

南海夏季风期间水汽输送的气候特征^{*}

谢 安 宋焱云

(北京大学地球物理系暴雨监测和预测国家实验室, 北京 100871)

毛江玉 叶 谦

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 通过分析 NCEP/NCAR 1973~1998 年(共 26 年)4~8 月的再分析比湿场和风场资料,研究了南海夏季风期间的水汽输送特征。夏季,东亚上空水汽水平输送特征在各月有很大差异,这是夏季风环流系统演变的结果。孟加拉湾南部地区是中国长江中下游和南海地区重要的水汽源地,来自上游孟加拉湾南部地区的水汽输送对南海季风的爆发具有重要意义。经向水汽输送主要有利于 20~30°N 之间华南地区的水汽辐合。从总的收支看,南海地区是一个水汽汇区。南海季风爆发早晚年的水汽输送通道存在明显差别。在爆发偏早年,从赤道印度洋到南海地区的输送通道建立早且维持时间长,4~5 月南海易成为水汽辐合区;在偏晚年,南海地区水汽则是辐散的,不利于形成季风性降水。南海季风爆发早晚年与长江中下游旱涝年的水汽输送有一定联系。

关键词: 南海; 夏季风; 水汽输送

1 引言

近年来,有关南海季风的研究引起了人们的高度重视^[1~4]。但对于较长时段南海地区的水汽收支状况和输送特征研究较少,尤其是爆发早、晚年水汽输送方面的差异还缺乏具体的研究。以往的研究大多通过个例或几年的资料分析,这样得到的结果并不能很好地揭示水汽输送及收支的气候特征。本文通过分析 1973~1998 年(共 26 年)的 NCEP/NCAR 再分析资料并选取较大的分析范围,考察整个夏季及南海夏季风爆发期间的水汽输送气候特征,着重讨论爆发早、晚年水汽输送形势的差异。

2 资料及其处理

本文用到的资料有:(1) NCEP/NCAR 1973~1998 年 4~8 月 1000~300 hPa (包括 1000、925、850、700、600、500、400、300 hPa) 8 层日平均的比湿 q 及风场 V 再分析资料;(2) 1975~1998 年(缺 1978 年)候平均射出长波辐射(OLR)资料。以上资料的空间分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度。

表 1 是夏季各月每层的水汽输送分布同 1000~300 hPa 整层积分水汽输送形势的相关。可以发现每月 850 hPa 层同整层积分水汽输送量相关系数最大,不论纬向、还是经

2000-01-25 收到, 2001-05-24 收到修改稿

^{*} 国家科技部攀登项目 A“南海季风试验研究”和国家自然科学基金资助项目 49975023 联合资助

向输送都如此。所以，有理由认为 850 hPa 水汽输送形势基本上可以代表整层积分水汽输送状况。因此以下主要讨论 850 hPa 的水汽输送问题。

表 1 4~8 月各等压面层与 1000~300 hPa 积分水汽输送相关系数

		1000 hPa	925 hPa	850 hPa	700 hPa	600 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa
纬向水汽输送	4 月	0.81	0.90	0.97	0.90	0.85	0.74	0.59	0.37
	5 月	0.82	0.90	0.96	0.87	0.80	0.70	0.54	0.33
	6 月	0.88	0.92	0.96	0.90	0.77	0.67	0.48	0.22
	7 月	0.91	0.94	0.96	0.91	0.72	0.55	0.32	0.03
	8 月	0.91	0.94	0.96	0.90	0.71	0.53	0.29	0.02
经向水汽输送	4 月	0.56	0.84	0.89	0.65	0.67	0.63	0.54	0.40
	5 月	0.61	0.84	0.92	0.60	0.60	0.60	0.41	0.23
	6 月	0.74	0.88	0.94	0.65	0.57	0.62	0.44	0.16
	7 月	0.75	0.88	0.95	0.55	0.50	0.49	0.26	0.02
	8 月	0.74	0.88	0.94	0.61	0.50	0.44	0.18	-0.07

本文选取 (105~120°E, 0~20°N) 作为南海区域。南海夏季风爆发的定义为: 当南海区域平均的 OLR 候平均值下降至 235 W m⁻², 同时区域平均的纬向风由东风转为西风^[5]。

