

2002 年南海夏季风爆发期间南海北部 海气通量分析与比较

陈奕德¹ 蒋国荣¹ 张 韧¹ 闫俊岳² 姚华栋² 唐志毅²

¹ 解放军理工大学气象学院二系, 南京 211101

² 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 基于 2002 年南海夏季风期间西沙海气通量观测试验, 采用梯度廓线法计算了观测期间的动量通量、潜热通量、感热通量及其相关要素, 并进行了分析与对比。结果表明: 南海夏季风爆发前后, 南海北部海气通量及其相关要素等都存在显著差异, 不同天气形势下也有较大变化; 南海北部海域在全球海气相互作用中的影响可能不如西太平洋显著; 平均而言, 三次试验的南海北部海气通量变化较小, 感热通量与潜热通量之间存在比较稳定的比例关系, 鲍恩比(Bowen Ratio)维持在大约 0.05。

关键词 南海 夏季风 海气通量 观测研究 梯度廓线法

文章编号 1006-9895(2005)05-0761-10

中图分类号 P732

文献标识码 A

Analysis and Comparison of Air-Sea Flux in the Northern South China Sea (SCS) During the Monsoon Onset in 2002

CHEN Yi-De¹, JIANG Guo-Rong¹, ZHANG Ren¹, YAN Jun-Yue²,
YAO Hua-Dong², and TANG Zhi-Yi²

¹ Meteorologica College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract From 24 April to 22 June 2002, before and after the South China Sea (SCS) monsoon onset, the 3rd experiment of air-sea flux observation was carried out at Xisha Qundao (16°50'N, 112°20'E) which is located in the northern part of South China Sea. A series of high quality and high frequency (1 time/min) data were gained in the experiment. Based on the datasets and the NCEP data at the same time, firstly this paper suggests that the summer monsoon onset firstly in the northern part of the SCS on 14 May and it onset in the whole SCS on 16 May by diagnosing the 850 hPa wind field. Secondly the momentum flux, sensible heat flux, latent heat flux and some other correlated factors are calculated and analyzed by flux-profile method. Thirdly the air-sea fluxes between the western Pacific and the South China Sea are compared in the past years to find their common and different characteristics. The three main results are shown as follows: (1) In the experiment, the mean momentum flux was $0.0458 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, the mean latent heat flux was $94.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, and the mean sensible heat flux was $4.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. The three fluxes were smaller than those in the western Pacific. (2) The air-sea fluxes in the northern part of the SCS and their correlated factors were remarkably different before and after the SCS monsoon onset, and they also varied greatly under different weather conditions. Every factor evolved stably besides the daily variation before the monsoon onset. But after the monsoon onset, the daily variation enhanced, the high frequency turbulence increased, and every flux varied greatly in a short time, especially in the

raining phase, which reflected that the meso-scale and microscale strong turbulence occurred in the acute weather background after the monsoon onset. (3) The northern part of the SCS had the oceanic common characteristics as well as the western Pacific. Its sensible heat flux is far smaller than its latent heat flux. But the northern part of the SCS might play a less important role in the global air-sea interaction than the western Pacific. The air-sea fluxes in the northern part of the SCS changed little from May to June according to the average of the three experiments. Moreover, there was a stable ratio of the sensible heat flux to the latent heat flux. The latent heat flux was about twenty times as much as the sensible heat flux, in other words, the Bowen ratio was about 0.05.

Key words South China Sea, monsoon, air-sea flux, observation research, flux-profile method

1 引言

海气通量交换是海气相互作用的关键环节,海洋和大气间相互影响、相互作用的过程最初都是由海气界面通量交换来实现的。一方面,海洋通过感热、潜热交换过程影响大气边界层、提供水汽输送,进而影响大气环流;另一方面,海水运动的大部分驱动力也来自海气界面处的通量交换,海气界面处的感热通量、潜热通量以及辐射通量是影响海洋上混合层乃至季节温跃层变化的重要因子,而动量通量则是海流、海浪的动力来源。海气通量交换先通过影响海洋上层海水的运动以及海水温盐分布结构,再借助于海洋内部的热力、动力调整过程进一步影响深层海水的运动。因此,海气通量交换是气候变化的重要机制之一,对于季节到年际时间尺度的气候变化及其预测,只有在充分了解大气和海洋的相互作用及其动力学的基础上才有可能得到解决。国际上许多大气海洋试验,如已完成的 BOMEX(巴巴多斯海洋和气象实验)、AMTEX(气团变性实验)、ATEX(大西洋季风试验)、TOGA(热带海洋和全球大气试验),和目前正在推行的“全球大洋通量联合研究”(JGOFS)、“全球海洋生态系统动力学研究”(GLOBEC)、“海岸带陆海相互作用研究”(LOICL)、全球能量与水循环试验(GEWEX)、气候变化和可预报性计划(CLAVER)、亚澳季风试验计划(CAMP)、孟加拉湾海-气相互作用试验(JASMINE),都把海气通量观测研究置于特别显要的位置。海气通量交换及其与气候变化的关系是当前气候系统中各圈层相互作用研究的难点和重点。

