

亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究

II. 夏季风水汽输送

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 1979~2002 年的 ERA-40 和 NCEP/NCAR 逐日再分析资料以及 CMAP 降水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)水汽输送的气候学特征及其与夏季降水的关系。分析表明:各夏季风子系统水汽输送通量主要取决于低层季风气流,南亚夏季风和北澳夏季风以纬向水汽输送为主,而东亚夏季风有很强的经向水汽输送。分析也证实,亚澳季风区的夏季风降水主;要源于水汽输送的辐合,而且 ERA-40 资料对夏季风水汽输送辐合的描述能力强于 NCEP/NCAR 资料。此外,受低层季风气流结构的影响,三夏季风子系统水汽输送辐合的动力机理存在明显差异,南亚夏季风和北澳夏季风的水汽输送辐合主要由低层西风气流的风场辐合所造成,而东亚夏季风的水汽输送辐合则由低层南风气流的风场辐合和季风湿平流共同作用造成。因此,东亚夏季风降水有别于南亚夏季风降水和北澳夏季风降水。

关键词 南亚夏季风 东亚夏季风 北澳夏季风 水汽输送 季风降水

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0766-13

中图分类号 P425

文献标识码 A

The Comparison of Climatological Characteristics among Asian and Australian Monsoon Subsystems. Part II: Water Vapor Transport by 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 Climatological characteristics of water vapor transport associated with various summer monsoon subsystems of the Asian-Australian monsoon, i. e., the South Asian summer monsoon (SASM) over area (0° - 25° N, 60° E- 100° E) and the East Asian summer monsoon (EASM) over area (0° - 45° N, 100° E- 140° E) in boreal summer, and the North Australian summer monsoon (NASM) over area (0° - 15° S, 110° E- 150° E) in austral summer, are investigated by using the ERA-40 daily reanalysis data, the NCEP/NCAR daily reanalysis data and the Climate Prediction Center (CPC) merged precipitation estimates for the period of 1979-2002. Due to concentration of voluminous water vapor in the lower troposphere over tropical oceans such as the tropical Indian Ocean and the western Pacific, water vapor transport fluxes integrated vertically from earth's surface to the tropopause in the Asian-Australian monsoon regions mainly depend on low-level flows of these monsoon subsystems. Since westerly flow prevails in the lower layers of the SASM and NASM subsystems, positive zonal water vapor transport, i. e., eastward water vapor transport from the west, is major in the SASM and NASM regions. But the southerly flow prevails in the lower layers of the EASM subsystem, positive meridional water vapor transport, i. e., northward water vapor transport from the south, is significant in the EASM region. Moreover, the analysis results also show that the monsoon rainfall in the SASM, NASM and EASM regions is mainly caused by the moisture flux convergence which can

收稿日期 2006-05-09, 2006-06-29 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600, 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP07118

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

be better described by the ERA-40 reanalysis data than the NCEP/NCAR reanalysis data. Besides, it can be seen clearly that there are obvious differences in the dynamical mechanism of the moisture flux convergence among SASM, EASM and NASM subsystems, which is controlled by summer wind structure in various monsoon regions. The moisture flux convergence in the SASM and NASM regions is mainly due to the convergence of low-level westerly, but that in the EASM region is mainly due to both the convergence of low-level southerly and the wet advection caused by the monsoon flow. Therefore, it may be well explained that the physical mechanism of monsoon rainfall in the EASM region is different from that in the SASM and NASM regions.

Key words the South Asian summer monsoon, the East Asian summer monsoon, the North Australian summer monsoon, water vapor transport, monsoon rainfall

1 引言

水循环是一个与人类活动密切相关的复杂过程, 涉及气候系统的各个环节, 包括大气、海洋、陆地、生物圈等, 加强对水循环过程的研究具有重大意义。作为全球大气环流的重要组成部分, 亚洲季风和澳洲季风在全球气候变化中扮演着重要的角色^[1~3]。亚澳季风, 尤其是夏季风, 从太平洋或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, 从而给季风区各国的国民经济和人民生活带来严重影响。早在 70 多年前, 竺可桢^[4]首先提出东亚夏季风和中国降水的可能关系, 而后续的一些研究^[5~8]说明水汽输送对于区域水分平衡起着重要作用。

季风环流是水汽输送的载体, 水汽输送及其辐合直接影响到降水^[7, 8]。随着“气候变率和可预报性 (CLIVAR)”和“全球能量和水分循环试验 (GEWEX)”等大型国际研究实验计划的实施以及它们的联合“协同强化观测 (CEOP)”, 水汽输送与夏季风降水的关系成为国内外气象学者关注的热门问题^[9~19]。由于海陆配置的差异和青藏高原的影响, 亚洲夏季风环流具有显著的区域性, Tao 等^[20]系统地指出东亚夏季风与印度夏季风的相对独立性。黄荣辉等^[10]进一步研究了东亚季风区与印度季风区的夏季水汽输送特征, 指出印度夏季风以纬向水汽输送为主, 东亚夏季风的经向水汽输送大于纬向水汽输送, 而且水汽平流和风场辐合对两季风区夏季降水的贡献存在明显差异。另一方面, 从更大的空间尺度看, 亚洲夏季风和北澳夏季风位于不同半球, 从属于不同季节, 其环流结构也必然不同。陈际龙等^[21]的研究表明, 南亚 (印度) 夏季风和北澳夏季风局限于热带地区, 盛行纬向气流和纬向风垂直切变, 以纬向型斜压结构为主; 而东亚

夏季风跨越热带和副热带地区, 盛行经向气流和经向风垂直切变, 呈现经向型斜压结构。然而, 与不同季风区的夏季流场结构相对应, 水汽输送对各夏季风降水的影响过程及机理有何异同? 目前涉及这方面的工作并不多^[10], 值得进一步深入研究。

当前, 国际上常用于气候研究的再分析资料主要有两套: NCEP/NCAR^[22]和 ERA-40^[23]。近年来, NCEP/NCAR 资料被广泛应用于水汽输送的研究中^[12~19], 然而这两套资料必然存在某些差异, 资料的选择不当可能导致虚假的结论。鉴于上述原因, 本研究利用 1979~2002 年的 ERA-40 和 NCEP/NCAR 逐日再分析资料以及 CMAP 逐月降水资料^[24]来剖析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) 水汽输送的气候学特征, 探讨水汽输送辐合与各夏季风降水的关系及其动力机理, 并以此来检验两套再分析资料描述季风区水汽输送的能力。

2 亚澳季风区的平均水汽输送特征

由于大气水汽主要集中在对流层, 因此, 单位气柱内整层水汽输送通量计算公式为

$$Q = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} q \mathbf{V} dp = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} q(u, v) dp, \quad (1)$$

其中, q 和 \mathbf{V} 分别表示该单位气柱各层大气的比湿和矢量风, u 和 v 为纬向风和经向风分量, p_s 是地表面气压, g 是重力加速度。由于水汽和风场随时间变化很大, 为精确起见, 先利用公式 (1), 由 ERA-40 逐日再分析资料计算出每日的水汽输送通量, 然后按季对 1979~2002 年作气候平均。北半球夏季取 6、7、8 三个月 (JJA) 平均, 南半球夏季取 12、1、2 三个月 (DJF) 平均。

