

1998 年 SCSMEX 期间南海夏季风 海气交换的主要特征*

曲绍厚 胡 非 李亚秋

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 根据 1998 年“南海季风试验 (SCSMEX)”强化观测期间“实验 3 号”和“科学 1 号”科学考察船船基大气海洋自动观测系统两点连续观测的大气、海洋资料, 使用考虑到风速和大气层结影响的整体输送公式计算海—气间的湍流通量交换。根据计算结果分析南海夏季风期间海表大气要素和海温日均值的逐日变化、海洋向大气输送的潜热通量和感热通量以及大气向海洋输送的动量通量等。结果表明: 这次夏季风于 5 月 21 日从南海南部开始爆发, 然后向北部扩展全面爆发。夏季风期间南海南部和南海北部的大气、海洋结构和海气交换特征等都有明显差别。此外, 海表温度的变化除了与太阳总辐射有关外, 主要是与海洋向大气输送的潜热通量变化有关, 对本次夏季风发生较晚、强度较弱作了海—气交换的物理解释, 并与 1992~1993 年西太平洋热带海域西风爆发过程作了比较。

关键词: 南海夏季风; 海—气交换; 湍流通量

1 引言

80 年代以来中国学者指出, 亚洲夏季风是由相互联系又有其独立特征的南亚 (印度) 季风系统和东亚季风系统组成, 而亚洲夏季风最早在南海海域爆发, 然后分别逐渐向西北和北方扩展最终建立起南亚和东亚季风系统。进入 90 年代, 中国学者对南海夏季风的爆发活动更加注意, 分别从不同角度如大气环流演变特征^[1]、反映对流变化的云顶温度资料 (TBB)^[2]、区域加热场的基本特征^[3]、海温异常^[4]、降水量突增^[5]和多要素变化的综合指标^[6~10]等方面揭示南海夏季风的爆发特征。

本文主要根据 1998 年 SCSMEX 强化观测期间 (5 月 5~25 日和 6 月 5~20 日), “实验 3 号”科学考察船在南海北部、“科学 1 号”科学考察船在南海南部使用船基大气海洋自动观测系统观测的气温、气压、湿度、风向、风速、太阳总辐射、射入 (向下) 长波辐射和海表温度等大气、海洋资料, 对资料平均光滑, 去日变化趋势等处理, 利用考虑风速和大气层结影响的整体动力学输送公式计算海气湍流通量交换, 分析给出海表大气要素特别是风矢量和海表温度日平均值的逐日变化特征、海洋向大气输送的潜热通量和感热通量以及大气向海洋输送的动量通量等大气、海洋结构和海气交换特征。据此给出这次夏季风不同海域、各个阶段的主要特征, 指出这次夏季风于 5 月 21 日从南海南部爆发 (纬向西风分量和经向南风分量同时出现), 然后向南海北部推进全面爆发。

2 观测海域、观测仪器和计算公式

2.1 观测海域和观测仪器

中国科学院科学考察船“实验 3 号”和“科学 1 号”作为大气、海洋观测平台分别位于南海北部 ($20^{\circ}22'N$, $116^{\circ}57'E$, 以下简称北部点) 和南海南部 ($6^{\circ}15'N$, $110^{\circ}E$, 以下简称南部点) 于 5 月 5~25 日和 6 月 5~20 日强化观测期间进行定点连续大气、海洋综合观测。

由于这次大气海洋综合观测是研究南海夏季风这样尺度的天气过程, 中方设计的试验方案不配置如超声风速温度仪和 Lyman- α 湿度脉动仪等一类的快速响应湍流通量观测仪器, 而是向美方建议提供组装代表当今世界先进水平的常规大气、海洋观测仪器, 其中包括美国研制的观测海表温度的 Chris Fairall 型海蛇温度计、美国 RM, Young 生产的旋桨式风向风速计、美国 Appley 设计的总辐射表和红外辐射表以及芬兰 Vaisala 生产的标准温度、湿度和气压等传感器。这套设备在 1992~1993 年西太平洋热带海域 TOGA-COARE 长达数月的观测中表现不俗, 为研究西风爆发过程提供了上乘的大气海洋观测资料^[11], 仪器的观测范围、观测精度、分辨率和通量误差分析等具体技术指标可见文献[11]。

2.2 计算公式

根据试验方案设计的仪器配置、研究对象的尺度特征以及与过去分析结果比对的一致性, 我们使用了考虑到风速和大气层结影响的海-气通量交换的整体动力学输送公式^[12]:

$$M = \rho C_{DD} U^2, \quad (1)$$

$$H_{SS} = \rho c_p C_{SS} U (T_s - T_a), \quad (2)$$

$$H_{LL} = L \rho C_{LL} U (q_{sw} - q_{aw}), \quad (3)$$

其中, M 为动量通量 (N/m^2), 空气密度 $\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$, U 为风速, 定压比热 $c_p = 1.00488 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, T_s 、 T_a 分别为海表水温和气温 ($^{\circ}C$), 本文取水汽潜热 L 为 $(597 - 0.56T_s) \times 4186.8 \text{ J/kg}$, q_{sw} 和 q_{aw} 分别为据海表水温下的饱和比湿和空气比湿, 其值为 $q_{sw} = 622e_{sw}(p - 0.378e_{sw})^{-1} \text{ (g/kg)}$, $q_{aw} = 622e_{aw}(p - 0.378e_{aw})^{-1} \text{ (g/kg)}$, e_{sw} 和 e_{aw} 分别为据海表水温下的饱和水汽压和空气实际水汽压 (hPa), p 为气压 (hPa), H_{SS} 和 H_{LL} 分别为感热通量和潜热通量 (W/m^2), C_{DD} 、 C_{SS} 和 C_{LL} 分别为考虑风速和大气层结影响的曳力系数、感热交换系数和潜热交换系数, 对不稳定大气其值分别为

$$\frac{C_{DD}}{C_D} \approx 1.0 + 0.47S^{0.5}, \quad (4)$$

$$\frac{C_{SS}}{C_S} \approx \frac{C_{LL}}{C_L} = 1.0 + 0.63S^{0.5}, \quad (5)$$

$$S = S_0 \frac{|S_0|}{|S_0| + 0.01}, \quad (6)$$

$$S_0 = \frac{T_s - T_a}{U^2 [1.0 + \lg(10/z)]^2}, \tag{7}$$

其中， S_0 和 S 为大气稳定度参数， z 为高度 (m)， C_D 、 C_S 和 C_L 分别为中性大气的曳力系数、感热交换系数和潜热交换系数，它们与风速的关系为

$$10^3 C_D = a_d + b_d U^{p_d}, \tag{8}$$

$$10^3 C_S = a_s + b_s U^{p_s} + c_s (U - 8)^2, \tag{9}$$

$$10^3 C_L = a_l + b_l U^{p_l} + c_l (U - 8)^2, \tag{10}$$

数值常数 a_d 、 a_s 、 a_l 、 b_d 、 b_s 、 b_l 、 c_s 、 c_l 、 p_d 、 p_s 和 p_l 与风速的关系见表 1。

表 1 中性大气整体交换系数公式中常数

$U/(m/s)$	a_d	a_s	a_l	b_d	b_s	b_l	c_s	c_l	p_d	p_s	p_l
0.3~2.2	0	0	0	1.08	1.185	1.23	0	0	-0.15	-0.157	-0.16
2.5~5.0	0.771	0.927	0.969	0.0858	0.0546	0.0521	0	0	1	1	1
5.0~8.0	0.867	1.51	1.18	0.0667	0.01	0.01	0	0	1	1	1
8.0~25.0	1.2	1.17	1.196	0.025	0.0075	0.008	-0.00045	-0.0004	1	1	1
25.0~50.0	0	1.652	1.68	0.073	-0.017	-0.016	0	0	1	1	1