3 夏半年东亚地区水汽水平输送形势

图 1 为 850 hPa 月平均水汽水平输送 (F_m) 气候图 (只给出 5、6 月)。4 月份副高脊线在 15°N 附近。副高南部的强东风将水汽带入南海中部及南部, 在 10°N 附近的中太平洋有一水汽输送大值中心; 副高西侧的西南气流和孟加拉湾槽前西南气流将中国华南上空的水汽带到中纬度地区及洋面上, 副高西侧偏南气流将南海北部的水汽带入华南地区。在华南地区有一水汽输送活跃中心, 它影响着华南前汛期降水。4 月中国大陆的水汽输送主要同南海和孟加拉湾相联系。

5 月虽然副高脊线仍在 15°N 附近, 但是副高南部东风减弱, 10°N 附近的水汽输送大值区明显东退, 赤道太平洋对南海的水汽输送明显减弱; 同副高西侧及北侧相联系的西南向水汽输送中心已东移到洋面上。随着阿拉伯海高压的消失及索马里越赤道气流的加强, 上游西风加强以及南海季风在该月爆发, 从赤道印度洋经孟加拉湾再经中南半岛到中国南部沿海地区出现一弱水汽输送通道, 最大水汽输送中心位于赤道地区 80~90°E 附近, 华南也有一输送中心。另外, 105°E 的越赤道气流也将部分南太平洋的水汽带入南海。在孟加拉湾西南气流和越赤道气流的共同作用下, 南海地区的向北水汽输送不断加强, 其中南部尤为明显。在南海季风爆发期间, 南太平洋和赤道印度洋都向南海地区输送水汽。

由于副高西侧西南风及上游孟加拉湾西南风的影响, 4、5 月在华南地区均有强水汽输送中心, 在该中心的北部边缘有很强水汽通量梯度, 为华南前汛期降水积累了丰富的水汽。但是, 华南前汛期的水汽来源在两月间也略有差别, 4 月孟加拉湾向华南地区的输送还不十分明显, 5 月从孟加拉湾到华南建立起明显的西南水汽输送。华南前汛期在 5 月中旬以后暴雨明显增多, 所以, 来自上游的水汽对华南地区降水有突出作用。

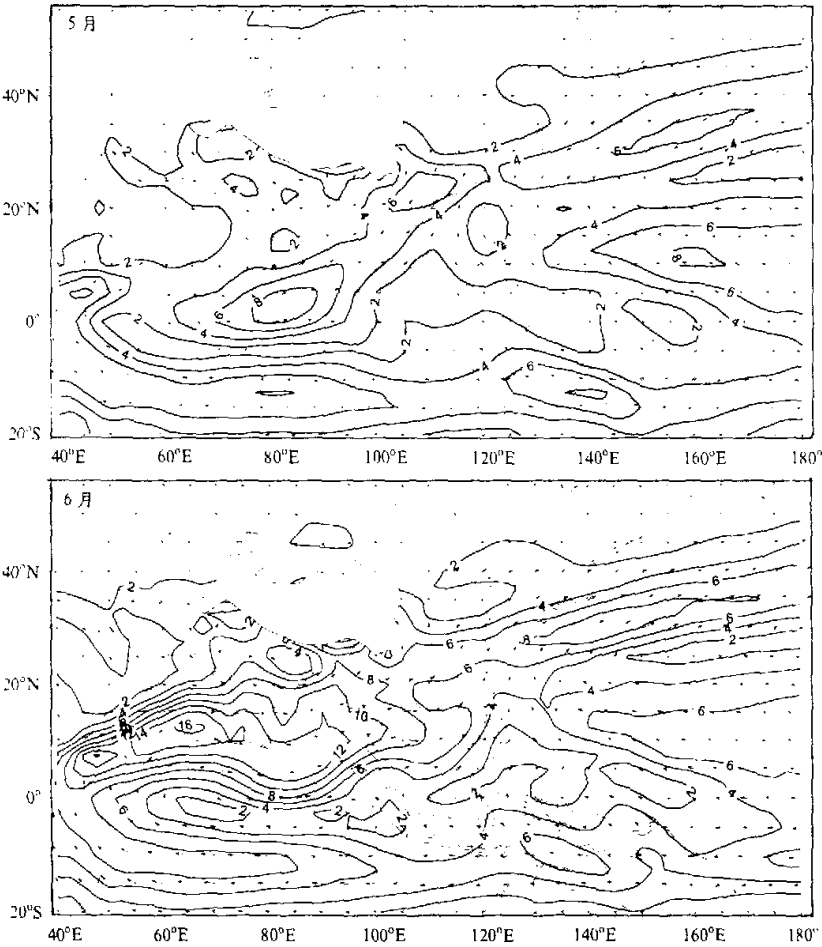


图1 5、6月850 hPa月平均水汽水平输送气候图
单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$

