

夏季东亚季风区水汽输送特征及其 与南亚季风区水汽输送的差别

黄荣辉 张振洲 黄刚

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

任保华

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

摘要 利用 ECMWF 所分析的 1980~1989 年每日各层的水汽和风场资料分析了东亚季风区夏季风的水汽输送特征, 并与印度季风区夏季水汽输送进行比较。分析结果表明了东亚季风区夏季水汽输送特征明显不同于印度季风区夏季水汽输送, 东亚季风区夏季水汽输送经向输送要大于纬向输送, 而印度季风区夏季水汽输送则以纬向输送为主。分析结果还表明东亚季风区由于夏季水汽分布是南边大、北边小, 偏南季风气流所引起的水汽平流是湿平流。因此, 水汽的辐合主要由季风气流所引起的水汽平流所造成, 而印度季风区季风气流所引起的水汽平流是干平流, 它利于水汽输送的辐散, 水汽的辐合主要是由于风场的辐合所造成。

关键词 季风 水汽输送 通量 比湿

1 引言

气候系统中的水文循环涉及到这个系统的各个子系统, 它是气候系统中动力、热力过程中的一个重要过程, 并且水文循环是一个直接与人类生活和生产活动有密切关系的复杂过程, 因此气候系统中水文循环的研究是当今气候研究计划 (WCRP) 的一个重要内容。目前国际上正在实施的全球能量和水份循环实验计划 (GEWEX), 其目的就是为了增强对大气—陆地—海洋—生物圈这个耦合气候系统中水文循环过程及其对气候变化作用的了解, 以便改进对气候系统中水文循环过程的描述。

由于季风, 特别是亚洲夏季风, 从海洋带来大量水汽到季风区, 因此, 季风环流将严重影响水汽输送, 从而严重影响降水。1934 年竺可桢首先提出中国降水与东亚季风有密切关系^[1]; Starr 等的研究表明了水汽平流在区域水份平衡中起到重要作用^[2]; 徐淑英讨论了我国水汽输送和平衡^[3]; 谢义炳和戴武杰讨论了黄淮地区强降水过程的水汽输送, 指出了强降水过程是与水汽的输入密切相关^[4]; 陆渝荣和高国栋指出水汽输送与东亚夏季风进退有关^[5]。这些研究说明了季风从海洋携带的水汽对于季风区域中水份平衡起着重要作用。

陶诗言和陈隆勋系统地研究了东亚季风的环流特征^[6,7], 指出东亚夏季风环流系统

1997-12-30 收到

*本研究得到中国科学院“九五”重大项目“KZ951-A1-203”和国家“九五”重中之重项目“96-908”的资助

无论它的平均结构或垂直经圈环流均与印度季风系统有很大差别。东亚夏季风它不仅受印度西南季风气流的影响，而且还受到西太平洋副热带高压和中纬度扰动系统的影响。因此，可以预计，东亚季风区夏季水汽输送特征与印度季风区的水汽输送特征有很大差别。

鉴于上述原因，本研究利用 ECMWF 所分析的 1980~1989 年每日各层的水汽、风场和高度场资料来分析东亚季风区夏季水汽输送特征，并与印度季风区夏季水汽输送特征作比较。

2 东亚季风区夏季水汽输送特征及其与印度季风区水汽输送的差别

2.1 水汽输送矢量和通量

假设在 100 hPa 以上大气没有水汽，那么某单位气柱整层大气水汽输送通量矢量 $\vec{Q} = (Q_x, Q_y)$ 可由下式来计算，即

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} \vec{V} \cdot q dp = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} (u, v) q dp. \quad (1)$$

因此，分别可得在纬向和经向水汽输送通量 Q_x 与 Q_y 的计算公式如下：

$$Q_x = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} u q dp, \quad (2)$$

$$Q_y = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} v q dp. \quad (3)$$

\vec{V} 为该单位所柱各层大气的风速矢量， u 和 v 分别为东西风和南北风分量， q 是该单位气柱各层大气的比湿， P_0 是海平面气压，为简单起见，一般取 $P_0 = 1000$ hPa。这样，利用公式 (1) ~ (3)，并由 ECMWF 所分析的 1980~1989 年 6~8 月每日各层的比湿、风场资料可以计算出亚洲季风区夏季 6~8 月各月的水汽输送矢量与纬向和经向水汽输送通量。由于水汽与风场随时间变化很大，为精确起见，我们计算 1980~1989 年各月每日的水汽输送通量，然后再从每日水汽输送通量分别按月和对 1980~1989 年作气候平均。

