

2008 年夏季风期间西沙海域海-气通量 交换及热量收支^{* 1}

黄磊¹ 王长科¹ 闫俊岳¹ 孙启振² 姚华栋¹ 赵兴华³ 陈长丘³
HUANG Lei¹ WANG Changke¹ YAN Junyue¹ SUN Qizhen² YAO Huadong¹
ZHAO Xuehua³ CHEN Changqiu³

1. 国家气候中心,北京,100081
2. 国家海洋环境预报中心,北京,100081
3. 海南省西南中沙气象台,永兴,573100

1. *National Climate Center, Beijing 100081, China*
2. *National Marine Environmental Forecast Centre, Beijing 100081, China*
3. *Xisha Observatory, Xisha Yongxing 573100, China*

2010-07-06 收稿,2011-06-14 改回.

Huang Lei, Wang Changke, Yan Junyue, Sun Qizhen, Yao Huadong, Zhao Xuehua, Chen Changqiu. 2012. Air-sea fluxes exchange and heat budget over the SCS Xisha seas during the period of 2008 summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(3):492-505

Abstract The data of atmosphere and ocean elements, including turbulent momentum, radiation, SST, wave, carbon flux, and air temperature, humidity, wind at heights of 3.5 m, 7.0 m, and 10.5 m, were observed in the fourth air-sea flux experiment during the monsoon at the Xisha islands in South China Sea (SCS) from April to October in the year 2008. The air-sea flux variation and heat balance were studied during the onset, development, break and decay of the SCS monsoon, as well as the processes of rainstorms, typhoons and cold currents, using the computational results in light of the scheme of eddy correlation and COARE3.0 parameterization. The results are as follows: in the clear days before the onset of the monsoon, total radiation was high and the loss of heat of the sea was low, so the net heat gain of the sea was quite high and the SST increased rapidly. During the onset, the total radiation was still high, and the long wave radiation of the atmosphere was strengthened while the long wave radiation of the sea stabilized, so that the net heat gain of the sea was still positive. The sensible heat (H_S) flux was high when the monsoon was active, especially in raining days, and the H_S flux decreased at the break of the monsoon. Though the latent heat (H_L) flux was high when the monsoon is active, the net heat gain of the sea was still positive because the solar short wave radiation was of high value. At the break of the monsoon, the H_S and H_L fluxes were reduced, and the seas gain more heat than when the monsoon was active. When it was raining, the solar short wave radiation decreased and the H_S flux augmented with the result that the sea lost much heat and the SST decreased fleetly. During the decay of the SCS monsoon, the humidity and the H_L flux decreased, so the net heat gain of the sea was positive, and the SST rose. Under the influence of the typhoons, the H_L flux increased rapidly with the augmentation of wind speed. The H_S flux was low in clear days and increased acutely in rainy days. Because the solar short wave radiation decreased and the H_L increased rapidly, the net heat gain of the sea was negative, so the SST was reduced. The momentum flux was mainly related to the wind speed at the sea level. These two elements are related using: $\tau = 0.00171v^2 - 0.003809v + 0.02213$.

Key words South China Sea summer monsoon, Flux exchange, Heat budget

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403600)、国家自然科学基金重点项目(70933005、40531006)。

作者简介:黄磊,主要从事气候变化、海-气相互作用等研究工作。E-mail: huanglei@cma.gov.cn

通讯作者:闫俊岳,主要从事海洋气候、南海季风、海-气相互作用等研究工作。E-mail: yanjy@cma.gov.cn

摘要 2008年4—10月在中国南海西沙永兴岛近海进行了第4次海-气通量观测试验,获得了整个夏季季风期间近海面湍流脉动量及辐射、表层水温、波浪及距水面3.5、7.0、10.5 m高度温、湿、风梯度观测资料,根据涡动相关法和COARE3.0法计算结果研究了2008年南海西南季风爆发、发展、中断、衰退包括暴雨、台风、冷空气影响等天气过程中海-气通量交换和热量收支变化。结果表明:(1)季风爆发前的晴天太阳总辐射强,而海洋失热量较小,热量净收支为较大正值,海面温度迅速升高。季风爆发期太阳总辐射仍然较强,大气长波辐射也有所增强,而海面长波辐射变化很小,故海面净辐射收支仍为正值;(2)季风活跃期特别是降水阶段感热通量增大,季风中断阶段变小;季风活跃期虽然潜热通量增大,由于太阳短波辐射没有减少,海洋净热量收支稍有盈余;中断阶段潜热通量、感热通量减少,海洋吸热大于季风活跃期;降水阶段由于太阳短波辐射减小,感热通量增大,海洋热量收支出现较大负值,海面温度很快降低。季风衰退期风力减弱,湿度减小,潜热通量减小,海洋热量收入又出现较大正值,海面温度回升;(3)台风影响过程中潜热通量随着风速增强迅速增大;感热通量因降水情况不同而有差异,晴天时减小,大雨时剧烈增大;由于太阳短波辐射减少、潜热通量剧增,海洋热量净收支出现负值,促使海面温度迅速降低;(4)动量通量主要与海表面风速有关;动量通量 τ 与风速 V 的关系可以表示为 $\tau = 0.00171v^2 - 0.003809v + 0.02213$ 。

关键词 南海夏季风,通量交换,热量收支

中图法分类号 P41

1 引言

从1998年“南海季风试验(SCSMEX)”开始,在西沙海域陆续进行了1998、2000、2002年3次海-气通量观测试验,获得了3个典型年份(西南季风1998爆发晚年、2000爆发早年和2002爆发正常年)5—6月近海面层风、温、湿度梯度、辐射和风速、温、湿度脉动资料。在3次观测试验的基础上,初步分析了西南季风爆发前后近海面层大气湍流结构,计算了海洋-大气间的热量、动量和水汽交换值,讨论了不同天气条件下海-气的热量交换特点和海-气通量交换系数变化(闫俊岳等,2000,2003a,2003b,2005,2006,2007; Yan, et al, 2003; 曲绍厚等,2000; 蒋国荣等,2002; Jiang, et al, 2004; 陈奕德等,2005),这些工作使得对季风区海-气通量变化的认识在此前短期调查(马耀明等,1997; 许建林,2000)的基础上深入了一步。

由于1998—2002年3次海-气通量试验观测时间均局限在季风爆发前后的5—6月,不能形成对季风爆发、发展、衰退及热带气旋影响强对流活动条件下通量交换及耦合过程的全面认识;并且,这3次海-气通量观测都是对热通量、动量和水汽通量的观测,没有对碳通量、波浪等要素的测量,使得进一步研究通量变化与环境条件的关系受到限制。国家重点基础研究发展计划项目“亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响”设计了2008年第4次南海通量试验研究计划,旨在认识西南季风发展全过程中海-气通量的变化特征,为模式的参数化改进提供依据。

2008年第4次南海通量观测试验主要在西沙永兴岛西南面礁盘边缘的海洋观测塔上进行,塔高12 m,北距永兴岛防波堤160 m,水深随着潮位变化于0.5—2.5 m,测量要素能够较好地代表小岛附近浅海海洋状况。塔上10 m高度处安装了高精度、快速反应的风、温、湿脉动测量系统——R3-50三维超声风/温仪、红外 H_2O/CO_2 分析仪,采样频率为10次/s。在距海面3.5、7和10.5 m高度处分别安装了3层温度、风、湿度梯度观测系统仪器,主要包括Vaisala温、湿度计和Met-One风向风速计,采样频率为1次/min。辐射观测系统为4 m高度上两对向上、向下的短波辐射表(Kipp&Zonen CM21)和长波辐射表(CG4),采样频率1次/min。表层水温系统包括红外表面温度计(4 m高)、109-L表层水温计(距塔45 m)、BW-1型高动态性能水温传感器(距塔20 m),分别测量海表面及以下0.1—0.2 m海水温度,采样频率1次/min。SBA3-2型声学测波仪置于礁盘边缘外面150 m,水深9—10 m,自动测量30 min平均的最大波高、最大波高对应的周期、最大周期、1/10大波、有效波高及周期。西沙气象台(距塔500 m)同步观测云、降水、天气现象和0—20 km高空风向、风速。2008年试验加强观测于西南季风爆发之前的4月25日启动,10月7日西南季风结束后结束,后续观测试验延长到2009年12月。

