

# COARE 算法估算海气界面热通量的个例对比分析

杨清华<sup>1</sup>, 张蕴斐<sup>1</sup>, 孙兰涛<sup>2</sup>, 吴辉碇<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京, 100081; 2. 北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871)

**摘 要:** 本文先对 NCEP 分析风、QSCAT/NCEP 混合风、MM5 中尺度模式分析风场进行了比对分析, 发现具有高分辨率的 QSCAT/NCEP 混合风资料给出的高风速数值较好, 但给出的高风速开始时间相对较早; NCEP 分析风资料给出的高风速数值明显偏小; MM5 分析风场较为可信, 只不过模拟的高风速数值还是相对偏小。使用 COARE 算法(版本 3.0)计算了四种资料情况下的渤、黄海海域一次冷空气大风过程的海表面湍流热通量, 并与 MM5 诊断分析结果进行了对比分析。结果发现相同资料情况下, MM5 结果跟 COARE 算法所算海气热通量(包括感热和潜热)在区域分布和时间变化规律上均较为一致, 中、低风速情况下, 结果比较接近; 但是高风速情况下两者差异显著。

**关键词:** COARE 算法; MM5; 感热通量; 潜热通量; 海-气界面

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2005) 4 - 0001 - 13

## 1 引言

海-气界面通量交换是海气相互作用的重要环节。海洋和大气间相互影响, 相互作用的进程最初都是由海-气界面通量交换来实现的, 一方面, 海洋作为大气的下垫面, 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动量通量, 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。海气界面的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-气界面通量的确定在海气相互作用研究方面具有非常重要的意义, 受到了海洋界和气象界的普遍重视。

鉴于海-气界面通量确定在海气相互作用研究领域的重要性, 如何合理、准确地计算海-气界面通量就显得尤其重要。海洋表面潜热、感热和动量通量的确定一般用两种方法: 涡动相关法和块体空气动力学方法。涡动相关法是根据通量的定义直接测量气象要素的湍流脉动量, 计算其二阶矩而得出, 故此法主要在野外观测实验时采用。块体空

收稿日期: 2005-07-07

基金资助: 本文承国家自然科学基金项(40376006, 40233032, 49049000)和重点科技攻关项目(2001BA603B-03)资助

作者简介: 杨清华(1983-), 男, 主要从事极地和海气边界层研究。

气动力学方法是建立在相似理论上,通过对气象状态变量(如海表温度,表面气温,比湿和风速等)的均值进行计算即可求得湍流通量,从而成为气候研究和数值模拟的当然之选<sup>[1-3]</sup>。

但是很多对比研究发现,现在常用的湍流通量产品存在较大的误差,这是由使用的算法误差和状态变量本身造成的。Fairall 等(2003)对 Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE) 算法已有版本作了进一步的评估和改进,公布了其最新版本 3.0,使其应用范围从低纬扩展至中高纬,风速范围也从 12m/s 扩至 20m/s,其误差分别在 5% (0~10m/s) 和 10% (10~20m/s) 之内<sup>[4]</sup>。M. A. Brunke 等(2003)使用热带和中纬(5°S~60°N)海域中进行的 12 个航次的直接湍流通量观测结果对国际上经常使用的 12 个块体算法进行了评估,结果发现 COARE 3.0 是最可靠的算法之一<sup>[5]</sup>。

赵鸣等<sup>[6]</sup>利用 TOGA-COARE 资料详细分析了潜热通量对海温的敏感性,指出风占有主要作用。但是现在大家使用较多的模式风资料(如 NCEP 分析资料等)大都与实际存在一定的偏差;同时块体通量算法把相对于海面流速的风速( $U_r = \kappa U_{air} - U_s \kappa$ )作为一状态变量,而实际计算中往往假设  $U_s$  为零,这个假设在强表面流海域会导致明显的误差。发射于 1999 年 7 月的 QuikSCAT 系列卫星上的 SeaWinds 散射计提供的正是块体算法所需要的相对风速资料。