2.1 各夏季风子系统的水汽输送通量

需要强调的是, 文中关注的各夏季风子系统

统^[21]主要包括北半球夏季 (JJA) 的南亚夏季风 (0°~25°N, 60°E~100°E)、东亚夏季风 (0°~45°N, 100°E~140°E) 和南半球夏季 (DJF) 的北澳夏季风 (0°~15°S, 110°E~150°E), 分别对应于图 1 中的矩形框 SASM、EASM 和 NASM。当然, 区域界限并不严格, 遇到具体问题时必须灵活处理。

图 1 给出了亚澳季风区的平均水汽输送通量。北半球夏季 (JJA), 亚洲南部和东部盛行夏季风, 从图 1a 可见, 南亚季风区以纬向水汽输送为主, 索马里急流经阿拉伯海转向的水汽输送为南亚夏季风降水提供充足的水汽; 并且, 东亚季风区有很强的经向水汽输送, 供给东亚夏季风降水的水汽来源要比南亚夏季风复杂得多。正如黄荣辉等^[10]所指出的那样, 到达东亚地区的水汽输送有 4 支, 包括西南季风从孟加拉湾带来的水汽、越赤道气流从南海带来的水汽、东南季风从热带西太平洋带来的水汽

和中纬西风带扰动带来的水汽。南半球夏季 (DJF), 印度尼西亚和澳洲北部盛行夏季风。从图 1b 可见, 北澳季风区的纬向水汽输送通量明显大于经向水汽输送通量。东亚冬季风从南海和西太平洋地区携带大量水汽越赤道后转向, 在澳大利亚和印度尼西亚之间汇合成水汽辐合带, 直接导致北澳夏季风降水。

由于大气中的大部分水汽集中在热带海洋地区的对流层低层, 而且图 1 所示的水汽输送通量与亚澳季风区的低空大尺度环流 (图略) 非常相似。与此相对应, 南亚夏季风和北澳夏季风以正的纬向水汽输送为主, 即由西向东输送水汽; 而东亚夏季风盛行正的经向水汽输送, 即由南向北输送水汽。因此, 各夏季风子系统的水汽输送主要表现为热带暖湿水汽随低空季风气流的越赤道扩展, 这与 Qian 等^[25]的季风定义一致。

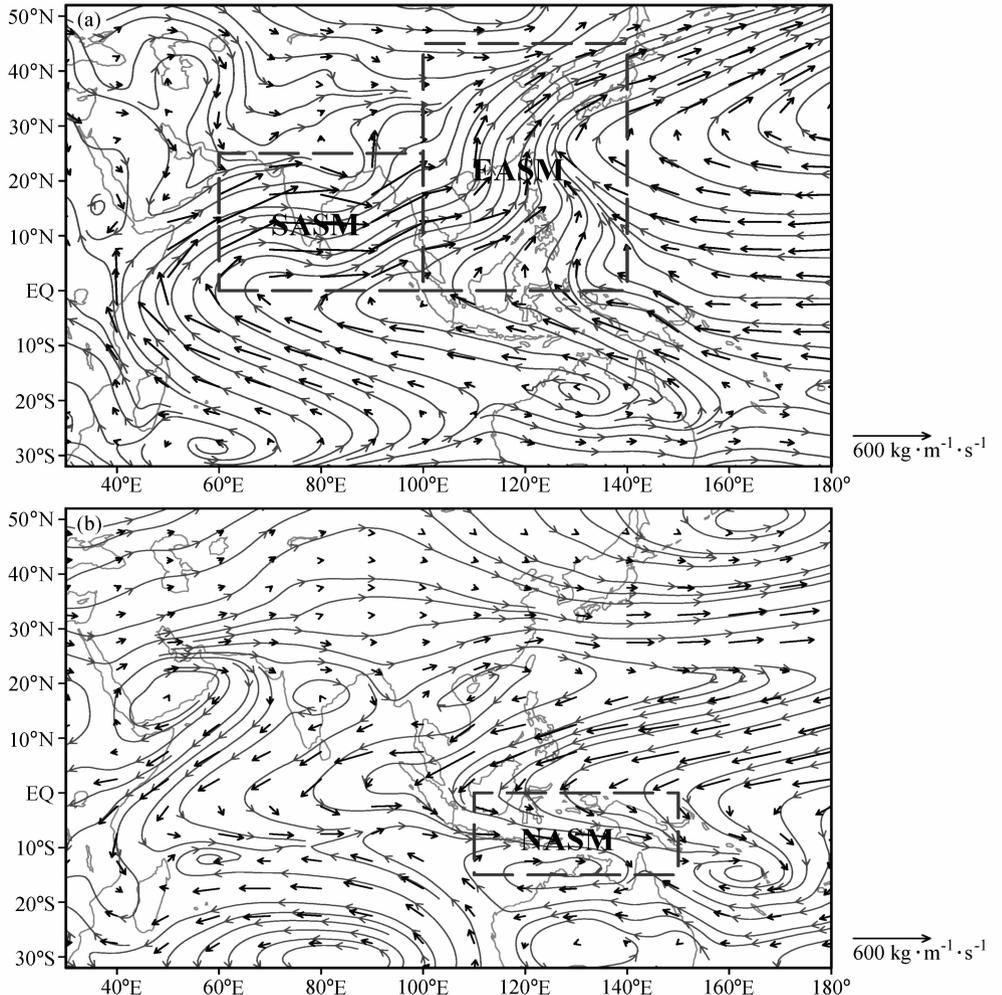


图 1 北半球夏季 (a) 和南半球夏季 (b) 的平均水汽输送通量

Fig. 1 Climatological mean water vapor transport flux from the ERA-40 reanalysis in (a) boreal summer and (b) austral summer

2.2 两套再分析资料描述水汽输送通量的差异性

利用公式 (1), 由 NCEP/NCAR 逐日再分析资料求出亚澳季风区的夏季平均水汽输送通量 (图略), 与上述由 ERA-40 资料分析所得的结果基本一致, 这似乎说明两套再分析资料对亚澳季风区平均水汽输送通量的描述能力相当。然而, NCEP/NCAR 资料与 ERA-40 资料在细节上存在一定差异, 图 2 给出了两套再分析资料的平均水汽输送通量之差, 阴影表示 t 检验信度超过 95%。从图 2a 可以看到, 北半球夏季 (JJA) 南亚季风区的平均水汽输送通量之差比东亚季风区显著, 相对 ERA-40 资料而言, NCEP/NCAR 资料在南亚季风区的纬向水汽输送偏弱, 越赤道气流区的经向水汽输送也明显偏弱, 东亚季风区的经向水汽输送偏弱但不显著。从图 2b 可以看到, 南半球夏季 (DJF) 北澳季