1998 年南海季风试验(SCSMEX)期间,国家气候中心在西沙海面设立通量观测塔^[1],填补了国内在这一领域的空白。2000 年 4 月初至 6 月底,国

家气候中心与解放军理工大学气象学院联合在西沙实施了 2000 年海气通量观测试验^[2]。2002 年,这两个单位再次联合进行了第三次南海夏季风爆发期间的海气通量观测试验。这次试验获得了高质量、高时间分辨率的干湿球、水温、风速梯度资料以及辐射、三维风速、气温和湿度脉动资料。本文利用此次试验部分观测资料,计算 2002 年南海夏季风爆发期间南海北部海气间动量、潜热和感热通量,并对其进行分析和比较。

2 观测试验概况

2002 年海气通量观测时段为 4 月 24 日~6 月 22 日。观测塔位于西沙永兴岛西南面(16°50'N, 112°20'E)礁盘边缘,距岛约 300 m,海面开阔,塔周围的风基本不受岛屿、陆地的影响。塔高 16 m,平均水深约 1.8 m,仪器安装在 1.5 m 长的钢质伸臂上,伸臂为西北—东南指向。水温观测地点选在塔基附近,水深 5~7 m,水温表吊在浮板上,始终保持与水面的固定距离。全部仪器在 2002 年 3 月由国家气象计量站统一进行了精度标定。仪器的性能指标和安装高度如表 1 所示。

本文将每分钟 1 次的高频观测资料拓展为逐半小时平均的资料,得到 59 天(2832 个数据点)连续的风速、干湿球温度和海温资料,采用梯度廓线法计算南海夏季风爆发期间海气间动量通量、潜热通量和感热通量。本文采用 Launiainen 等^[3]提出的方法和程序,具体算法原理参阅文献^[4]。该计算方法的最大优越性是可以利用常规海面气象观测记录通过数值迭代计算得到动量通量、潜热通量和感热通量等,计算结果具有较高精度^[5]。此外,本文在分析天气形势时利用了 NCAR 资料和西沙气象台提供的逐日观测资料。

表 1 2002 年南海海气通量观测试验使用的部分仪器性能指标和安装高度
Table 1 The capability and fixing height of some apparatus used in the experiment of the South China Sea (SCS) air-sea flux observation in 2002

仪器名称 Apparatus	精度范围 Precision	采样频率 Frequency/min ⁻¹	采样层 Sampling layer
干球温度采集器 Dry-bulb thermometer	±0.05 K	1	5 层: 2 m、3 m、5 m、9 m、13 m 5 layers: 2 m, 3 m, 5 m, 9 m, 13 m
湿球温度采集器 Wet-bulb thermometer	±0.05 K	1	5 层: 2 m、3 m、5 m、9 m、13 m 5 layers: 2 m, 3 m, 5 m, 9 m, 13 m
水温表 Water-thermometer	±0.01 K	1	2 层: 0.01 m、0.5 m 2 layers: 0.01 m, 0.5 m
风速采集器 Wind velocity recorder	±0.1 m·s ⁻¹	1	5 层: 2 m、3 m、5 m、9 m、13 m 5 layers: 2 m, 3 m, 5 m, 9 m, 13 m
风向采集器 Wind direction recorder	±0.1°	1	1 层: 11 m 1 layer: 11 m

3 2002 年南海夏季风期间的天气过程特征

本文以低层西南风的建立为南海季风爆发的标志^[6], 基于 850 hPa 风场对南海海域夏季风的爆发进行诊断, 认为 2002 年南海夏季风爆发的时间基本属于正常, 5 月 14 日南海北部西南季风爆发, 16 日 110°E 附近出现越赤道气流, 致使南海夏季风全面爆发(图略)。

西沙位于南海中北部, 基于 850 hPa 形势场和图 1~4, 观测期间西沙海域经历的主要天气过程可分为以下几个阶段: (1)副高控制期(5 月 9 日前); (2)转换期(5 月 9~13 日); (3)西南季风爆发期(5 月 14~22 日); (4)冷空气影响期(5 月 23~28 日); (5)第二次活跃期(5 月 29 日~6 月 12 日); (6)季风中断期(6 月 13 日后), 存在两种天气系统先后控

制西沙海域, 6 月 13~14 日西沙海域受副高西侧边缘的影响, 6 月 15~21 日受北部低压槽影响, 西沙海域位于槽前。这主要针对南海北部进行划分, 如果从整个南海海域来看, 情况会有所不同。

4 南海北部海气间动量、潜热和感热通量特征分析

4.1 海气温差

对比图 3~5, 可以发现, 降水发生时气温变化剧烈、海气温差迅速增大; 降水结束后, 海气温差短时内明显减小, 随后缓慢增大, 充分体现了海洋和大气的物理属性差异及其在热带海洋大气中的表现。观测期间, 西沙海域平均海温(T_w)为 29.9℃, 平均气温(T_a)为 29.1℃, 平均海气温差为 0.8℃, 并且逐日海气温差几乎全为正值, 说明观测期间西

