流汇合经南海分为两支: 一支以东北气流南下在海洋大陆地区越过赤道, 转向为南半球的热带西北夏季风, 并在 15°S 附近与南半球的东南气流汇合组成南半球热带辐合带 (ITCZ); 另一支以偏东气流西进经孟加拉湾, 与印度半岛和阿拉伯地区局地环流形成的东北气流合并, 在东非沿岸越赤道转向南下, 最终汇入南半球副高带北侧的偏东气流中。

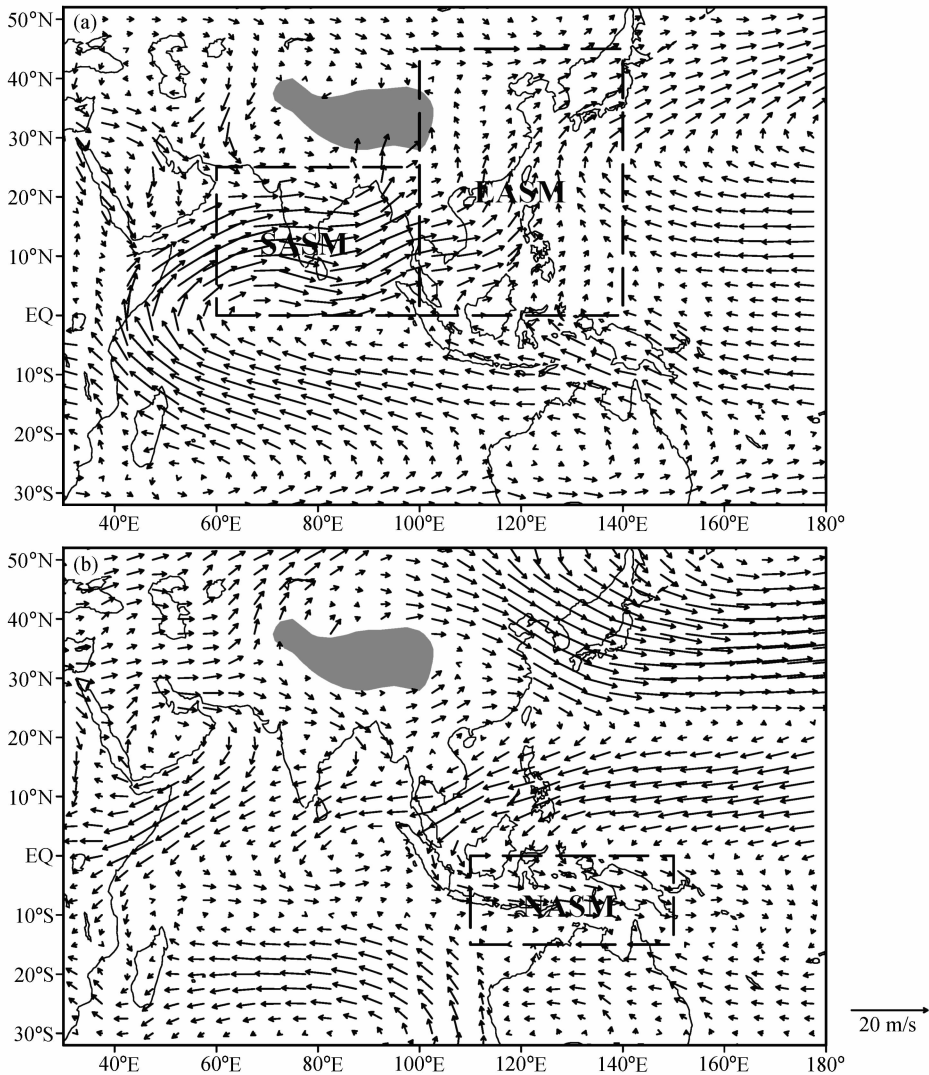


图 1 北半球夏季 (a) 和南半球夏季 (b) 的低层平均风场 (单位: m/s)。灰色阴影表示高于 3000 m 的青藏高原地区, 三个矩形框分别代表南亚季风区、东亚季风区、北澳季风区

Fig. 1 Climatological mean low-level wind averaged for 1000 – 700 hPa in boreal summer (a) and austral summer (b). The shaded areas indicate the Tibetan Plateau higher than 3000 m. Three rectangular frames indicate the SASM (the South Asian summer monsoon) region, the EASM (the East Asian summer monsoon) region and the NASM (the North Australian summer monsoon) region, respectively

2.2 高层大尺度环流

在对流层高层,亚澳季风区的流场主要表现为副热带高压和西风带的季节性位移。北半球夏季(JJA)(图 2a),18°S 以南地区为强大的南半球西风带。南半球副热带高压带中心位于 15°S 附近的印度洋及西太平洋地区,北半球副热带高压带中心位于 28°N 附近的南亚地区,即南亚高压。南北半球的副热带高压带之间是宽广的热带东风带,跨度近 40 个纬度。30°N 以北地区为北半球西风带,但强度要比南半球稍弱。南半球夏季(DJF)(图 2b),15°N 以北地区为强大的北半球西风带。北半球副热带高压带中心位于 12°N 附近的西太平洋地区,南半球副热带高压带中心位于 17°S 附近的澳大利亚北部地区。南北半球的副热带高压带之间是东风

带。20°S 以南地区为南半球西风带,但强度要比北半球弱得多。

太阳辐射的季节变动促使大尺度环流系统的季节性南北移动,而海陆热力差异造成大尺度环流系统沿纬圈的不均匀性^[12]。由太阳辐射年变化所致的“第一推动力”和由地表特性差异所致的“第二推动力”在亚澳季风区正好合拍且冬夏季反相^[3],从而形成全球最大的季风系统-亚澳季风系统。