风区的平均水汽输送通量之差较显著, 相对 ERA-40 资料而言, NCEP/NCAR 资料在北澳季风区的纬向水汽输送偏弱。

3 水汽输送辐合与夏季风降水的关系

若忽略大气中液态和固态水, 那么, 在大气中单位气柱内的水分收支平衡方程^[8]为

$$\frac{\partial W}{\partial t} = C + (E - P), \quad (2)$$

式中, W 表示可降水量, 即单位气柱内水汽含量, E 是蒸发, P 是降水, 而 C 是水汽输送辐合。(2) 式表明单位气柱内水汽含量的变化与此气柱内水汽的辐合辐散、从气柱下垫面蒸发而来的水汽以及向气柱下垫面落下的降水有关。对于较长时间 (月或季) 的平均, 水汽含量的变化可忽略不计, (2) 式简

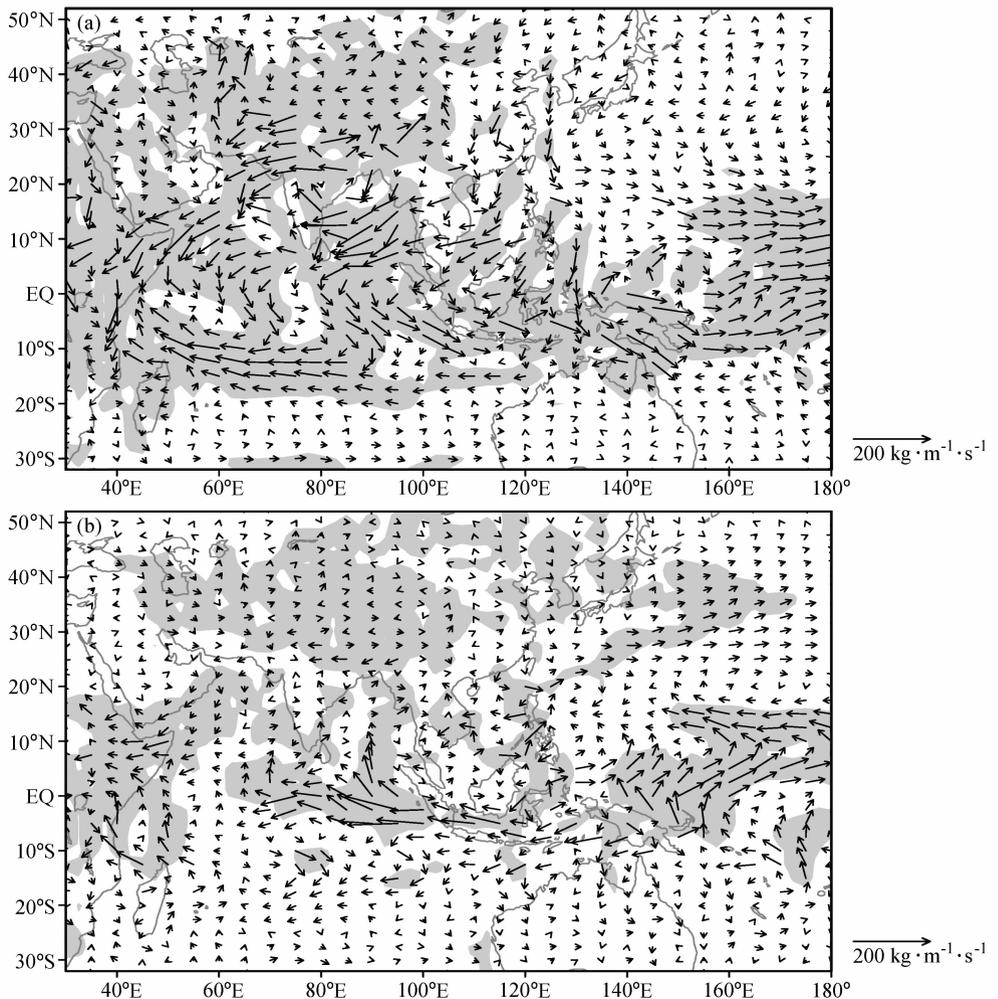


图 2 北半球夏季 (a) 和南半球夏季 (b) NCEP/NCAR 资料与 ERA-40 资料的平均水汽输送通量之差。阴影: t 检验信度超过 95%

Fig. 2 Difference of climatological mean water vapor transport flux between the NCEP/NCAR reanalysis and the ERA-40 reanalysis in boreal summer (a) and austral summer (b). Shading denotes significance at 95% confidence level of t -test.

化为

$$\bar{P} \approx \bar{C} + \bar{E}. \quad (3)$$

(3)式说明了某个地区在某时段(月或季)内平均的降水主要来源于这个时段中流进此地区水汽的辐合以及由此地区蒸发而来的水汽。水汽输送辐合 C 的计算公式为

$$C = -\nabla \cdot \mathbf{Q} = -\frac{1}{g} \nabla \cdot \left(\int_{100}^{p_s} q \mathbf{V} dp \right). \quad (4)$$

利用公式(1)和(4),由ERA-40逐日再分析资料分别计算出每日的水汽输送辐合,然后按季对1979~2002年作气候平均。为了探讨水汽输送和季风降水的对应关系,水汽输送辐合 C 的单位转化为 mm/d。

3.1 水汽输送辐合对各夏季风降水的贡献

图3给出了北半球夏季(JJA)的平均CMAP降水率和ERA-40水汽输送辐合。从图3a可以看到,除赤道以南的热带印度洋、海洋大陆和西太平洋地区有大量降水外,强降水主要分布在亚洲季风区,包括阿拉伯海东部、印度半岛、孟加拉湾、中南半岛和南海地区的热带夏季风降水,以及中国中东部、韩国和日本的副热带夏季风降水。对比图3a和3b可见,亚洲夏季风强降水与ERA-40资料的水汽输送辐合正值区有很好的对应,且数值大小和中心位置比较接近。图4给出了南半球夏季(DJF)的平均CMAP降水和ERA-40水汽输送辐合。从图4a可以看到,除热带印度洋、海洋大陆和西太平