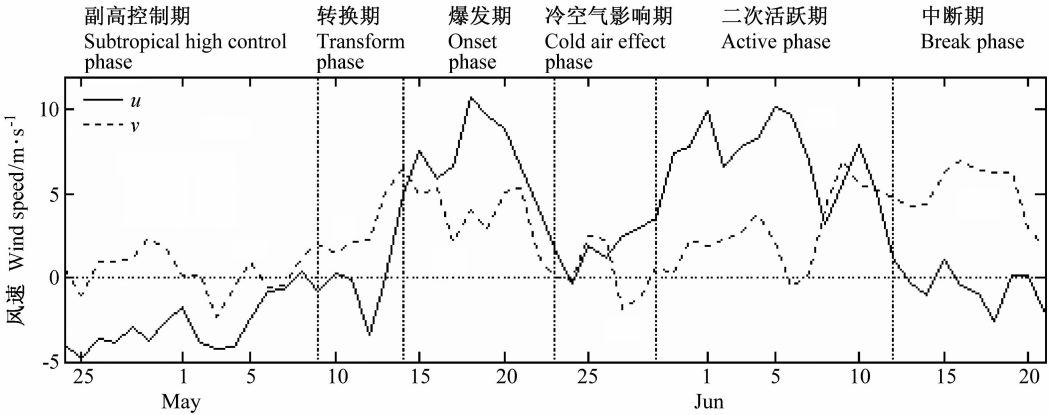


图 1 观测期间永兴岛 850 hPa 逐日风速演变
Fig. 1 The evolvement of the daily mean 850 hPa wind speed in Yongxing Island during the experiment

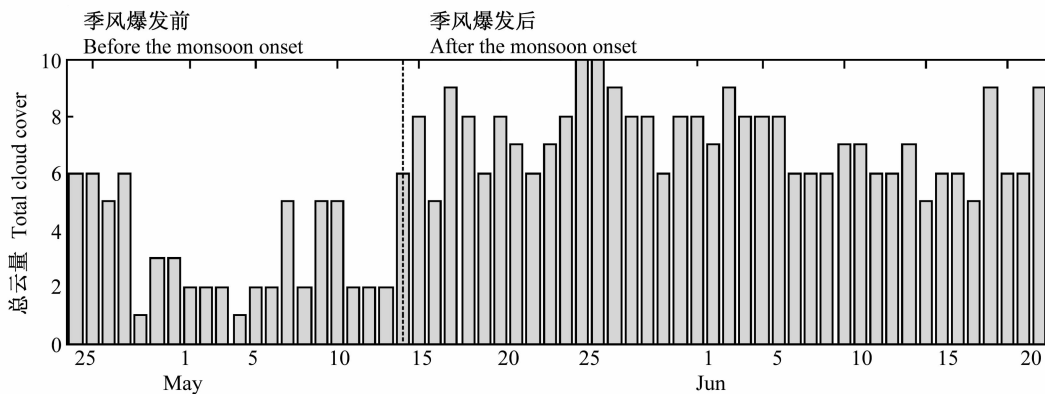


图2 观测期间永兴岛日平均总云量演变

Fig. 2 The evolvement of the daily mean total cloud cover in Yongxing Island during the experiment

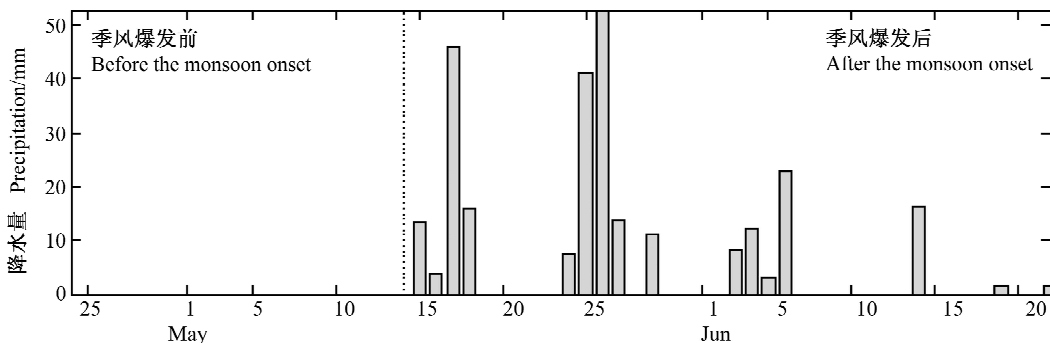


图3 观测期间永兴岛日总降水量演变

Fig. 3 The evolvement of the daily total precipitation in Yongxing Island during the experiment

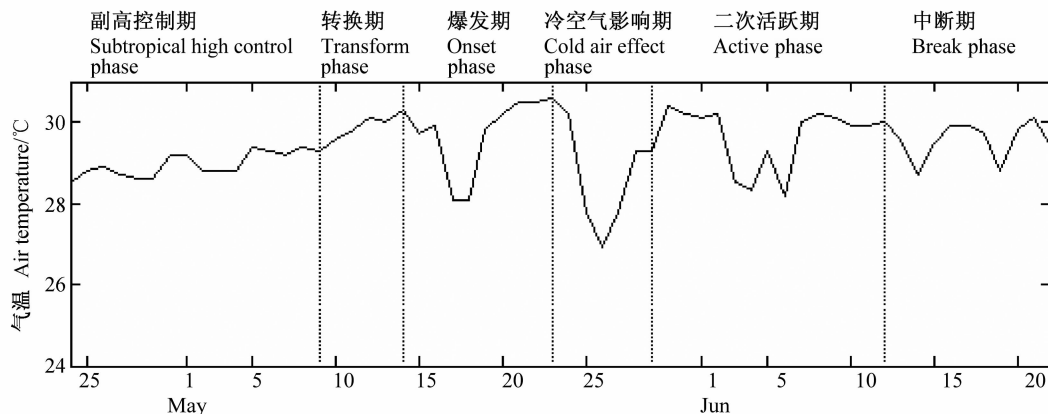


图4 观测期间永兴岛日平均气温演变

Fig. 4 The evolvement of the daily mean air temperature in Yongxing Island during the experiment