2008年观测试验由于仪器先进、实时监控、精心维护,所得观测数据精度较高,具有很好的代表性和连续性。观测项目涉及到有关海-气通量研究的全部海洋-气象要素;统计结果既有涡动相关法计算的动量通量(τ)、潜热通量(H_L)、感热通量(H_S)、碳

通量及各通量交换系数,也有被认为目前比较先进的 COARE3.0 算法(Fairall, et al, 2003; Michael, et al, 2003)计算的各项通量值。涡动相关法计算公式为

$$\begin{aligned} \tau &= \rho_a [(\overline{w'u'})^2 + (\overline{w'v'})^2]^{1/2} \\ H_L &= \rho_a L_v \overline{w'q'} \\ H_S &= \rho_a c_p \overline{w'\theta'} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u' 、 v' 、 w' 、 q' 、 θ' 分别为 3 方位风速和比湿、虚位温的脉动量, ρ_a 为空气密度, L_v 为单位质量水汽的蒸发潜热, c_p 为空气定压比热。

在大风大浪、高温、高湿、高盐腐蚀天气条件下,观测仪器运行基本正常;各要素具有较好的代表性和一致性;脉动量资料除了因为降水、盐份对红外气体/水汽测量仪的干扰外,绝大部分资料在湍流的惯性次区 u 、 v 、 w 、 T_a (气温)、 T_v (超声虚温)、 q 、 c (二氧化碳)无量纲功率谱符合 $-2/3$ 次律谱(图 1),图中, n 是频率, P_u 、 P_v 、 P_w 是三维速度功率谱, P_{T_v} 、 P_{T_a}

是超声虚温和气温功率谱, P_q 是比湿功率谱, P_c 是二氧化碳功率谱, S_u 、 S_v 、 S_w 是三维速度方差, S_{T_v} 、 S_{T_a} 分别是超声虚温和气温方差, S_q 是比湿方差, S_c 是二氧化碳方差。

比较两种计算方法的计算结果可知,由涡动相关法计算的通量和由 COARE3.0 算法计算的通量变化趋势相同,而潜热通量平均值略小(平均差异为 10 W/m^2),这是海面物理特性导致涡动相关法测量到的湍旋偏小造成的,与以往的分析与观测结果一致(陈家宜等, 2006; 沈艳等, 2005)。鉴于涡动相关法计算结果在降水、盐粒污染严重时段会出现偏差,为方便与以前较多采用 COARE3.0 算法的观测结果比较,本文采用 COARE3.0 算法得到的连续资料序列研究 2008 年夏季风期间(包括爆发前后、活跃、中断、衰退及台风影响过程中)通量交换和热量收支特点,而涡动相关法计算结果主要用来研究通量及交换系数与海洋气象要素的关系。

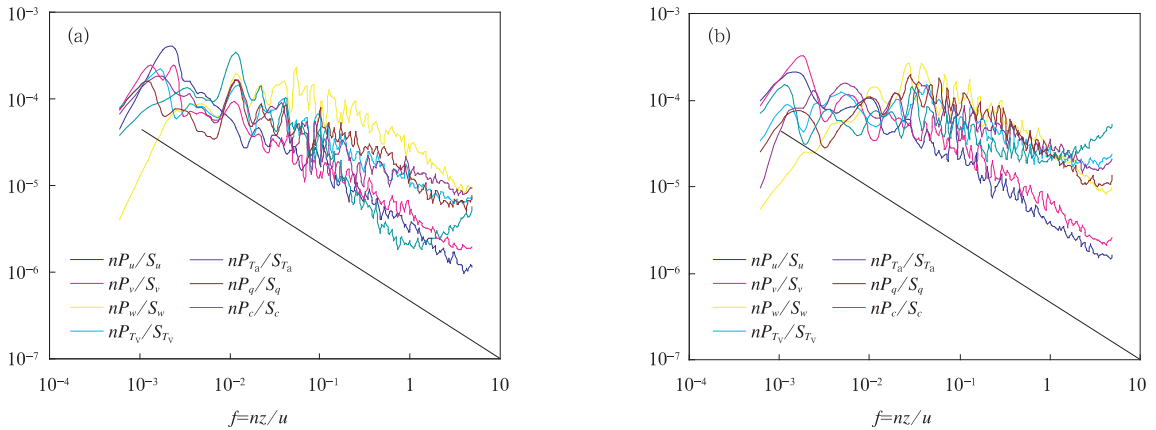


图 1 在湍流的惯性次区, u 、 v 、 w 、 T_a 、 T_v 、 q 、 c 无量纲功率谱符合 $-2/3$ 次律谱

(a. 2008 年 4 月 26 日 12 时起 30 min 平均, b. 2008 年 6 月 22 日 19 时 30 分起 30 min 平均)

Fig. 1 In the inertial sub-range the u , v , w , T_a , T_v , q and c normalized spectrum follows the $-2/3$ law as expected

(a. averaged over 12:00 – 12:30 BT April 26 2008, b. averaged over 19:30 – 20:00 BT June 22 2008)

2 2008 年南海季风爆发和发展的天气气候特征

南海夏季风(西南季风)时期的主要气候特点是盛行西南风,风速、云量、降水、湿度等气象水文要素随着季风爆发、活跃、中断、衰退及台风活动等天气过程而变化。2008 年南海季风于 5 月第 1 候在南海南部首先爆发,5 月 18 日南海北部季风爆发(全面爆发),经过 3 次活跃、4 次中断过程,8 月第 6 候

开始衰退,10 月第 1 候结束(图 2)。2008 年南海北部西南季风持续时间 4 个月 2 候,接近多年平均值。2008 年西南季风爆发和发展特点如下:

(1) 在西南季风爆发之前,4 月的南海通常维持晴朗、稳定、少雨的天气,但 2008 年 4 月中旬,该年 01 号台风“浣熊”(Noguri)突然于 4 月 15 日在南海南部生成,16 日由于弱冷空气等影响,加强为台风,其后一路北上,18 日台风“浣熊”的中心靠近西沙,西沙站 10 min 平均最大风速 38 m/s ,瞬时风速

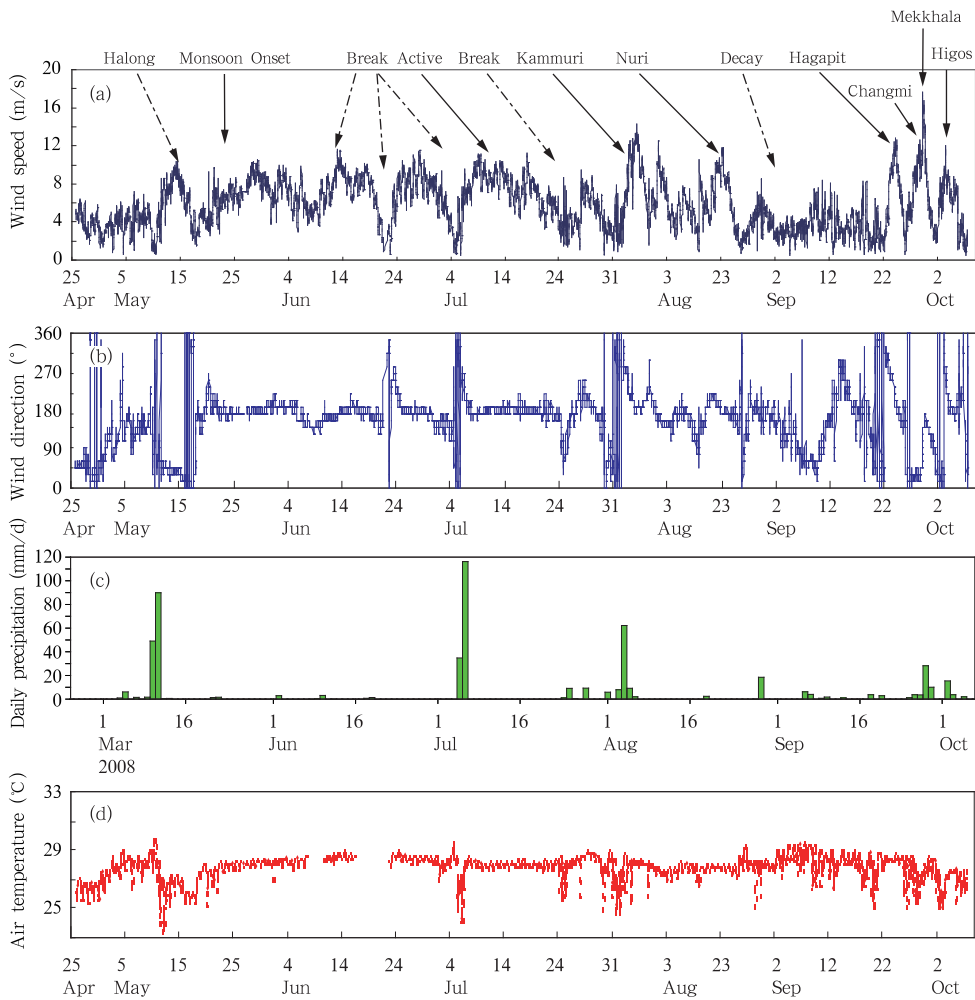


图 2 2008 年 4 月 25 日至 10 月 7 日观测塔上风速(a)、风向(b)、日降水量(c)、30 min 平均气温(d)随时间变化
(文中热带气旋名称均为 2008 年,下同)