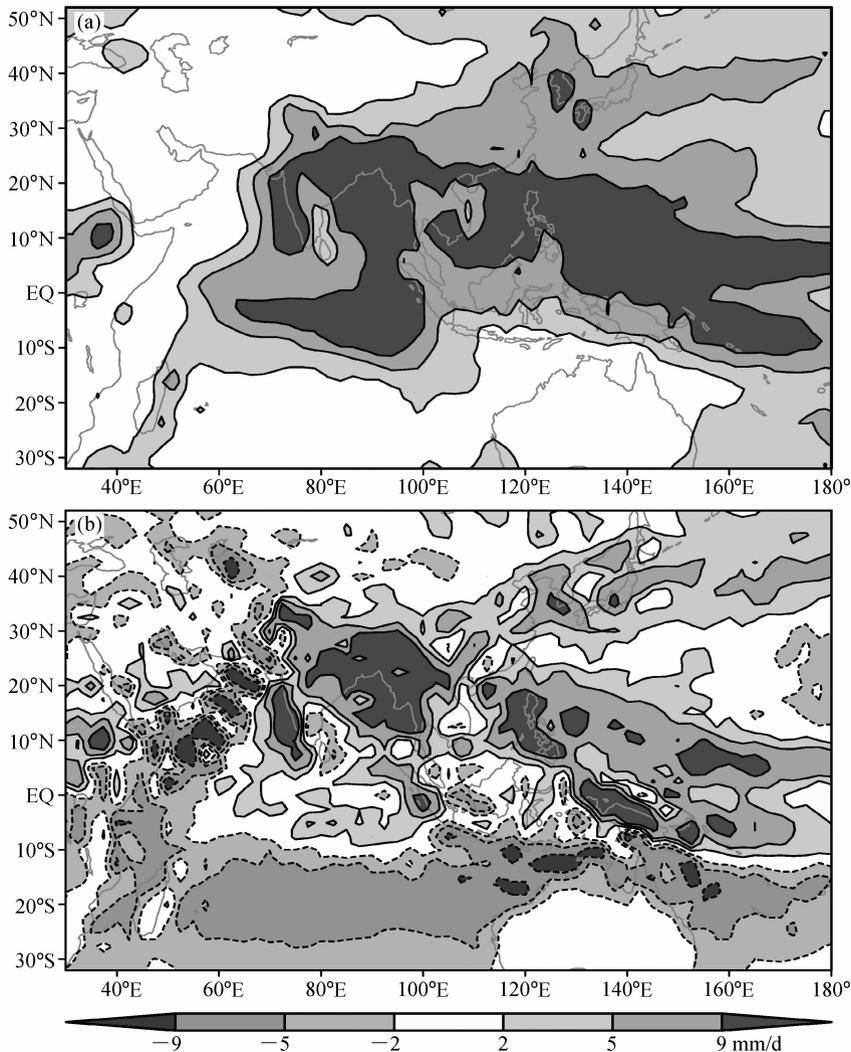


图3 北半球夏季(JJA)的平均CMAP降水率(a)和ERA-40水汽输送辐合(b)。零线略去

Fig. 3 Climatological mean CMAP precipitation rate (a) and moisture flux convergence from the ERA-40 reanalysis (b) in boreal summer (JJA). Zero contour is not shown

洋的部分地区有大量降水外，强降水主要分布在北澳季风区，包括澳大利亚北部和印度尼西亚的夏季风降水。对比图 4a 和 b 可见，北澳夏季风强降水与 ERA-40 资料的水汽输送辐合正值区有很好的对应，且数值大小和中心位置比较接近。

3.2 水平衡方程对再分析资料的可靠性检验

当然，夏季风区蒸发的水汽由部分降水转化而来，影响各夏季风降水的水汽主要属于外界输入，结合(3)式可知，水汽输送辐合应与各夏季风强降水相对应且数值相当，上述 ERA-40 资料的分析也证实这一点，因此，水汽输送辐合是表征夏季风降水的最重要指标，以此为依据可以检验再分析资料的可靠程度。

利用公式 (1)、(4)，由 NCEP/NCAR 逐日

再分析资料求出亚澳季风区的夏季平均水汽输送辐合(如图 5 所示)。对比图 3~5 可知，NCEP/NCAR 资料的水汽输送辐合值区与夏季风强降水的对应程度不如 ERA-40 资料，且数值大小和中心位置的差异相对较大。由此可见，ERA-40 资料对夏季风水汽输送辐合的描述能力明显强于 NCEP/NCAR 资料，为此，本文以下内容仅选用 ERA-40 资料。

4 夏季风水汽输送辐合的动力机理

C 表示水汽输送的源汇，若 $C < 0$ ，即为水汽辐散，或为水汽输送源；相反，若 $C > 0$ ，即为水汽辐合，或为水汽输送汇。若不考虑地表(陆面或海面)状况的影响，水汽输送辐合 C 可分解为

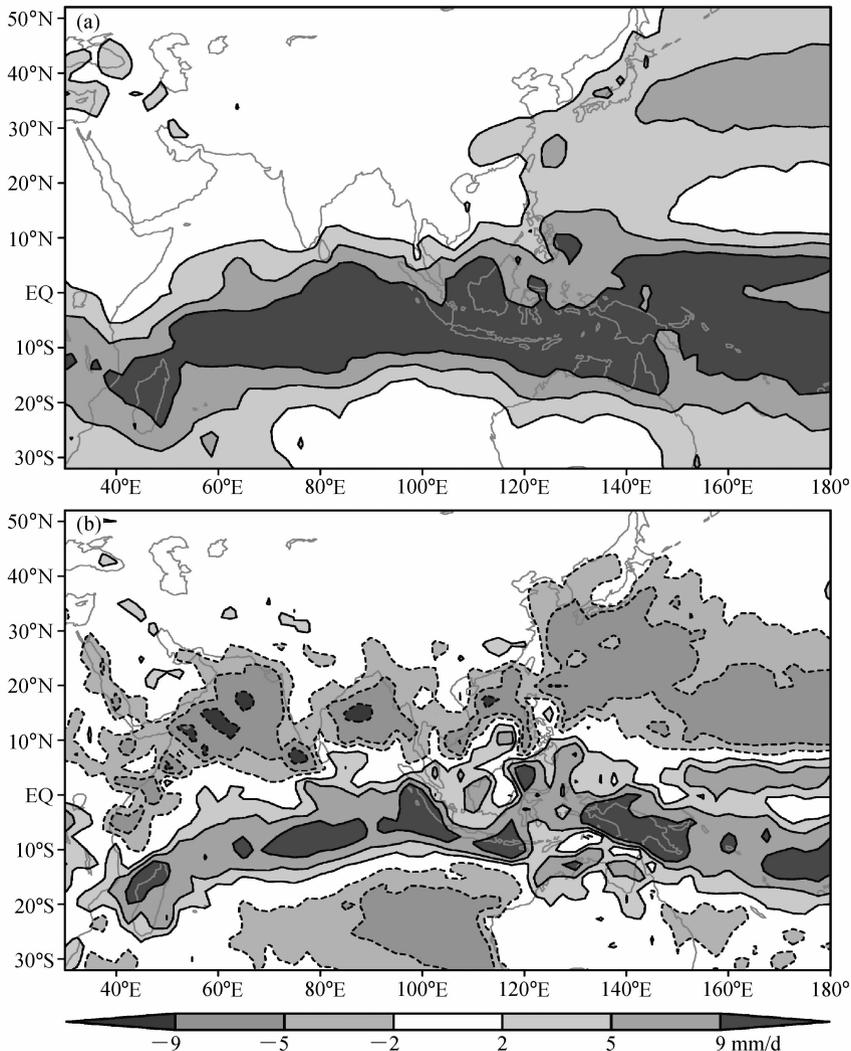


图 4 同图 3，但为南半球夏季(DJF)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but in austral summer (DJF)