沙海域的大气层结以不稳定为主,但在图5中,海气温差可在短时间内小于零,即出现短时的稳定大气层结,主要存在于季风爆发期间。对比分析表明,海温和气温的变化在季风爆发后比季风爆发前更为复杂,海气温差在季风爆发后经历了四个峰值过程。

4.2 动量通量

大气与海洋的动量通量(τ)输送是海气相互作用的重要组成部分,是大气影响海洋的基本方式,与海流和波浪的形成密切相关。比较图6和图7,动量通量的演变与10 m高度风速(u_{10})的演变十分

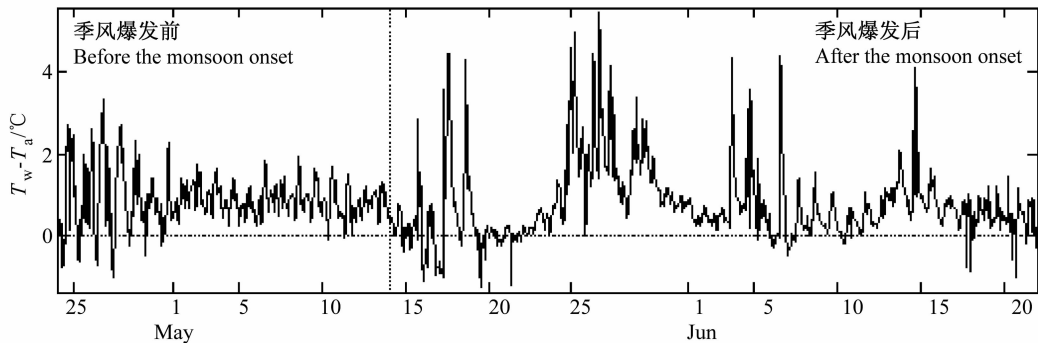


图 5 海气温差的半小时演变

Fig. 5 The half-hour evolvement of the temperature difference between sea and air ($T_w - T_a$)

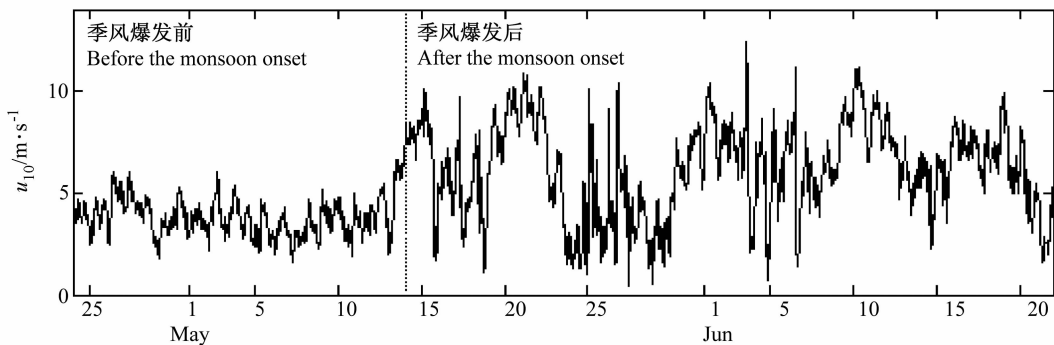


图 6 10 m 高度上风速的半小时演变

Fig. 6 The half-hour evolvement of the wind speed at the 10 m height (u_{10})

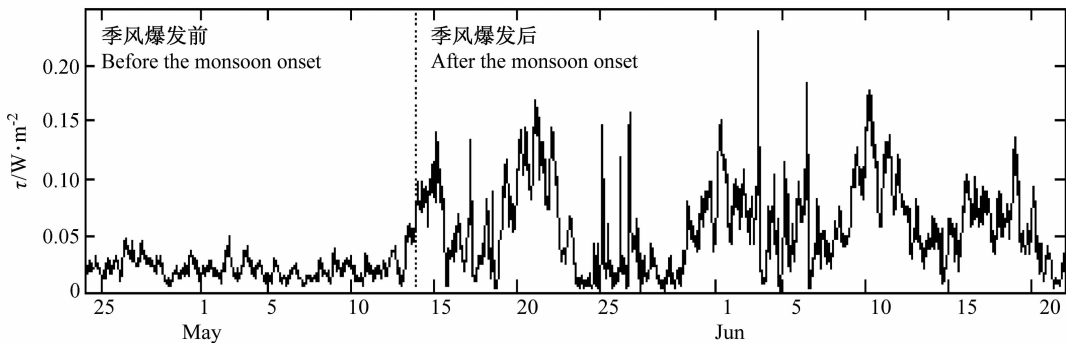


图 7 海面动量通量 τ 的演变

Fig. 7 The evolvement of the momentum flux (τ)

一致，计算所得相关系数为 0.9747，但它同时受大气层结的影响(主要通过动量输送系数 C_D 来实现)。计算所得季风爆发前后平均的动量通量分别为 $0.0214 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.0583 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，季风爆发后的动量通量是爆发前的 2.72 倍，即季风爆发前后大气对海洋的强迫作用和影响程度存在显著差异，季风强盛期的动量通量也大于季风减弱和中断期。根据最小二乘法原则，使用三次曲线对动量通量随风