6月副高出现第一次北跳，副高脊线在 $20\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间。副高南部向西的水汽输送大值区减弱，赤道太平洋对南海及中国大陆的水汽输送相当不明显。而源于索马里急流的赤道西风加强北抬，建立起从阿拉伯海经印度半岛和孟加拉湾的较强水汽输送通道，经中南半岛向南海中、南部地区及中国的长江以南省份输送水汽，这一强水汽输送的中心在阿拉伯海。受到西南季风的影响，西太平洋洋面及南海地区也向中国的长江以南省份输送水汽。在长江中下游地区出现了强水汽通量梯度，在这一地区的水汽通量辐合促使南侵的中小尺度系统的发展，从而在低层构成静止锋和切变线等，形成阴雨天气，长江中下游地区进入梅雨期。

6月 105°E 越赤道气流对南海的水汽输送相对已不重要,主要由阿拉伯海通过孟加拉湾地区向南海地区输送水汽。此时,中国南方省份的水汽来自于南海地区和孟加拉湾地区。

7月副高出现第二次北跳,脊线在 $25\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间。副高南部的东南方向的水汽输送继续减弱。阿拉伯海的水汽输送大值中心继续加强,越过印度半岛经过孟加拉湾向南海及中国大陆输送水汽。在西南季风的作用下,中国西部内陆上空的水汽通量增加,出现了水汽输送大值中心。东亚大陆上的西南水汽输送轴北移,此时长江中下游地区及华北南部地区出现水汽通量的辐合。长江中下游的梅雨维持到7月中旬,从7月下旬开始华北进入雨季。7月中国大陆降水的水汽来源于南海及孟加拉湾。

8月副高脊线在 30°N 附近,副高南部的东南向水汽输送继续减弱,大值区已基本消失。阿拉伯海的水汽输送中心继续维持,大值区越过印度半岛,经孟加拉湾,通过中南半岛到达南海地区并延伸至 140°E 附近的西太平洋上。南海北部地区及西太平洋洋面上水汽沿季风槽从东南方向输入中国大陆。虽然中国大陆上空没有强水汽通量辐合,但是来自于洋面的源源不断的东南向水汽输送同中高纬度系统或热带低压相互作用,导致了我国北方暴雨。8月中国大陆的水汽主要源于西太平洋和南海北部,而孟加拉湾地区并没有很明显的直接贡献。

总之,夏季东亚上空水汽水平输送特征各月间有很大差异,这种差异同夏季风环流的活跃有密切联系。源于上游印度洋的水汽输送无论对南海的水汽收支还是对中国大陆长江以南省份的降水都起重要作用。

4 夏季南海地区水汽的收支与输送特征

4.1 夏季南海地区的水汽收支

图2是南海地区各边界水汽在4~8月的逐候收支情况,用850 hPa的水汽总辐合量表示。正值表示在该边界向南海地区输入水汽,负值表示在该边界水汽从南海地区输出。

随着副高北跳,其南部东风减弱,东边界向南海地区输送的水汽减少。5月2候到5月4候突然减小,这是南海季风爆发阶段环流场发生较大调整的结果。6月2候以后,东边界不再向南海地区输入水汽,而是输出水汽进入西太平洋。

西边界在4月份输出水汽,输出的水汽逐渐减小,在5月2候之后变为输入水汽,对应着南海季风爆发期间上游西风的加强,并且在南海季风爆发后,西边界的水汽输入占主导地位。在6~8月来自上游的赤道西风控制了南海地区,所以西边界的水汽输入与东边界的水汽输出形成了很好的对应关系。

南边界的水汽输入同 105°E 越赤道气流有关。在5月2候到5月4候有一个小的跃升,之后逐渐有所增加。5月上半月,即南海夏季风爆发前夕,南边界对南海地区的水汽输入相对重要。在此之前南海地区以东边界输入为主;之后南海地区以西边界输入为主。