3 夏季风子系统的流场结构配置

由于不同研究者对亚澳季风区域性的认识有所偏差,目前季风子系统的划分标准尚未统一。本文关注的各夏季风子系统以 Tao 等^[11]和 Manton 等^[5]的研究为依据,主要包括北半球夏季的南亚夏季风

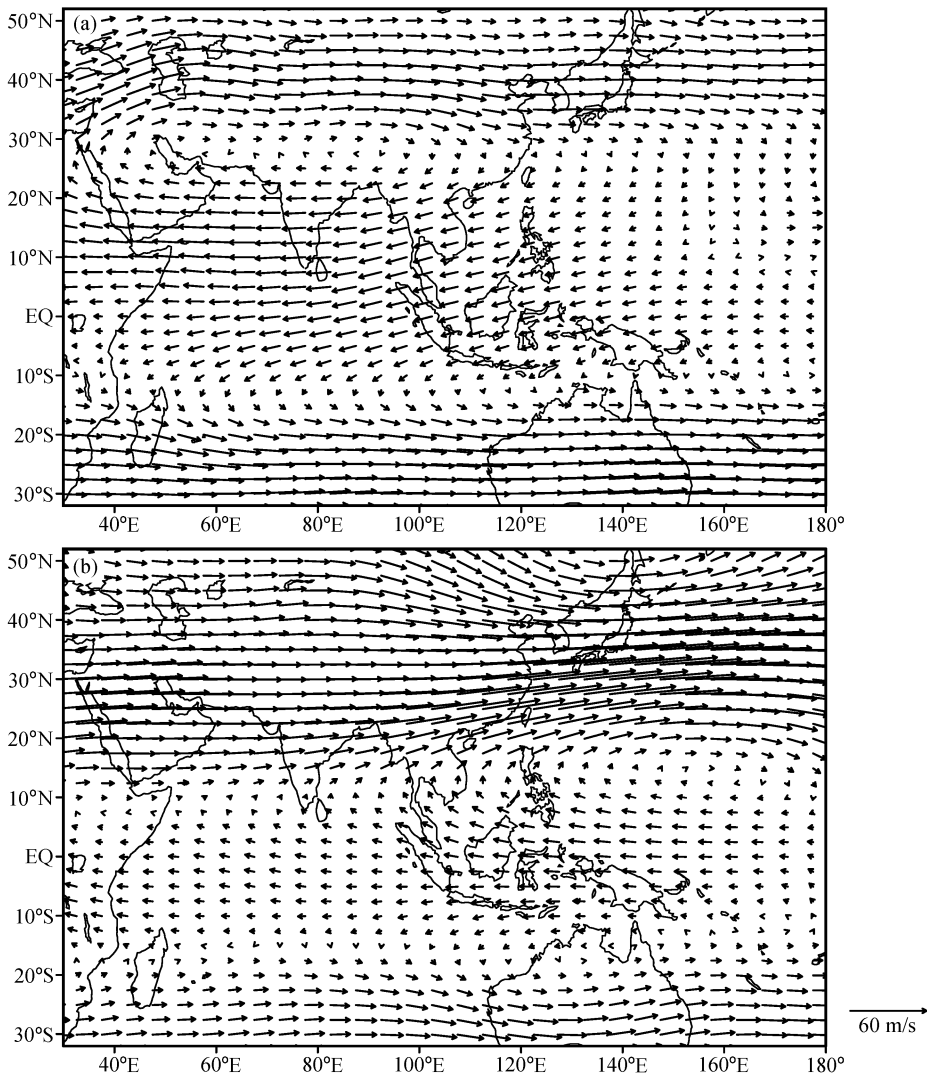


图2 同图1, 但为高层平均风场

Fig. 2 Same as in Fig. 1, but for high-level wind averaged for 300 - 100 hPa

($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$)、东亚夏季风 ($0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 和南半球夏季的北澳夏季风 ($0^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$), 分别对应图 1 中的矩形框 SASM、EASM、NASM。当然, 区域界限并不严格, 遇到具体问题时必须灵活处理。

3.1 南亚夏季风的流场结构配置

北半球夏季 (JJA) (图 1a 和图 2a), 100°E 以西的南亚季风区流场的纬向分量较大, 经向分量相对较小, 且低层盛行偏西气流、高层盛行偏东气流, 纬向气流具有很强的垂直斜压结构。为了描述这种斜压结构特征, 不妨引入垂直切变量:

$$\Delta F = F_1 - F_2, \quad (1)$$

其中, F 是纬向风或经向风, F_1 和 F_2 分别表示 F 在对流层低层和对流层高层的值; $\Delta F > 0$ 表示垂直正切变, $\Delta F < 0$ 表示垂直负切变。图 3 给出了北半球夏季 (JJA) 的纬向风垂直切变和经向风垂直切变。从图 3a 可以看出, 南亚季风区纬向风垂直正切变很强且自西向东减弱, 中心位于阿拉伯海, 对应的低层西风和高层东风也自西向东减弱 (图略)。从图 3b 可以看出, 与越赤道气流和经向环流相对应, 经向风垂直正切变主要分布于东非沿岸、孟加拉湾、南海和中国大陆地区, 而阿拉伯海和印度半岛的经向风垂直切变很弱。

阿拉伯海 (65°E)、印度半岛 (80°E)、孟加拉湾 (95°E) 经度范围分别对应南亚季风区的西、中、东部。以南亚季风区中部为例, 图 4 给出了北半球夏季 (JJA) 纬向风和经向风沿 80°E 的高度-纬度剖面。从图 4a 可以看出, $0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间的南亚季风区内, 高低空纬向气流呈反相分布, 低层西风、高层东风, 有很强的纬向风垂直正切变, 其中低层西风气流非常深厚, 可伸展到 400 hPa。从图 4b 可以看出, 印度半岛地区的经向气流较弱, 相对纬向气流可忽略不计。但是, 孟加拉湾地区经向气流较强且高低空反相 (图略), 即低层南风、高层北风。