国家海洋环境预报中心以中尺度 MM5 模式为基本框架与大尺度模式嵌套,发展了中国海域和西北太平洋海面风场预报,并作为与该海域海洋模式耦合的大气模式,提供海洋模式的大气强迫。为了检验所采用的 MM5 的通量计算结果,并进一步提出海气耦合模式界面通量参数化和参数选取的依据,本文首先对 QSCAT/NCEP 混合风资料、NCEP 全球分析风资料和 MM5 模式输出的风资料进行了比对分析;然后使用 COARE 3.0 算法,利用上述不同资料(特别是风资料),计算渤海海域(35°~42°N, 116°~128°E)一次冷空气过程(2002 年 2 月 20 日~2002 年 3 月 4 日)的湍流热通量,并与预报中心所采用的 MM5 模式通量输出结果进行了对比分析,以评估进一步与海洋模式耦合的问题。

## 2 方法

### 2.1 COARE 算法

本文采用 COARE 算法<sup>[4, 8, 9]</sup>作为检验预报中心大气和海洋模式耦合所采用的通量计算方法。1992 年 11 月~1993 年 2 月在西太平洋暖池进行了四个月的热带海洋与全球大气研究计划“耦合海气响应试验”(TOGA—COARE), COARE 算法也正是为此计划而发展起来的。该算法在国内外已广泛应用,并不断发展和改进,到 2003 年,发展为 3.0 版本,经过一系列改进,使算法适用的区域扩展至中高纬,风速限制也由原来的 12m/s 扩至 20m/s<sup>[4]</sup>。

该算法采用块体方法,以 Monion-Obukhov (MO) 相似理论为基础,应用变量平均值估算海气通量:

$$\overline{w'x'} = c_x^{1/2} c_d^{1/2} S \Delta X = C_x S \Delta X$$

式中,  $x$  代表  $u, v$  风速分量, 位温  $\theta$ , 水汽混合比  $q$ , 或者其他一些大气示踪成分;  $c_x$  为变量的块体输运系数;  $c_d$  为风速拖曳系数;  $C_x$  为总的输运系数;  $\Delta X$  是变量  $x$  平均值在海气界面的差;  $S$  为平均风速 (相对海洋表面), 包括阵风 ( $U_g$ ) 在内, 即:

$$\Delta X = X_s - X(z); \quad S = (U^2 + V^2 + U_g^2)^{1/2}$$

输运系数同表面稳定度的依赖关系为:

$$c_x^{1/2}(\zeta) = \frac{C_{xn}^{1/2}}{[1 - \frac{C_{xn}^{1/2}}{\kappa} \psi_x(\zeta)]}; \quad C_{xn}^{1/2} = \frac{\kappa}{\ln(z/z_{0x})}$$

式中下标  $n$  表示中性 ( $\zeta=0$ ) 稳定度;  $z$  为变量  $x(z)$  的测量高度;  $\kappa$  为 Von Karmon 常数;  $z_{0x}$  为变量  $x$  的粗糙度长度;  $\zeta$  为 MO 稳定度参数, 表示为:

$$\zeta = -\frac{\kappa g z}{T} \frac{(\overline{w'\theta'} + 0.61 T \overline{w'q'})}{(-\overline{w'u'})^{3/2}}$$

式中  $T$  为温度,  $g$  为重力加速度。  $u_* = \sqrt{-\overline{w'u'}}$ ,  $\theta_* = -\overline{w'\theta'}/u_*$ ,  $q_* = -\overline{w'q'}/u_*$  分别称为摩擦速度, 摩擦温度和摩擦湿度。

$\psi_x$  为稳定度订正函数, 由 Businger-Dyer 形式给出<sup>[10]</sup>:

不稳定条件下:

$$\psi_x(\zeta) = \ln\left[\left(\frac{1+m}{2}\right)^2 \left(\frac{1+m^2}{2}\right)\right] - 2 \arctan(m) + \frac{\pi}{2}$$