速的演变进行拟合，结果为

$$\tau = [(0.5817u_{10}^3 + 4.910u_{10}^2 + 34.17u_{10} - 28.79) \pm 7.255] \times 10^{-4},$$

上式最后一项为实际动量通量对拟合曲线的平均偏差，占实际动量通量的 1.6%。

4.3 潜热、感热通量

图 8 为观测期间的潜热通量(E)和感热通量(H)演变，二者与风速的相关性较弱，尤其是感热

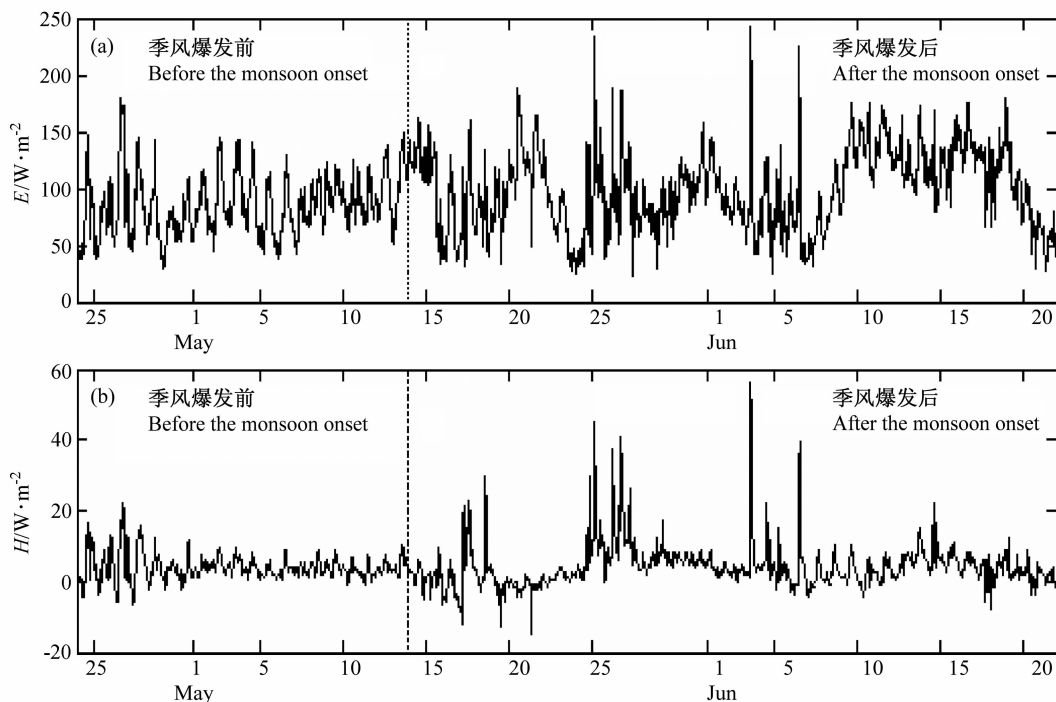


图8 海面热量通量的演变: (a) 潜热通量 (E); (b) 感热通量 (H)

Fig. 8 The evolvement of (a) latent heat flux (E) and (b) sensible heat flux (H)

通量的变化,受海气温差的影响更为明显,它在季风爆发后的四个大值区都与海气温差的极大值对应,同时还对应着观测期间的主要降水过程。

观测期间潜热通量平均值为 $94.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要范围在 $50 \sim 130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,但其极差(样本最大值与最小值的差)达到 $220.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,显示出潜热通量变化的复杂性。季风爆发初期(5月14~15日)和冷空气到达南海前后(5月20~23日)都出现了较强的潜热通量输送。这两个阶段,海温和气温都有不同程度的下降,海气温差出现极小值,而风速持续偏强,说明这两个阶段的潜热通量主要是由风速造成海面蒸发加剧所致。潜热通量随风速的三次曲线拟合结果如下,

$$E = (0.2109 \times u_{10}^3 - 4.106u_{10}^2 + 33.8236u_{10} + 0.8733) \pm 19.6004,$$

上式平均偏差达到平均值的20.8%,最大偏差可达 $99.0973 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,为结果的105.4%。因此,风速对潜热通量的拟合存在较大误差,必须结合其他因素进行订正。

感热通量在整个观测期间量值较小,平均为 $4.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,季风爆发后,部分时段的感热通量出现强烈振荡,主要发生在降雨出现的时候,与海气温差在季

风爆发后的四个峰值对应很好,说明感热通量与海气温差关系密切,计算所得二者的相关系数达0.9018,海气温差 0.5°C 附近,感热通量的分布范围最小(图略)。海气温差对感热通量的三次曲线拟合结果为

$$H = (0.1933 \times \Delta t^3 - 0.7980 \times \Delta t^2 + 6.4467 \times \Delta t - 0.6444) \pm 1.2836,$$

其中, Δt 为海气温差,平均偏差为平均感热通量的31.5%,而最大偏差也达到 $30.516 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,比用风速拟合(略)的效果有较大改善。

4.4 动量输送系数与热量输送系数

观测期间动量输送系数平均为 1.211×10^{-3} ,与风速总体相关系数为-0.5812。对动量通量输送系数进行公式拟合,可得

$$C_D \times 10^3 = (0.5772u_{10}^{-1} + 0.0041u_{10}^2 - 0.0434u_{10} + 1.1751) \pm 0.0272,$$