2.2 亚洲夏季平均水汽输送

由公式 (1) 和 ECMWF 所分析 1980~1989 年 6~8 月每日各层的比湿和风场资料可以计算出亚洲夏季平均水汽输送矢量的分布 (图 1)。从图 1 可见印度季风区的水汽输送主要来源于索马里急流经阿拉伯海转向带来的水汽输送；而东亚季风区的夏季水汽输送来源要比印度季风区复杂得多。从图 1 可以看到，到达东亚季风区的水汽输送有 4 支：第 1 支是印度西南季风流经孟加拉湾向我国江淮流域输送；第 2 支是沿西太平洋副热带高压西南侧东南季风气流带来的水汽；第 3 支是沿 105°E 附近流经我国南海的跨赤道气流带来的水汽；第 4 支是由中纬度西风带扰动带来的水汽。这 4 支气流在我国长江流域和江淮流域汇合后流向朝鲜半岛和日本。因此，东亚季风区夏季水汽输送的年际和季内变化要比印度季风区水汽输送的变化复杂得多。图 1 所示的东亚季风区夏季水汽输送矢量的分布是与陶诗言和陈隆勋所指出的东亚夏季风环流系统是一致的^[6]。

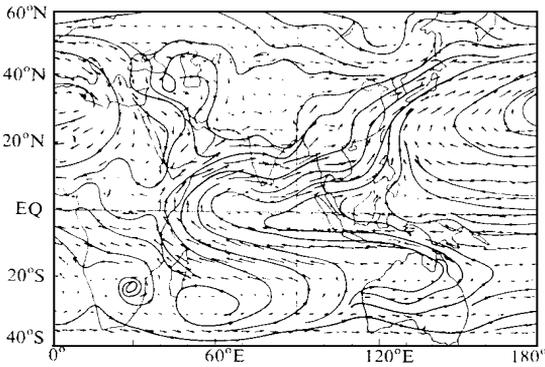


图 1 1980~1989 年平均的夏季 (6~8 月) 水汽输送矢量分布
单位: $g/(s \text{ cm})$

从图 1 所示水汽输送矢量分布还可以看到, 东亚季风区夏季水汽输送明显不同于印度季风区的水汽输送。印度季风区夏季气流是从阿拉伯海流向印度半岛, 水汽输送是以纬向输送为主的, 而东亚季风区夏季盛行偏南气流, 水汽输送的经向分量则很大。这个差别将在下面的纬向和经向水汽输送通量的计算中更明显看到。

2.3 平均纬向水汽输送通量

图 2a~c 分别是 6、7、8 月份各月 1980~1989 年平均的纬向水汽输送通量的分布。可以看到, 6 月份, 正的纬向水汽输送通量位于阿拉伯海、印度与中印半岛, 7、8 月份, 这个正通量区向东扩展, 并可以伸展到菲律宾以东地区, 其中心仍位于阿拉伯海和印度, 平均纬向水汽输送以 7 月份最大。图 2 明显表明了印度季风区的降水主要来源于索马里急流从南印度洋携带的水汽和阿拉伯海洋面蒸发的水汽; 并且, 还可以看到, 另一个正的纬向水汽输送通量 6 月份位于日本以东、朝鲜半岛, 7、8 月份这个正值区向西伸展至我国东部。