由此可见, 南亚夏季风以强大的纬向气流和纬向风垂直正切变为主, 而孟加拉湾地区的经向气流和经向风垂直正切变也较强。

3.2 东亚夏季风的流场结构配置

北半球夏季 (JJA), 由图 1a 和图 2a 可知, 100°E 以东的东亚季风区流场的经向分量较大, 且低层盛行偏南气流、高层盛行偏北气流, 经向气流具有很强的垂直斜压结构。受西太平洋副高和中纬

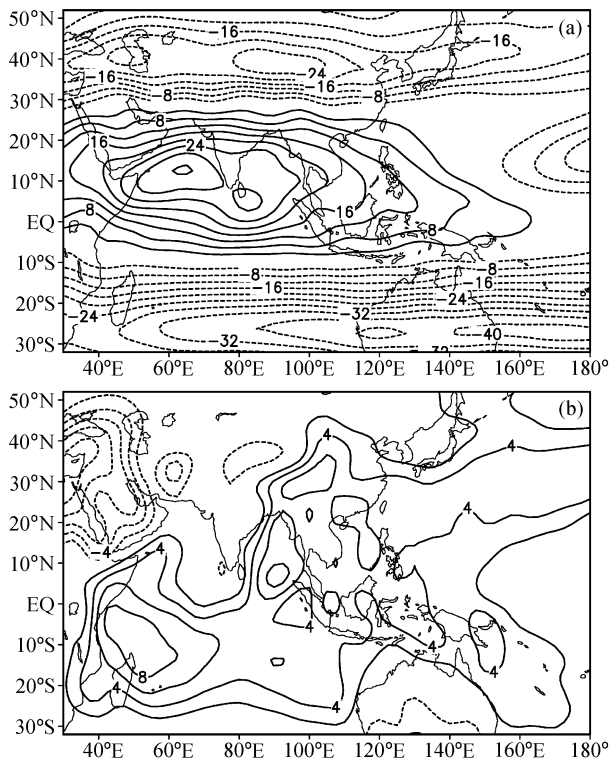


图 3 北半球夏季 (JJA) 的纬向风垂直切变 (a) 和经向风垂直切变 (b) (单位: m/s)

Fig. 3 The vertical shears of zonal wind (a) and meridional wind (b) in boreal summer (JJA). Units: m/s

西风急流的共同影响, 东亚季风区纬向气流的高低层配置相对复杂。从图 3a 可以看出, 东亚季风区以 25°N 为界可分为两个区域, 这与 Zhu 等^[10]的观点大致吻合。 25°N 以南地区为纬向风垂直正切变, 对应南海-西太平洋热带夏季风; 25°N 以北地区为纬向风垂直负切变所控制, 对应中国大陆-日本副热带夏季风。 25°N 附近纬向风垂直切变很弱, 说明此处纬向气流呈现垂直正压结构。从图 3b 可以看出, 东亚季风区有很强的经向风垂直正切变, 中心位于南海中北部和中国大陆地区。

中南半岛 (105°E)、中国东部 (120°E)、日本南部 (135°E) 经度范围分别对应东亚季风区的西、中、东部。以东亚季风区中部为例, 图 5 给出了北半球夏季 (JJA) 纬向风和经向风沿 120°E 的高度-纬度剖面。从图 5a 可以看出, $0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间的东亚热带季风区, 纬向气流高低层配置类似于南亚季风区, 即低层西风、高层东风, 为纬向风垂直正切变, 但整体强度明显弱于南亚季风区, 低层西风气流也不如南亚季风区深厚。东亚热带西南季风气流