平均偏差为计算结果的2.2%,最大偏差 3.138×10^{-4} ,为结果的25.9%。

本文在计算潜热和感热通量时取 $C_E = C_H$ (即取潜热输送系数等于感热输送系数),并统称为热量输送系数(记作 C_H)。曲线拟合的结果为

$$C_H = (0.6862u_{10}^{-1} + 0.0035u_{10}^2 - 0.0415u_{10} + 1.1228) \pm 0.0330,$$

平均偏差占计算结果的 2.9%，最大偏差占平均结果的 29.8%。因此，采用拟合公式进行整体输送系数的计算，平均偏差很小，具有一定实用性。

4.5 小波分析

为了得到观测期间海气通量的扰动特征，使用具有 5 阶消失矩的 Daubechies 小波函数，对动量通量(图 9)和潜热、感热通量(图略)作了 6 个层次的小波分解。由图 9 可以清楚地看到，季风爆发前海气通量的演变主要是日变化基础上的较平稳演变过

程，而季风爆发后，分解得到的低频部分(a6)具有明显的天气过程，日变化(d5)和高频扰动(d1~d4)加强，通量的演变表现为天气过程和日变化基础上叠加的高频扰动。尤其在出现降水的时期，高频的 d2~d4 显著增强，反映出季风爆发后出现的剧烈天气背景下大气存在的中小尺度强扰动。

最后，给出观测期间不同阶段的各要素平均值(如表 2)。

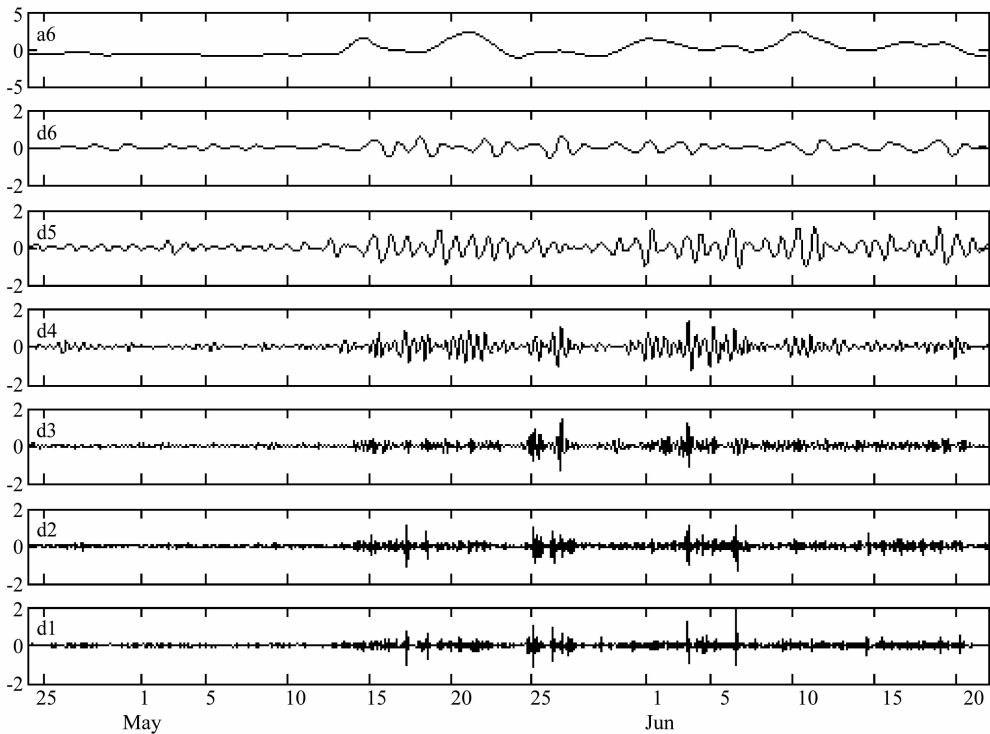


图 9 动量通量的小波分解(d1~d6 为小波分解的高频部分, a6 为低频部分)
Fig. 9 The wavelet outcome of the momentum flux (d1—d6; the high frequency of the wavelet; a6; the low frequency of the wavelet)

表 2 观测期间不同天气形势下海气界面要素平均情况

Table 2 The average value of the air-sea interface elements under different weather conditions during the experiment

	副高控制期 Subtropical high control phase	转换期 Transform phase	季风爆发期 Onset phase	冷空气影响期 Cold air effect phase	活跃期 Active phase	中断期 Break phase	全过程 Total process
$u_{10}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3. 719	4. 063	7. 019	3. 799	6. 695	5. 986	5. 363
$T_w/^{\circ}\text{C}$	29. 351	29. 981	29. 838	30. 153	30. 167	30. 090	29. 880
$T_a/^{\circ}\text{C}$	28. 438	29. 166	29. 516	28. 476	29. 467	29. 379	29. 073
$\tau/W \cdot \text{m}^{-2}$	0. 0203	0. 0246	0. 0725	0. 0253	0. 0666	0. 0522	0. 0458
$C_D \times 10^3$	1. 2317	1. 2279	1. 1727	1. 2993	1. 1888	1. 1815	1. 2107
$C_H \times 10^3$	1. 1954	1. 1895	1. 0955	1. 2731	1. 1188	1. 1197	1. 1565
$E/W \cdot \text{m}^{-2}$	81. 603	96. 794	98. 395	82. 924	98. 153	109. 50	94. 060
$H/W \cdot \text{m}^{-2}$	4. 088	3. 760	0. 833	8. 887	3. 978	4. 398	4. 071
10/L	−0. 610	−0. 563	−0. 246	−1. 589	−0. 336	−0. 249	−0. 525

注: 10/L 为 10 m 高度的稳定度参数, L 为 Monin-Obukhov 长度。
Notes: 10/L means the stability parameter at 10 m height, L is the length of Monin-Obukhov.