其中  $m = (1 - 16\zeta)^{1/4}$ , 稳定条件下,  $\psi_x(\zeta) = -5\zeta$

风速速度粗糙度长度  $z_0$  等于光滑流部分的海面粗糙度加上粗糙流部分的海面粗糙度之和文献 [7], COARE 3.0 给出了三种方案<sup>[4]</sup>。因为没有相应的波浪资料, 本文计算过程中选用的动量粗糙度长度方案为 Yelland 等 (1996) 方案, 该方案在不考虑波浪时结果可信<sup>[7]</sup>; 同样因为资料缺乏, 计算过程中没有考虑降水导致的热通量; 另外还假定所用模式 SST 资料即为真实海表皮温资料, 计算过程中没有考虑表面的冷皮温层和接近表面暖层的作用。

## 2.2 MM5 通量计算方案

MM5 通量结果取决于模式中边界层模块的选取。本文用以检验的 MM5 通量结果, 计算方案选用 MRF 方案<sup>[11]</sup>, 该方案基于 Troen-Mahrt 给出的充分混合 PBL 反梯度项和 K 廓线理论<sup>[12]</sup>; 其参数化方案中感热的计算公式为:

$$H_s = -C_{pm} \rho_a k u_* T_s$$

式中摩擦温度  $T_s = \frac{\theta_a - \theta_g}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_h}$ , 热容量  $C_{pm} = C_p(1 + 0.8Q_x)$ ,  $C_p$  为  $1004 J/(KgK)$ ,  $Q_x$  为模式最下

层的湿度; 感热通量取  $-250 W/m^2$  和计算得到的  $H_s$  结果的最大值。潜热计算采用下式:

$$E_s = M\rho_a I^{-1}(q_{vs}(T_g) - q_{va})$$

式中  $I^{-1} = ku_s [\ln(\frac{ku_s z_a}{z_1} + \frac{Z_a}{Z_1})\psi_h]^{-1}$ , 其中  $z_1 = z_0$  (水面情况),  $K_a = 2.4 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$  为背景分子扩散率,  $M$  为湿度利用率参数。潜热通量取 0 和计算所得的潜热通量的最大值。海面粗糙度为摩擦速度的函数, 即:

$$z_0 = 0.032 \frac{u_*^2}{g} + Z$$

$Z$  为背景值  $10^{-4} m$  [13]。

### 3 资料

使用 COARE 算法计算热通量需要四个基本变量: 10m 风速、2m 气温、2m 比湿和表面温度, 研究海域范围选取 ( $35^\circ \sim 42^\circ N$ ,  $116^\circ \sim 128^\circ E$ ), 时间为 2002 年 2 月 20 日~2002 年 3 月 4 日。所用资料如下:

#### 3.1 NCEP 全球对流层分析资料

该资料是由 NCEP(美国环境预报中心) 提供的全球覆盖, 时间间隔为 6h, 空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$  的资料。垂直方向有表面层和  $26\sigma$  层 (从 1000mb~10mb)。本文使用的是其中的 10m 风速、2m 气温、2m 比湿以及表面温度资料, 计算过程中对其线性插值成  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

#### 3.2 QSCAT/NCEP 混合风资料

该资料是由 QSCAT-DIRTH 辐射计观测资料同 NCEP 分析资料在时间和空间混合所得到的全球 6h 一次的海表面风场。QSCAT 风速资料空间高分辨, 但是数据不完整, 时间上时有时无。卫星每扫描一次得到 101 分钟, 覆盖 1 800 km 宽, 空间分辨率达 25km 的轨道数据。QSCAT 合成的准全球风场时间分辨率是 12h, 相对较低。NCEP 风场是全球覆盖, 但是相对低分辨。每 6h 一次 T62 高斯网格 ( $1.8^\circ$ ) 全球场, 实际空间分辨率比 T62 还要粗。以 NCEP 分析资料时间为基准, 将 6h 一次的 NCEP 分析风场同 QSCAT 12h 合成风场混合成混合风资料。QSCAT/NCEP 混合风资料即以 QSCAT 卫星反演风资料为基础, 在卫星资料空白区 (如相邻的轨道之间) 补充以带有月平均高波数 QSCAT 信息的低波数 NCEP 分析场数据, 从而使该资料同时具备了高空间和时间分辨率 ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ )。