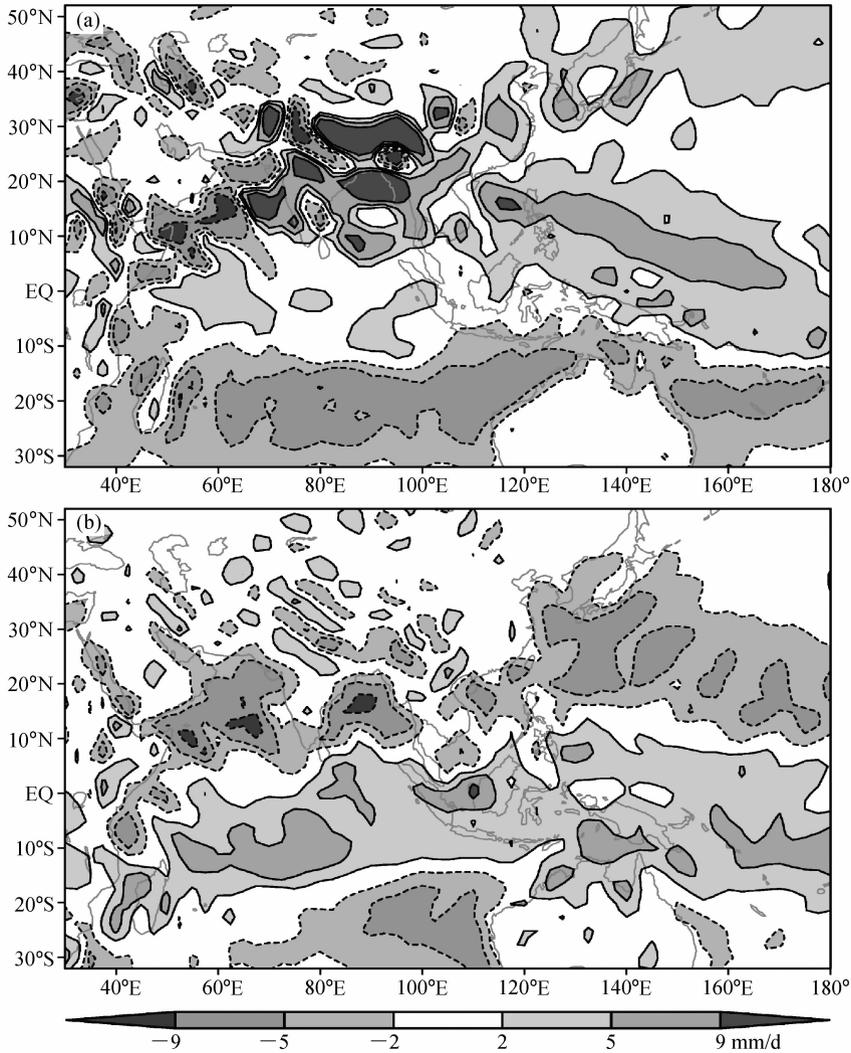


图5 北半球夏季 (a) 和南半球夏季 (b) 的 NCEP/NCAR 平均水汽输送辐合。零线略去

Fig. 5 Climatological mean moisture flux convergence from the NCEP/NCAR reanalysis in boreal summer (a) and austral summer (b).

Zero contour is not shown

$$C = -\nabla \cdot \mathbf{Q} \approx -\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} \nabla \cdot (q\mathbf{V}) dp = -\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} (q \nabla \cdot \mathbf{V}) dp - \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} (\mathbf{V} \cdot \nabla q) dp. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,水汽输送源汇由两部分组成:风场辐合项(即右端第一项)、水汽平流项(即右端第二项)。由(3)式和(5)式可知,若亚澳季风区的风场辐合项为正(即风场辐合)或水汽平流项为正(即湿平流),这有利于水汽输送辐合和夏季风降水;反之,若亚澳季风区的风场辐合项为负(即风场辐散)或水汽平流项为负(即干平流),这不利于水汽输送辐合和夏季风降水。

4.1 风场辐合项和水汽平流项对各夏季风降水的贡献

在球坐标系中,(5)式中的风场辐合项和水汽平流项分别可表示为

$$-\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} (q \nabla \cdot \mathbf{V}) dp = -\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} \frac{q}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) dp, \quad (6)$$

$$-\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} (\mathbf{V} \cdot \nabla q) dp = -\frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right) dp, \quad (7)$$

其中, λ 、 φ 分别为经、纬度, a 是地球半径,这里 $\cos \varphi > 0$ ($-\pi/2 < \varphi < \pi/2$)。利用公式(6)和(7),

由 ERA-40 逐日资料分别计算出每日水汽输送辐合的风场辐合项和水汽平流项，然后按季对 1979~2002 年作气候平均。

图 6 给出了北半球夏季 (JJA) 平均水汽输送辐合的风场辐合项和水汽平流项。从图 6a 可以看到，亚洲季风区的风场辐合项为正，但南亚季风区由风场辐合引起的水汽输送辐合明显大于东亚季风区。从图 6b 可以看到，南亚季风区的水汽平流项为负，即干平流引起水汽输送辐散，而东亚副热带季风区 (包括中国东部、韩国和日本) 的水汽平流项为正，即湿平流引起水汽输送辐合，这与黄荣辉等^[10]的结果类似。对比图 6a 和 b 可知，南亚夏季风水汽输送辐合主要由季风气流的风场辐合所造成，而东亚夏季风 (尤其是东亚副热带夏季风) 的

水汽输送辐合由季风气流的风场辐合和水汽湿平流共同作用造成。

图 7 给出了南半球夏季 (DJF) 平均水汽输送辐合的风场辐合项和水汽平流项。从图 7a 可以看到，北澳季风区的风场辐合项为正，即风场辐合引起水汽输送辐合。从图 7b 可以看到，北澳季风区的水汽平流项为负，即干平流引起水汽输送辐散。因此，北澳夏季风的水汽输送的辐合主要由季风气流的风场辐合所造成，这与南亚夏季风类似。