3 主要结果

表 2 和表 3 列出了 1998 年 SCSMEX 期间“科学 1 号”和“实验 3 号”观测的常规大气要素、海表温度以及利用层结大气整体动力学输送公式计算的湍流通量等的日平均值。表中 u_{10} 是 10 m 高度上的纬向风速日平均值（东风为正值西风为负值）， v_{10} 是 10 m 高度上经向风速日平均值（北风为正值南风为负值）， U_{10} 是 10 m 高度的风速值， $\rightarrow$ 表示以“度”为单位的风向， T_s 海表温度， T_a 为 10 m 高度上的气温， p 和 H_r 是气压和相对湿度， C_{ddu} 和 C_{ddv} 为层结大气的纬向和经向曳力系数， M_u 和 M_v 为层结大气状况下大气向海洋输送的纬向和经向动量通量， H 为感热通量和潜热通量之和，而 β 为感热通量与潜热通量的比值，即 Bowen 比。

3.1 SCSMEX 期间南海夏季风日平均风矢量逐日变化特征

图 1a 给出“科学 1 号”SCSMEX 期间南海夏季风日平均值风矢量的逐日变化。从图 1a 可以看出该观测海域的风矢量变化经历了爆发前期、转换期、爆发期和盛行期（在盛行期出现了季风中断期）。

5 月 5~15 日为爆发前期，盛行东北风，日平均风速较大，最大高达 9.3 m/s（5 月 7 日），该值与 1992 年西太平洋热带海域西风爆发时的风速值^[1]差不多，在转换期的前 1 天（15 日）日平均风速骤减至 1.7 m/s。5 月 16 日到 20 日经历了 5 天的转换期，这期间风向由爆发前期的东北风转至东南风，风速较小，最大日平均风速仅为 3.3 m/s（5 月 17 日）远远小于爆发前期的 9.3 m/s，最小日平均风速仅为 0.6 m/s（5 月 18 日）。5 月 21 日风由东南风转到西南风，纬向风和经向风分别为西风 0.5 m/s（日均值）和南风 1.1 m/s（日均值）（表 2），西南季风开始爆发，在爆发期间无论是西风分

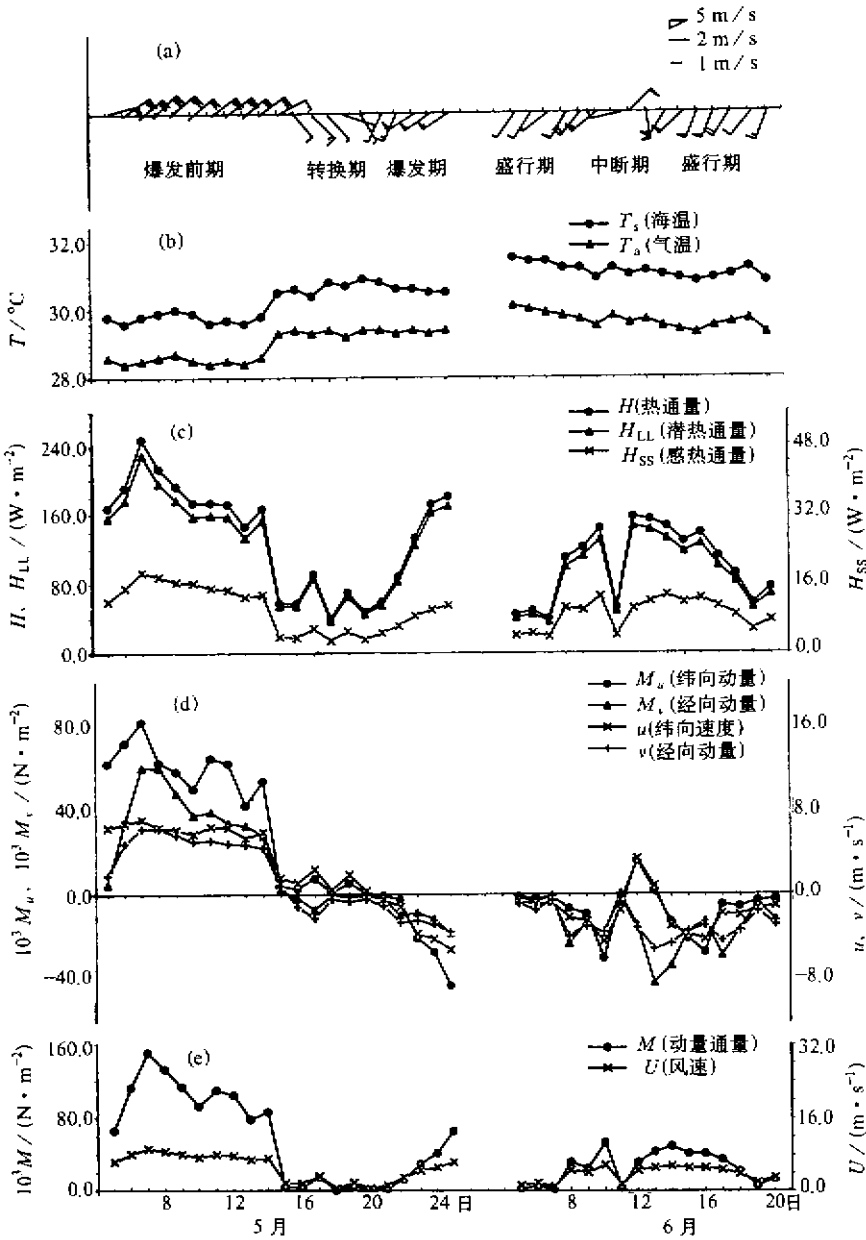


图 1 1998 年“科学 1 号”大气、海洋要素和湍流通量日平均值的逐日变化

(a) 风矢量; (b) 海温和气温; (c) 热通量、潜热通量和感热通量;

(d) 纬向风速和动量通量、经向风速和动量通量; (e) 风速和动量通量

量、南风分量, 还是合成风均逐日增加, 分别由 21 日的 0.5、1.1 和 1.2 m/s 增至 25 日的 5.3、3.6 和 6.4 m/s (表 2)。该爆发过程整整持续了 5 天直到 5 月 25 日。6 月 5 日到 6 月 20 日除 12~13 日出现短暂西南季风中断外 (风向由 11 日的西南变到 12 日的东北再转至 13 日的东南, 14 日又恢复到西南风), 其他时间均为西南季风盛行期, 值