南海北边界的水汽输出在季风爆发前期变化不明显,主要受副高西侧的西南气流控制。而季风爆发后,水汽输出增加,在6月末达到最大值,表明从南海地区折向北的气

流源源不断向中国大陆地区输送水汽，为中国大陆的夏季降水提供了水汽来源。随着东亚热带季风的撤退，输出逐渐减小。

从总的水汽收支情况看，南海地区是一个水汽汇区。在南海季风爆发前水汽输出逐渐减小，在南海季风爆发后，水汽输入增加且输入量趋于稳定。

4.2 与水汽输送有关物理量的演变特征

水汽输送的方向由风场决定，输送的大小则由风场与水汽含量共同决定。

图 3 给出 $0\sim 20^{\circ}\text{N}$ 多年候平均 850 hPa 纬向水汽输送 F_x 的时间-经度剖面图。4 月初西风首先出现在孟加拉湾地区，随着索马里急流的加强，南海上游赤道西风不断加强东伸，而副高则东退，5 月 4 候南海季风爆发时，南海地区东风转为西风。当印度西南季风爆发后，6~8 月印度半岛上出现西风大值区，同时西风逐渐东伸到西太平洋；4 月水汽的最大值中心实际位于中南半岛上空，随着南海季风的爆发，5 月中南半岛上空的

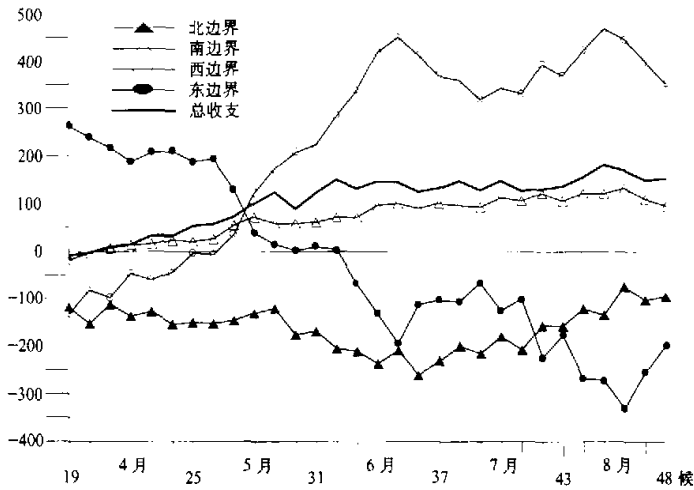


图 2 多年平均的 4~8 月南海地区各边界候平均水汽收支
正值为输入水汽，负值为输出水汽。单位： $10^4\text{ kg hPa}^{-1}\text{ s}^{-1}$

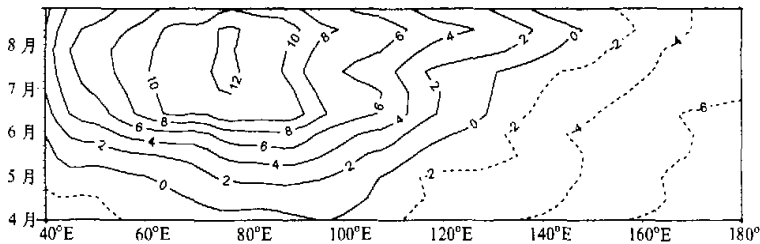


图 3 $0\sim 20^{\circ}\text{N}$ 多年候平均 850 hPa 纬向水汽输送 F_x 时间-经度剖面图
单位： $\text{g hPa}^{-1}\text{ cm}^{-1}\text{ s}^{-1}$

大值区已逐渐东伸到南海上空,西太平洋上空水汽含量也逐渐变大。印度季风爆发后,印度半岛上的水汽含量也逐渐增加。6~8月印度半岛、孟加拉湾上空及中南半岛到南海地区上空分别出现了水汽含量高值中心,西太平洋上的水汽含量也有些增加,但中太平洋上水汽含量变化不大,阿拉伯海地区的水汽含量相对其他地区较小;纬向水汽输送的演变同纬向风场的变化基本一致。