4.2 低层流场和比湿结构对各夏季风水汽输送辐合的影响

第 2 节的分析已表明，亚澳季风区的夏季水汽输送主要取决于热带水汽随低空季风环流的扩展，因此，各夏季风水汽输送辐合必然与低层流场和比

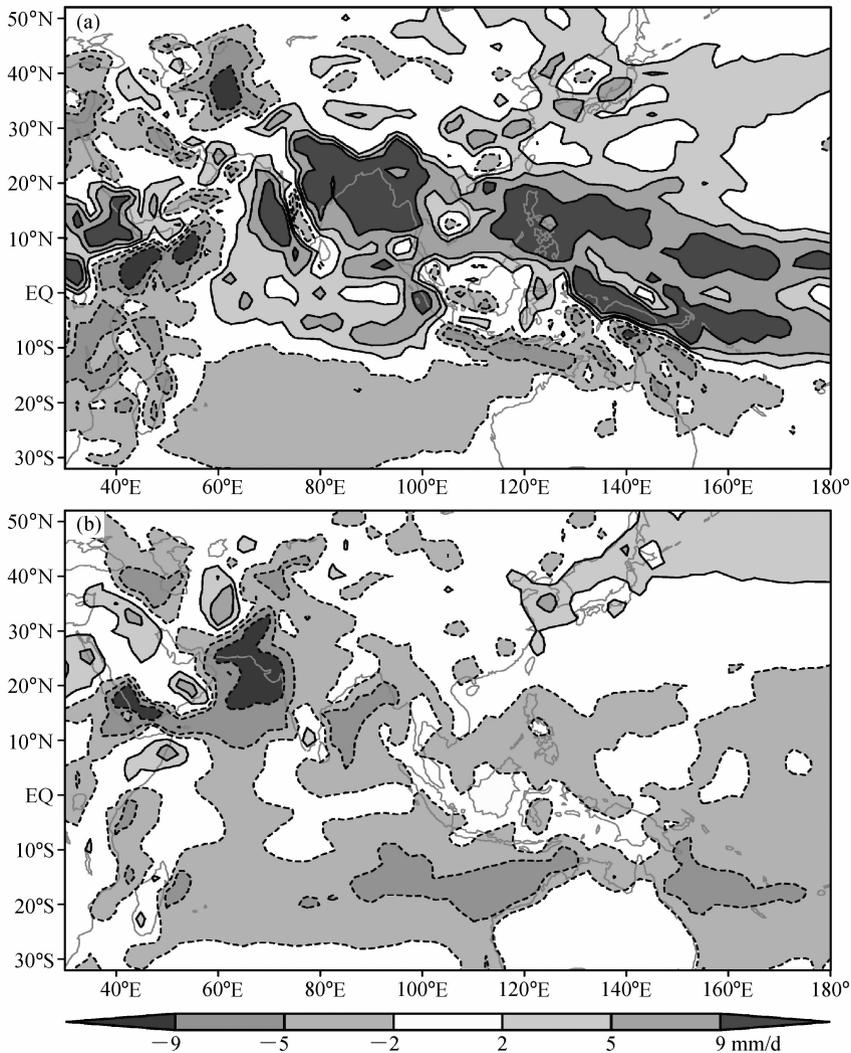


图 6 北半球夏季(JJA)平均水汽输送辐合的风场辐合项 (a) 和水汽平流项 (b)。零线略去

Fig. 6 Climatological mean moisture flux convergence caused by wind convergence (a) and moisture advection (b) in boreal summer (JJA).

Zero contour is not shown

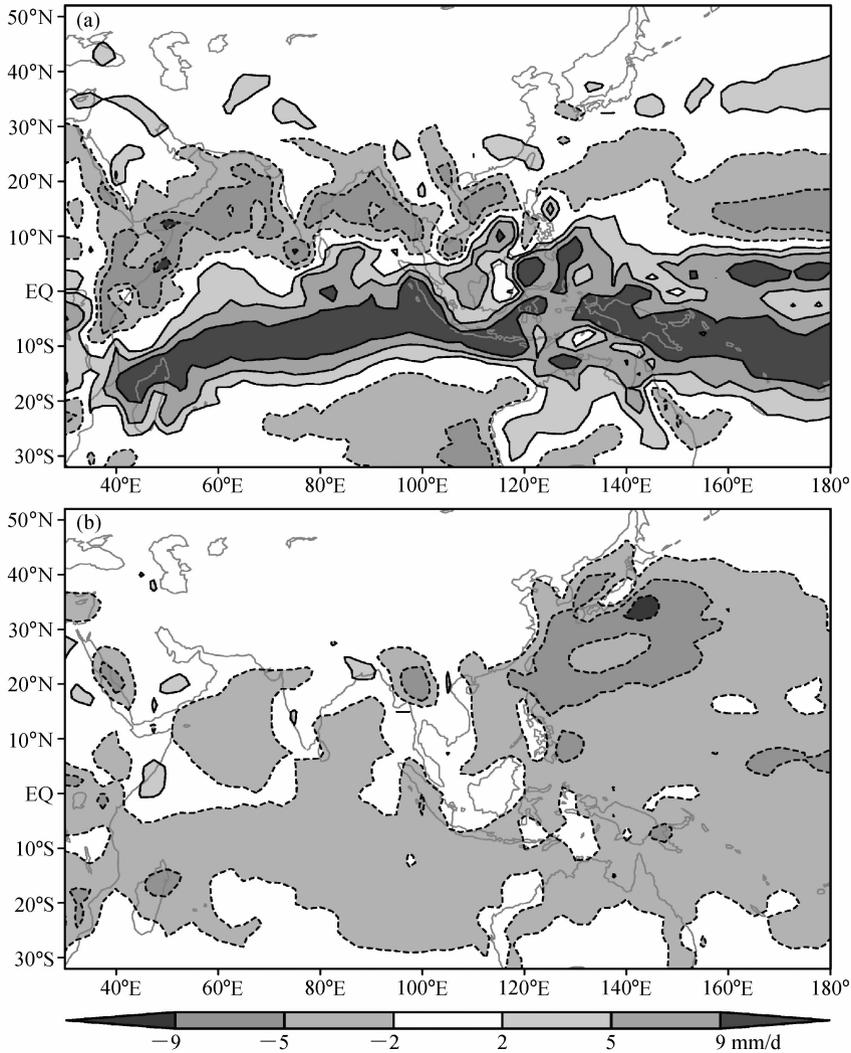


图7 同图6, 但为南半球夏季 (DJF)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but in austral summer (DJF)

湿结构有密切关系。由于夏季风子系统低层气流的深浅厚薄不完全一致, 为更准确地反映低层季风气流的总体动力特征, 本研究取 1000~700 hPa 的等压面平均代表对流层低层。

图 8 给出了北半球夏季 (JJA) 的低层平均纬向风、经向风和比湿分布。南亚夏季风 ($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$) 局限于青藏高原以南地区, 低层盛行西风气流, 从图 8a~c 可以看出, $\partial u/\partial \lambda < 0$, $\partial v \cos \varphi/\partial \varphi \approx 0$, 即有 $q(\partial u/\partial \lambda + \partial v \cos \varphi/\partial \varphi) < 0$, 低层风场辐合对于水汽输送辐合是正贡献, 而 $\partial q/\partial \lambda \approx 0$, $\partial q/\partial \varphi > 0$, 即有 $(u\partial q/\partial \lambda + v \cos \varphi \partial q/\partial \varphi) > 0$, 低层干平流对于水汽输送辐合是负贡献, 因此, 南亚夏季风的水汽输送辐合主要由低层西风气流的风场辐合所引起。

东亚夏季风 ($0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 跨越热带和副热带地区, 低层盛行南风气流, 水汽输送辐合的机理比较复杂。东亚副热带季风区 ($25^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$), 从图 8a~c 可以看出, $\partial u/\partial \lambda > 0$, $\partial v \cos \varphi/\partial \varphi < 0$, 即有 $q(\partial u/\partial \lambda + \partial v \cos \varphi/\partial \varphi) \approx 0$, 低层风场辐合对于水汽输送辐合的贡献较小, 而 $\partial q/\partial \lambda \approx 0$, $\partial q/\partial \varphi < 0$, 且 $(u\partial q/\partial \lambda + v \cos \varphi \partial q/\partial \varphi) < 0$, 低层湿平流对于水汽输送辐合也是正贡献, 因此, 东亚副热带季风区的水汽输送辐合主要由低层南风气流的湿平流所引起。作为南亚季风区和东亚副热带季风区的衔接过渡区, 东亚热带季风区 ($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 的水汽输送辐合特征介于前两者之间。总体而言, 东亚夏季风的水汽输送辐合由低层南风气流的风场辐合和季风湿平流共同