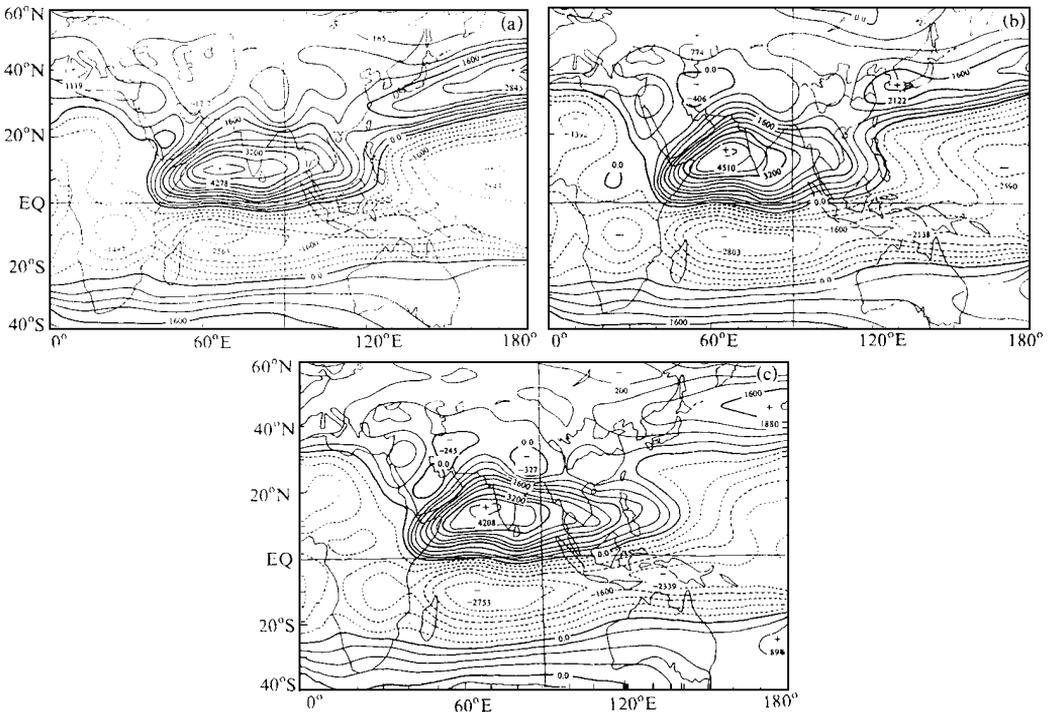


图 2 1980~1989 年平均夏季各月水汽纬向输送通量分布
(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月。单位: $g/(s \text{ cm})$

比较这两个正的纬向水汽通量中心的水汽输送值，可以看到，位于阿拉伯海和印度的正中心的纬向水汽输送通量要比位于朝鲜半岛南部与日本南部正中心的水汽输送通量大得多，尤其在我国东部，纬向水汽输送通量比位于南亚的纬向水汽输送通量小得多。

2.4 平均经向水汽输送通量

图 3a~c 分别是 6、7、8 月份各月 1980~1989 年平均的经向水汽输送通量的分布。可以看到，一个正的水汽输送通量（即向北输送）位于索马里急流区与阿拉伯海，在印度半岛有一个负的水汽输送通量（即向南输送），另一个正值区位于孟加拉湾，它们构成了一个“偶极型”结构；另一个正的水汽输送通量区位于我国南海、华南、江南和日本南部，6 月份这个正的水汽输送中心位于南海，7 月份它北移至华南，其中心值达到最大。

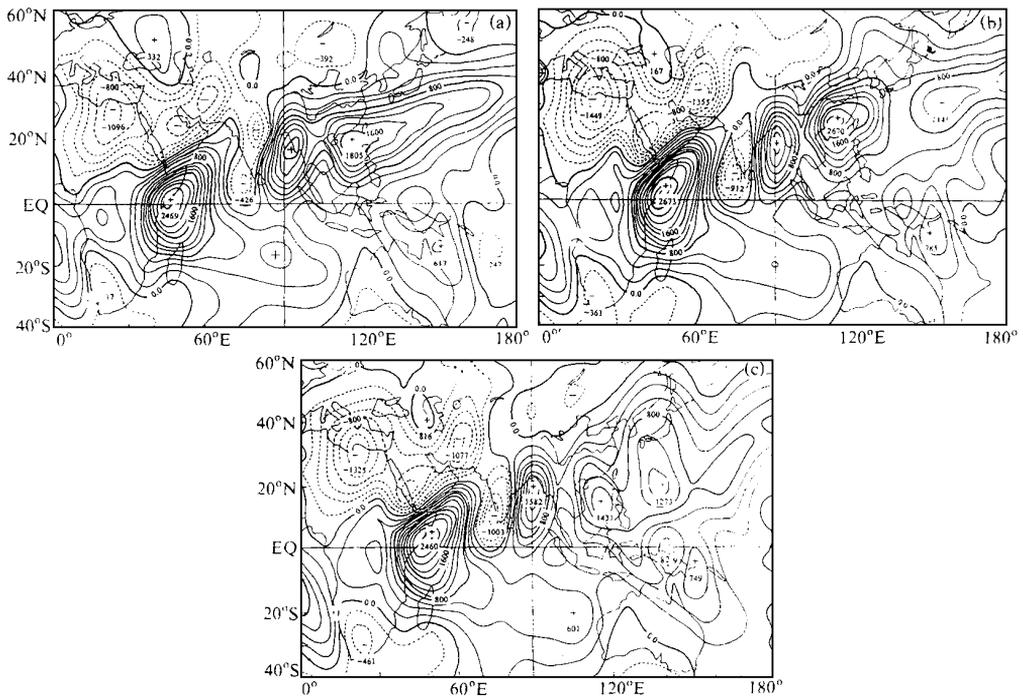


图 3 1980~1989 年平均夏季各月水汽经向输送的通量分布 (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月。单位: $g/(s \cdot cm)$

把图 3 与图 2 作比较，可以看到，位于南亚和阿拉伯海的纬向水汽通量要比位于阿拉伯海西岸和非洲东岸的经向水汽输送通量大；而位于我国南海、江南、华南和江淮流域的经向水汽通量却比纬向水汽输送通量大，尤其在 7 月份。可见，在盛夏期间，来自南海、热带西太平洋以及孟加拉湾的经向水汽输送是东亚夏季降水的主要水汽来源，这个结果与罗绍华^[8]和陈世训^[9]所分析的结果一致。因此，供给东亚季风区的夏季降水的水汽主要是由西南季风从孟加拉湾带来的水汽、东南季风从热带西太平洋带来的水汽以及跨赤道气流从南海带来的水汽所组成。