Fig. 2 Temporal variation of the wind speed (a), direction (b), daily precipitation (c) and 30 min-averaged air temperature (d) on the SCS Xisha air-sea flux observation tower from April 25 to October 7 2008

42.8 m/s;受“浣熊”影响,西沙站降水量达到 280 mm。台风“浣熊”在南海生成早、登陆早、发展快、强度大,创造了 50 a 以来的历史纪录。早而强的台风活动说明 2008 年南海春季已经积聚了较多能量;而在台风过去后,原来较暖的南海洋面(北部更加明显)变成较冷的洋面,冷洋面对海上对流活动和季风爆发产生影响,使得西沙及以北海域季风爆发(5 月 18 日)比南海南部偏晚,但与多年平均季风爆发日期 5 月第 4 候相同。

(2) 西南季风爆发一般伴随着风力增大、对流加强。2008 年南海北部季风爆发后风速逐渐加强到 10 m/s 左右,西南风持续了 20 d,6 月 7—12 日

出现第 1 次中断(季风中断指非西南风持续 3 d 以上)(金祖辉等,2002),而后再出现 3 次活跃(6 月 13—29 日、7 月 6—31 日、8 月 6—25 日)、3 次中断(7 月第 1 候、8 月第 1 候、9 月第 1—2 候),中断次数比多年平均偏多,较多的季风中断也是季风偏弱的反映。7 月 5—23 日季风发展最强,大风、高温、高湿天气在南海持续 20 d,季风前缘向北推进至 32.5°N,比气候平均值偏北。8 月第 6 候季风进入衰退期,西南风发展高度降低(<4 km),海面温度回升,风速、湿度减小。经历 9 月下旬到 10 月初 3 个台风活动之后,10 月第 1 候西南季风退出南海,结束时间接近常年。

(3) 2008 年有 9 个台风(包括西北太平洋生成进入中国南海和在南海生成的)在中国南海活动, 另外有 2 个西北太平洋台风: 台风“凤凰”(Fung-wang)和超强台风“蔷薇”(Changmi), 到达中国台湾岛附近也影响到中国南海, 这样影响中国南海的台风共 11 个, 数量与常年相同, 其中 9 个台风对西沙产生了影响(西沙风速 ≥ 6 级)。

(4) 2008 年 5—9 月西沙降水量为 509.3 mm, 仅占当年降水量气候平均值的 1/3, 大大低于西沙 1971—2000 年 5—9 月降水量气候平均值 972 mm。2008 年 5—9 月降水量偏少是该年西沙距大多数台风中心较远以及西南季风偏弱造成的。

(5) 西南季风爆发之前海面上气温由 4 月下旬的 26℃很快上升到 5 月上旬末的 28℃左右(图 2); 热带气旋、季风爆发及降水天气影响时段气温可降低 1—4℃, 其余时间基本稳定在 28℃附近; 西南季风衰退期由于降水少, 气温比活跃期稍稍升高。

2008 年季风发展过程中的上述天气、气候特点和水文气象条件决定了海面通量交换的变化趋势, 海面通量的变化又影响着海洋边界层和之后季风的发展变化。

3 2008 年西南季风期间的辐射通量收支

辐射通量交换包括太阳总辐射、海面反射短波辐射、大气长波辐射以及海面长波辐射。太阳总辐射是到达海面的直接太阳短波辐射和云层散射的短波辐射之和。太阳总辐射及大气长波辐射是海洋得到的热量, 海面反射短波辐射和海面长波辐射是海洋失去的热量, 两者之差为海洋得到的净辐射量。由于太阳总辐射与大气长波辐射一般会大于海面反射短波辐射和海面长波辐射, 海洋得到的净辐射收支多为正值。平均来说, 特别是在热带地区, 海洋总是通过辐射获得热量, 维持其较高的温度, 并通过洋流将热量向中高纬度输送。

从 2008 年季风爆发前后(4 月 25 日—5 月 26 日)太阳总辐射(Q_s)、海面反射短波辐射(Q_{sf})、海面长波辐射(Q_{sl})、大气长波辐射(Q_{al})及相应的总云量(N)、低云量(N_L)、相对湿度(f)、气温(T_a)变化(图 3)可以看到, 5 月 10 日之前受副热带高压(副高)控制期间天空少云, 太阳总辐射较强, 白天最高可达 900 W/m² 以上, 日极值则接近 1300 W/m² (1 min 观测值)。5 月 11—14 日受冷空气影响, 降

水期间总、低云量较多, 连续 3 d 均超过 9 成, 致使到达海面的太阳总辐射数值很小, 白天 10 min 平均值最高只有 300 W/m², 日极值为 400 W/m² 左右, 同时海面反射的短波辐射也相应减小, 仅为前阶段的一半。5 月 15—17 日热带低压影响期间虽然总云量达到 10 成, 但由于低云量较少, 甚至小于副高控制期, 太阳总辐射仍然恢复到 5 月 10 日前的强度。这表明, 就总云量和低云量对太阳辐射的影响而言, 低云量的影响要大于总云量。同样, 5 月 18 日西南季风开始影响西沙海域, 由于季风爆发偏弱, 对流发展不强, 虽然总云量很多, 但低云量增加较少, 太阳总辐射仍然接近季风爆发前水平。

太阳总辐射与低云量关系密切的另一个原因是, 热带海洋上以积云(低云类)为主, 积云的散射能力强, 海面接收到的太阳总辐射在中等低云量的天气也能出现很大值。例如, 2000 年 6 月 14 日 13 时 59 分西沙总云量接近 10 成, 但低云量只有 3—4 成, 天空有大片云隙, 由于积云散射很强, 太阳总辐射观测记录达 1300 W/m², 时间持续了 2 min, 其中, 瞬时值为 1351 W/m², 已接近太阳常数(1370 W/m²)。

海面反射的太阳短波辐射数值较小(30—60 W/m²)(图 3e), 变化趋势与太阳短波辐射相同。海洋上大气长波辐射(图 3c)与云量、气温、水汽含量等有关; 季风活跃、降水时由于湿度大、温度低而数值较大。海面长波辐射主要与海温有关, 季风爆发前由于海表面温度(SST)持续升高, 海面长波辐射也有上升的趋势; 与此同时, 蒸发增强使空气水汽含量变大, 大气的长波辐射也相应增强。热带低压活动期由于气温和海面温度处于较低的状态, 海面长波辐射减弱, 大气长波辐射达到了观测时期中的较低值, 日最大值仅有 420.1 W/m²。

图 4 是季风活跃、中断、降水及 08 号台风影响期(6 月 27—7 月 31 日)太阳总辐射、海面反射短波辐射、海洋和大气长波辐射变化趋势, 反映出季风活跃期、中断期由于低云量仅 4 成左右, 太阳总辐射较强, 白天日最大值接近 1000 W/m²。大气长波辐射比中断期也有增强, 而海面长波辐射变化很小, 故海面净辐射收入增加; 季风中断至再度爆发时, 对流加强, 往往同时伴有降水出现, 太阳总辐射、海面长波辐射明显减小, 大气长波辐射反而增强, 使得海面净辐射大大减小。台风影响期特别是有降水情况下情况与之类似。