#### 3.3 MM5 诊断分析结果

利用 GTS 实测资料,以 NCEP 资料作为背景场初始化所得初始场,进行诊断分析所得结果,包括 10m 风速、2m 气温、2m 比湿以及感热、潜热通量。

3.4 另外还有渤海湾平台 (38.5°N, 118.5°E) 所观测的 10m 风资料。

## 4 结果分析

### 4.1 风资料的比对分析

(1) 首先对比 2002 年 2 月 20 日~2002 年 3 月 10 日三种风资料,本文采用的 MM5 风资料即为当时国家海洋环境预报中心的客观分析结果。并结合当时的天气图,进行详细的比对分析。

以 2002 年 3 月 1 日 00、06、12、18 四个时刻风场为例(图略),三种风资料都清楚地反映了一股东北路冷空气从 3 月 1 日凌晨起开始南侵影响渤海北部,然后不断向南、向东推进发展,影响范围不断加大,风力逐渐增强并在 3 月 1 日 18 时达到风力极大值的过程。NCEP 分析风场变化相对比较平稳,从北向南推进;MM5 风场则是区域西部即陆地部分变化较为平稳,东部海上部分变化则很迅速。3 月 1 日 00 时刻 NCEP 分析风场和 MM5 风场在 39°N 附近,区域西部都有一明显的辐合带:其北侧是东北路冷空气,吹东北风;南侧则是一股弱的南风气流。随着冷空气的不断南下,辐合带位置不断南移。不同的是,MM5 风场在中午 12 时辐合带就已到达该海域最南端,而中午 12 时,NCEP 分析风场的辐合带仍位于 37°N,直到下午才移出该海域。从风速的等值线分布可以看到,辐合带北侧风速极大值逐渐增大,最后均达到 14m/s 以上,同时也应该注意到 MM5 风场比 NCEP 分析风场风速数值要大。QSCAT/NCEP 混合风场风向变化相对较快,从 3 月 1 日凌晨起,冷空气即已经控制了整個渤海海域,整个渤海吹东北风,并且有 16m/s 的风速极大值区;东部海域则是从 3 月 1 日上午才开始显著增强。至于辐合带位置明显偏南,在 3 月 1 日 00 时位于区域最南端 35°N 附近,随即很快移出该海域。

结合当时实际天气过程,可以发现 MM5 风场的风向变化与连续的海面气压场形势演变相当一致。NCEP 分析风场时间变化相对滞后,而 QSCAT/NCEP 混合风场大风时间相对超前;极大值分布方面,QSCAT/NCEP 混合风数值最大,MM5 模拟风场次之,NCEP 分析风场最小。

#### (2) 单点风速时间变化序列图的比较

为了进一步检验上述资料,本文采用渤海湾平台(38.5°N, 118.5°E)海上实测风速与其对比,上述三种资料由格点插值到该平台位置,所得该点各种风速随时间变化列于图 1。时间取 2 月 20 日~3 月 4 日,NCEP、QSCAT/NCEP 混合风时间间隔为 6h,MM5 和实测风资料间隔为 1h。比较分析如下:

由图 1 可以看到 3 种风资料都清楚地表现出该期间发生的一次大风过程,且风速极大值对应时间都比较吻合。

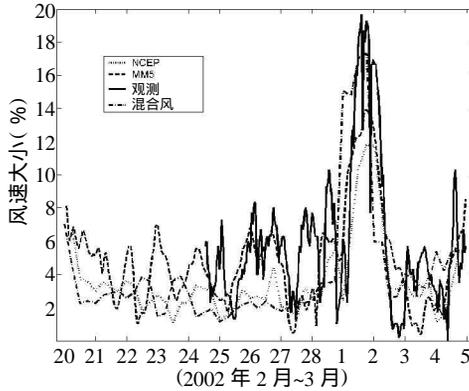


图 1 渤海湾平台(38.5°N, 118.5°E)观测值及各种风资料插值结果随时间变化

QSCAT/NCEP 混合风给出的风速高值接近 18m/s, 同实测的最高风速 20m/s 最为接近。但是高风速开始时间偏早, 同时给出的中等风速数值相对偏低。可能原因是 QSCAT 测风计观测给出的是相对风速数值, 而我们用来与之对比的是绝对风速, 中间可能会存在一定的差别。同时还应该考虑到 QSCAT/SeaWinds 系列风资料反演的是大洋表面风场, 而我们用来比较的是大陆近海, 风速受大陆影响很大。以后对大洋中的 QSCAT/NCEP 混合风资料进一步进行比较, 将会对该资料以更好的评估。

NCEP 分析风资料的风速变化趋势同观测资料相关性较好, 但数值偏小, 尤其是对于强风期。

利用 GTS 资料所作的 MM5 分析风场与实际最为接近, 既有比较好的相关性, 同时在大部分时间里风速数值较为接近。不足的是强风期结果还是偏小(仅为 14.5m/s)。

#### 4.2 湍流热通量的比较

使用 COARE 3.0 算法分别计算了四种资料下的热通量分布(分别称这四个试验为“COARE 1”、“COARE 2”、“COARE 3”、“COARE 4”, “MM5”为由 MM5 中尺度模式得到的通量结果, 时间范围为 2002 年 2 月 20 日~3 月 4 日)。表 1 给出通量计算的方案和所采用的变量资料。

表 1 通量计算的方案和所用变量资料

试验	10m 风速 (U10)	2m 气温 (Tair2)	2m 比湿 (Qair2)	表面温度 (SST)
COARE1	NCEP	NCEP	NCEP	NCEP
COARE2	Blended Winds	NCEP	NCEP	NCEP
COARE3	MM5	NCEP	NCEP	NCEP
COARE4	MM5	MM5	MM5	NCEP
MM5	MM5	MM5	MM5	NCEP

### 4.2.1 渤海热通量分布

下面进一步利用上述不同资料采用 COARE 算法 4 种试验所得的渤海热通量分布进行对比分析,并检验 MM5 模式的通量输出结果,本文选取 2002 年 3 月 1 日 18 时(世界时)为例,当时渤海海域的风速达到了最大。

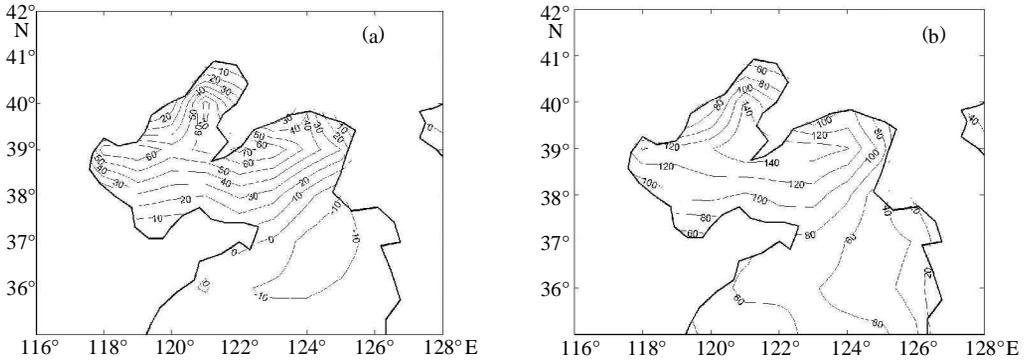


图2 渤海海 2002 年 3 月 1 日 18 时(世界时) COARE 1 热通量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) 分布:(a) 潜热,(b) 感热