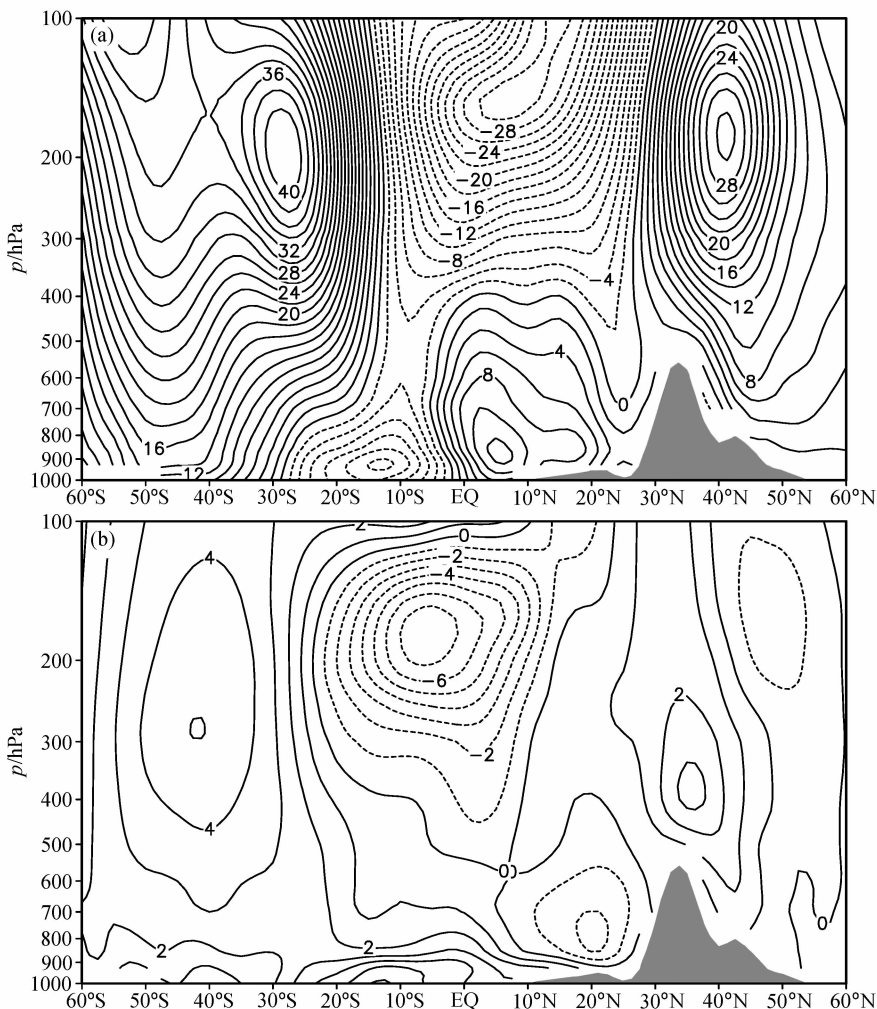


图4 北半球夏季(JJA)纬向风(a)和经向风(b)沿80°E的高度-纬度剖面(单位:m/s)。灰色阴影表示高原地形

Fig. 4 The altitude-latitude cross-sections of zonal wind (a) and meridional wind (b) along 80°E in boreal summer (JJA). Units: m/s. The shaded areas indicate plateau contours

与西太平洋副热带高压西侧偏南气流汇合北进,在25°N以北地区形成独特的东亚副热带季风,在高空西风急流控制下,形成较强的纬向风垂直负切变(见图3a)。从图5b可以看出,0°~45°N之间的东亚季风区内,盛行经向气流且高低空反相,即低层南风、高层北风,有较强的经向风垂直正切变,其中低层南风气流非常深厚,可伸展到300 hPa。

由此可见,东亚夏季风经向跨度大,盛行经向气流和经向风垂直正切变,而纬向气流高低层配置相对复杂。

3.3 北澳夏季风的流场结构配置

南半球夏季(DJF),由图1b和图2b可知,北澳季风区流场的纬向分量、经向分量很小,且低层盛行偏西气流、高层盛行偏东气流,纬向气流具

有较强的垂直斜压结构。图6给出了南半球夏季(DJF)的纬向风垂直切变和经向风垂直切变。从图6a可以看到,北澳季风区的纬向风垂直正切变很强,中心位于印度尼西亚地区。从图6b可以看到,此时东亚沿岸盛行冬季风,有很强的经向风垂直负切变;而北澳季风区盛行夏季风,经向风垂直切变值很小。

115°E、130°E、145°E分别对应北澳季风区的西、中、东部。以北澳季风区中部为例,图7给出了南半球夏季(DJF)纬向风和经向风沿130°E的高度-纬度剖面。从图7a可以看到,0°~15°S之间的北澳季风区内,纬向气流高低层配置类似于南亚夏季风,即低层西风,高层东风,有较强的纬向风垂直正切变,但强度明显弱于南亚夏季风。从图

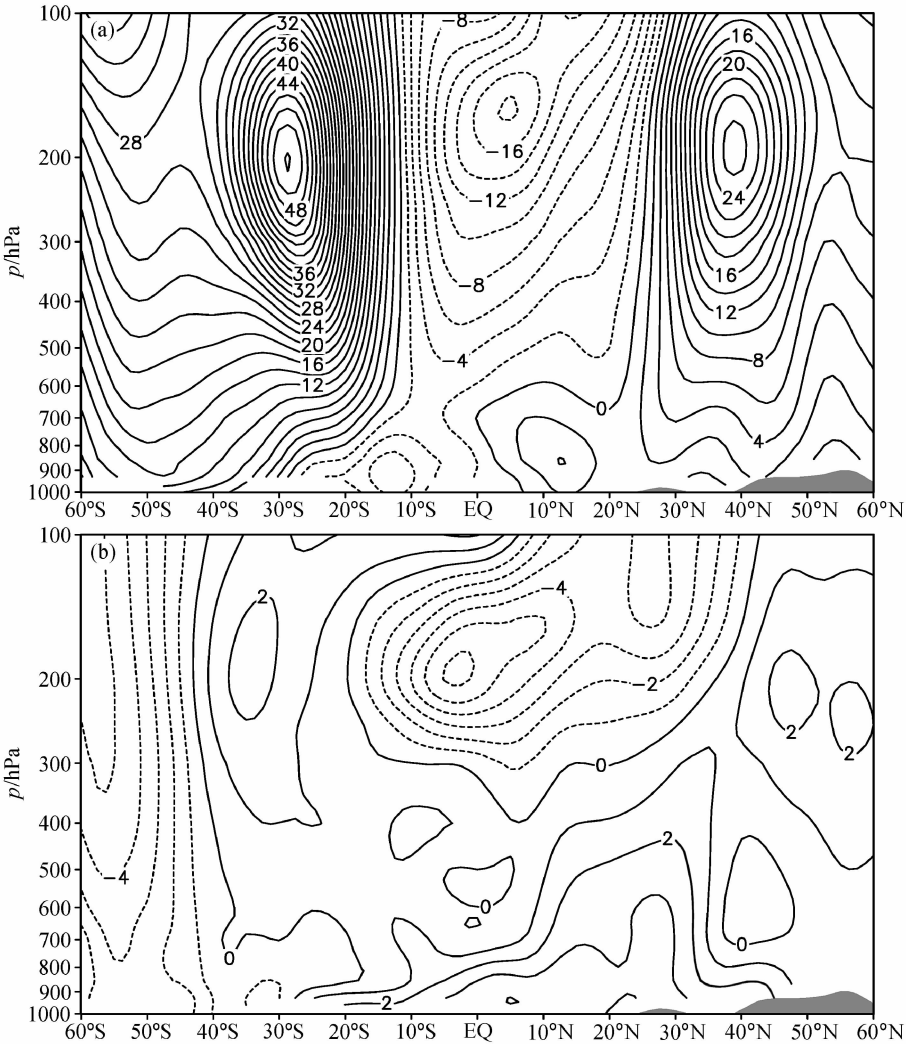


图 5 北半球夏季 (JJA) 纬向风 (a) 和经向风 (b) 沿 120°E 的高度-纬度剖面 (单位: m/s)。灰色阴影表示高原地形
Fig. 5 The altitude-latitude cross-sections of zonal wind (a) and meridional wind (b) along 120°E in boreal summer (JJA). Units: m/s. The shaded areas indicate plateau contours