4月到5月初,由于索马里急流还较弱,阿拉伯海高压位于阿拉伯半岛南端,阿拉伯海地区水汽向东输送。低纬西太平洋地区则由副热带高压南缘的东风控制,中南半岛东部、南海及西太平洋地区水汽亦为向西输送。在孟加拉湾槽前西南气流及槽后西北气流的控制下,从印度半岛到中南半岛西部纬向水汽输送表现为向东输送。向西与向东输送的水汽在中南半岛辐合,中南半岛进入雨季。随着索马里急流的加强和阿拉伯海高压的消失,南海上游70~90°E的赤道西风加强东伸,西太平洋副高东退,西风水汽输送逐渐东进。5月初,南海地区的西部已经被向东的输送所控制,南海地区成为向东、向西水汽输送的辐合区。向东的输送继续东伸加强。季风爆发后,整个南海地区的纬向水汽输送已变为西风输送,7、8月向东的水汽输送东伸至低纬西太平洋洋面。夏季从中南半岛到西太平洋的纬向水汽输送辐合为ITCZ上的降水提供了水汽来源。

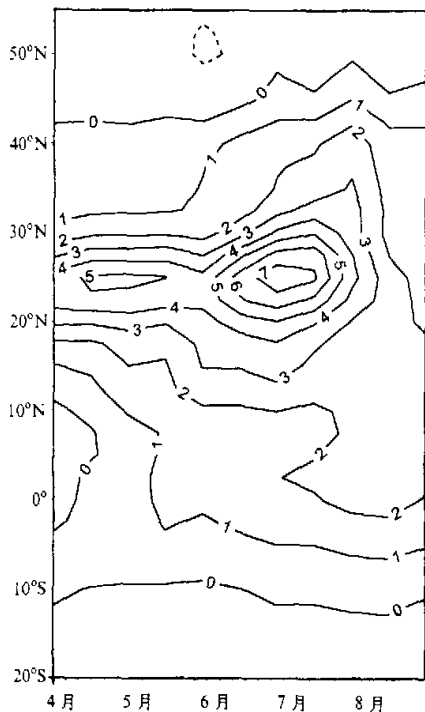


图4 105~120°E 多年候平均850 hPa 经向水汽输送 F_y 的时间-纬度剖面图
单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$

图4是105~120°E多年候平均850 hPa经向水汽输送 F_y 的时间-纬度剖面图。最显著的特征是夏季经向水汽输送中心并不在南海,而是在20~30°N之间的华南地区。南海区域的经向水汽输送在4~8月是逐渐增强的,但整个夏季由南半球输入到南海的水汽较弱。

从水汽含量的变化来看,5~8月高湿带位于20~30°N之间,南海地区水汽含量在季风爆发后变化幅度不大,尤其是南海南部。7月份高湿带向北凸出(图略)。

经向水汽输送形势及其演变是经向风场同水汽场共同作用的结果。南海北部及华南地区由于经向风和湿度均较大,所以这一地区的水汽经向通量也很强;在高纬地区,虽然风速不弱,但因水汽含量低,缺乏从高纬向南的水汽输送。

5月以后南海一直维持弱向北水汽输送,这是105~120°E越赤道气流的产生和维持所致,但这股越赤道气流并不强。6、7月份华南地区是经向风高值中心,这说明南海处于辐散区,不利于该地的降

水; 而高值中心北部的江淮流域正好属于辐合区, 加之湿度场配置, 非常有利于江淮流域的梅雨。原来位于华南地区经向水汽输送中心在 8 月消失, 南海则成为经向水汽通量高值区。

由此可见, 南海上游地区向东的纬向水汽输送在 5~7 月间是随时间逐渐加强。它对南海夏季风爆发和维持具有决定性作用。105°E 附近越赤道气流的水汽输送对南海夏季风只有次要的作用, 但自南海向北的水汽输送对中国降水有较大贡献。

4.3 南海季风爆发早晚年水汽输送形势对比

按文献[5]得到的 1975~1998 年的南海夏季风爆发时间表, 可以确定爆发偏早年为 1984、1985、1986 和 1996 年, 偏晚年为 1982、1983、1987、1991、1992、1993 和 1995 年。

图 5 为南海季风爆发偏晚年与偏早年 5 月第 4 候 850 hPa 水汽输送逐候差值。从图 5 可以清楚看到爆发早晚年水汽输送的差别。受孟加拉湾槽前西南风影响而造成的华南地区强水汽输送中心, 在偏晚年要强于偏早年。5 月 2 候, 105°E 附近的越赤道水汽输送偏晚年则弱于偏早年。尽管偏早年的索马里急流在 5 月 5 候以后才明显强于偏晚年, 但从赤道印度洋到南海的输送偏早年却一直明显强于偏晚年。南海南部地区是一差值中心, 爆发早的年份向东输送偏强。南海北部偏晚年的西南输送比偏早年略强。特别在 5 月 4 候, 南海地区形成反气旋性差值分布, 说明在偏早年有更多的暖湿空气向南海地区辐合, 这有利于南海地区的季风性降水。