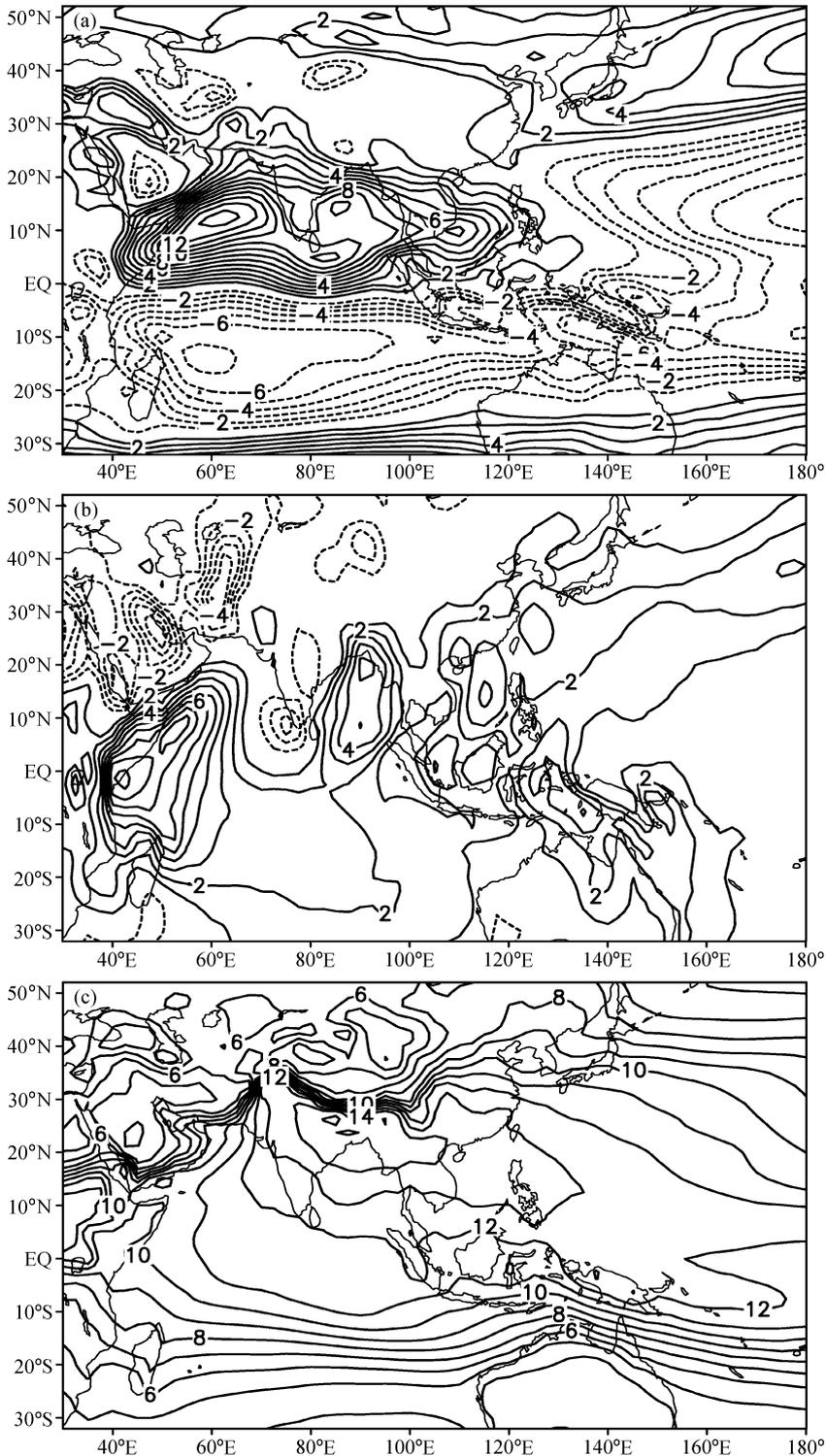


图 8 北半球夏季(JJA)的低层平均纬向风 (a, 单位: m/s)、经向风 (b, 单位: m/s)和比湿 (c, 单位: g/kg)。等值线间隔 1.0, 零线略去
 Fig. 8 Climatological mean low-level (a) zonal wind (m/s), (b) meridional wind (m/s) and (c) specific humidity (g/kg) averaged for 1000-700 hPa in boreal summer (JJA). Contour interval is 1.0, and zero contour is not shown

造成。

图 9 给出了南半球夏季 (DJF) 的平均低层纬向风、经向风和比湿分布。北澳夏季风 (0°~15°S,

110°E~150°E) 局限于热带地区, 低层盛行西风气流, 从图 9a~c 可以看出, $\partial u/\partial \lambda < 0$, $\partial v \cos \varphi/\partial \varphi \approx 0$, 即有 $q(\partial u/\partial \lambda + \partial v \cos \varphi/\partial \varphi) < 0$, 低层风场辐合