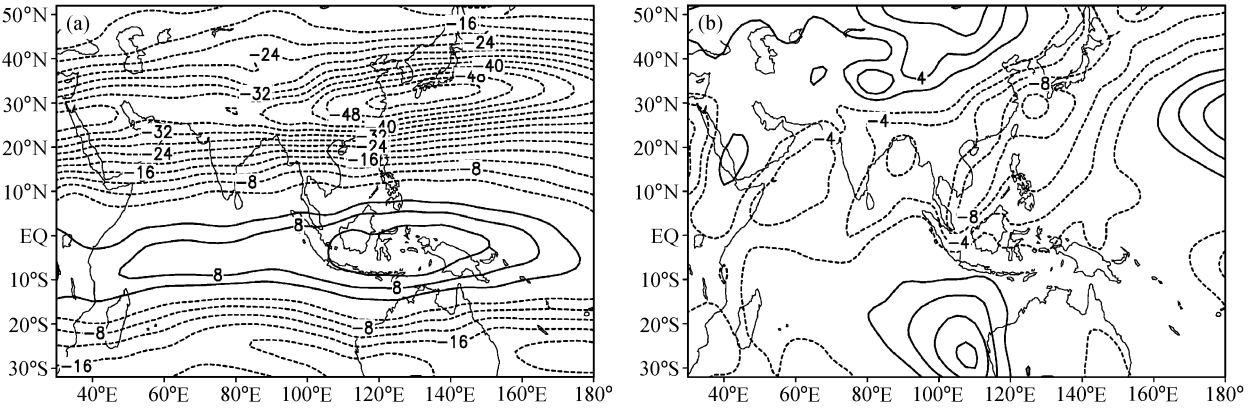


图 6 同图 3, 但为南半球夏季 (DJF)
Fig. 6 Same as in Fig. 3, but in austral summer (DJF)

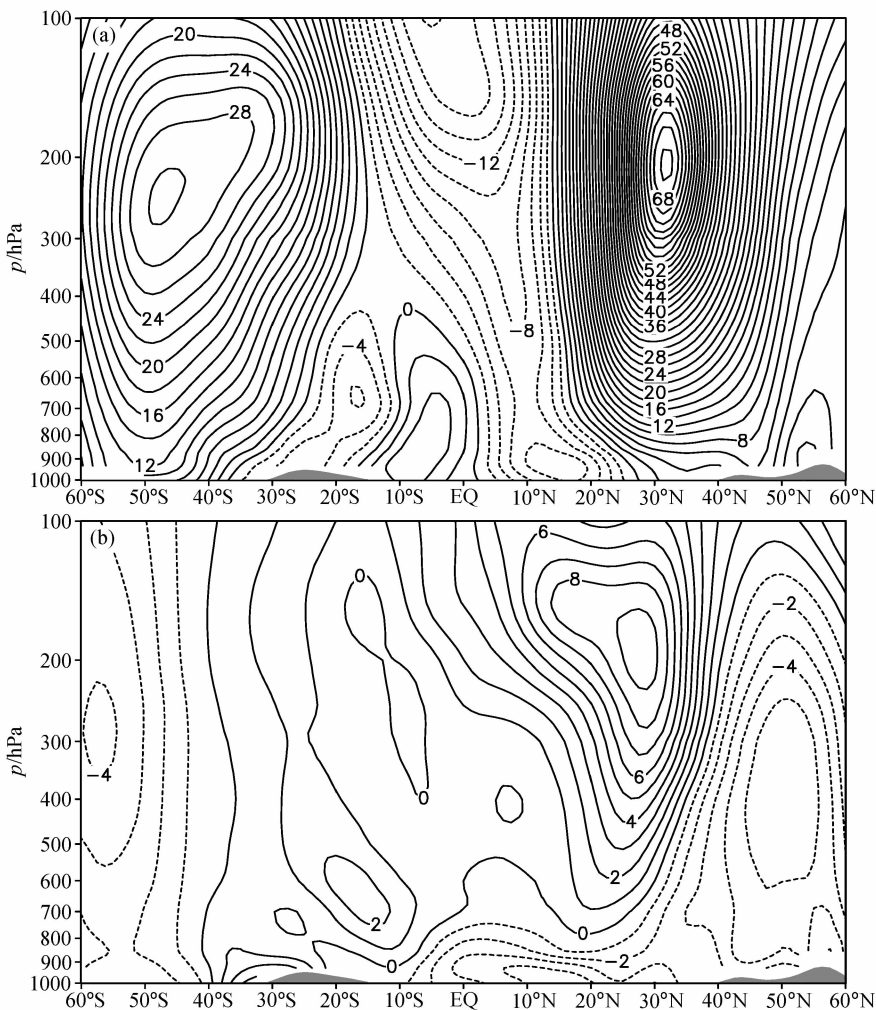


图 7 同图 4, 但为南半球夏季 (DJF) 沿 130°E 的高度-纬度剖面

Fig. 7 Same as in Fig. 4, but along 130°E in austral summer (DJF)