5 对比分析

5.1 南海北部与其他海域的海气通量对比

南海作为半封闭的海盆，其地理位置和海陆配置使得其温度、盐度、海流、海浪、水色等海洋要素与其他海域存在差异，同时北面是青藏高原，其热力作用也极大地影响着南海上空大气环流形势，因而南海海气通量必然有别于其他海域的海气通量，部分学者的研究结论如表 3。

本文得到的潜热通量、感热通量小于西太平洋地区，但鲍恩比与姚华栋等^[12]的结果相近，动量通量与熊康^[8]、徐天真等^[4]和姚华栋等^[12]的结论差别不大。下面主要与徐天真等^[4]的结论进行对比：“实验 3 号”1992 年 11 月~1993 年 2 月在西太平洋观测期间，平均风速 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，海温 29.4°C ，气温 27.9°C ，比湿 $19.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均稳定度参数 ($10/L$) 为 -3.76 。2002 年观测得到的南海北部平均海温、气温、比湿、平均风速都要高于西太平洋冬季

的值，但西太平洋的潜热通量、感热通量却大于南海初夏的值，因此推测，若同步观测，其差异应该更大。另一方面，南海北部计算得到的不稳定程度弱于西太平洋，即使在不稳定度最大的冷空气影响期，也低于西太平洋地区。这说明南海北部海域在全球海气相互作用中的影响可能不如西太平洋显著。

5.2 南海北部海气通量的年际比较

近年来，我国在南海海域进行了四次海气通量观测试验，通过其年际间的异同点比较，可以得到南海北部海域海气通量变化的一般特征，以及季风爆发的不同形态对海气通量的影响。

由表 4 可以看出，除用 1998 年资料计算得到的动量通量较大外，其他通量的结果差异很小，鲍恩比更是几乎一致。因此可以认为南海北部的感热通量、潜热通量在不同的季节可能存在差异，但其比例基本维持在 1: 20 左右，即鲍恩比约为 0.05；三次试验的南海北部海气通量，尽管夏季风爆发形态特征有所不同，但其平均海气通量的变化并不大。

表 3 不同区域通量研究的结果
Table 3 The different investigative results in different regions

	时间 Time	地点 Site	$C_D \times 10^3$	$C_H \times 10^3$	$E/W \cdot \text{m}^{-2}$	$H / W \cdot \text{m}^{-2}$	$\tau / W \cdot \text{m}^{-2}$
本文平均 This paper	Apr - Jun 2002	南海 The South China Sea	1.21	1.15	94.06	4.07	0.046
苗曼倩等 ^[7] Miao Manqian et al ^[7]	Feb - Mar 1974	台湾东面 East of Taiwan	1.35 *	1.14 *	/	/	/
Francy 等 ^[7] Francy et al ^[7]	Feb - Mar 1974	台湾东面 East of Taiwan	1.55 *	1.25 *	/	/	/
熊康 ^[8] Xiong Kang ^[8]	Oct-Nov 1987	西太平洋 The western Pacific	1.11	/	/	8.3	0.042
曲绍厚等 ^[9, 10] Qu Shaohou et al ^[9, 10]	Dec 1992	西太平洋	1.55	1.22	203.1	31.9	0.188
	Jan 1993	The western Pacific	1.36	1.18	120	13.1	0.051
	Nov 1992		1.04	1.11	75.3	5.6	0.011
	Oct - Dec 1986		1.53	/	150	18.0	/
徐天真等 ^[4] Xu Tianzhen et al ^[4]	Nov - Feb 1992	西太平洋	1.298	1.261	105.7	10.42	0.046
	Nov - Feb 1993	The western Pacific					
张强等 ^[11] Zhang Qiang et al ^[11]	May - Jun 2002	敦煌戈壁 The Dunhuang desert	2.36	2.10	/	/	/
姚华栋等 ^[12] Yao Huadong et al ^[12]	Nov - Feb 1992	西太平洋	/	/	116.2	5.87	0.048
	Nov - Feb 1993	The western Pacific					

注：* 为根据作者给出的拟合公式计算所得
Notes: * means that the values are calculated according to the formula given by the authors

表 4 南海海气通量年际间的比较

Table 4 Interannual comparison of the SCS air-sea flux

时间 Time	地点 Site	τ / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	E / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	H / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	鲍恩比 Bowen ratio
May-Jun 1998	西沙 ^[13] Xisha ^[13]	0.10	50~200	7.8	0.05
May-Jun 2000	西沙 ^[14] Xisha ^[14]	/	90.96	5.24	0.058
Sep 1994	南沙 ^[15] Nansha ^[15]	/	129.2	6.0	0.046

6 结论

综合分析讨论,南海海气通量观测期间动量、潜热和感热通量及其相关要素的变化特征可归纳如下:

(1) 观测期间动量通量平均为 $0.0458 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 潜热通量平均为 $94.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 感热通量平均为 $4.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 鲍恩比为 0.043, 小于西太平洋得到的结果。

(2) 季风爆发前、后,南海海气通量及相关要素的演变存在显著差异,不同天气形势下也有较大变化。各要素在季风爆发前主要是日变化基础上的较平稳演变过程,而季风爆发后,日变化加强,高频扰动增加,各种通量在短时间内有很大变化,尤其在有降水的时期,反映出季风爆发后出现的剧烈天气背景下大气存在的中小尺度强扰动。

(3) 南海北部与西太平洋在海气通量上均具有海洋的一般共性:感热通量远小于潜热通量。南海北部海域在全球海气相互作用中的影响可能不如西太平洋显著。平均而言,三次试验的南海北部海气通量变化较小,感热通量与潜热通量之间存在比较稳定的比例关系,鲍恩比维持在大约 0.05。

参考文献 (References)

[1] 闫俊岳,姚华栋,王强,等. 西沙海-气通量观测资料初步分析. 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. 147~151
Yan Junyue, Yao Huadong, Wang Qiang, et al. A preliminary analysis for air-sea flux observation data at the tower in Xisha. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 147~151

[2] Jiang Guorong, Zhang Ren, Sha Wenyu, et al. Artificial neural network correction of rough errors of observation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16**: 123~132

[3] Launiainen J, Vihma T. Derivation of turbulent surface fluxes - an iterative flux-profile method allowing arbitrary observing heights. *Environ. Software*, 1990, **5**: 113~124

[4] 徐天真,陈伯海. 西太平洋暖池区海-气通量计算分析. 青岛海洋大学学报, 1994, **23**(增刊), 97~107
Xu Tianzhen, Chen Bohai. The calculation and analysis of air-sea fluxes over the west Pacific warm pool. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 1994, **23**(Suppl): 97~107

[5] 孙即霖,刘秦玉,张秀芝. 1998 年夏季风爆发前后南海海-气热通量主要特征. 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. 152~156
Sun Jilin, Liu Qinyu, Zhang Xiuzhi. The main characteristics of heat flux in the South China Sea before and after the onset of summer monsoon. *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 152~156

[6] 闫俊岳. 南海西南季风爆发的气候特征. 气象学报, 1997, **55**: 174~186
Yan Junyue. Climatological characteristics South China Sea southwest monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**: 174~186

[7] 苗曼倩,张雷鸣. 非定常天气海面通量特征. 大气科学, 1990, **14**: 464~474
Miao Manqian, Zhang Leiming. Characteristics of sea surface fluxes on nonstationary synoptic systems. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, **14**: 464~474

[8] 熊康. 西太平洋热带海域湍流通量以及海面粗糙度 Z_0 和曳力系数 C_D 的观测研究. 大气科学, 1990, **14**: 475~482
Xiong Kang. Observational research on turbulent fluxes, roughness length and drag coefficient over West Pacific tropical ocean area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, **14**: 475~482

[9] 曲绍厚,王赛. 西太平洋热带海域西风爆发过程湍流输送的某些特征. 大气科学, 1996, **20**: 188~194
Qu Shaohou, Wang Sai. Some Characteristic of the transfer of the turbulent fluxes during the westerly wind burst over the western Pacific tropical ocean. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 188~194

[10] 曲绍厚. 西太平洋热带海域动量、感热和潜热等湍流通量的观测研究. 气象学报, 1988, **46**: 452~460
Qu Shaohou. Observation research of the turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat over the West Pacific tropical ocean area. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1988, **46**: 452~460

[11] 张强,卫国安,黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数. 中国科学(D辑), 2001, **31**: 783~792

- Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. The momentum and sensible heat bulk transport coefficient over the South-west Drought Area and Hungriness Area and the Desert Area. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2001, **31**: 783~792
- [12] 姚华栋, 李骥, 丁一汇. TOGA - COARE IOP 海表通量估算, 热带西太平洋海气相互作用考察及诊断模拟研究, 国家气候中心 TOGA - COARE 课题组, 1996. 1~16
- Yao Huadong, Li Ji, Ding Yihui. The estimate of the sea surface fluxes during TOGA - COARE IOP. The Air - Sea Interaction Review and Diagnose Simulate Research over the West Pacific Tropical Ocean Area, Edited by: National Climate Center TOGA - COARE Work Group, 1996. 1~16
- [13] 闫俊岳, 姚华栋, 李江龙, 等. 1998 年南海季风爆发期间近海面层大气湍流结构和通量输送的观测研究. 气候与环境研究, 2000, **5**: 447~458
- Yan Junyue, Yao Huadong, Li Jianglong, et al. Characteristics of turbulent structure and flux transfer on the sea surface during the onset of SCS monsoon in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5**: 447~458
- [14] Jiang Gourong, He Jinhai, Wang Dongxiao, et al. Observational study of air - sea fluxes during the SCS summer monsoon in 2000—features of thermal budget at the sea surface. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **18**: 245~258
- [15] 马耀明, 王介明, 刘巍, 等. 南海海域近海面层大气湍流结构及输送特征研究. 大气科学, 1997, **21**: 357~365
- Ma Yaoming, Wang Jieming, Liu Wei, et al. The study of the characteristics of both the atmospheric turbulence structure and the transfer in the lower layer of the atmosphere above the Nansha Islands area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21**: 357~365