表 2 1998 SCSMEX“科学 1 号”(6°15'N, 110°E) 湍流通量观测结果

日期	u_{10}	v_{10}	U_{10}	$\rightarrow$	T_s	T_a	p	H_r	$10^3 C_{du}$	$10^3 M_u$	$10^3 C_{dv}$	$10^3 M_v$	$10^3 C_D$	$10^3 C_S$	$10^3 C_L$	S	$10^3 C_{DD}$	$10^3 C_{SS}$	$10^3 C_{LL}$	$10^3 M$	H_{SS}	H_{LL}	β	H
5-05	6.2	1.7	6.4	75	29.8	28.6	1006.0	82	1.37	61.6	1.30	4.4	1.29	1.21	1.24	0.022	1.38	1.32	1.36	66.1	11.9	155.6	0.076	167.5
5-06	6.6	4.7	8.1	55	29.6	28.4	1006.5	84	1.40	71.4	1.29	33.4	1.40	1.23	1.26	0.012	1.47	1.31	1.35	112.8	15.0	175.7	0.085	190.7
5-07	7.0	6.1	9.3	49	29.8	28.5	1006.5	82	1.42	81.4	1.37	59.6	1.43	1.24	1.27	0.009	1.49	1.31	1.35	150.8	18.6	229.1	0.081	247.7
5-08	6.2	6.1	8.7	45	29.9	28.6	1006.0	84	1.38	62.1	1.37	59.6	1.42	1.24	1.27	0.011	1.50	1.32	1.35	132.8	17.6	195.3	0.09	212.9
5-09	6.0	5.5	8.1	48	30.0	28.7	1005.0	86	1.37	57.7	1.34	47.4	1.40	1.23	1.26	0.013	1.48	1.32	1.35	113.6	16.3	176.2	0.093	192.5
5-10	5.6	4.9	7.4	49	29.9	28.5	1004.7	86	1.35	49.5	1.31	36.9	1.36	1.22	1.25	0.018	1.45	1.32	1.36	92.9	16.1	156.8	0.10	172.9
5-11	6.3	5.0	8.0	52	29.6	28.4	1004.7	86	1.39	64.1	1.32	38.4	1.40	1.23	1.26	0.012	1.47	1.32	1.35	110.1	14.9	158.4	0.094	173.3
5-12	6.2	4.7	7.8	53	29.7	28.5	1004.6	86	1.37	61.6	1.29	33.3	1.39	1.23	1.26	0.014	1.47	1.32	1.35	104.6	14.5	156.6	0.093	171.1
5-13	5.2	4.6	6.9	49	29.6	28.4	1005.1	87	1.32	41.6	1.29	31.9	1.33	1.22	1.25	0.018	1.41	1.32	1.36	78.5	12.9	132.6	0.097	145.5
5-14	5.8	4.3	7.2	54	29.8	28.6	1005.0	85	1.35	53.1	1.27	27.4	1.35	1.22	1.25	0.016	1.43	1.32	1.35	86.7	13.4	152.2	0.088	165.9
5-15	1.5	0.8	1.7	62	30.5	29.3	1006.0	80	1.36	3.6	1.84	1.4	1.00	1.09	1.13	0.41	1.30	1.53	1.59	4.4	3.7	53.7	0.069	57.4
5-16	1.0	-1.2	1.6	141	30.6	29.4	1007.0	79	1.61	2.5	1.50	-1.9	1.01	1.10	1.14	0.46	1.33	1.57	1.63	4.0	3.5	53.6	0.065	57.1
5-17	2.3	-2.3	3.3	136	30.4	29.3	1008.1	81	1.17	7.2	1.17	-7.3	1.05	1.11	1.14	0.092	1.20	1.33	1.36	15.3	5.6	85.0	0.066	90.6
5-18	0.4	-0.5	0.6	138	30.8	29.4	1009.2	80	2.96	0.6	2.53	-0.7	1.17	1.28	1.33	3.88	2.25	2.87	2.98	1.0	2.8	37.0	0.076	39.8
5-19	1.8	-0.7	1.9	109	30.7	29.2	1008.5	79	1.31	5.0	2.08	-1.2	0.98	1.07	1.11	0.41	1.27	1.50	1.56	5.4	5.0	64.6	0.077	69.6
5-20	0.3	-0.5	0.6	150	30.9	29.4	1008.9	76	3.76	0.4	2.58	-0.8	1.17	1.28	1.33	4.16	2.29	2.92	3.04	1.0	3.1	44.4	0.070	47.5
5-21	-0.5	-1.1	1.2	205	30.8	29.4	1008.9	79	2.52	-0.7	1.65	-2.3	1.05	1.15	1.19	1.17	1.58	1.93	2.00	2.7	4.6	54.6	0.084	59.2
5-22	-1.2	-2.7	3.0	204	30.6	29.3	1007.6	81	1.52	-2.6	1.19	-10.2	1.03	1.09	1.12	0.13	1.20	1.34	1.37	12.6	6.2	81.6	0.076	87.8
5-23	-3.8	-2.5	4.5	238	30.6	29.4	1006.4	80	1.25	-21.1	1.20	-8.8	1.16	1.17	1.20	0.051	1.28	1.34	1.37	30.3	8.5	123.6	0.069	132.1
5-24	-4.3	-2.9	5.2	236	30.5	29.3	1006.5	76	1.28	-27.6	1.20	-11.8	1.21	1.20	1.23	0.036	1.32	1.34	1.38	41.8	9.9	161.0	0.061	170.9
5-25	-5.3	-3.6	6.4	236	30.5	29.4	1006.8	80	1.33	-43.7	1.22	-18.5	1.29	1.21	1.24	0.02	1.30	1.32	1.35	66.1	10.9	168.6	0.065	179.5
6-05	-0.7	-0.9	1.2	216	31.5	30.1	1007.4	86	2.08	-1.2	1.80	-1.7	1.05	1.15	1.19	1.03	1.55	1.89	1.95	2.6	4.0	40.2	0.10	44.2
6-06	-1.0	-1.5	1.8	214	31.4	30.0	1007.4	88	1.68	-2.0	1.40	-3.7	0.99	1.08	1.12	0.42	1.29	1.52	1.58	4.9	4.5	43.8	0.10	48.3
6-07	-0.8	-0.6	1.0	233	31.4	29.9	1007.7	87	1.92	-1.4	2.29	-1.0	1.08	1.19	1.23	1.49	1.70	2.11	2.17	2.0	3.7	35.6	0.14	39.3
6-08	-2.2	-4.0	4.6	209	31.2	29.8	1007.3	88	1.20	-6.8	1.26	-23.6	1.17	1.18	1.21	0.057	1.30	1.36	1.39	32.2	10.3	98.2	0.10	108.5
6-09	-2.6	-3.1	4.1	219	31.2	29.7	1007.4	83	1.20	-9.5	1.23	-13.8	1.12	1.15	1.18	0.080	1.27	1.35	1.39	25.0	9.8	111.1	0.09	120.9
6-10	-4.5	-3.6	5.8	231	30.9	29.5	1008.4	87	1.29	-30.6	1.25	-19.0	1.25	1.21	1.24	0.034	1.36	1.35	1.39	53.5	12.9	129.6	0.10	142.5
6-11	-1.5	-0.3	1.5	258	31.2	29.8	1008.3	84	1.39	-3.7	3.13	0.3	1.02	1.11	1.15	0.61	1.39	1.66	1.72	3.7	4.1	48.2	0.09	52.3
6-12	3.3	3.2	4.6	46	31.0	29.6	1006.4	77	1.22	15.5	1.23	-14.7	1.17	1.17	1.21	0.057	1.30	1.35	1.39	32.2	10.2	145.6	0.07	155.8
6-13	0.8	-5.2	5.3	171	31.1	29.7	1006.5	83	1.98	1.5	1.33	-42.1	1.22	1.20	1.23	0.042	1.34	1.35	1.39	44.0	11.8	141.2	0.08	153.0
6-14	-3.0	-4.7	5.6	212	31.0	29.5	1007.8	84	1.22	-12.8	1.31	-33.9	1.24	1.21	1.23	0.040	1.36	1.35	1.39	49.9	13.3	131.8	0.10	145.1
6-15	-3.8	-3.5	5.2	227	30.9	29.4	1008.8	87	1.25	-21.1	1.23	-17.6	1.21	1.20	1.23	0.044	1.33	1.35	1.39	42.0	11.6	116.2	0.10	127.8
6-16	-4.3	-3.0	5.2	236	30.8	29.3	1007.7	86	1.28	-27.7	1.22	-12.8	1.21	1.20	1.23	0.047	1.33	1.36	1.40	42.0	12.5	124.9	0.10	137.4
6-17	-1.8	-4.4	4.8	202	30.9	29.5	1006.8	88	1.29	-4.9	1.29	-29.2	1.18	1.19	1.22	0.052	1.31	1.36	1.39	35.3	10.7	100.2	0.11	110.9
6-18	-2.0	-3.4	3.9	211	31.0	29.6	1007.0	88	1.24	-5.8	1.23	-16.6	1.11	1.14	1.17	0.083	1.26	1.35	1.38	22.4	8.7	81.8	0.11	90.5
6-19	-1.3	-1.6	2.1	218	31.2	29.7	1007.8	87	1.50	-3.0	1.37	-4.1	0.95	1.05	1.09	0.33	1.21	1.43	1.48	6.2	5.3	51.7	0.10	57.0
6-20	-1.1	-2.9	3.1	201	30.8	29.3	1007.2	88	1.61	-2.3	1.22	-12.0	1.04	1.10	1.13	0.15	1.23	1.37	1.40	13.8	7.5	67.5	0.11	75.0