从以上分析可以看到, 印度季风区夏季水汽输送主要是纬向水汽输送, 即由西向东输送水汽为主; 而东亚季风区夏季水汽输送虽然纬向水汽输送通量也不小, 但由南向北的经向水汽输送要比由西向东的纬向水汽输送大。

3 东亚水汽输送的辐合 (辐散) 特征及其与印度季风区的水汽辐合 (辐散) 的差别

Starr 早在 50 年代就指出局地水汽含量是与水汽输送通量的辐合 (辐散) 密切相关^[10], Chen 的研究也表明了东亚季风区水汽输送通量的辐合、辐散与 OLR 分布很一致^[11], 因此, 季风区水汽输送通量的辐合、辐散是表征季风降水变化一个很重要的物理量。

3.1 水汽输送通量的散度

在球坐标系中, 水汽输送通量矢量的散度可由下式计算, 即

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{1}{a \cos \theta} \left(\frac{\partial Q}{\partial \lambda} + \frac{\partial Q \cos \theta}{\partial \theta} \right), \quad \text{向水} \quad (4)$$

上式中 λ 、 θ 分别为经度和纬度, a 是地球半径。

由 (4) 式和 (1) 式, 可以得到下式, 即

$$\nabla \cdot \vec{Q} \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} \nabla \cdot (\vec{V}q) dp = \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} \vec{V} \cdot \nabla q dp + \frac{1}{g} \int_{100}^{P_0} q \cdot (\nabla \cdot \vec{V}) dp. \quad (5)$$

从 (5) 式右端可知, 水汽输送的散度由两部分引起: 第一部分 (即右端第一项) 由水汽平流项引起; 另一部分 (右端第二项) 由风场辐散辐合所引起。由 (5) 式右端第一项可知, 当风由比湿高的地区流向比湿低的地区, 此项为负, 称之为湿平流, 它对水汽输送的辐合有正贡献; 反之, 当风由比湿低的地区流向比湿高的地区, 此项为正, 称之为干平流, 它对水汽输送的辐合是负贡献, 而对水汽输送的辐散是正贡献。由 (5) 式右端第二项可知, 当风场为辐合时, 则此项对水汽输送的辐合是正贡献; 反之, 则此项对水汽输送的辐散是正贡献。

若忽略大气中液态和固态水, 那么在大气中单位气柱内水分平衡由下式来表达:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{Q} + (E - P), \quad (6)$$

上式中 W 表示可降水量, 即单位气柱内水蒸汽含量, P 是降水, E 是蒸发。(6) 式表示了单位气柱内水汽含量的变化是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。

若对 (6) 式进行较长时间积分, 即 1 个月或者 1 个季度, 那么单位气柱中水汽饱和、凝结并不断变成降水, 因此, 当 $t_1 - t_0$ 足够大, 就有

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial W}{\partial t} dt = 0,$$

这样, (6) 式可变成下式:

$$\int_{t_0}^{t_1} P dt = - \int_{t_0}^{t_1} \nabla \cdot \vec{Q} dt + \int_{t_0}^{t_1} E dt. \quad (7)$$

(7) 式说明了某个地区在某一个季节或某一个月内的降水主要来源于这个季节时段中流进这个地区水汽的辐合以及由此地区的蒸发而来的水汽。当然，该地区蒸发而来的水汽主要也是由落下该地区的降水所形成。

3.2 由水汽平流所引起的水汽输送的辐合（辐散）

黄荣辉和孙凤英的研究^[12]表明了 1980、1982、1983 和 1987 年夏季，我国江淮流域降水偏多，并发生洪涝；而在 1981、1984、1985 和 1988 年夏季，我国江淮流域降水偏少，并发生干旱。这是与东亚夏季风水汽输送的辐合密切相关，为此我们利用 1980~1989 年观测资料与 (5) 式右端第一项可以计算出夏季由水汽平流所引起的水汽输送通量的散度。图 4、5 分别为在江淮流域干旱（1981、1984、1985 和 1988 年）与洪涝（1980、1982、1983 和 1987 年）夏季平均而得到的由水汽平流所引起的水汽输送通量的散度分布。从图 4a 与 b 可以看到：无论我国江淮流域是干旱或是洪涝的夏季，一个大的干平流所引起的水汽辐散区位于从索马里急流区经阿拉伯海到印度半岛西部，另一个较大的干平流引起的水汽辐散区位于中印半岛的西部，在这两种情况下，印度半岛处于较小的干平流所引起的水汽输送辐散区；而东亚季风区是一个由湿平流引起的水汽输送辐合区。并且由图 4a 与图 4b 的比较还表明了，位于东亚季风区的湿平流所引起的水汽辐合区，涝夏的辐合要比旱夏时强得多。