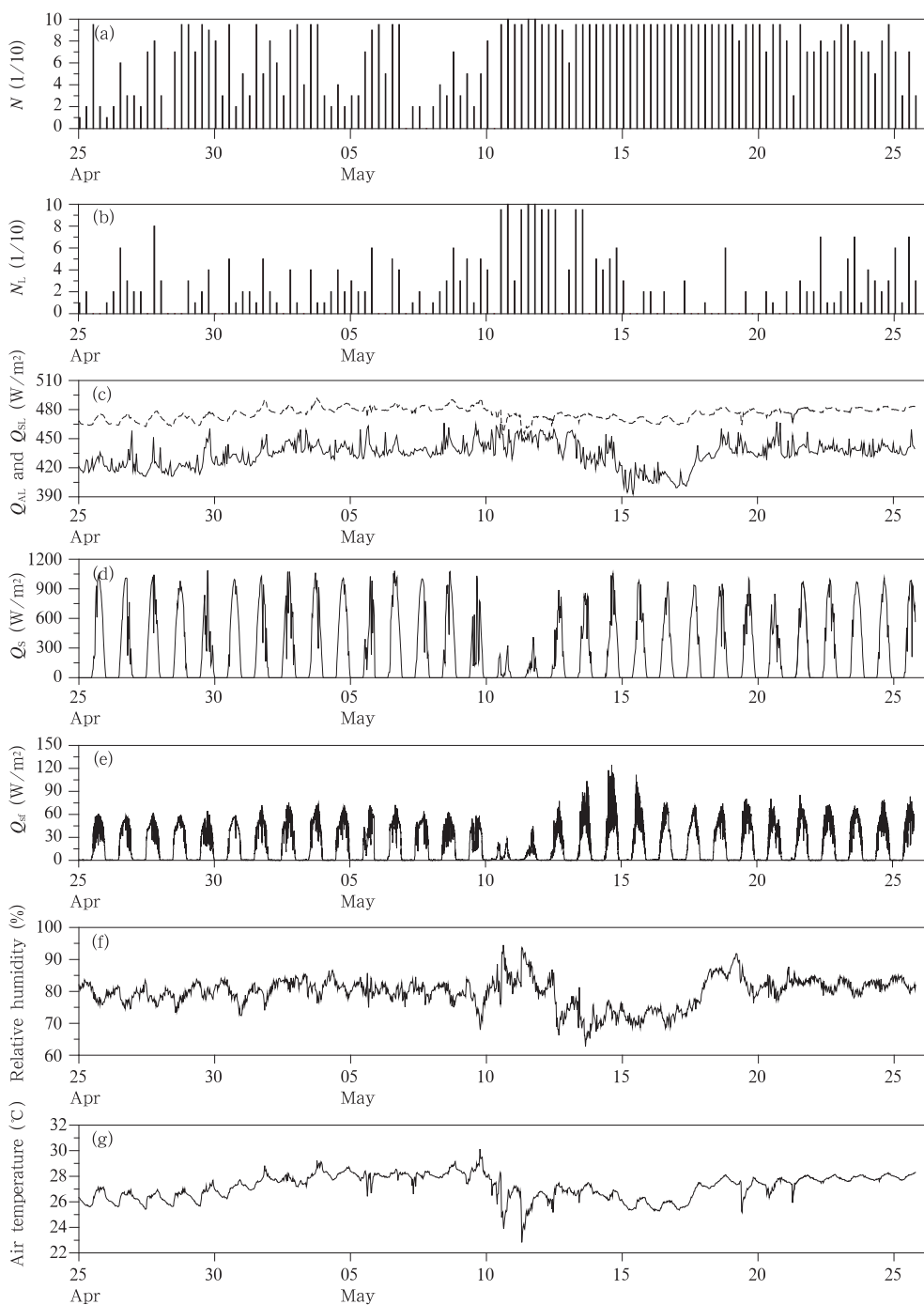


图3 2008年4月25日至5月26日总云量(a)、低云量(b)、海洋(虚线)和大气长波辐射(实线)(c)、太阳总辐射(d)、海面反射短波辐射(e)、相对湿度(f)和气温(g)(10 min 平均值)逐日变化

Fig.3 Daily variation of the cloud amounts (N for the total (a) and N_L for the component of low clouds (b)), ocean and atmospheric long-wave radiation (c), atmospheric (d) and ocean (e) short-wave radiation, relative humidity (f), and air temperature (g) from April 25 to May 26 2008

海面净辐射是向下、向上短波辐射和长波辐射之差,由于海面反射短波辐射、海洋和大气长波辐射之差数值较小,所以,其变化趋势和太阳总辐射基本

一致。季风爆发前海面净辐射日平均值为 212.0 W/m^2 ,这是海面升温的重要原因之一。冷空气影响期间、热带气旋活动期间云层增厚使太阳总辐射

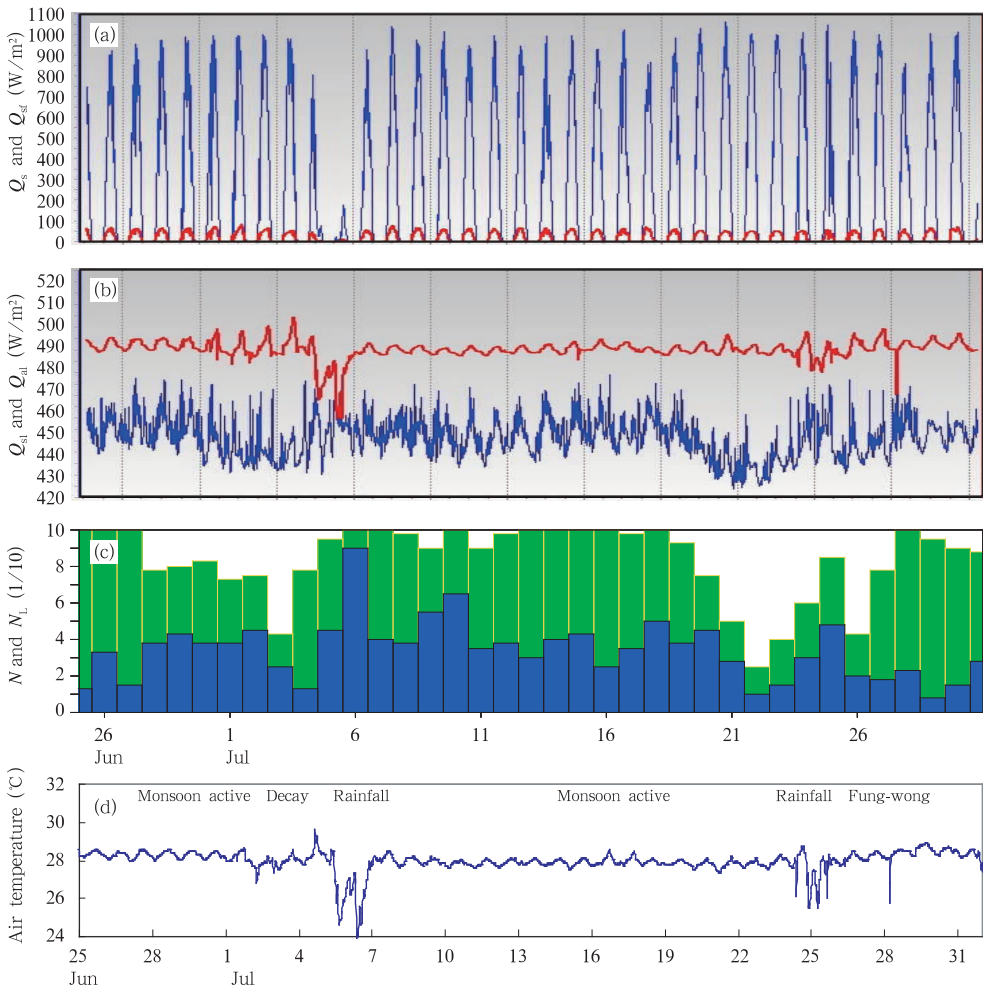


图4 2008年6月25—7月31日(a)太阳总辐射(蓝线)和海面反射辐射(红线)、(b)海洋长波辐射(红线)和大气长波辐射(蓝线)、(c)总云量(绿色)和低云量(蓝色)及(d)气温(蓝线)变化

Fig. 4 Daily variation of the ocean and atmospheric short-wave radiation (a), ocean and atmospheric long-wave radiation (b), cloud cover (c, green for the total amount N and blue for the low clouds amount N_L), and air temperature (d) from June 25 to July 31 2008