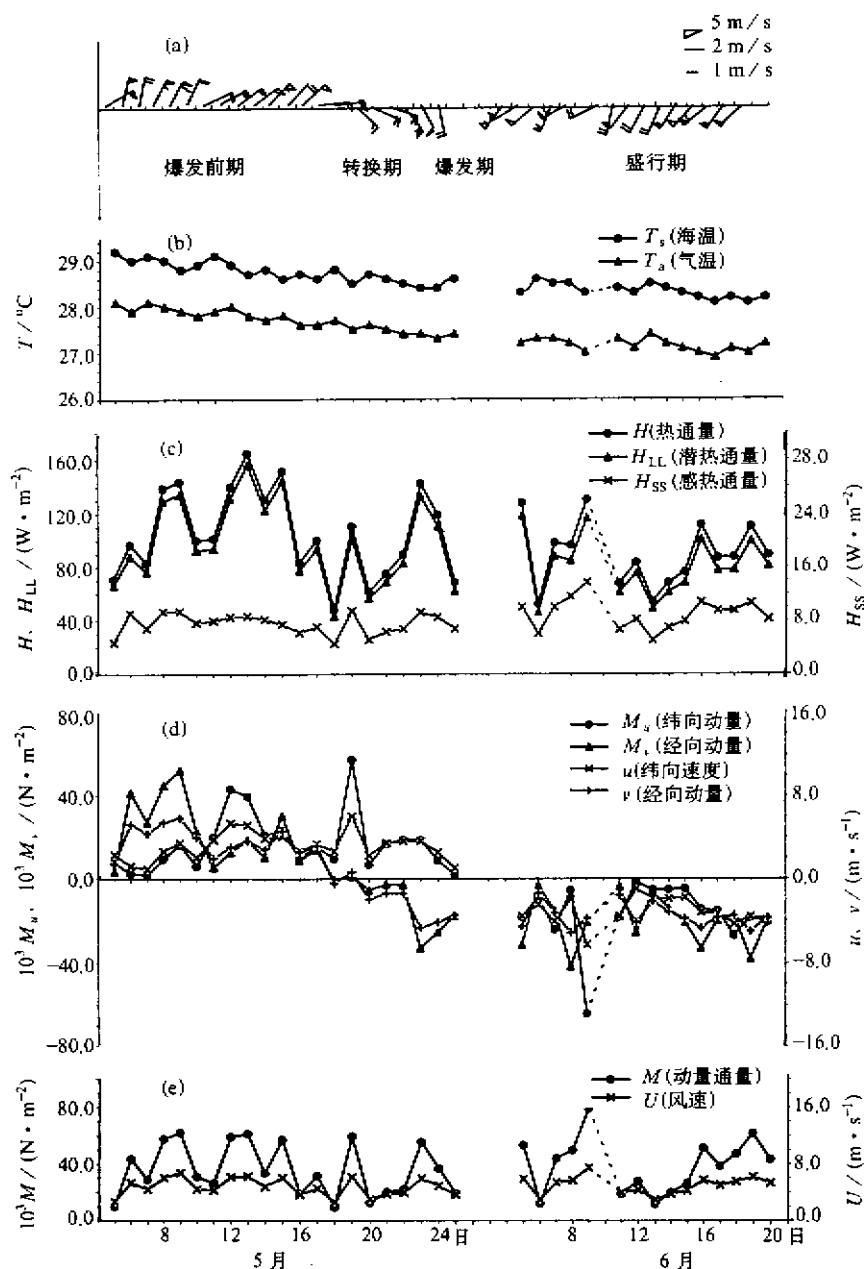


图2 1998年“实验3号”大气、海洋要素和湍流量日平均值的逐日变化

(a) 风矢量; (b) 海温和气温; (c) 热通量、潜热通量和感热通量;

(d) 纬向风速和动量通量、经向风速和动量通量; (e) 风速和动量通量

得注意的是这期间的最大日平均风速为 5.8 m/s , 远远小于爆发前期的 9.3 m/s 。此外, 无论是季风转换期 1.6 m/s 的平均风速, 爆发期的 4.1 m/s 平均风速, 还是季风盛行期的 3.6 m/s 平均风速, 都远远小于季风爆发前期的 7.2 m/s 平均风速。