上述分析说明了东亚夏季降水主要由夏季风带来水汽平流所引起。

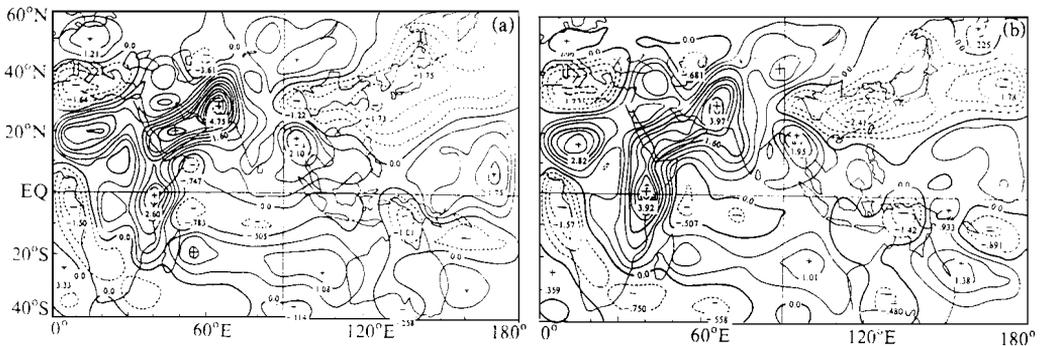


图 4 夏季 (6~8 月) 由水汽平流所引起的水汽输送通量的散度分布
(a) 江淮流域干旱的夏季；(b) 江淮流域洪涝的夏季。单位：mm/d

3.3 由风场辐合（辐散）所引起的水汽输送的辐合（辐散）

利用 1980~1989 年观测资料与 (5) 式右端第二项同样可以计算出由风场辐合（辐散）所引起的水汽输送通量的散度。图 5a 与 b 分别为江淮流域干旱与洪涝夏季由风场的辐合（辐散）所引起的水汽输送通量的散度分布。从图 5a 与图 5b 可以看到，无论我国江淮流域是干旱或是洪涝的夏季，印度季风区与东亚季风区均是风场辐合区。在江淮流域干旱的夏季，由风场辐合引起的水汽输送的辐合最大位于印度季风区，而在东亚季风区由风场辐合所引起的水汽输送的辐合较少；并且在涝夏时，东亚季风区由风场所

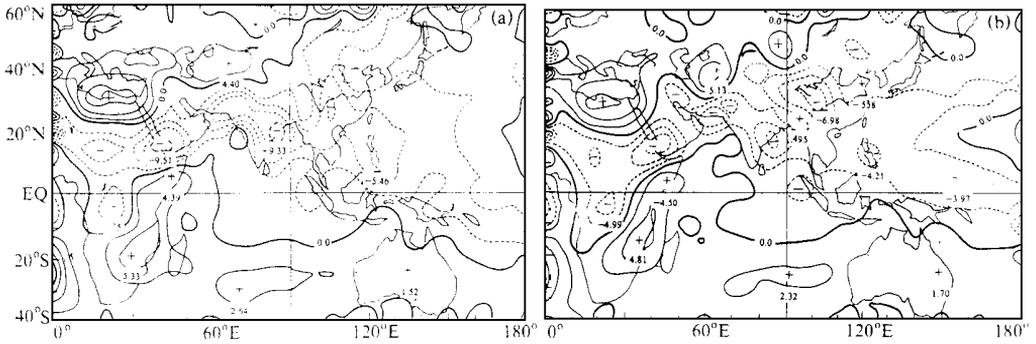


图 5 夏季 (6~8 月) 由风场散度所引起的水汽输送通量的散度分布
 (a) 江淮流域干旱的夏季; (b) 江淮流域洪涝的夏季。单位: mm/d

引起的水汽输送的辐合与印度季风区的水汽输送的辐合相当。

把图 5 与图 4 作比较, 可以看到, 印度季风区由风场辐合 (辐散) 所引起的水汽输送的辐合 (辐散) 要大于水汽平流引起的辐散。

从上分析可以看到, 东亚季风区夏季引起水汽输送的辐合 (辐散) 是与印度季风区引起水汽辐合 (辐散) 的机理不同。印度季风区夏季水汽输送的辐合 (辐散) 主要由季风环流系统的风场的辐合 (辐散) 引起; 而东亚季风区夏季水汽辐合 (辐散) 主要由季风气流引起的水汽平流 (湿平流) 所造成, 在涝夏时, 除了湿平流外, 风场的辐合也起相当重要的作用。