减小,大气长波辐射增加,海面长波辐射随着气温的降低也减小,使海面净辐射收入减小。季风爆发后净辐射值回升至接近副高控制期的水平。

4 季风爆发前后的感热、潜热通量交换和热量净收支

海洋-大气之间的热通量交换除辐射通量外还有感热通量和潜热通量。图5给出了4月25日—5月25日感热通量(H_s)、潜热通量(H_L)和海面水温(T_s)、气温(T_a)的逐日变化曲线。可以看到,季风爆发前后的4个天气阶段通量交换有很大差别:第一阶段季风爆发前晴朗期(4月25日—5月10日),

感热通量、潜热通量较小,这是因为季风爆发前海-气温差、风速(图2)都很小;第二阶段(5月11—12日)冷空气影响期,潜热通量、感热通量都大为增加,其中感热通量的增加最为显著,这是因为当冷空气影响时气温降低较快、表层海温降低较慢,海-气温差增大,感热通量增加;第三阶段(5月13—15日)热带风暴“夏浪”(Halong)影响期,气温和表层海面温度都因为强风作用下降,海-气温差减小,感热通量也相应减小,但潜热通量因为强风作用达到最大。第四阶段季风爆发后(5月18日—6月5日),感热通量、潜热通量均比爆发前增加,但小于热带风暴期。

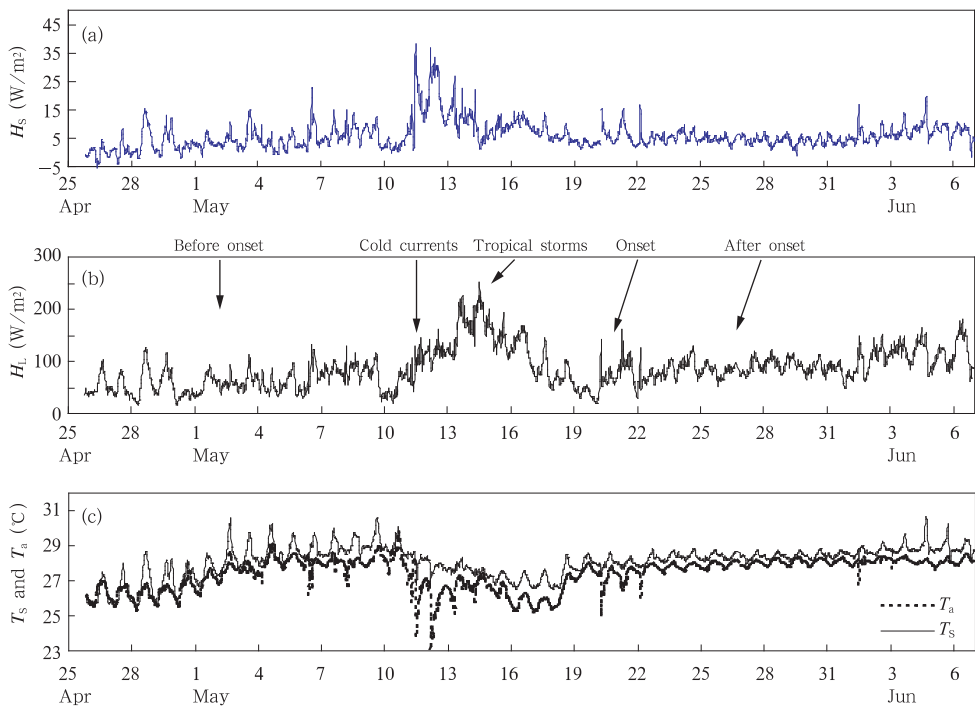


图5 2008 年季风爆发前后(4月25日—6月6日)感热 H_s (a)、潜热通量 H_L (b) 以及海面水温(T_s 上曲线)和气温(T_a 下曲线)(c)的逐日变化

Fig.5 Daily variations of the H_s (a), H_L (b), T_s and T_a (c)

before and after the onset of the SCS monsoon in 2008

(from April 25 to Jun 6 2008)

表1给出了4个天气过程中海-气通量及热量净收支的数量变化。海洋热量净收支由吸收的太阳短波辐射+大气长波辐射-(感热+潜热+海面短波辐射+海面长波辐射)计算得到。从表1可知,季风爆发前晴天阶段海洋得到较多的辐射能(太阳短波辐射+大气长波辐射),而失热量(感热+潜热+海面短波辐射+海面长波辐射)较小,海洋热量净收入出现较大的正值。根据控制海温变化的方程,海温变化决定于热通量和海洋内部动力过程,在较短的时间尺度上,热量净收支起决定作用,因此,海洋热量净收支的盈余导致表层海面温度较快上升。在冷空气影响和热带风暴“夏浪”影响期,海洋得到较少的辐射能,而潜热通量剧增,热量净收入出现较大负值,导致海面温度降低。2008西南季风爆发由于是在热带风暴“夏浪”影响之后,对流不像往年那样剧烈发展,太阳辐射仍然较强,潜热通量很小,大气长波辐射增加,海洋热量净收入出现正值,海洋又开始有能量积累。虽然海面热量净收入不如季风爆发

前晴天阶段,表层海面温度仍然缓慢升高。

南海北部季风爆发后海面温度升高的现象与阿拉伯海、孟加拉湾不同,那里季风爆发后对流发展异常强烈,并常有风、雨伴随,太阳短波辐射量急剧减小,潜热通量由于风速增大而剧增,热量净收入出现较大负值,海面温度在季风爆发后稍稍降低。表2反映出阿拉伯海 MONEX-79 试验(Mohanty, et al, 1990)、孟加拉湾 JASMINE-99 试验(Webster, et al, 2000)、南海试验(SCS-2002、SCS-2008)在西南季风爆发后短波净辐射明显减少、感热通量增加以及海洋热量净收支降低等总的基本趋势一致,但阿拉伯海、孟加拉湾季风爆发期潜热通量比南海明显偏大,海洋热量净收入很少,1999年甚至出现了较大负值,超过2008年季风爆发前热带风暴影响期海洋失热量,海面热量的大量释放导致海温显著降低。2002、2008年季风爆发后南海海洋热量净收入明显偏高,说明有能量积累,使得季风爆发后海温能够在热带风暴影响后缓缓升高。

表1 2008西南季风爆发前后各类天气过程海面通量及热量净收支变化

Table 1 The variation of the surface fluxes and net budget corresponding to each synoptic stages before and after the onset of the SCS monsoon in 2008

热量收支各分量	爆发前晴天 (4月25日— 5月10日)	冷空气影响 (5月11—13日)	夏浪(Halong) 影响期 (5月13—15日)	爆发后南海 季风活跃期 (5月18日— 6月5日)	整个南海季风 爆发前后 (4月25日— 6月5日)
感热通量(W/m ²)	-3.81	-16.50	-10.00	-5.23	-5.31
潜热通量(W/m ²)	-61.50	-1230	-162.00	-87.20	-87.60
动量通量(N/m ²)	0.0217	0.0751	0.0999	0.0695	0.0520
太阳短波辐射(W/m ²)	276.49	103.69	217.01	282.42	257.10
海面短波辐射(W/m ²)	-20.43	-8.64	-19.75	-23.56	-20.83
大气长波辐射(W/m ²)	438.24	447.82	437.27	433.80	436.04
海面长波辐射(W/m ²)	-480.40	-471.20	-472.50	-479.54	-477.27
热量净收支(W/m ²)	141.53	-67.83	-9.97	121.05	102.49

注:海洋失热为负,得热为正,下同。

表2 阿拉伯海(MONEX-79)、孟加拉湾(JASMINE-99)和西沙(SCS-2002,SCS-2008)海-气相互作用试验结果比较(W/m²)

Table 2 A comparison of the air-sea flux experiment results between MONEX-79, JASMINE-99 and Xisha (SCS-2002, SCS-2008)

天气阶段	净短波辐射	净长波辐射	感热通量	潜热通量	热量净收支
阿拉伯海(MONEX-79)爆发前(5月15—26日)	231.30	-39.10	-11.60	-94.80	85.30
阿拉伯海(MONEX-79)爆发后(6月3—13日)	199.20	-34.40	-17.80	-139.40	7.60
孟加拉湾(JASMINE-99)爆发前(5月10—15日)	260.00	-49.00	-5.00	-115.00	92.00
孟加拉湾(JASMINE-99)爆发后(5月21—26日)	162.00	-31.00	-17.00	-162.00	-89.00
西沙(SCS-2002)爆发前(4月24日—5月13日)	282.80	-59.10	-4.80	-91.20	127.70
西沙(SCS-2002)爆发后(5月14日—6月21日)	209.50	-40.90	-5.50	-95.10	68.00
西沙(SCS-2008)爆发前(4月24日—5月10日)	256.06	-42.16	-3.81	-61.50	141.53
西沙(SCS-2008)爆发后(5月18日—6月5日)	258.87	-45.74	-5.23	-87.20	121.05