图2a给出了“实验3号”SCSMEX期间南海夏季风日平均风矢量的逐日变化。从

表3 1998 SCSMEX“实验3号”(20°22'N, 116°57'E) 湍流通量观测结果

日期	u_{10}	v_{10}	U_{10}	$\rightarrow$	T_s	T_a	ρ	H_f	$10^3 C_{ddu}$	$10^3 M_u$	$10^3 C_{ddv}$	$10^3 M_v$	$10^3 C_{dd}$	$10^3 C_s$	$10^3 C_L$	S	$10^3 C_{DD}$	$10^3 C_{SS}$	$10^3 C_{LL}$	$10^3 M$	H_{SS}	H_{LL}	β	H
5-05	2.3	1.4	2.7	60	29.2	28.1	1008.8	81	1.40	7.4	1.16	3.3	1.00	1.07	1.10	0.14	1.18	1.32	1.36	10.1	4.7	66.2	0.07	70.9
5-06	1.2	5.2	5.3	13	29.0	27.9	1010.9	88	1.31	2.5	1.48	41.4	1.22	1.20	1.23	0.031	1.32	1.33	1.37	43.6	9.1	87.8	0.10	96.9
5-07	0.9	4.3	4.4	12	29.1	28.1	1011.3	87	1.25	1.6	1.67	27.0	1.15	1.17	1.20	0.043	1.26	1.32	1.36	28.7	6.8	76.1	0.09	82.9
5-08	2.6	5.4	6.0	26	29.0	28.0	1010.3	82	1.32	9.2	1.16	45.0	1.27	1.21	1.24	0.021	1.36	1.32	1.35	57.6	9.3	129.5	0.07	138.8
5-09	3.4	5.8	6.7	30	28.8	27.9	1008.4	83	1.33	16.1	1.19	52.3	1.31	1.22	1.25	0.013	1.38	1.31	1.34	62.0	9.3	134.1	0.07	143.4
5-10	2.0	3.9	4.4	27	28.9	27.8	1008.1	84	1.24	5.7	1.22	22.1	1.22	1.17	1.20	0.048	1.35	1.33	1.37	30.6	7.6	92.3	0.08	99.9
5-11	3.7	1.9	4.2	63	29.1	27.9	1008.5	83	1.24	19.7	1.23	5.2	1.13	1.16	1.19	0.059	1.26	1.34	1.37	26.1	7.9	93.5	0.08	101.4
5-12	5.3	3.0	6.1	61	28.9	28.0	1008.6	82	1.18	43.1	1.31	12.4	1.27	1.21	1.24	0.017	1.35	1.31	1.34	59.0	8.5	131.1	0.06	139.6
5-13	5.1	3.6	6.2	55	28.7	27.8	1008.0	77	1.21	39.6	1.30	18.3	1.27	1.21	1.24	0.017	1.35	1.31	1.34	61.0	8.6	155.8	0.06	164.4
5-14	3.8	2.8	4.7	53	28.8	27.7	1007.4	78	1.18	20.8	1.23	10.1	1.17	1.18	1.21	0.041	1.28	1.33	1.36	33.2	8.1	122.4	0.07	130.4
5-15	4.0	4.5	6.0	42	28.6	27.8	1005.9	78	1.26	22.8	1.22	29.9	1.27	1.21	1.24	0.015	1.34	1.30	1.33	56.8	7.4	144.0	0.05	151.4
5-16	2.6	2.5	3.6	46	28.7	27.6	1007.2	83	1.18	9.5	1.17	8.6	1.08	1.12	1.16	0.076	1.22	1.31	1.36	18.6	6.1	77.0	0.08	83.1
5-17	3.3	3.1	4.5	47	28.6	27.6	1008.6	83	1.19	15.2	1.19	13.4	1.16	1.17	1.20	0.041	1.32	1.32	1.35	31.4	7.0	93.1	0.08	100.1
5-18	2.6	-0.5	2.6	91	28.8	27.7	1009.9	88	2.38	9.3	1.17	-0.7	0.99	1.07	1.10	0.15	1.17	1.33	1.37	9.3	4.5	43.0	0.10	47.5
5-19	6.0	0.6	6.1	84	28.5	27.5	1008.6	87	2.08	57.3	1.36	0.9	1.27	1.21	1.24	0.02	1.35	1.32	1.35	59.3	9.4	101.0	0.09	110.4
5-20	2.2	-2.0	3.0	133	28.7	27.6	1008.0	86	1.20	6.6	1.17	-5.6	1.03	1.09	1.13	0.11	1.19	1.32	1.37	12.6	5.1	56.2	0.09	61.3
5-21	3.4	-1.4	3.7	112	28.6	27.5	1007.3	86	1.20	16.6	1.23	-2.8	1.09	1.13	1.16	0.071	1.23	1.32	1.35	20.0	6.3	68.6	0.09	74.9
5-22	3.6	-1.4	3.9	111	28.5	27.4	1005.7	83	1.39	18.5	1.22	-3.2	1.11	1.14	1.17	0.064	1.24	1.32	1.35	22.2	6.7	82.7	0.08	89.4
5-23	3.6	-4.7	5.9	143	28.4	27.4	1004.6	80	1.28	18.3	1.21	-33.1	1.26	1.21	1.24	0.021	1.35	1.32	1.35	55.3	9.2	132.9	0.07	142.1
5-24	2.5	-4.2	4.9	152	28.4	27.3	1003.7	81	1.25	8.6	1.18	-25.8	1.19	1.19	1.22	0.038	1.30	1.34	1.37	36.7	8.5	110.6	0.07	119.1
5-25	1.0	-3.5	3.6	166	28.6	27.4	1002.4	88	1.23	1.9	1.63	-17.6	1.08	1.12	1.16	0.084	1.23	1.32	1.37	18.7	6.7	61.8	0.11	68.5
6-05	-3.6	-4.6	5.8	218	28.3	27.2	1006.9	84	1.28	-18.3	1.21	-31.7	1.25	1.21	1.24	0.022	1.34	1.32	1.36	52.9	9.9	117.9	0.08	127.8
6-06	-2.5	-1.4	2.9	241	28.6	27.3	1006.7	91	1.41	-8.7	1.19	-3.2	1.02	1.09	1.12	0.13	1.19	1.34	1.37	11.8	6.0	46.0	0.13	52.0
6-07	-4.1	-3.3	5.3	231	28.5	27.3	1006.1	89	1.20	-24.6	1.25	-15.3	1.22	1.20	1.23	0.031	1.32	1.33	1.37	43.6	9.9	88.1	0.11	98.0
6-08	-2.0	-5.2	5.6	201	28.5	27.2	1005.4	91	1.32	-5.7	1.22	-41.8	1.24	1.21	1.24	0.030	1.34	1.34	1.38	49.4	11.5	84.6	0.14	96.1
6-09	-6.3	-3.8	7.4	239	28.3	27.0	1004.9	89	1.23	-64.1	1.38	-20.8	1.36	1.22	1.25	0.013	1.43	1.31	1.34	78.5	13.6	116.7	0.12	130.3
6-11	-3.6	-1.6	3.9	246	28.4	27.3	1008.4	89	1.30	-18.3	1.21	-3.9	1.11	1.14	1.17	0.057	1.23	1.31	1.35	18.7	6.6	60.8	0.11	67.4
6-12	-1.0	-4.2	4.3	194	28.3	27.1	1007.7	87	1.25	-1.9	1.61	-25.8	1.14	1.16	1.19	0.051	1.26	1.32	1.36	27.4	8.1	75.2	0.11	83.3
6-13	-1.9	-2.2	2.9	222	28.5	27.4	1007.7	88	1.16	-5.2	1.22	-6.6	1.02	1.09	1.12	0.11	1.18	1.32	1.35	11.7	5.0	48.9	0.10	53.9
6-14	-1.9	-3.2	3.7	210	28.4	27.2	1008.3	88	1.20	-5.2	1.23	-14.4	1.09	1.13	1.16	0.071	1.22	1.32	1.35	19.7	6.9	61.3	0.11	68.2
6-15	-1.8	-3.8	4.2	205	28.3	27.1	1007.4	89	1.23	-4.8	1.26	-20.8	1.13	1.16	1.19	0.054	1.25	1.33	1.36	26.0	7.9	68.3	0.12	76.2
6-16	-3.2	-4.7	5.7	214	28.2	27.0	1005.6	87	1.28	-14.5	1.21	-33.1	1.25	1.21	1.24	0.026	1.34	1.33	1.37	51.2	10.7	100.9	0.11	111.6
6-17	-3.3	-3.7	5.0	222	28.1	26.9	1004.5	89	1.23	-15.3	1.20	-19.7	1.20	1.20	1.23	0.036	1.31	1.34	1.38	38.4	9.5	77.6	0.12	87.1
6-18	-4.3	-3.5	5.5	231	28.2	27.1	1005.6	90	1.21	-27.0	1.25	-17.3	1.23	1.21	1.24	0.025	1.32	1.33	1.36	47.0	9.5	78.1	0.12	87.6
6-19	-3.6	-5.0	6.2	216	28.1	27.0	1006.3	88	1.30	-18.3	1.21	-38.0	1.28	1.21	1.24	0.019	1.36	1.31	1.35	61.6	10.6	99.9	0.11	110.5
6-20	-3.8	-3.7	5.3	226	28.2	27.2	1006.9	87	1.21	-20.6	1.22	-19.4	1.22	1.20	1.23	0.024	1.31	1.32	1.35	43.2	8.2	81.0	0.09	89.2