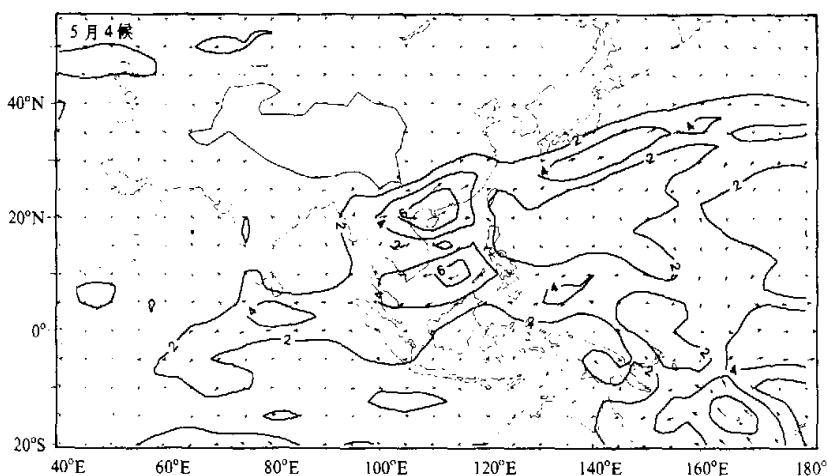


图 5 南海季风爆发偏晚年与偏早年 5 月第 4 候 850 hPa 水汽输送逐候差值

单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$

爆发偏早与偏晚年的水汽输送通道亦有明显差别。在偏早年, 从赤道印度洋到南海地区的输送通道建立早且维持时间长。在爆发偏晚年, 最先建立起从中国南部大陆到中纬西太平洋的西南水汽输送, 并且很稳定。偏早、晚年于 5 月 6 候均建立起从赤道印度洋到中纬西太平洋的水汽输送通道, 但偏早年西南水汽输送轴更偏南, 偏晚年南海南部

却处在东风输送的控制下。这种输送形势的差别使得在偏早年南海南部有更强的向东输送,而华南地区及南海北部的西南水汽输送较弱,从而导致了南海地区水汽输送辐合的不同,偏早年更有利于暖湿空气在南海的辐合。来自于上游赤道印度洋的水汽输送对南海季风的爆发具有重要意义。从上游到南海的向东输送建立早对南海对流活动有利,则南海季风爆发早;反之不利于暖湿空气在南海辐合,季风爆发偏晚。

我们还分析了长江中下游地区旱涝年水汽输送之差异(详细内容将另文发表),发现南海季风爆发早晚与长江中下游旱涝年的水汽输送有一定联系。图6是这种关系的示意图。孟加拉湾南部地区是中国长江中下游和南海地区重要的水汽源地。从此源地出发的水汽输送有两条主要的轴线,一是向东进入南海,另一条是向东北经中印半岛进入华南和长江中下游地区。当南海季风爆发偏早时,南海及其上游地区向东水汽输送通道建立早且维持时间长,强度大,该年长江中下游降水往往偏少;反之,长江中下游为多雨年。顺便指出,南海北部向华南地区水汽输送的年际变化,比上述两支主要水汽通道的年际变化要小得多。