5 季风活跃、中断和衰退期的感热、潜热通量交换和热量净收支

西南季风爆发进入活跃期后,出现了活跃、中断、再活跃、再中断过程,8月下旬进入衰退阶段(西南气流顶层高度明显降低,风速、湿度减小,海面温度上升)。2008年季风爆发后(6月22日—10月7日)活跃、中断、降水、衰退阶段(图6),感热 H_s 变化明显,降水和活跃阶段较大,特别是季风中断结束至再活跃的降水阶段和部分台风影响过程中,感热通量甚至是平均值的3倍;潜热通量 H_L 在降水过程中一般因湿度大而减小,但在风速 V 较大时(季风活跃及台风影响时)其数值也增大。可以看出,潜热通量与风速具有大致相同的变化趋势,这也说明潜热通量虽然同时与风速和海-气之间水汽压差等要素有关,而受风速的影响更大。

分析在季风活跃、中断、衰退等不同天气过程代

表时段的海面通量及热量净收支情况(表3)可知:感热通量在活跃、中断、降水、衰退过程中变化较大,降水阶段感热通量最大,这主要是由于海气温差增大的影响,当海-气温差较大时,海气界面的热传导较强,感热通量增大。在季风中断和衰退阶段感热通量变小,这是因为该阶段天气晴好,风力较弱,气温和表层海面温度都比较稳定。在季风活跃阶段感热通量最小,这是因为该时段风速比较大,海洋-大气之间交换很强,海-气温差反而减小。潜热通量在降水过程中因湿度大而减小,衰退阶段又因为风力减弱而降低,但在季风活跃阶段增加,主要是由于风速、海-气比湿差较大时海面蒸发迅速,从而潜热通量增大。在季风中断阶段出现了潜热通量较大值,主要是由于该阶段湿度较小。在表3中,同时也把一次西南季风期最强降水过程(2008年7月5—6日,降水量131mm)海洋热量收支列出来比较。

上述海洋失热的差异,加上获得热量的不同,使

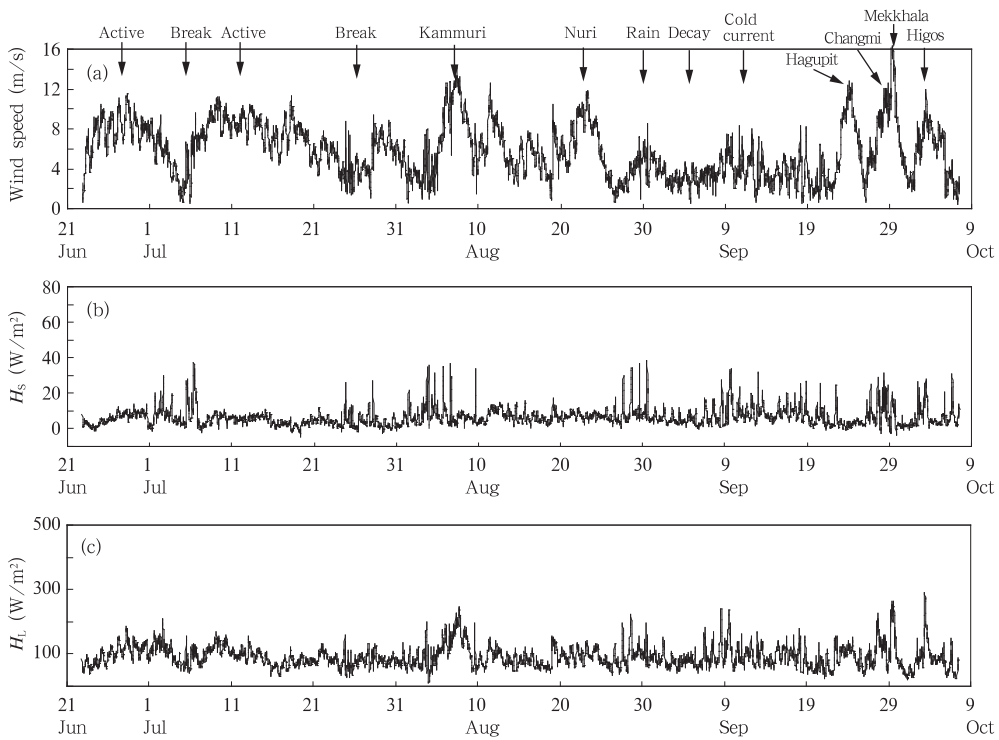


图 6 2008 年季风爆发后(6月22日—10月7日)风速(a)、感热(b)和潜热通量(c)逐日变化

Fig. 6 Daily variations of the wind speed (a), H_s (b) and H_L (c) after the onset of SCS monsoon in 2008 (from June 22 to October 7 2008)

表 3 季风活跃、中断、降水、衰退过程中代表时段海面通量及热量净收支变化

Table 3 The fluxes and the net heat budget during the different monsoon phases (active, break, rainfall and decay phases)

热量收支各分量	中断期 (6月30日— 7月5日)	活跃期 (7月6—23日)	强降水过程 (7月5—6日)	衰退期 (9月1—22日)	整个季风期平均 (4月25日— 10月7日)
感热通量(W/m ²)	-8.16	-5.02	-13.20	-7.52	-6.33
潜热通量(W/m ²)	-108.00	-90.80	-88.50	-88.40	-92.50
动量通量(N/m ²)	0.0507	0.0861	0.045	0.0196	0.0475
太阳短波辐射(W/m ²)	256.86	256.63	77.41	253.26	244.13
海面短波辐射(W/m ²)	-21.15	-20.67	-6.996	-19.53	-20.26
大气长波辐射(W/m ²)	442.01	444.79	448.43	442.57	440.92
海面长波辐射(W/m ²)	-485.29	-484.45	-475.85	-487.44	-481.72
热量净收支(W/m ²)	76.27	100.57	-58.71	92.94	84.24

得季风活跃、中断、降水、衰退等不同天气阶段热量净收支出现很大差别:降水过程中由于太阳短波辐射很小,虽然潜热通量也小,但热量净收支仍然出现较大负值;季风活跃期潜热通量比中断期小,热量净收入盈余较多;季风中断期虽然吸收的太阳短波辐射较多,但潜热通量较大,热量净收入也有较少盈余;季风衰退期海洋得到的太阳短波辐射与中断期相当,虽然放出的长波辐射较多,但由于潜热通量

小,热量净收入也比中断期高。西沙海域9月上中旬季风衰退期表层海面温度再次出现一个上升阶段,与季风衰退期热量净收入盈余较多有密切关系。

作为对比,表4给出了根据NOAA研究船^①1999年夏季风期间在孟加拉湾、赤道西太平洋调查资料由Bulk算法计算的海面通量及热量净收支。NOAA研究船在孟加拉湾调查期间,正值季风爆发之后,平均风速达5.9 m/s,潜热通量较大,热量净

^① Fairall C W, Hare J E, Grachev A A. 2000. Turbulent surface flux measurements from Nauru99. Eleventh ARM Science Team Meeting Proceedings, San Antonio, Texas, March 13-17

表4 NOAA研究船1999夏季风期间观测的海面通量及热量净收支
Table 4 The fluxes and the net heat budget observed by the NOAA (R/V) ship in the period of summer monsoon 1999

热量收支各分量	JASMINE (8°N, 89°E) (5.5—5.31)	NAURU99 (0.5°N, 167°E) (6.15—7.18)	KWAJEX1 (8°N, 167.5°E) (7.28—8.23)	KWAJEX2 (8°N, 167.5°E) (8.24—9.12)	平均
感热通量(W/m ²)	-5.6	-5.5	-6.4	-7.6	-6.1
潜热通量(W/m ²)	-109	-117	-88	-97	-104
动量通量(N/m ²)	0.055	0.054	0.031	0.036	0.046
净太阳短波辐射(W/m ²)	215	220	237	232	226
净长波辐射(W/m ²)	-43	-51	-46	-44	-46
热量净收支(W/m ²)	57.4	46.5	96.6	83.4	69.9
平均风速(m/s)	5.9	5.9	4.5	4.9	5.4