图 2a 可以看出, 该观测海域的风矢量变化与南部点差不多也经历了爆发前期、转换期、爆发期和盛行期, 只不过是具体日期向后推迟, 并且在季风盛行期没有出现南部点的短暂中断期。5 月 5~19 日为爆发前期, 与南部点一样也盛行东北风, 最大日平均风速为 6.7 m/s (5 月 9 日, 见表 3), 小于南部点 9.3 m/s 的最大日平均风速。这期间的平均风速为 4.9 m/s , 小于南部点爆发前期 7.2 m/s 的平均风速。5 月 20~25 日为季风转换期, 风向由东北转向偏东直到东南, 转换期的风向变化与南部点差不多, 但平均风速 (4.2 m/s) 和最大平均风速 (5.9 m/s , 5 月 23 日, 见表 3) 均大于南部点平均风速 (1.6 m/s) 和最大日平均风速 (3.3 m/s , 5 月 19 日, 见表 2)。由于 5 月 25 日观测中止, 该点夏季风爆发具体时间难以确定, 可能出现在 5 月 25 日与 6 月 5 日之间的暂停观测期间。从 6 月 5 日恢复观测直到 6 月 20 日停止观测, 北部点夏季风处于盛行期, 其最大日平均风速 (6 月 9 日, 7.4 m/s , 见表 3) 和平均风速 (4.9 m/s , 见表 3) 均大于南部点的最大日平均风速 (6 月 10 日, 5.8 m/s , 见表 2) 和平均风速 (3.6 m/s)。此外, 从表 3 可以看出虽然北部点爆发前期的最大日平均风速 6.7 m/s (5 月 9 日) 小于季风盛行期的 7.4 m/s (6 月 9 日), 但与南部点一样, 爆发前期的平均风速 4.9 m/s 要大于季风盛行期的平均风速 3.6 m/s 。

3.2 SCSMEX 期间南海夏季风海温和气温逐日变化特征

图 1b 和图 2b 是南海夏季风期间南部点和北部点海表温度和气温日平均值的逐日变化。从图 1b 可以看出, 南部点在季风爆发前期海温维持在 29.8°C 左右, 而在季风盛行期则维持在 31°C 左右, 它与西太平洋热带海域一样也是一个热带暖池^[13], 气温变化与海温变化相似, 二者基本同步。爆发前期的最后一天 5 月 15 日海温发生增温突变, 1 天之内由 29.8°C 增至 30.5°C , 增温幅度高达 0.7°C , 气温也随之同步飙升。日平均风速也由 7.2 m/s 骤减到 1.7 m/s , 相应海洋向大气输送热量也急剧减少 (见图 1c)。5 月 16 日到 20 日的季风转换期和 5 月 21 日到 25 日季风爆发期海温和气温变化都不大, 分别维持在 30.6°C 和 29.3°C 左右; 而在 6 月 5 日到 20 日的季风盛行期, 海温与气温均呈下降趋势, 二者下降幅度分别为 0.7°C 和 0.8°C 左右, 远远小于西太平洋热带海域西风爆发过程海温降温 1.3°C ^[11] 和 1.6°C ^[14] 的幅度, 这种海温和气温的降温过程除与这期间的云量增加、总辐射减少等有关外, 主要是海洋向大气输送的潜热通量发生变化引起的 (见图 1c)。

从图 2b 可以看出, 北部点的日平均海温和气温的逐日变化特征与南部点有明显差别。首先, 在季风爆发前期 (5 月 5~19 日), 海温和气温均呈下降趋势, 下降幅度均为 0.6°C 左右, 而不是南部点那样呈上升趋势, 更没有发生增温突变。在季风转换期的 5 月 20~25 日海温和气温呈现下降趋势, 但下降幅度不大, 仅为 0.2°C 左右 (南部点基本维持不变)。而在季风盛行期的 6 月 5~20 日海温和气温虽呈下降趋势, 但基本维持在 28.3°C 和 27.3°C 左右, 这与南部点的明显呈下降趋势是有很大的不同的, 这可能是南部点强对流天气过程与北部点有差异引起云量变化不同所致。

3.3 SCSMEX 期间南海夏季风湍流通量逐日变化特征

3.3.1 动量通量

图 1d 和图 2d 分别是南部点和北部点纬向动量通量、纬向风速和经向动量通量、经向风速等的日平均值逐日变化。从图 1d 可以看出, 南部点在季风爆发前期的 5 月 5

~15 日纬向风是正值的东风分量, 其最大日平均东风分量为 7.0 m/s (5 月 7 日, 见表 2), 经向风也是正值的北风分量, 其最大日平均北风分量为 6.1 m/s (5 月 7 日, 见表 2)。相应的动量通量分量分别为 $8.14 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 和 $5.96 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 。转换期的 5 月 16~20 日纬向风仍然是正值的东风分量, 其最大日平均风速值由 7.0 m/s 降到 2.3 m/s (5 月 17 日, 见表 2)。经向风变成负值的南风分量, 其最大日平均风速值由北风分量的 6.1 m/s 变到南风分量的 2.3 m/s 。而在季风爆发期的 5 月 21~25 日, 纬向风变为负值的西风分量, 经向风仍为负值的南风分量。无论是纬向风的西风分量, 还是经向风的南风分量, 其日平均风速值均逐日增加, 分别由 0.5 m/s 和 1.1 m/s 增加到 5.3 m/s 和 3.6 m/s , 相应的动量通量分别由 $0.7 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ 和 $2.3 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ 增加到 $4.37 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 和 $1.85 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 。南海夏季风始爆发于纬向风西风分量、经向风南风分量同时出现的 5 月 21 日。6 月 5~20 日的季风盛行期除了 6 月 12~13 日中断期纬向风由负值变为正值的东风分量和经向风 (12 日) 为北风分量外, 其他时段无论是纬向风还是经向风均为负值的西风分量和南风分量 (见表 2), 这期间的纬向动量通量和经向动量通量的平均值分别为 $9.3 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ 和 $1.7 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 远远小于爆发前期的 $5.5 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 和 $3.4 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ (见图 1d 和表 2), 也就是说季风爆发前的纬向动量通量和经向动量通量分别是季风盛行期的纬向动量通量和经向动量通量的 6 倍和 2 倍。

