

1998年南海季风试验期间海-气通量的估算*

姚华栋

(国家气候中心,北京 100081)

任雪娟 马开玉

(南京大学大气科学系,南京 210093)

摘要

根据1998年南海季风试验西沙海面铁塔梯度观测资料,利用总体(Bulk)系数法和多层结通量廓线法对西沙海面的海-气通量进行了估算,得出两种方法估算的潜热通量、感热通量基本一致。总体系数法估算的潜热通量比多层结通量廓线法略大 $1\sim 3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,感热通量小 $0\sim 1.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。一般而言,季风爆发期间潜热输送逐渐增加,季风爆发前期间夜间潜热通量比季风爆发后期大,季风爆发后期,白天潜热通量明显大于爆发初期和中期。感热通量季风爆发前海面向大气输送,爆发后期大气向海面输送。动量通量和摩擦速度随风速增加。
关键词:西沙 铁塔观测 海气通量 南海季风爆发

引言

海-气通量交换是气候变化的重要机制之一,随着气候变化研究特别是气候数值模拟的发展,作为关键参数海-气通量的观测研究越来越受到重视。国际上许多科学试验,如已经进行的“大西洋季风试验”(ATEX)、“热带海洋和全球大气试验”(TOGA)以及目前正在实施的三大海洋计划即“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)、“海洋带陆海相互作用研究”(LOICL)都把海-气通量的观测作为主要内容。

海-气通量可用铁塔、船舶、浮标、系留气艇、卫星等载体进行观测,而铁塔观测具有定点、连续、仪器稳定等优越性。目前世界上海洋观测塔多分布于中高纬度,而低纬度洋面上铁塔通量观测则很少。

我国位于东亚季风区,季风爆发早晚、强弱与活动异常对我国夏季旱涝灾害特别是华南和长江流域暴雨有着密切的关系。东亚夏季风最早在南海爆发,南海为季风发展提供了充足的水汽和热量。

20世纪90年代我国学者对南海夏季风的爆发活动进行了大量的研究,分别从不同角度如大气环流演变特征、区域加热演变特征、海温异常和降水量变化等方面揭示南海夏季风的爆发特征^[1~5]。1998年5月14日~6月22日,国家科技攀登项目南海季风试验(SCS MEX)在南海西沙永兴岛海区实施了海面铁塔通量观测,首次获得了较长时段定点、

* 本文得到国家科技攀登项目:南海季风试验(98季风-2-1)资助。

2001-05-09收到,2002-03-19收到修改稿。

连续的西沙海区的海面观测资料,它与在南海南部($61^{\circ}5' N, 110^{\circ} E$)“科学1号”和南海北部($20^{\circ}22' N, 116^{\circ}57' E$)“实验3号”科学考察船一起组成南海通量观测阵,为研究和认识南海季风爆发期间近海海面层物理过程,能量收支和湍流特征提供了可能。本文利用西沙永兴岛海上铁塔观测资料对海-气通量特征进行了估算分析。

1 观测塔、仪器和天气背景

西沙海-气通量观测塔位于西沙永兴岛西南部礁盘边缘($16^{\circ}50' N, 112^{\circ}20' E$)距岛约300 m,气象要素分布基本不受岛屿陆面影响。塔基平台潮位变化在海面以下0.5~1.5 m。塔体为三角形,高度18 m,仪器安装在长度为1.5 m的伸臂上,梯度观测分4层分别离海面2.4、8.1、16 m,使用的仪器是由长春气象仪器厂制造的铂电阻电动通风干湿表、风向风速仪、水温表,1998年3~5月在国家气象计量站检测标定。观测时间采样频率为每分钟1次。

观测从1998年5月14日至6月22日。这次试验期间主要经历了以下几种天气过程:

①5月14~16日,西南季风爆发前,南海地区受副热带高压控制,风向为SSE—S,平均云量2~3成。②5月17~22日,西南季风爆发初期,17日西沙地面风向由SE转为S—SW,天空云量陡增达8~10成,平均风速增大到4~8 m/s,且17、18、19日连续出现较强降水过程,标志着南海北部开始季风爆发。21~22日, $105^{\circ} E$ 附近越赤道气流进入南海,造成整个南海西南季风爆发,西沙再次降雨。③西南季风爆发后3次风速加强—减弱过程:5月27日~6月3日,6月4~14日和6月15~20日。这期间6月2日,6月8日和6月19日风速先后达到峰值,最大风速达10~15 m/s。但6月6日以后受西北太平洋副热带高压西伸影响,风速虽增大,但云量都在5~8成,降水较少。