收入仅有盈余 57.4 W/m²。6月中旬到7月中旬的赤道西太平洋调查同样是在风速达 5.9 m/s 状况下进行的,由于湿度略小,潜热通量更大,热量净收入只有 46 W/m²。这也是该年海表面温度在季风爆发后可以维持稳定或略微升高的原因之一。相比之下,8—9月赤道西太平洋调查时平均风速相对减小(平均为 4—5 m/s),潜热通量也减小,热量净收入盈余较多,海面温度升高明显,这一情况与南海季风衰退期相似。

6 热带气旋影响过程中感热、潜热通量交换和热量收支

充分了解热带气旋的边界层过程是更好地研究和预报热带气旋的前提,但由于热带气旋核心区的恶劣天气,要获得相应的观测资料非常困难;因此,对热带气旋边界层过程的观测资料十分有限(Kepert, 2004),许多问题至今还不很了解(陈联寿等, 1994)。近年来,热带气旋的大气-海洋边界层观测及海-气界面的通量参数化得到特别的重视,美国于2002—2004年进行的CBLAST外场试验观测到了飓风“Fabian”、“Isabel”^①的边界层资料, Moon等(2006)根据1998—2003年出现在大西洋的10个热带气旋资料研制了新的海-气通量参数化方案,很好地改进了GFDL预报模式中强飓风的风-压关系。本文根据2008年夏季风期间观测塔上观测到的9次台风影响过程,讨论台风影响过程中海-气通量的变化特征。

2008年5月1候—10月1候,虽然没有热带气旋的中心经过西沙,但有9个热带气旋对西沙产生

了重要影响(西沙风速 ≥ 6 级)。其中,对西沙影响最强的是16号台风“米克拉”,其台风路径距西沙较近,西沙9月29日早上观测到的1 min平均最大风速达19.6 m/s,瞬时风速为23.4 m/s,西沙永兴岛近海最大波高达4.9 m。15号超强台风“蔷薇”虽然距西沙较远,但由于强度大,影响范围广,1 min平均风速也达到17.6 m/s。

表5给出了夏季风期间9次热带气旋影响过程中最大潜热通量和最大感热通量,同时也给出了热带气旋中心最大风速、相对西沙方位、西沙距热带气旋中心距离、塔上测量的1 min平均最大风速和过程降水量。可以看出,由于热带气旋中心的强度、方位、距西沙远近(km)不同,西沙观测到的风力、降水情况也有很大差别;9次热带气旋影响过程中最大潜热通量和最大感热通量的差别也很大,其中4次热带气旋(6、9、12、14号)过程由于降水量很小或者没有降水,海-气温差较小,最大感热通量仅有5—7 W/m²;而当台风过程中降水量稍大(≥ 10 mm)时,感热通量就比较大,其中15号超强台风“蔷薇”和17号热带风暴“海高斯”影响时段的感热通量分别达到20.3和27.8 W/m²,这是由于降水时气温降低较快而导致海-气温差增大造成的。需要说明的是,由于潜热通量是30 min计算的平均结果,与最大1 min平均风速出现的时间不完全吻合,因此数值上大小也不完全对应。例如,16号台风“米克拉”影响时,最大1 min平均风速19.6 m/s,潜热通量为266 W/m²;17号热带风暴“海高斯”影响时最大1 min平均风速虽然较小,却出现了季风期台风影响过程中潜热通量的最大值292 W/m²。

^① Black P G. 2006. Observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment in hurricanes. <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/cblast/index.html>

表5 2008年夏季风期间9次台风过程西沙近海观测的最大潜热通量和最大感热通量

Table 5 The maximum values of the sensible and latent heat fluxes for the 9 tropical cyclones in the period of 2008 summer monsoon

台风名称	中心最大风速 (m/s)	相对西沙方位	距西沙距离 (km)	西沙最大风速 出现时间	最大1 min 平均风速 (m/s)	过程 降水量 (mm)	最大潜 热通量 (W/m ²)	最大感 热通量 (W/m ²)
夏浪(Halong)	15	SE	600	5月14日12时	12.3	1.0	251	21.8
风神(Fengshen)	23	NE	500	6月25日01时	11.2	0.0	123	6.23
凤凰(Fung-wang)	35	NE	1400	7月28日04时	13.2	9.3	132	7.53
北冕(Kammuri)	18	E	600	8月7日07时	15.0	2.0	248	7.83
鸚鵡(Nuri)	13	NE	750	8月23日06时	13.0	0.0	142	9.68
黑格比(Hagupit)	50	NE	550	9月24日04时	13.8	4.9	151	4.95
蔷薇(Changmi)	65	NE	1400	9月27日17时	14.5	31.8	225	20.3
米克拉(Mekkhala)	20	NW	60	9月29日07时	19.6	10.1	266	19.0
海高斯(Higos)	18	NE	80	10月3日10时	13.7	19.1	292	27.8

表6列出了表5中潜热通量较大的5次台风影响过程各自过程平均的通量交换和热量收支情况,并与季风活跃期进行了对比。可以看出,台风影响过程中潜热通量随着风速增大而迅速升高至140—160 W/m²;感热通量平均数值则与平时变化不大,

但由于潜热通量增大、太阳短波辐射减小,海洋热量收支普遍出现负值,海洋失热量大大强于季风活跃期。特别是台风“北冕”(Kammuri)影响期间,海洋失热量达到64 W/m²,接近孟加拉湾季风活跃期间的海洋失热量89 W/m²。

表6 5次台风影响过程中通量交换和热量收支(W/m²)

Table 6 The fluxes exchange and the net heat budget in the period of the 5 tropical cyclones

热量收支各分量	夏浪 Halong (5月13—16日)	北冕 Kammuri (8月6日—8日)	蔷薇 Changmi (9月23—24日)	米克拉 Mekkhala (9月28—29日)	海高斯 Higos (10月3日)	季风活跃期 (7月6— 23日)
感热通量平均(W/m ²)	-10.0	-6.67	-2.48	-10.10	-11.80	-5.03
潜热通量平均(W/m ²)	-162.0	-164	-111	-140	-146	-90.70
动量通量平均(N/m ²)	0.0999	0.216	0.149	0.232	0.119	0.0861
太阳短波辐射(W/m ²)	217.01	161.63	144.94	171.55	169.02	256.63
海面短波辐射(W/m ²)	-19.75	-21.92	-13.37	-29.71	-16.06	-20.67
大气长波辐射(W/m ²)	437.27	451.27	448.93	448.47	426.94	444.79
海面长波辐射(W/m ²)	-472.5	-483.84	-485.29	-471.30	-457.80	-484.45
热量净收支(W/m ²)	-9.97	-63.53	-18.27	-31.09	-35.70	100.57

7 动量通量变化及其与风速的关系

动量(风应力)在推动和维持洋流、特别是确定上层海洋的垂直结构中起着重要作用,海浪、海流、海浪破碎都是海洋对大气动量的响应。图7给出了2008年6月22日—10月7日30 min平均风速与相应的动量通量变化,可以看到,动量通量变化分布与风速变化非常一致。

表1、表3列出了2008年季风爆发前后4个天气过程和季风活跃、中断、衰退、强降水过程中动量通量变化,同时也与整个观测期(2008年4月25日—10月7日)平均值作了比较。表6中也给出了5次台风影响过程平均的动量通量。结合图7可以

看出,动量通量在2008年西南季风发展过程中差别很大,季风爆发前因风力较弱(比观测期平均值小),其值0.0217 N/m²也仅为季风期的一半。季风爆发后因风速加大(特别是西南大风出现时段),动量增大,日变化趋势也更加显现出来。7月6—23日季风活跃期动量达0.086 N/m²,为季风爆发前的4倍。16号台风“米克拉”影响过程中(9月28—29日),动量通量平均值达0.232 N/m²,为季风爆发前的10倍。正是由于强大的风应力作用,西沙海面出现了4.9 m的最大波高。

2008年西南季风期间动量通量平均为0.0475 N/m²,与表4给出的NOAA研究船1999年5月5日—9月12日夏季风期间在孟加拉湾、赤道西太平

洋调查的平均值 0.046 N/m^2 非常接近。

在 2002 年西沙试验中动量通量 τ 随风速 v 变化的拟合关系式是: $\tau = 0.00185v^2 - 0.00559v + 0.01248$, 拟合信度超过 99% (闫俊岳等, 2005)。图 8 是根据 2008 年 6 月 22—10 月 7 日 30 min 平均风速与由涡动相关法计算的动量通量关系, 可以看到,