从图 2d 可以看出, 北部点季风爆发前期的 5 月 5~19 日, 纬向风是均为正值的东风分量, 其最大日平均风速值为 6.0 m/s (5 月 19 日, 见表 3), 经向风除 5 月 18 日外也是均为正值的北风分量, 其最大日平均风速值为 5.8 m/s (5 月 9 日, 见表 3), 相应的动量通量分别为 $5.73 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 和 $5.23 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 。转换期的 5 月 20~25 日, 纬向风与南部点相同仍然是正值的东风分量, 经向风也与南部点一样变成负值的南风分量。5 月 25 日后, 由于观测中止, 没能在本观测海域观测到季风爆发的具体时间。6 月 5~20 日的季风盛行期北部点与南部点相同, 纬向风和经向风也均为负值的西风分量和南风分量 (见表 3), 这期间的纬向动量通量和经向动量通量的平均值分别为 $1.68 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$, $2.08 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 与季风爆发前期的 $1.94 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 和 $1.87 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 相差不多。

图 1e 和图 2e 分别是南部点和北部点的总动量通量 M 和总风速日平均值的逐日变化。从图 1e 和 2e 可以看出, 动量通量是与风速明显呈正相关。南部点季风爆发前期的动量通量的平均值为 $9.58 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 远远大于季风盛行期的动量通量平均值 $2.57 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$, 而北部点季风爆发前期的动量通量平均值 $3.92 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 与季风盛行期的动量通量平均值 $3.87 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 相差无几。

南部点爆发前期 $9.58 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 动量通量平均值介于西太平洋热带海域西风爆发过程的动量通量平均值 ($18.8 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$) 和强对流天气的动量通量平均值 ($5.13 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$) 之间, 而北部点爆发前期 $3.92 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$ 动量通量平均值则介于西太平洋热带海域强对流天气过程的动量通量平均值 ($5.13 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$) 和平稳天气的动量通量平均值 ($1.17 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$) 之间^[14]。

3.3.2 感热通量和潜热通量

在几天甚至更长时间尺度的天气过程如西风爆发和南海夏季风爆发等, 影响其海温

T_s 的变化可在海表层内表示成如下的趋势热量平衡方程^[15]:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p h} (Q_0 - Q_{\text{pen}}) - (v_s \cdot \nabla T_s) - \left(\frac{1}{h} \nabla \cdot \int_{-h}^0 T'v' dz \right) - \left[\frac{(T_s - T_{-h})}{h} \left(\frac{dh}{dt} + w_h \right) \right] - \frac{1}{\rho c_p h} Q_{-h}, \tag{11}$$

其中, Q_0 为海表热通量, Q_{pen} 太阳辐射穿透到海洋 $-h$ 处的热通量。等号右边第 2 项为海洋平流热通量, 第 3 项为层结切变辐合 (散度) 热通量, 第 4 项为夹卷混合热通量, 第 5 项是湍流扩散热通量。

由于设计观测方案的限制, 这里只能讨论控制海温 T_s 时间变化的趋势热量平衡方程 (11) 中海表热通量 Q_0 , 它是控制海洋、大气物理过程即表征海—气热量耦合的物理量,

$$Q_0 = Q_{\text{net}} + Q_{\text{adv}} = Q_{\text{lat}} + Q_{\text{sen}} + Q_{\text{rf}} + Q_{\text{res}}, \tag{12}$$

其中, Q_{net} 为海表上空气柱内净辐射通量, Q_{adv} 为平流到该气柱内的热通量, Q_{lat} 为气柱内海洋蒸发潜热通量, Q_{sen} 为气柱内感热通量, Q_{rf} 为气柱内的降水感热通量, Q_{res} 为气柱内差额热通量。而

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{nsw}} + Q_{\text{nlw}} = Q_{\text{sw}} (1 - \alpha) + (Q_{\text{lw}\downarrow} - Q_{\text{lw}\uparrow}), \tag{13}$$

其中, Q_{nsw} 为短波净辐射, Q_{nlw} 为长波净辐射, Q_{sw} 为太阳总辐射, α 为海洋反照率, $Q_{\text{lw}\downarrow}$ 大气向下长波辐射, 而 $Q_{\text{lw}\uparrow}$ 海洋向上长波辐射。

(12) 和 (13) 式的海表热通量方程中 Q_{adv} 由于观测条件限制无法计算, 根据雨强计观测 Q_{rf} 值约为 $2.5 \sim 4.5 \text{ W/m}^2$ 为小量, Q_{sw} 、 $Q_{\text{lw}\downarrow}$ 可由观测给出, α 在南部点取值为 0.055, 北部点则稍大, $Q_{\text{lw}\uparrow}$ 由海温下的 Stefan-Boltzmann 定律计算给出, Q_{lat} 和 Q_{sen} 根据计算给出, 这样就可以给出 $\partial T_s / \partial t$ 与 Q_0 的关系。

Cronin^[11]和曲绍厚^[14]根据观测结果认为热带海洋中海温变化除了与太阳总辐射有关, 主要与海洋释放潜热通量的变化有关。

图 1c 和图 2c 分别给出南部点和北部点感热通量 H_{SS} 、潜热通量 H_{LL} 和总热通量 ($H_{\text{SS}} + H_{\text{LL}}$) 的日平均值的逐日变化。从图 1c 可以看出海洋向大气输送的潜热通量 H_{LL} 或总热通量的变化与海温变化 (见图 1b) 呈明显负相关。在季风爆发前期的 5 月 5~15 日, 海温维持在 29.8°C 左右, 海洋向大气输送的潜热通量平均为 168.9 W/m^2 介于西太平洋热带海域西风爆发过程 (203.1 W/m^2) 和强对流天气过程 (120.0 W/m^2) 海洋向大气输送的潜热通量^[11,14], 而在 5 月 15 日的海温增温事件中 (增温高达 0.7°C), 海洋向大气输送的潜热通量由 152.2 W/m^2 急剧减少到 53.7 W/m^2 (见表 2), 差不多减少了 2 倍, 同时日平均风速也由 7.2 m/s 骤减至 1.7 m/s 。在 5 月 16~20 日的季风转换期由于风速较小, 海温较高 (潜热释放是大气与海洋的动力、热力过程的综合作用), 潜热释放 5 天平均值处于较低的 56.9 W/m^2 左右, 远远小于季风爆发前期平均释放的潜热通量 152.2 W/m^2 , 仅为其 $1/3$ 左右。在 5 月 21~25 日的季风爆发期间海温下降 (由 30.8°C 减至 30.5°C) 风速增加 (由 1.2 m/s 增至 6.4 m/s), 潜热释放由 54.6 W/m^2 猛增到 168.6 W/m^2 , 增加了 2 倍多。