7b 可以看到, 北澳季风区的经向气流很弱, 相对纬向气流可忽略不计。

由此可见, 北澳夏季风经向跨度小, 以纬向气流和纬向风垂直正切变为主, 而经向气流和经向风垂直切变很弱。

以上分析表明, 三个夏季风子系统的流场结构特征明显不同。南亚夏季风和北澳夏季风以纬向气流和纬向风垂直正切变为主, 而东亚夏季风盛行经向气流和经向风垂直正切变。由海陆差异所致的热力梯度^[12]可能是维持不同季风区流场结构的原动力。在南亚季风区和北澳季风区, 与南北向海陆配置相对应, 以经向热力梯度为主; 而在东亚季风区, 与东西向海陆配置相对应, 有很强的纬向热力梯度。相对北澳夏季风而言, 南亚夏季风的低

层西风强而深厚, 而东亚夏季风的低层南风强而深厚, 这与青藏高原的热源效应^[18]对南亚季风区经向热力梯度和东亚季风区纬向热力梯度的加强有关。

4 热带季风区流场结构的季节演变

由于太阳辐射的季节变动和海陆热力的季节反差, 亚澳热带季风区的热力梯度产生季节性转向^[12], 从而导致季风环流及其结构的季节性转换。

4.1 纬向风结构的季节演变

南亚夏季风、东亚夏季风、北澳夏季风的热带纬向气流均呈现高低层反相, 即低层西风、高层东风。那么, 纬向气流的这种高低层配置是如何进行季节演变的? 为此, 对不同热带季风区的纬向风作

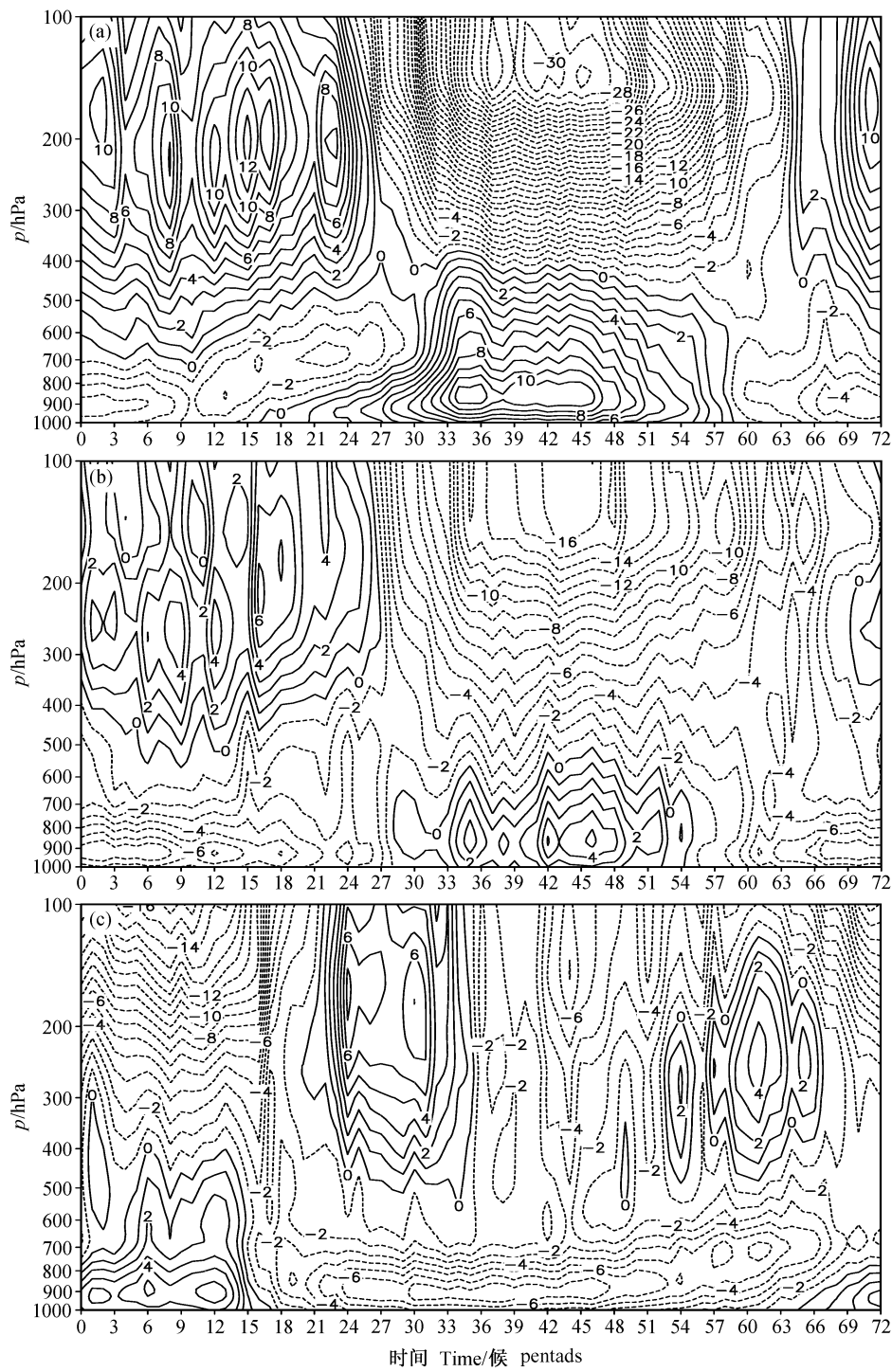


图 8 热带季风区纬向风的高度-时间剖面 (单位: m/s): (a) 南亚 (5°N~20°N, 70°E~90°E); (b) 东南亚 (5°N~20°N, 110°E~130°E); (c) 北澳 (5°S~15°S, 120°E~140°E)

Fig. 8 The altitude-time cross sections of zonal winds (m/s) averaged over tropical monsoon subregions such as South Asia (5°N-20°N, 70°E-90°E) (a), Southeast Asia (5°N-20°N, 110°E-130°E) (b) and North Australia (5°S-15°S, 120°E-140°E) (c)