南海西南季风爆发多年平均在5月第4候,1998年爆发日期属正常,季风发展强度偏弱。

2 计算方法

海表通量可用不同的方法求出。涡动相关法是最直接、准确的测量,但需要对传感器作仔细的订正,且价格昂贵不能普及常规观测。总体(Bulk)系数法是间接或半经验方法,由海气温、湿差及风来计算,不但能应用常规观测资料确定局地通量,也能估算天气或全球尺度的表面通量,其感热和潜热的计算公式为:

$$H_L = \rho C_d L (q_s - q_a) V \quad (1)$$

$$H_s = \rho C_d C_p (T_s - T_a) V \quad (2)$$

这里 ρ 为空气密度, $C_p = 1.0048 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为空气定压比热, T_s 和 T_a 分别为海面水温和气温, q_s 和 q_a 分别为海面空气比湿和对应于 T_s 的空气饱和比湿, V 为海面风速, C_d 为传输系数,受风速和海面空气稳定性影响,取值按文献[6]。近年来传输系数多用近地层气象学中基于相似理论的Businger-Dyer公式来计算,并进一步考虑粗糙度随风的变化,

且引入与一般粗糙度 Z_0 不同的温度和湿度粗糙度 Z_{0T} 和 Z_{0q} 。Fairall(1996a, 1996b) 提出了一个计算方法, 部分地考虑了近地层自由对流的影响, 并计入海面冷肤效应以解决实测海温常为海面下某一深度的温度而非海表温度的问题^[7-8]。最近 Zeng 等(1998) 又提出一个新的廓线公式, 即在 B D 公式中考虑自由对流对廓线的影响, 求出一个新的海面 Z_0 、 Z_{0T} 、 Z_{0q} 随摩擦速度变化的公式^[9]。通过海面上方某高度的风、温、湿和海表温度由下列公式迭代得到动量通量 $\tau = \rho u_*^2$, 感热通量 $H_s = -\rho C_p u_* \theta_s$ 和潜热通量 $H_L = -\rho L u_* q_s$, 其中 L 为蒸发潜热, u_* 、 θ_s 、 q_s 分别为摩擦速度, 特征温度和特征湿度。这一方法也可称为多层结廓线法, 有关公式如下:

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left| \ln \frac{\zeta_m L_r}{z_0} - \psi_m(\zeta_m) \right| + 1.14 \left[(-\zeta)^{1/3} - (-\zeta_m)^{1/3} \right], \quad \zeta < \zeta_m = -1.574 \quad (3)$$

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left| \ln \frac{z}{z_0} - \psi_m(\zeta) \right|, \quad \zeta_m < \zeta < 0 \quad (4)$$

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left| \ln \frac{z}{z_0} + 5 \zeta \right|, \quad 0 < \zeta < 1 \quad (5)$$

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left| \left(\ln \frac{L_r}{z_0} + 5 \right) + [5 \ln(\zeta) + \zeta - 1] \right|, \quad \zeta > 1 \quad (6)$$

$$\theta(z) - \theta_s = \Delta \theta = \frac{\theta_*}{K} \left| \ln \frac{\zeta_h L_r}{z_{0T}} - \psi_h(\zeta_h) \right| + 0.8 \left[(-\zeta_h)^{1/3} - (-\zeta)^{-1/3} \right], \quad \zeta < \zeta_m = -0.465 \quad (7)$$

$$\Delta \theta = \frac{\theta_*}{K} \left| \ln \frac{z}{z_0} - \psi_h(\zeta) \right|, \quad \zeta_h < \zeta < 0 \quad (8)$$

$$\Delta \theta = \frac{\theta_*}{K} \left| \ln \frac{z}{z_{0T}} + 5 \zeta \right|, \quad 0 < \zeta < 1 \quad (9)$$

$$\Delta \theta = \frac{\theta_*}{K} \left| \left(\ln \frac{L_r}{z_{0T}} + 5 \right) + [5 \ln(\zeta) + \zeta - 1] \right|, \quad \zeta > 1 \quad (10)$$