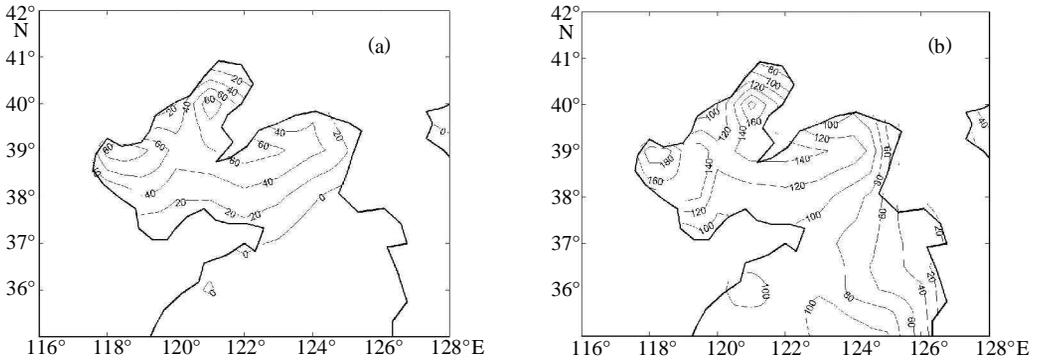


图3 COARE 2 热通量分布(说明同图2)

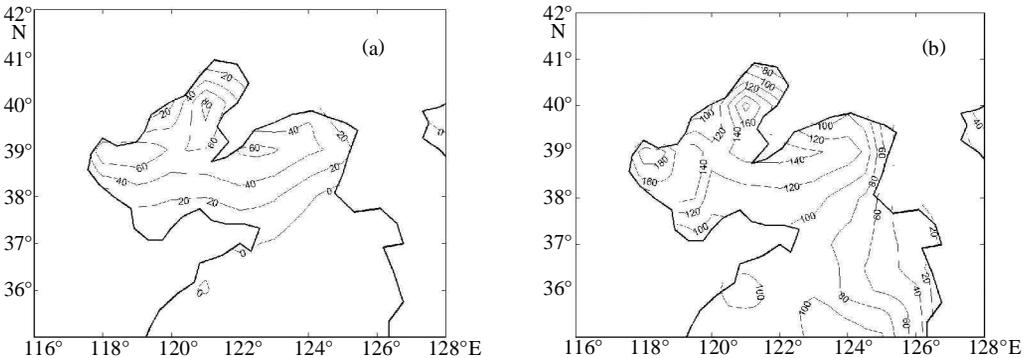


图4 COARE 3 热通量分布(说明同图2)

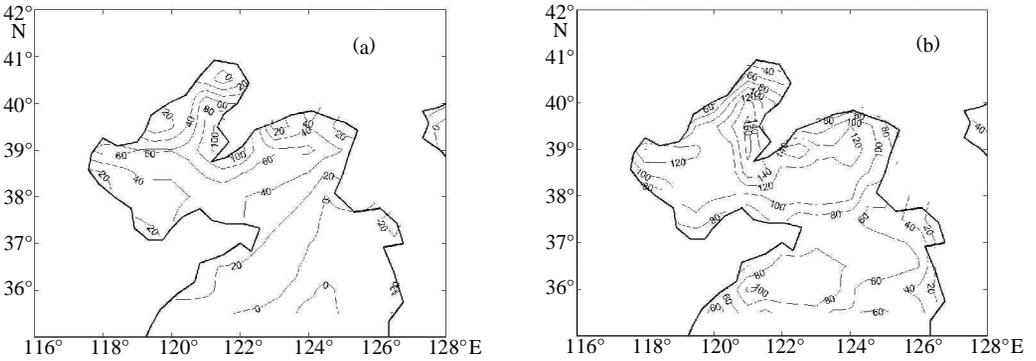


图5 COARE 4 热通量分布(说明同图2)