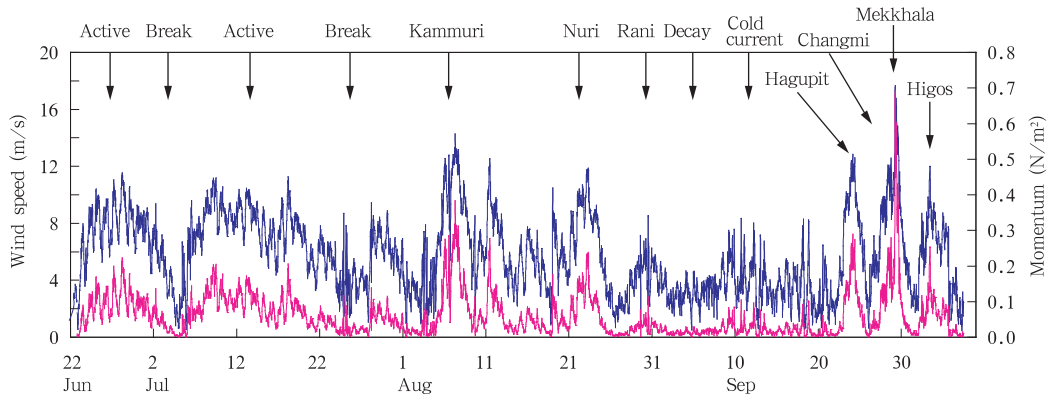


图 7 2008 年 6 月 22 日—10 月 7 日 30 min 平均风速(蓝线)与相应的动量通量(红线)变化

Fig. 7 Variations of the momentum flux (blue curve) and wind speed (red curve) obtained from June 22 to October 7 2008

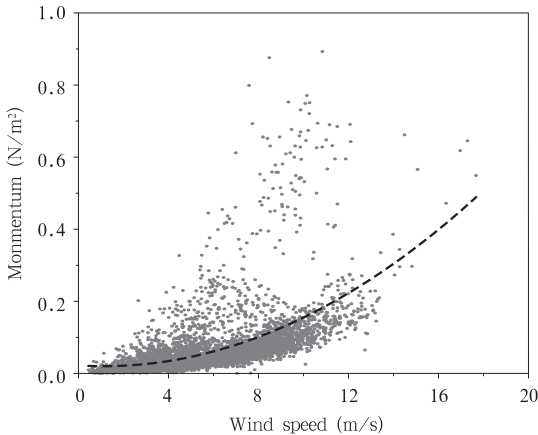


图 8 2008 年 6 月 22 日至 10 月 7 日动量通量与风速分布的关系

Fig. 8 Momentum flux vs. wind speed obtained from June 22 to October 7 2008

8 结 论

(1) 季风爆发前晴天阶段海洋得到较多的辐射能, 失热量较小, 海面温度很快升高; 热带风暴“夏浪”影响时, 潜热通量剧增, 热量净收支成为负值, 海面温度明显降低; 2008 年季风爆发阶段对流发展不强, 海面得到的辐射能增加, 潜热通量减小, 大气长

动量通量 τ 随风速 v 变化的拟合曲线与以前的工作相似, 但由于本次观测试验时间长、统计样本多, 而且序列中有很多 6—8 级大风天气下的资料, 试验拟合的关系式成为

$$\tau = 0.00171v^2 - 0.003809v + 0.02213 \quad (4)$$

波辐射增加, 海洋又开始能量积累, 海面温度缓慢升高。

(2) 季风活跃期特别是降水阶段感热通量增大, 季风中断阶段变小; 季风活跃期潜热通量减小, 由于太阳短波辐射没有减少, 海洋吸热量仍有盈余; 季风中断期虽然吸收的太阳短波辐射较多, 但潜热通量较大, 热量净收入小于整个季风期平均值; 降水阶段由于太阳短波辐射减小, 感热通量增大, 海洋热量收支出现较大负值。季风衰退期的显著特点是风力减弱, 湿度减小, 潜热通量减小, 海洋热量收入又出现较大值, 海面温度在季风活跃期之后回升。

(3) 多数台风影响过程中潜热通量随着风速增大迅速升高至 $200\text{--}300 \text{ W/m}^2$; 感热通量随降水情况不同而差异, 晴天时比平时减小, 大雨时剧烈增大, 可以为平时 5 倍以上; 由于潜热通量增大和太阳短波辐射减少, 海洋热量收支出现负值, 海洋失热量大于季风活跃期。

(4) 动量通量主要与海表面风速有关, 动量通量与风速的分布可以拟合为二次方关系式: $\tau = 0.00171v^2 - 0.003809v + 0.02213$

致谢: 国家海洋预报中心李诗民研究员为试验提供热忱帮助, 并承担资料的统计计算工作; 北京大学张宏升教授

对试验计划、资料分析进行指导和鼓励,李江龙副研究员承担部分绘图工作,国家气候中心博士生许崇海、海南省西南中沙气象台孔令杰、陈恒锐等同志参加了观测工作。

参考文献

- 陈家宜,范邵华等.2006. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究. 大气科学,30(3):423-432
- 陈联寿等译.1994. 热带气旋全球观. 北京:气象出版社,341pp
- 陈奕德,蒋国荣,张韧等.2005. 2002年南海夏季风爆发期间南海北部海气通量分析与比较. 大气科学,29(5):761-770
- 金祖辉,陶诗言.2002. 南海夏季风建立、活跃和中断期的特征. 气候与环境研究,7(3):267-278
- 蒋国荣,沙文钰,李训强等.2002. 南海季风爆发前后辐射特征分析. 热带气象学报,18(1):29-37
- 马耀明,王介明,刘巍等.1997. 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,21:357-365
- 曲绍厚,胡非,李亚秋.2000. 1998年SCSMEX期间南海夏季风海气交换的主要特征. 气候与环境研究,5(4):434-446
- 沈艳,刘允芬,王堰.2005. 应用涡动相关法计算水热、CO₂通量的国内外进展概况. 南京气象学院学报,28(4):559-566
- 许建林,曲绍厚.2000. 1997年冬季南海南部海区不同天气过程下的湍流通量输送. 热带海洋,19(2):19-26
- 闫俊岳,姚华栋,李江龙等.2000. 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,5(4):447-458
- 闫俊岳,姚华栋,李江龙等.2003a. 2000年南海季风爆发前后西沙海域海-气热量交换特征. 海洋学报,25(4):18-28
- 闫俊岳,唐志毅,姚华栋等.2003b. 2002年南海季风建立及其雨带变化的天气学研究. 气象学报,61(5):569-579
- 闫俊岳,唐志毅,姚华栋等.2005. 2002年南海西南季风爆发前后海-气界面的通量交换变化. 地球物理学报,48(5):1000-1010
- 闫俊岳,唐志毅,姚华栋等.2006. 南海西南季风爆发前后海-气通量交换系数研究. 气象学报,64(3):335-344
- 闫俊岳,刘久萌,蒋国荣等.2007. 南海海-气通量交换研究进展. 地球科学进展,22(7):685-697
- Fairall C W, Bradley E F, et al. 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. J Climate, 16: 571-591
- Jiang G R, He J H, Wang D X, et al. 2004. Observational study of air sea fluxes during the SCS summer monsoon in 2000-features of thermal budget at the sea surface. Acta Meteor Sinica, 18(2): 245-258
- Kepernt J D. 2004. Models and observations of tropical cyclone boundary-layer winds. Extended Abstracts, the Past, Present and Future of Numerical Modeling; 16th Annual BMRC Modeling Workshop, BMRC Research Rep. 104, Melbourne, Australia, BMRC, 77-82
- Michael A B, Fairall C W, Zeng Xubin, et al. 2003. Which Bulk Aerodynamic algorithm is least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? J Climate, 16: 619-635
- Mohanty U C, Mohan K N. 1990. Variability of the Indian summer monsoon in relation to oceanic heat budget over the Indian Seas. Atmos Environ, 24(4): 823-828
- Moon IL-JU, Ginis I, Hara T, et al. 2007. A physics-based parameterization of air-sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions. Mon Wea Rev, 135: 2869-2878
- Webster P J, Bradley E F, Fairall C W, et al. 2000. JASMINE: the field phase. <http://www.ametsoc.org/>
- Yan J Y, Yao H D, Li J L, et al. 2003. A study of the turbulence structure and flux transfer at the SCS surface during the onset of southwest monsoon. Acta Meteor Sinica, 17(Suppl): 186-200