4 东亚季风区夏季比湿分布特征及其与印度季风区的差别

上一节的分析表明, 东亚季风区夏季水汽的辐合 (辐散) 主要由水汽平流所造成, 而印度季风区夏季水汽的辐合 (辐散) 主要由风场的辐合、辐散引起的。这是什么原因引起的, 我们对此问题进行了探讨。(5) 式第一项可写成下式, 即

$$\text{于} \quad \frac{1}{g} \frac{P_0}{100} \vec{V} \cdot \nabla q dp = \frac{1}{g} \frac{P_0}{100} \left(u \frac{\partial q}{\partial \cos \theta} + v \frac{\partial q}{\partial \theta} \right) dp. \quad (8)$$

利用 1980 ~ 1989 年比湿 q 的实测资料可以计算出各层 q 的气候平均分布。图 6a ~ c 分别是夏季 6、7、8 月各月沿 80°E 气候平均 q 的纬度 - 高度剖面图。由于印度季风区位于青藏高原以南, 即位于 10 ~ 30°N 之间, 从图 6a ~ c 可以看到 $\partial q / \partial \cos \theta > 0$, 且较小, 因此, 西南季风对于印度季风区水汽辐合是负贡献, 即 $v(\partial q / \partial \cos \theta) > 0$, 有利于水汽的辐散。图 7a ~ c 分别是夏季 6、7、8 各月 115°E 气候平均 q 的纬度 - 高度剖面图。东亚季风区位于 25 ~ 40°N 之间。从图 7a ~ c 可以看到, $\partial q / \partial \cos \theta < 0$, 且较大, 因此, 夏季西南季风与东南季风对于东亚季风区水汽辐合是正贡献, 即 $v(\partial q / \partial \cos \theta) < 0$, 有利于水汽的辐合。

图 8a、b 分别是沿 25°N 与 30°N 1980 ~ 1989 年平均各月 700 hPa 大气比湿 q 的时间 - 经度剖面图。可以看到, 印度季风区 $\partial q / \partial \cos \theta = 0$, 西南气流对于水汽辐合并无