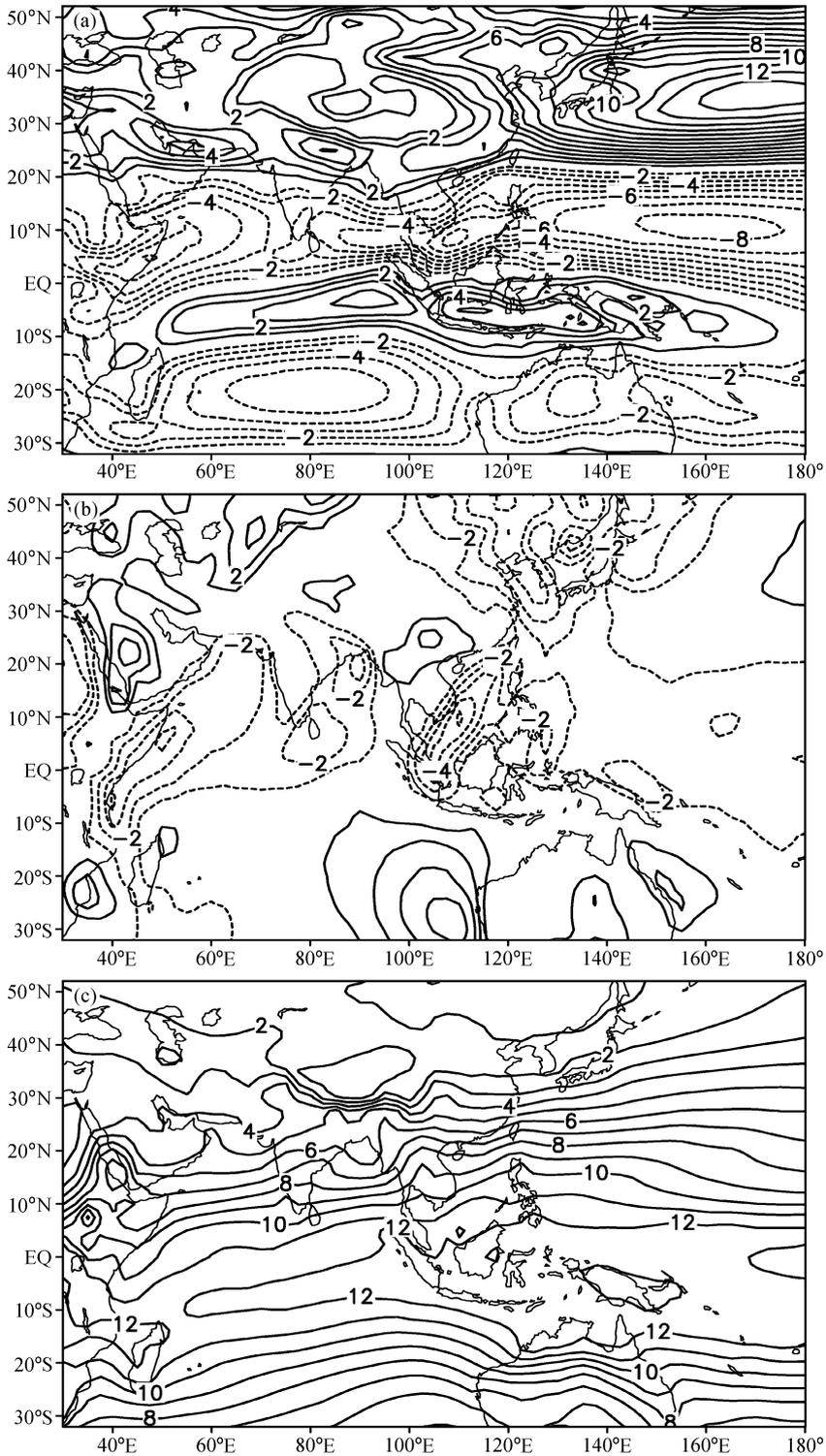


图9 同图8, 但为南半球夏季(DJF)

Fig. 9 Same as Fig. 8, but in austral summer (DJF)

项对于水汽输送辐合是正贡献, 而 $\partial q/\partial \lambda \approx 0$, $\partial q/\partial \varphi \approx 0$, 即有 $(u\partial q/\partial \lambda + v\cos\varphi\partial q/\partial \varphi) \approx 0$, 低层水汽平流项对于水汽输送辐合的贡献很小, 因此, 北澳夏季风的水汽输送辐合主要由低层西风气流的风场

辐合所引起。

上述分析表明, 低层季风环流通过风场辐合项和水汽平流项直接影响水汽输送辐合, 从而引起夏季风降水。但是, 导致各夏季风降水的水汽输送辐

合过程明显不同, 南亚夏季风和北澳夏季风的水汽输送辐合主要由低层西风气流的风场辐合所造成, 而东亚夏季风的水汽输送辐合主要来自低层南风气流的风场辐合和水汽湿平流的共同作用。由此看来, 夏季风雨季的到来和雨带的进退^[14]与季风气流的季节性反转和季节内演变^[21]是分不开的。

5 结论与讨论

本文利用 1979~2002 年的 ERA-40 和 NCEP/NCAR 逐日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)水汽输送的气候学特征进行对比分析, 并结合 CMAP 逐月降水资料探讨了水汽输送辐合对各夏季风降水的影响及动力机理。

由于亚澳季风区的大部分水汽集中在对流层低层, 整层水汽输送通量主要取决于低层季风气流。分析结果表明, 南亚夏季风和北澳夏季风盛行低层西风气流, 以纬向水汽输送为主, 即由西向东输送水汽; 而东亚夏季风盛行低层南风气流, 有很强的经向水汽输送, 即由南向北输送水汽。分析也证实, 与各夏季风子系统相伴的强降水主要来源于水汽输送的辐合, 而 ERA-40 再分析资料对季风区夏季水汽输送辐合的描述能力强于 NCEP/NCAR 再分析资料。此外, 受低层季风气流结构的影响, 各夏季风子系统水汽输送辐合的动力机理存在明显差异, 南亚夏季风和北澳夏季风的水汽输送辐合主要由低层西风气流的风场辐合所造成, 而东亚夏季风(尤其是东亚副热带地区)的水汽输送辐合过程比较复杂, 由低层南风气流的风场辐合和季风湿平流共同作用造成。

然而, 亚澳季风各夏季风子系统的环流与降水具有明显的年际和年代际变化^[26, 27], 水汽输送的变异与不同季风区夏季旱涝的关系有待进一步探讨。

参考文献 (References)

- [1] 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
- [2] Manton M, McBride J. Recent research on the Australian monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 275~285
- [3] Ding Y H. *Monsoons over China*. Kluwer Academic Publishers, 1994. 419pp
- [4] 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
- [5] 徐淑英. 我国水汽输送与平衡. *气象学报*, 1958, **29**: 33~43
Xu S Y. Water vapor transport and balance over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29**: 33~43
- [6] 陆渝蓉, 高国栋. 中国大气中的水汽平均输送. *高原气象*, 1983, **2**: 34~48
Lu Y R, Gao G D. The mean water vapor transport over China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1983, **2**: 34~48
- [7] Peixoto J P, Oort A H. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 1992. 520pp
- [8] Chen T C, Pfaendner J. On the atmospheric branch of the hydrological cycle. *J. Climate*, 1993, **6**: 161~167
- [9] 伊兰, 陶诗言. 定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水循环中的作用. *气象学报*, 1997, **55**: 532~544
Yi L, Tao S Y. The role of the standing and the transient eddies in atmospheric water cycle in the Asian monsoon region. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**: 532~544
- [10] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 东亚季风区的水汽输送特征及其与印度季风区的差别. *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 Journal of Atmospheric Science (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 460~469
- [11] Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J. Climate*, 1999, **12**: 1353~1367
- [12] Zhang R H. Relations of water vapor transport from India monsoon with that over East Asia and summer rainfall in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 1005~1017
- [13] 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构. *科学通报*, 2003, **48**: 2288~2294
Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. Moisture transport source-sink structure of the Meiyu rainbelt along the Yangtze River valley. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**: 2288~2294
- [14] 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
- [15] Zhou T J, Yu R C. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D08104, doi:10.1029/2004JD005413
- [16] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. *大气科学*, 2005, **29**: 195~204
Zhou Y S, Gao S T, Deng G. A diagnostic study water vapor transport and budget during heavy precipitation over

- the Changjiang River and Huaihe River basins in 2003. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 195~204
- [17] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. *大气科学*, 2006, **30**: 25~37
Chen Y, Ding Y H, Xiao Z N, et al. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 25~37
- [18] 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因. *大气科学*, 2006, **30**: 545~560
Huang R H, Chen J L, Huang G, et al. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 545~560
- [19] 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国东部水汽收支的初步分析. *大气科学*, 2007, **31**: 329~345
Zhang W J, Zhou T J, Yu R C. A preliminary analysis on the moisture budget of East China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, **31**: 329~345
- [20] 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
- [21] 陈际龙, 黄荣辉. 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. *大气科学*, 2006, **30**: 1091~1102
Chen J L, Huang R H. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystems. Part I: The wind structure of summer monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 1091~1102
- [22] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [23] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 2005, **131**: 2961~3012
- [24] 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
- [25] Qian W, Deng Y, Zhu Y, et al. Demarcating the worldwide monsoon. *Theor. Appl. Climatol.*, 2002, **71**: 1~16
- [26] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451~14510
- [27] 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