高度-时间剖面 (图 8, 横坐标表示“中国候”, 即每年 72 候)。从图 8a 可以看到, 在南亚地区 (5°N~20°N, 70°E~90°E), 3 月底 (第 17 候) 低层已出现

西风, 但直到 5 月中 (第 27 候), 高层东风全面爆发, 高低层配置发生转向, 然后 6 月初 (第 31 候) 低层西风剧增, 并伸展到 400 hPa, 纬向气流的垂

直斜压结构一直维持到 10 月中 (第 58 候)。从图 8b 可以看到, 在东南亚地区 ($5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$), 5 月中 (第 27 候) 高层东风全面爆发, 5 月底 (第 29 候) 低层西风出现, 高低层配置发生转向, 6 月中 (第 33 候) 以后低层西风增强并伸展到 600 hPa, 纬向气流的垂直斜压结构一直维持到 9 月底 (第 54 候)。从图 8c 可以看到, 在北澳地区 ($5^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$), 11 月底 (第 66 候) 中高层为东风, 低层出现西风, 高低层配置发生转向, 但此时低层西风相对浅薄, 1 月初 (第 1 候) 西风突然增强并伸展到 500 hPa, 2 月底 (第 12 候) 在低层西风达到最强, 纬向气流的垂直斜压结构维持到 3 月中 (第 16 候)。由此可见, 亚澳季风系统的季节转换表现为热带季风区纬向气流高低层配置的转向, 即夏季风爆发时从低层东风、高层西风转

换为低层西风、高空层风, 夏季风撤退时从低层西风、高层东风转换为低层东风、高空层风。

4.2 经向风结构的季节演变

北半球夏季 (JJA), 孟加拉湾和南海北部地区有很强的经向风垂直正切变 (图 3b), 即低层南风、高层北风。那么, 经向气流的这种高低层配置是如何进行季节演变的? 为此, 对孟加拉湾和南海北部的经向风作高度-时间剖面 (如图 9, 横坐标表示“中国候”, 即每年 72 候。从图 9a 可以看到, 在孟加拉湾 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$), 4 月初 (第 19 候) 低层已出现南风, 但直到 6 月初 (第 31 候) 高层北风爆发, 同时低层南风伸展到 300 hPa, 高低层配置发生转向, 即低层南风、高层北风, 标志着南亚夏季风经向环流开始建立, 并维持到 9 月中 (第 52 候)。从图 9b 可以看到, 在南海北部 (10°N

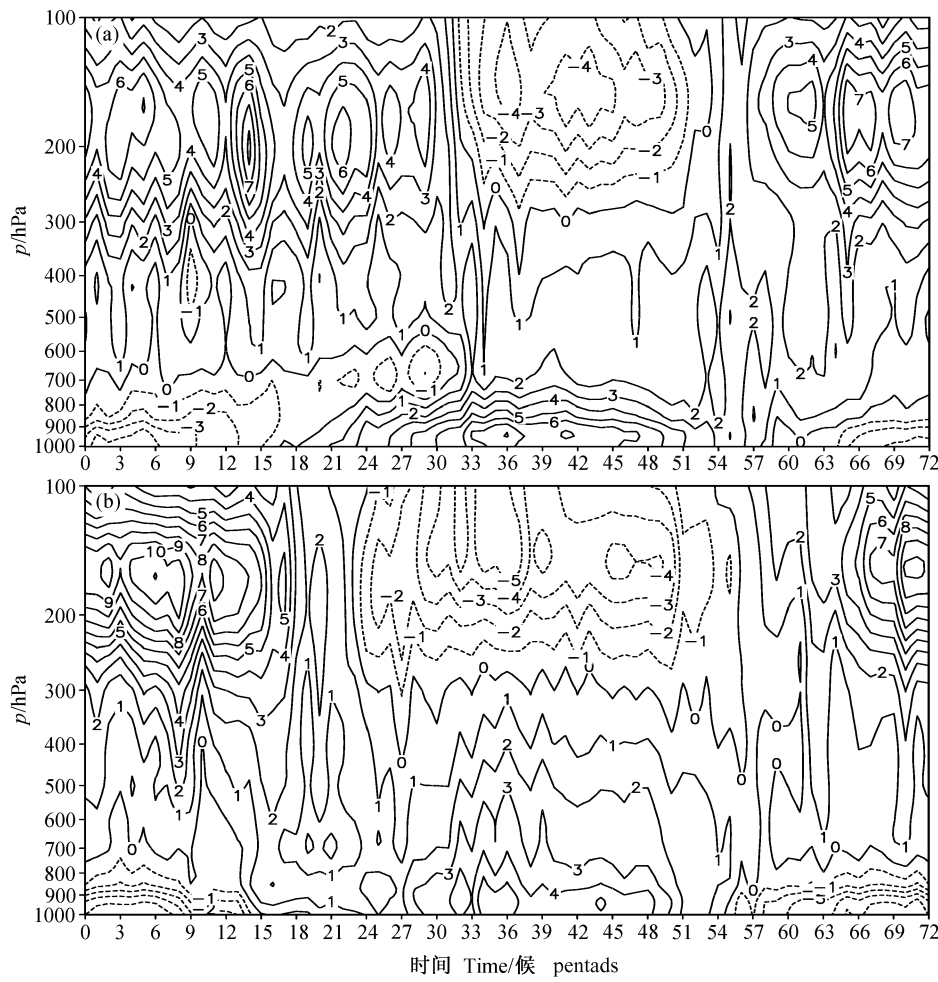


图 9 亚洲热带季风区经向风的高度-时间剖面 (单位: m/s): (a) 孟加拉湾 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$); (b) 南海北部 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)

Fig. 9 The altitude-time sections of meridional winds (m/s) averaged over Asian tropical monsoon subregions such as the Bay of Bengal ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$) (a) and the northern South China Sea ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) (b)