季风盛行初期的 6 月 5~10 日海温由 31.5°C 下降到 30.9°C , 风速由 1.2 m/s 增加到 5.8 m/s , 相应的潜热释放由日平均值的 40.2 W/m^2 增加到 129.6 W/m^2 , 它与海温变化明显呈负相关关系。整个季风盛行期的潜热释放平均值为 84.3 W/m^2 , 介于西太平洋热带海域强对流天气过程释放潜热的 120.0 W/m^2 和平稳天气过程释放潜热 75.3 W/m^2 之间。此外, 从图 1c 还可以看出, 总热通量 H 和感热通量 H_{ss} 也有相同的变化趋势。由于感热通量 H_{ss} 值在高温海域占海洋释放热量份额较小即 β 值较小 (多为 0.1 左右, 见表 2 和表 3), 因此, H_{ss} 值变化对海温 T_s 的影响不像 H_{LL} 那样举足轻重作用。

北部点的海温变化与海洋潜热释放也呈明显负相关关系 (见图 2b 和 2c), 这里就不必赘述了。

4 几点结论

(1) 本次南海夏季风于 5 月 21 日首先在南海南部观测海域 ($6^{\circ}15'\text{N}$, 110°E) 开始爆发。纬向风速由 20 日东风分量日平均值 0.3 m/s 变成 21 日西风分量 0.5 m/s , 20 日和 21 日经向风速均为南风分量 0.5 m/s 和 1.1 m/s ; 纬向动量通量由东风分量 $0.4 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$ 转变成西向分量 $0.7 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$, 20 日和 21 日经向动量通量均为南向分量 $0.8 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$ 和 $2.3 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$ 。北部观测海域 ($20^{\circ}22'\text{N}$, $116^{\circ}57'\text{E}$) 5 月 25 日停止观测处于季风转换期, 而 6 月 5 日重新开始观测时已经是季风盛行期。根据这一事实, 其季风爆发时间应在 5 月 25 日之后 6 月 5 日之前的暂停观测期间。

南、北两个观测海域的夏季风均经历了爆发前期 (南部 5 月 5~15 日、北部 5 月 5~19 日), 转换期 (南部 5 月 16~20 日、北部 5 月 20~25 日), 爆发期 (南部 5 月 21~25 日、北部 5 月 25 和 6 月 5 日之间) 和盛行期 (南部 5 月 26~6 月 20 日观测结束, 北部 6 月 5 日之后到观测结束)。北部点季风各个时期除了时间滞后于南部点外, 没有出现南部点 5 月 12~13 日的短暂中断期。

(2) 夏季风爆发前期南部点和北部点的平均风速和平均动量通量依次为东北风 7.2 m/s , 4.9 m/s 和 $9.59 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$, $3.92 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$, 均大于季风盛行期的 4.1 m/s , 3.6 m/s 和 $2.57 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$, $3.87 \times 10^{-2}\text{ N/m}^2$ 。两个观测点都出现长约 5 天左右的季风转换期, 使得这次夏季风的发生正常略晚和强度较弱。

(3) 南部点和北部点的日平均值海温和气温逐日变化是不同的, 季风爆发前期南部点海温和气温发生增温突变呈上升趋势, 而北部点海温和气温均呈下降趋势, 降幅达 0.6°C 左右。转换期和爆发期南部点海温和气温变化不大, 而北部点则呈现较小的下降趋势。季风盛行期南部点海温和气温呈明显下降趋势, 降幅分别为 0.7° 和 0.8°C 左右, 而北部点海温和气温基本维持在 28.3°C 和 27.3°C 左右。

(4) 与西风爆发一样, 这次夏季风过程的海温变化除与太阳总辐射变化有关外, 主要与海洋向大气释放潜热通量的变化呈明显负相关。

1992~1993 年西风爆发过程 10 天左右内海温下降幅度高达 1.6°C 左右, 而这次夏季风爆发过程, 南部点海温下降幅度为 0.7°C , 北部点海温无明显的下降趋势。这次夏季风南部点和北部点均出现长达数天的转换期, 而西风爆发过程不存在风向逐渐变化的

转换期。季风爆发前大气向海洋输送的动量通量远远大于季风爆发后大气向海洋输送的动量通量,而西风爆发前大气向海洋输送的动量通量远远小于西风爆发时大气向海洋输送的动量通量。

参 考 文 献

- 1 李崇银、屈 昕,南海夏季风爆发的大气环流演变特征,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,1999,5~11.
- 2 金祖辉, TBB资料揭示的南海夏季风爆发的气候特征,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,1999,57~65.
- 3 王世玉、钱永甫,1998年南海季风爆发前后区域加热场的基本特征,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,1999,43~47.
- 4 谢 安、毛江玉、叶 谦,海温纬向梯度与南海夏季风爆发,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,1999,48~56.
- 5 Tao Shiyun and Chen Longxun, A review of recent research on East Asian summer monsoon in China, *Monsoon Meteorology*, Oxford University Press, 1987, 60~92.
- 6 宋正山、鲍媛媛、杨 辉,初夏东亚季风建立的气候特征及年际变化,东亚季风和中国暴雨,1997,250~264.
- 7 谢 安、刘 霞、叶 谦,南海夏季风爆发的气候特征,亚洲季风研究新进展,北京:气象出版社,1996,132~142.
- 8 何金海、罗金娃,南海季风爆发和亚洲夏季风推进特征及其形成机制的探讨,亚洲季风研究新进展,北京:气象出版社,1996.
- 9 陈隆勋、宋 毅、村上胜人,夏季风爆发时期对流云团的变化特征,亚洲季风研究新进展,北京:气象出版社,1996,54~64.
- 10 王启伟、丁一汇,南海与孟加拉湾夏季风演变的对比分析,亚洲季风研究新进展,北京:气象出版社,1996,115~123.
- 11 Cronin, M. F., M. J. McPhaden, The upper ocean heat balance in the western equatorial Pacific warm pool during September–December 1992, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(C4), 8533~8553.
- 12 Junsei Kondo, Air–sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary–Layer Meteorology*, 1975, **9**, 91~112.
- 13 Graham, N. E. and T. P. Barnett, Sea surface temperature, surface wind divergence, and convection over–tropical oceans, *Science*, 1987, **238**, 657~659.
- 14 曲绍厚、王 赛,西太平洋热带海域西风爆发过程湍流通量输送的某些特征,大气科学,1996, **20**(2), 188~194.
- 15 Stevenson, J. W. and P. P. Niiler, Upper ocean heat budget during the Hawaii–to–Tahiti shuttle experiment, *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, **13**, 1894~1907.

Some Characteristics of Air-Sea Exchange for the South China Sea Summer Monsoon in the Period of SCSMEX98

Qu Shaohou, Hu Fei and Li Yaqiu

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,

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

Abstract Atmospheric and oceanic data collected by "Shiyan 3" and "Kexue 1" during the intensive observation period in SCSMEX98 were used to calculate the air-sea turbulent flux exchange. Here the calculation was based on the bulk aerodynamic formula, which had been considered the influence of wind speed and atmospheric stratification. Some characteristics of air-sea exchange were analyzed by examining the results. We found that the summer monsoon firstly burst out in the southern part of the South China Sea on May 21 and advanced northward to the whole. There were obvious differences in the characteristics of air-sea exchange between southern and northern. Moreover, the variation of SST mainly related to the latent flux transfer besides global radiation. We also gave an explanation for the later outbreak and weakness of the summer monsoon, and a comparison with westerly wind burst in the western equatorial Pacific Ocean from 1992 to 1993.

Key words: summer monsoon; air-sea exchange; turbulent flux