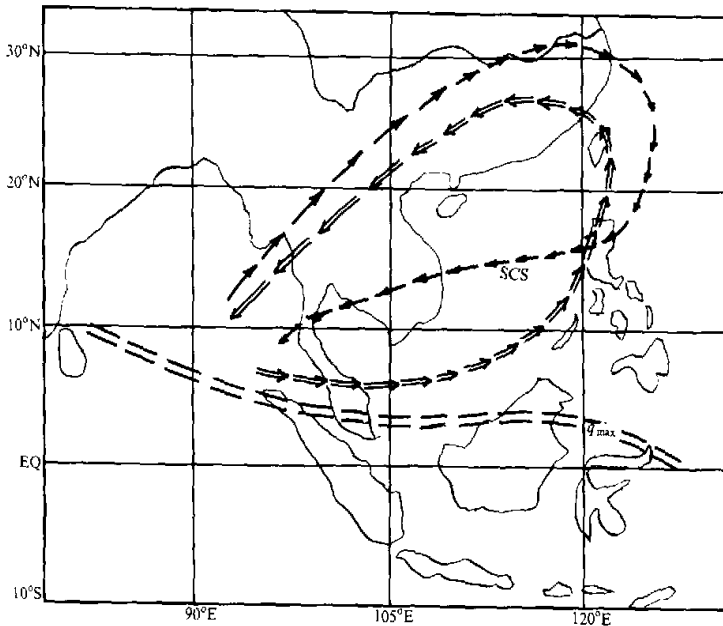


图6 南海季风爆发早晚与长江中下游旱涝的水汽输送特征示意图
双虚线表示气候平均最大水汽轴,单、双箭头分别为长江中下游
旱年和南海季风爆发早、晚年的水汽输送之差

5 结论

(1) 夏季东亚上空水汽水平输送特征在各月有很大差异,这是夏季风环流系统演变造成的。105°E 附近越赤道气流对南海、长江流域及其以南地区的水汽输送作用不如从

阿拉伯海经印度半岛南部、孟加拉湾穿越中南半岛的输送作用显著。

(2) 南海地区水汽收支在夏季风爆发期间各边界发生显著变化。东边界由水汽输入变为输出, 而西边界则由输出变为输入, 这是由于夏季风爆发期间副高东退和上游赤道西风加强造成的。就总的水汽收支而言, 南海地区是一个水汽汇区。

(3) 来自于上游赤道印度洋的水汽输送对南海季风的爆发具有重要意义。纬向水汽输送对爆发起主要作用, 经向输送主要有利于 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间的华南地区的水汽辐合, 自南海向北的水汽输送对中国降水有一定贡献。

(4) 南海季风爆发早晚年的水汽输送通道存在明显差别。在爆发偏早年, 从赤道印度洋到南海地区的输送通道建立早且维持时间长; 在爆发偏晚年, 最先建立起从中国南部大陆到中纬西太平洋的西南水汽输送, 并且较稳定。这种输送形势的差异导致了南海地区水汽辐合的不同, 偏早年更有利于暖湿空气在南海的辐合。在偏晚年南海地区水汽则是辐散的, 不利于形成季风性降水。南海季风爆发早晚年与长江中下游旱涝年的水汽输送有一定联系。

参 考 文 献

- 1 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏, 中国的梅雨, 东亚季风和中国梅雨, 北京: 气象出版社, 1998, 3~46.
- 2 罗绍华, 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, 全国热带季风学术会议文集 (1981), 昆明: 云南人民出版社, 1982, 142~151.
- 3 孙颖, 丁一汇, 1997 年夏季风时期大尺度水汽输送, 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用, 北京: 气象出版社, 1999, 101~107.
- 4 金祖辉, 1979 年夏季南海地区水汽收支, 全国热带季风学术会议文集 (1981), 昆明: 云南人民出版社, 1982, 152~163.
- 5 谢安, 刘震, 叶谦, 赤道涡旋与南海夏季风爆发, 气象学报, 1997, 55(5), 611~618.

Climatological Characteristics of Moisture Transport during Summer Monsoon over South China Sea

Xie An and Song Yanyun

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Mao Jiangyu and Ye Qian

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Climatological characteristics are investigated for moisture transport during summer monsoon over the South China Sea (SCS) based on NCEP/NCAR reanalysis data for the period of 1973~1998. It is found that the significant difference of moisture transport over East Asia exist between months due to evolutions of monsoon circulation. The moisture transports coming from the upstream of Indian Ocean play important roles in the SCS moisture budget, the SCS monsoon onset and the South China precipitation. Meridional transport is favorable to moisture convergence over South China between 20°N and 30°N . The SCS is a moisture sink area. Moisture transport channels in early onset

years are significantly different from that in delayed onset years. For early onset years, the moisture passageway from the equatorial Indian Ocean to the SCS occurs earlier and maintains for a longer time, the SCS is liable to become moisture convergence region in the period of April~ May. For delayed years, the moisture over the SCS remains divergent in the end of Spring and the beginning of Summer, which is not favorable to the SCS monsoon.

Key words: South China Sea; summer monsoon; moisture transport.