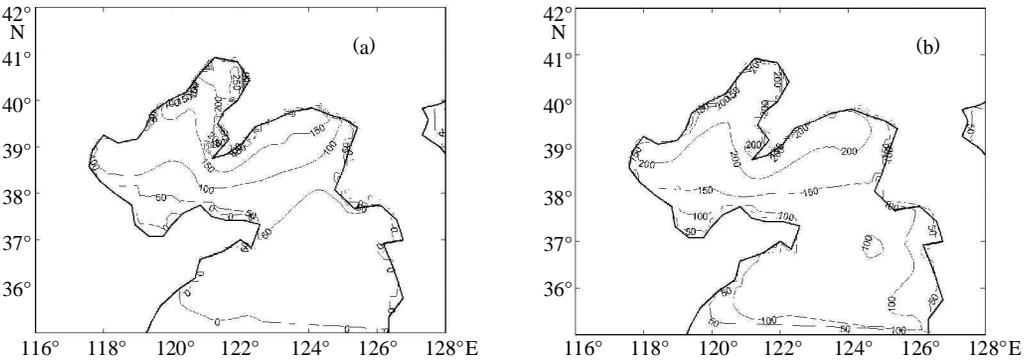


图6 MM5 热通量分布(说明同图2)

### (1) 感热通量

受冷空气带来的大风过程影响,在渤海湾海域出现了一正的极大值,如图 2a~4a 所显示。黄海南部海域数值相对较小。甚至全部采用 NCEP 资料 COARE 1 试验(见图 2a)出现负值,即感热由大气向海洋输送。

COARE 1(见图 2a)、COARE 2(见图 3a)和 COARE 3(见图 4a)感热通量分布基本一致,特别是 COARE 2 和 COARE 3 的结果更一致。图 5a 表示 COARE 4 试验和 COARE 3 所采用风速资料虽相同,但 2m 气温来源于不同资料,所得到的感热通量仍存在一定差异,其最大值分别为  $100\text{w/m}^2$  和  $80\text{w/m}^2$ 。这说明 COARE 算法感热计算中,风速仍起重要作用,但对海上气温资料来源也很敏感。上述不同资料来源,利用 COARE 算法所得渤海感热通量分布和 MM5 模式输出的通量(见图 6a)比较,显示 MM5 模式输出的通量基本合理,反映了这期间渤海通量分布的特点。但 COARE 4(见图 5a)和 MM5(见图 6a)的感热强值区的分布差异非常明显,COARE 4 极大值为  $100\text{w/m}^2$ ,MM5 则超过  $200\text{w/m}^2$ ;渤海上述两者相差普遍较大。

### (2) 潜热通量

潜热通量分布和感热通量类似,整个渤海海域潜热通量比南黄海海域明显偏高,且在辽东湾东南部海域达到极大。

COARE 1、COARE 2 和 COARE 3 使用不同的风速资料, 相同的气温、比湿、SST 资料。由图 2b~4b 可以看到, 三者的潜热等值线分布大体一致, 但潜热的极值分布区域和数值都有所不同。这些差异与风资料 (分别是 NCEP、混合风、MM5) 的差异有密切关系, 说明在 COARE 算法潜热通量计算中, 风仍起着重要作用。COARE 3 和 COARE 4 是由相同的 MM5 风速、NCEP 的 SST 资料, 但是不同的气温、比湿资料所得的通量结果, 图 4b 和图 5b 显示虽然两者的极值皆超过  $160\text{w/m}^2$ , 但在具体分布上差异比较明显, 这就指出了 COARE 算法潜热通量计算中, 除风起着重要作用外, 对海上大气温、湿资料来源也很敏感。COARE 4 (见图 5b) 和 MM5 (见图 6b) 是由相同的资料、不同的算法得到的通量结果。可以发现 MM5 结果比 COARE 算法计算所得潜热通量普遍偏大  $10\sim 50\text{w/m}^2$ 。与感热通量类似, 当高风速时, MM5 潜热结果比 COARE 算法计算潜热明显偏大。说明即使对于同样的变量资料, 不同参数化方案的结果仍存在明显的差异, MM5 模式的通量输出还有待进一步检验。

#### 4.2.2 区域单点湍流热通量的时间变化

为了进一步对比 MM5 和 COARE 热通量结果, 选取计算域 4 个特征点, 比较它们随时间变化, 该 4 个特征点位置列于表 2。图 7~10 分别为上述 4 点 4 种试验的结果和 MM5 输出的通量随时间变化以及试验结果和 MM5 输出通量差随时间的变化。通过对比明显看到, MM5 模式输出通量与试验结果基本一致, 但强风期间差异显著。表 3 和表 4 分别给出了这段时间大风之前 (2月 20~28 日) 以及大风期间 (3月 1~4 日) MM5 潜热和感热通量相对于 COARE 算法各次试验的均方根差分布。