用 $\Delta q = q(z) - q_s$ 代替 $\Delta \theta$, z_{0q} 代替 z_{0T} 就可以得到与 $\theta(z)$ 类似的比湿 $q(z)$ 公式, 上述各式中 $\zeta = z/L_r$, 其中 $L_r = \theta_v u_*^2 / K g \theta_v$ 为计入水汽影响的 Monin-Obukhov 长度, θ_v 为虚位温, θ_v 为虚特征温度, K 为卡门常数, θ_s 为海面位温, 动量和热量的稳定度函数分别为

$$\psi_m = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

$$\text{和} \quad \psi_h = 2 \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \quad (12)$$

$$\text{其中} \quad x = (1 - 16 \zeta)^{1/4} \quad (13)$$

而粗糙度长度

$$z_0 = a_1 \frac{u_*^2}{g} + a_2 \frac{\nu}{u_*} \quad (14)$$

$$\ln \frac{z_0}{z_{0q}} = b_1 Re_*^{1/4} + b_2 \quad (15)$$

$$z_{0T} = z_{0q} \quad (16)$$

其中 $a_1 = 0.013$, $a_2 = 0.11$, $b_1 = 2.67$, $b_2 = -2.57$ 和粗糙度雷诺数 $Re_* = u_* z_0 / \nu$, 而 ν 为空气粘性系数。

本文用式(3) ~ (16)估算海-气通量并与式(1)和式(2)的计算结果进行相应的比较。

3 计算结果

表1是利用观测资料根据式(1) ~ (16)计算的试验期间不同时段的海面通量等有关物理量。从表中可以看出,总体系数法和多层结法廓线计算的潜热通量比较接近,一般总体系数法比多层结廓线法计算的潜热通量大 $1 \sim 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,感热通量小 $0.3 \sim 1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此,如果仅计算海面潜热和感热通量,考虑风速和海面空气稳定性影响的简单总体系数法可以获得相当满意的计算结果。

表1 1998年南海季风试验期间不同时段海面通量等物理量的估算值

方法	物理量	时段				
		5月14~16日	5月21~22日	5月27日~6月3日	6月4~14日	6月15~20日
总体系数法	$H_L (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	52.2	53.6	60.9	58.2	68.9
	$H_S (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	-7.1	-3.3	-3.0	0.2	0.3
多层结廓线法	$\overline{q} (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	0.0622	0.0629	0.0586	0.0868	0.1216
	$H_L (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	50.3	51.3	58.1	56.8	68.1
	$H_S (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	-6.8	-2.8	-3.0	1.2	1.5
	$u_* (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.23	0.23	0.21	0.27	0.33
	$\theta_* (\text{°C})$	0.026	0.009	0.009	-0.003	-0.003
	$q_* (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.080	-0.081	-0.114	-0.075	-0.074
海面上4m处实测风速 $U (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		6.2	6.10	5.4	7.0	8.2

从表1中还可以看到,一般而言季风爆发期间,海面向大气输送潜热并逐渐增加;感热通量在季风爆发前后变化趋势非常明显,季风爆发前海面向大气输送感热,爆发后逐渐减少,最后由于副高西伸的影响,云量和降水减少,太阳辐射加强,大气向海面输送感热。

动量通量和摩擦速度随风速增加,特征温度的符号与海气温差符号相同,特征湿度与海面风速有密切的关系,风速越小,负值越大。

图1表示季风试验期间不同时段海面潜热通量平均日变化情形。从图中可以看到,虽然季风爆发前

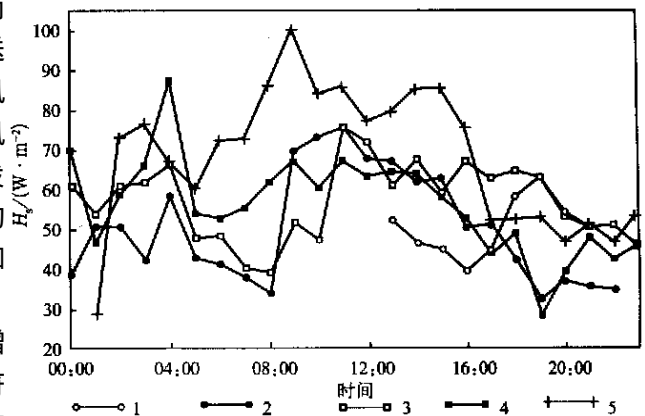


图1 南海季风试验期间不同时段海面潜热通量平均日变化曲线
(1:5月14~16日,2:5月21~22日,3:5月27日~6月3日,4:6月4~14日,5:6月15~20日)