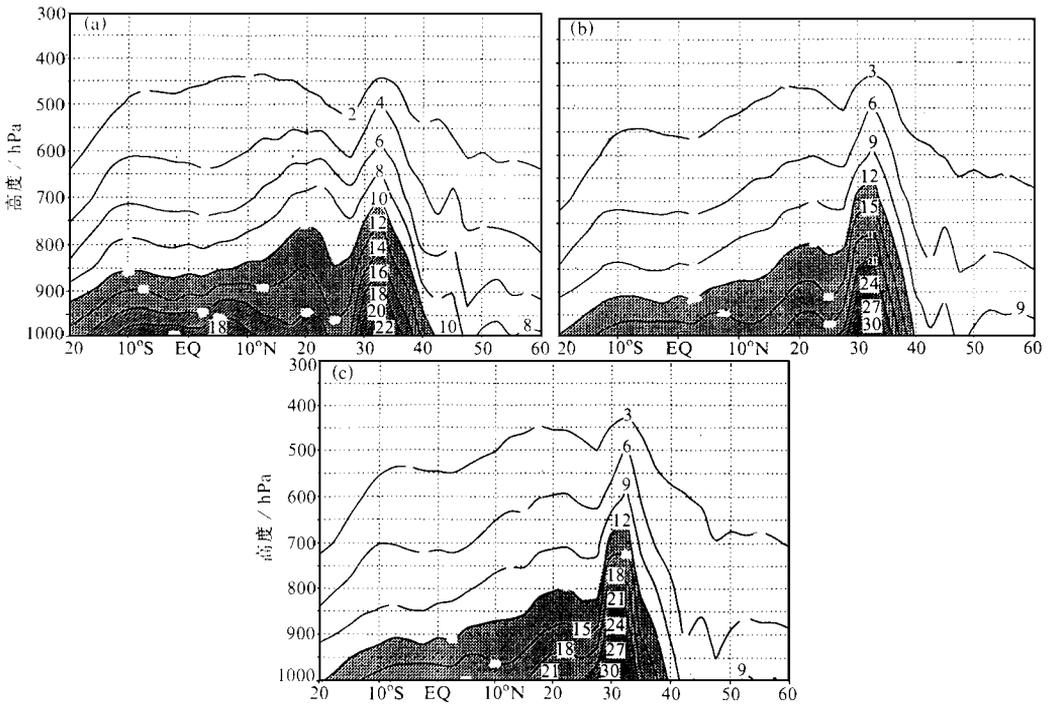


图 6 沿 80°E1980 ~ 1989 年夏季 (6 ~ 8 月) 平均各月大气的比湿 q 的纬度 - 高度剖面图

(a) 6 月, (b) 7 月, (c) 8 月。单位: %

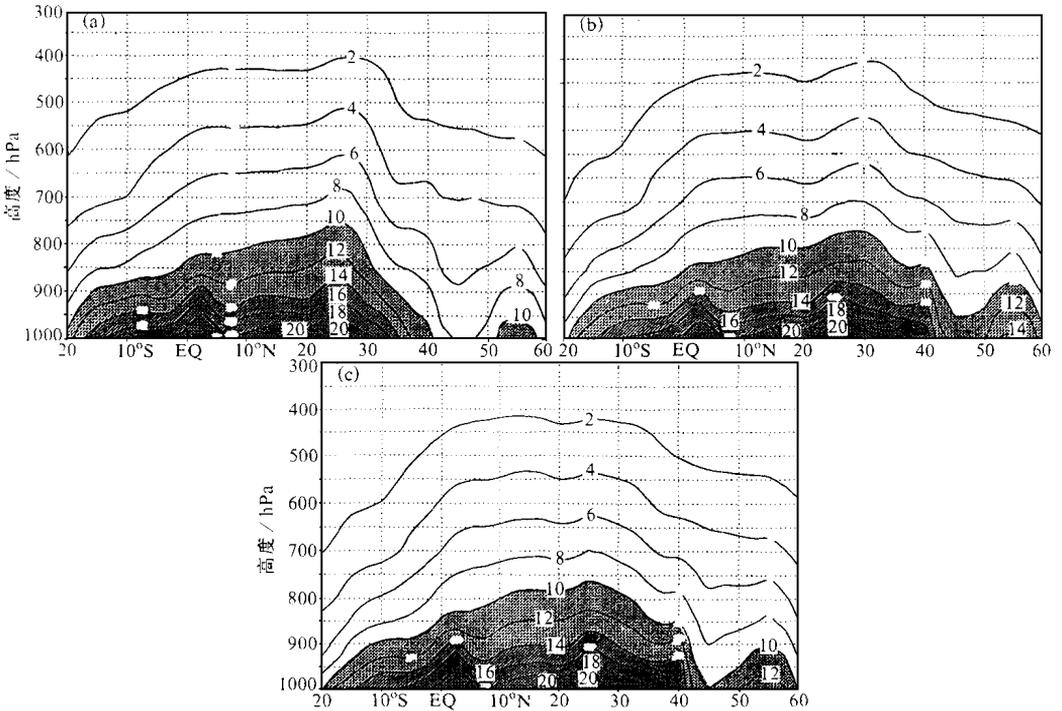


图 7 沿 115°E 1980 ~ 1989 年夏季 (6 ~ 8 月) 平均各月大气的比湿 q 的纬度 - 高度剖面图

单位: ‰

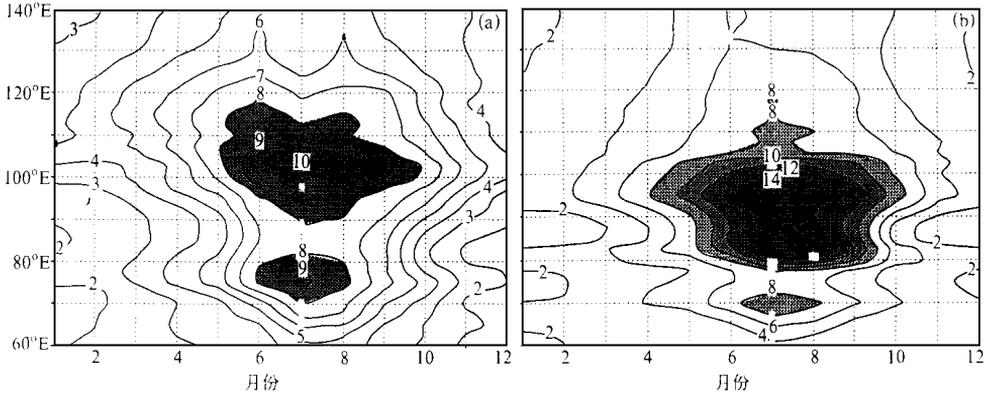


图 8 沿 25°N (a) 与 30°N (b) 1980~1989 年平均各月 700 hPa 大气比湿 q 的时间-经度剖面图
单位: ‰

大的贡献；而在东亚季风区 $\partial q / \partial \cos \theta < 0$ ，因此西南气流有利于水汽的辐合。

从上分析，可以看到，季风引起的水汽平流在东亚季风区有利于水汽的辐合，而在印度季风区，则不利于水汽的辐合。因此，在东亚季风区夏季西南季风与东南季风所引起的水汽平流是利于季风降水；而在印度季风区西南季风所引起的水汽平流并不利于季风降水。季风降水可能是由于风场的辐合、辐散所引起。印度季风区的季风低压对于水汽的辐合和降水可能起到很大作用。