~20°N, 110°E~120°E), 3月中(第15候)低层已出现南风, 4月底(第24候)高层北风全面爆发, 高低层配置发生转向, 即低层南风、高层北风, 5月中(第27候)低层南风增强并伸展到300 hPa, 标志着东亚夏季风经向环流开始建立, 并一直维持到9月底(第54候)。南海北部高层北风爆发的时间比孟加拉湾提前近1个月, 这与南亚高压的季节性移动有关^[19]。

从热带季风区纬向风结构的季节演变来看, 南亚夏季风的纬向气流垂直正切变最强、季节内变化最平稳、维持时间长, 东亚夏季风和北澳夏季风的纬向气流垂直正切变较弱、季节内变化剧烈, 而北澳夏季风的维持时间最短。从亚洲热带季风区经向风结构的季节演变来看, 南亚夏季风的经向环流弱、季内变化平稳、维持时间短, 东亚夏季风的经向环流强、季内变化剧烈、维持时间长。

5 结论与讨论

本文利用1979~2003年的NCEP/NCAR再分析资料, 对亚澳季风各夏季风子系统(南亚夏季风、东亚夏季风、北澳夏季风)流场结构及其季节演变的气候学特征进行对比研究, 结果表明, 三个夏季风子系统的动力结构特征相当不同。

南亚夏季风和北澳夏季风属纬向型热带季风, 盛行纬向气流和纬向风垂直正切变, 且高低层纬向气流呈反相配置, 即低层西风、高层东风, 但北澳夏季风的强度明显弱于南亚夏季风。而东亚夏季风为经向型季风, 盛行经向气流和经向风垂直正切变, 且高低层经向气流呈反相配置, 即低层南风、高层北风, 而纬向气流高低层配置较为复杂: 25°N以南地区对应南海-西太平洋热带夏季风, 低层西风, 高层东风, 为纬向风垂直正切变, 强度与北澳夏季风相当; 25°N以北地区对应中国大陆-日本副热带夏季风, 高低层均为西风气流, 有较强的纬向风垂直负切变。

热带季风区纬向气流高低层配置的季节性转向是亚澳季风系统季节转换的主要特征。夏季风爆发时, 从低层东风、高层西风转换为低层西风、高层东风; 夏季风撤退时, 从低层西风、高层东风转换为低层东风、高层西风。从热带季风区流场结构的季节演变过程看, 三个夏季风子系统均为垂直斜压结构。相对北澳夏季风而言, 南亚夏季风的低层西

风强而深厚, 而东亚夏季风的低层南风强而深厚。除季风经向跨度和流场垂直切变强度不同外, 三个夏季风子系统的差异性还表现在季内稳定性和维持时间长短等方面。南亚夏季风的季节内变化平稳, 而东亚夏季风和北澳夏季风的季节内变化剧烈; 东亚夏季风的维持时间最长, 而北澳夏季风的维持时间最短。

三个夏季风子系统的流场结构及其季节演变特征存在明显差异, 可能与不同季风区热力梯度的季节性转向及其与季节内振荡的位相锁定^[20]密切相关。然而, 在亚澳季风区, 流场结构的季节突变和热力梯度的季节转向几乎是同步的, 两者之间的因果关系或正反馈作用有待进一步探讨。同时, 各夏季风子系统的流场动力结构对不同季风区夏季天气和气候形成的重要性也值得深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Ramage C. *Monsoon Meteorology*. International Geophysics Series, 15, Academic Press, San Diego, Calif., 1971. 4~6
- [2] Webster P J. The elementary monsoon. *Monsoons*, Fein J S and Stephens P L, Eds., Wiley-Interscience Publication, New York, 1987. 3~32
- [3] 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**: 433~448
Zeng Q C, Li J P. Interaction between the Northern and Southern Hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**: 433~448
- [4] Yasunari T, Seki Y. Role of the Asian monsoon on the inter-annual variability of the global climate system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 177~189
- [5] Manton M, McBride J. Recent research on the Australian monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 275~285
- [6] Ding Y H. *Monsoons over China*. Kluwer Academic Publishers, 1994. 419pp
- [7] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. *地理学报*, 1934, **1**: 1~26
Zhu K Z. Southeast monsoon and rainfall in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, **1**: 1~26
- [8] 涂长望, 黄仕松. 夏季风进退. *气象杂志*, 1944, **18**: 1~20
Tu C W, Huang S S. The advance and retreat of the summer monsoon. *Meteor. Mag.* (in Chinese), 1944, **18**: 1~20
- [9] Huang R H, Zhou L T, Chen W. The progresses of recent studies of the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 55~69
- [10] Zhu Q G, He J H, Wang P X. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**: 367~387
- [11] Tao S Y, Chen L X. 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
- [12] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp
- Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. *The East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp
- [13] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (in Chinese), 1992, **118**: 877~926
- [14] 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**: 34~42
- He J H, Zhu Q G, Murakami M. T_{BB} data-revealed features of Asian-Australian monsoon seasonal transition and Asian summer monsoon establishment. *J. Tropical Meteor.* (in Chinese), 1996, **12**: 34~42
- [15] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区的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**: 460~469
- Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese J. Atmos. Sci.* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22**: 460~469
- [16] 陈隆勋, 高辉, 何金海, 等. 夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征. 中国科学 (D), 2004, **34**: 171~179
- Chen L X, Gao H, He J H, et al. Zonal propagation of kinetic energy and convection in the South China Sea and Indian monsoon regions in boreal summer. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2004, **34**: 171~179
- [17] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [18] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 278pp
- Yeh D Z, Gao Y X. *Meteorology over the Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 278pp
- [19] Wu R G, Wang B. Multi-stage onset of the summer monsoon over the western North Pacific. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 277~289
- [20] Ding Y H. Seasonal march of the East-Asian summer monsoon. *East Asian Monsoon*, Chang C P, Ed., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. 3~53