观测次数较少,但还是可以看到,夜间海面潜热通量比季风爆发后大,这是由于季风爆发前夜间海温与气温之差较大的缘故。季风爆发后期,白天海面潜热通量明显大于爆发初期和中期。

感热通量值较小,其日变化情形省略。

上述结果与1998年南海季风试验中“科学1号”和“实验3号”考察船强化观测期间(5月5~25日和6月5~20日)观测资料计算的结果比较^[10]表明,感热通量在季风爆发前后变化更为明显,且其值偏小 $5\sim 8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,潜热通量比“科学1号”考察船资料计算的整个观测期间的平均值 $84.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (其中,5月5~14日在 $120\sim 240\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)低 $15\sim 20\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,但与“实验3号”考察船资料计算的结果较为接近。

4 结论与讨论

(1) 总体系数法和多层结通量廓线法估算的海-气潜热通量,感热通量基本一致,总体系数法估计的潜热通量略大 $1\sim 3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,感热通量小 $0\sim 1.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2) 季风爆发期间潜热输送逐渐增加,季风爆发前期夜间潜热通量比季风爆发后大,季风爆发后期,白天潜热通量明显大于爆发初期和中期。

(3) 感热通量季风爆发前海面向大气输送,爆发后期大气向海面输送。

(4) 动量通量和摩擦速度随风速增加。

由于试验观测日期集中在5月16日~6月20日,季风爆发前资料时段短,代表性较差;观测期间因仪器和天气原因,资料缺测多,因此上述结论仅是初步的。

参 考 文 献

- 1 江宁波,罗会邦.南海夏季风爆发前后亚洲地区大尺度环流突变.热带气象学报,1995,11:289~296.
- 2 简茂球,乔云亭,罗会邦.南海夏季风爆发前后低纬大气环流突变特征.气候与环境研究,2000,5(4):356~362.
- 3 王世玉,钱永甫.1998年南海夏季风爆发前后区域加热的基本特征.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 罗会邦.南海夏季风爆发及相关雨带演变特征.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,1999.25~29.
- 6 马开玉,陈星,张跃存.气候诊断.北京:气象出版社,1996.
- 7 Fairall C W, Bradley M E F, Rogers D P, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment. *J. Geophys. Res.*, 1996a, **101**(c2): 3747~3764.
- 8 Fairall C W, Godfrey J S, Wick G A, et al. Coolskin and warm-layer effects on sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 1996b, **101**(c1): 1295~1308.
- 9 Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms TOGA COARE and TAO data. *Journal of Climate*, 1998, **11**: 2628~2644.
- 10 曲绍厚,胡非,李亚秋.SCS MEX期间南海夏季风海气交换的主要特征.气候与环境研究,2000,5(4):441~444.

ESTIMATE OF AIR-SEA FLUXES DURING SOUTH CHINA SEA MONSOON EXPERIMENT IN 1998

Yao Huadong

(*National Climate Center, Beijing 100081*)

Ren Xuejuan Ma Kaiyu

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract

Based on the data of the South China Monsoon Experiment in 1998, the air-sea fluxes are estimated by using the bulk coefficient and multi-stratification formulas. The results of latent and the sensible heat fluxes by two methods are basically close. The latent heat flux is $1 - 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ larger and the sensible heat flux $0 - 1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ smaller by the multi-stratification method than by the bulk coefficient method. Generally the latent heat flux increases gradually during the monsoon onset. The flux at night is larger before the monsoon onset than after. During the days, the flux is smaller in the beginning and middle of the monsoon onset period than the latter period. The sensible heat flux transports from the sea surface to atmosphere in the beginning of the monsoon onset and from the atmosphere to sea surface in the latter period of the monsoon onset. The momentum flux and friction velocity increase with speed.

Key words: Xisha Tower observation Air-sea fluxes South China sea Monsoon onset