5 结论和讨论

本文利用 ECMWF 所分析的 1980~1989 年每日各层的水汽和风场资料计算了亚洲季风区的水汽输送矢量和通量以及水汽输送的散度，分析了东亚季风区夏季的水汽输送特征，并与印度季风区夏季水汽输送特征作了比较。

分析结果表明了东亚季风区夏季水汽输送特征明显不同于印度季风区夏季水汽输送。东亚季风区水汽输送经向输送要大于纬向输送，而印度季风区夏季水汽输送则以纬向输送为主；分析结果还表明了：由于东亚季风区水汽分布是南边大，北边小，因此，夏季风的偏南气流所引起的水汽平流是湿平流，它对于水汽输送的辐合起到重要作用；而印度季风在季风气流所引起的水汽平流是干平流，它利于水汽输送的辐散，水汽输送的辐合主要是由于风场的辐合所造成。这说明了东亚夏季风降水主要是由夏季风带来的水汽平流所引起，而印度季风区夏季降水主要是由夏季风环流系统的风场辐合所引起。但在江淮流域涝夏时，季风环流系统的风场辐合也起到重要作用。

本文分析结果说明了东亚季风不仅在水平环流结构与经圈环流不同于印度季风，而且在水汽输送特征明显不同于印度季风，因此，东亚季风系统与印度季风系统是亚洲季风系统中既相互关联又相互独立的两个季风子系统。

参 考 文 献

- 1 竺可桢, 1934, 东南季风与中国之雨量, 地理学报, 1, 1~27.
- 2 Starr, V. P. et al., 1955, Direct measurement of the hemispheric poleward flux of water vapor, *J. Meteor. Res.*, **14**, 217~225.
- 3 谢义炳、戴武杰, 1959, 中国东部地区夏季水汽输送个例计算, 气象学报, **30**, 173~185.
- 4 徐淑英, 1958, 我国水汽输送和平衡, 气象学报, **29**, 33~43.
- 5 陆渝蓉、高国栋, 1987, 物理气候学, 北京: 气象出版社, 645pp.
- 6 Tao Shiyun and Chen Longxun, 1985, The East Asian summer monsoon, Proceedings of International Conference on Monsoon in the Far East, Tokyo, Nov. 5~8, 1985, 1~11.
- 7 Tao Shiyun and Chen Longxun, 1987, A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China, *Monsoon Meteorology*, Edited by C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Oxford University Press, 60~92.
- 8 罗绍华, 1982, 盛夏期间我国大陆东南部低纬地区的水汽输送和水汽平衡, 全国热带夏季风学术会议论文集, 昆明: 云南人民出版社, 142~151.
- 9 陈世训等, 1982, 1982年5~6月长江以南地区降水的水汽输送与平衡, 全国热带夏季风学术会议论文集, 昆明: 云南人民出版社, 111~123.
- 10 Starr, V. P. et al., 1958, On the global balance of water vapor and the hydrology of deserts, *Tellus*, **10**, 188~194.
- 11 Chen, T. C. and R. Y. Tzeng, 1990, Global - scale intraseasonal and annual variation of divergent water vapor flux, *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 133~151.
- 12 Huang Ronghui and Sun Fengying, 1992, Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70** (1B), 243~256.

Characteristics of the Water Vapor Transport in East Asian Monsoon Region and Its Difference from that in South Asian Monsoon Region in Summer

Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou and Huang Gang

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing100080)

Ren Baohua

(Department of the Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei230026)

Abstract The characteristics of the water vapor transport by the summer monsoon in the East Asian monsoon region is analysed by using the daily data of water vapor and wind fields at various levels analysed by ECMWF, and its difference from that in the Indian monsoon region is compared in this paper. The analysed results show that there is a obvious difference between the characteristics of the water vapor transport in the East Asian monsoon region and those in the South Asian monsoon region in summer. In summer, the meridional water vapor transport is larger than the zonal water vapor transport in the East Asian monsoon region, but the zonal water vapor transport is dominant in the Indian monsoon region. Moreover, the analysed results also show that due to the distribution of water vapor in the East Asian monsoon region: large in the south and small in the north, the water vapor advection by the southerly monsoon flow is wet advection. Therefore, the convergence of the water vapor transport is mainly due to the water vapor advection caused by the monsoon flow in the East Asian monsoon region. However, in the Indian monsoon region, the water vapor transport is dry advection, which assists the divergence of water vapor, thus, the convergence of water vapor is mainly caused by the convergence of wind field.

Key words monsoon water vapor transport flux specific humidity