表 2 计算域检验单点位置

点列	经纬度位置	所在海域
点 1	(38.5°N, 118.5°E)	渤海湾西部平台
点 2	(38.5°N, 120.0°E)	渤海
点 3	(38.5°N, 123.0°E)	黄海北部
点 4	(36.0°N, 123.0°E)	黄海南部

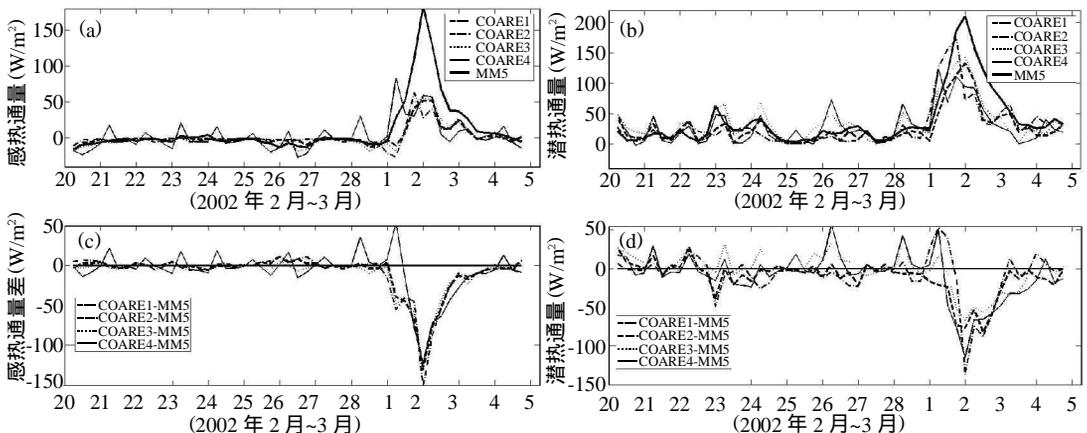


图 7 点 1 热通量随时间变化, (a) 感热通量 ( $\text{w/m}^2$ )、(b) 潜热 ( $\text{w/m}^2$ )、(c) 感热通量差 ( $\text{w/m}^2$ )、(d) 潜热通量差 ( $\text{w/m}^2$ )

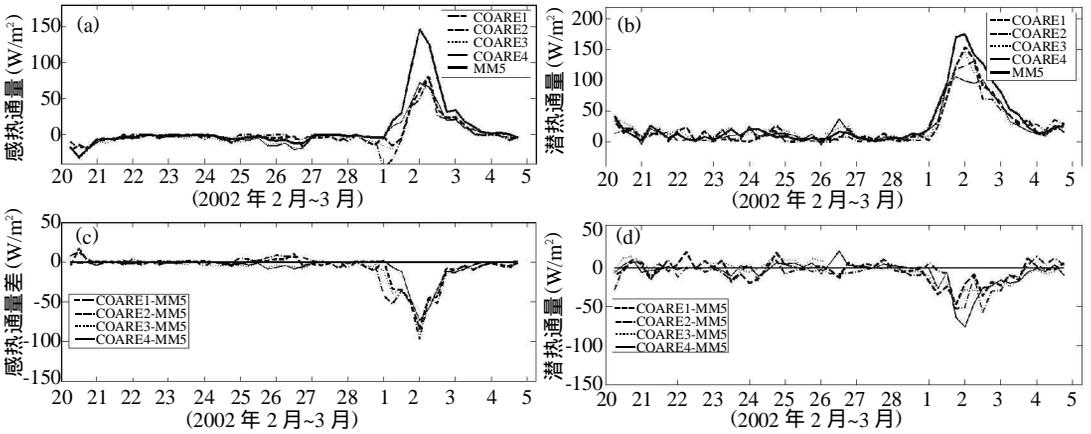


图 8 点 2 热通量随时间变化 (说明同图 7)

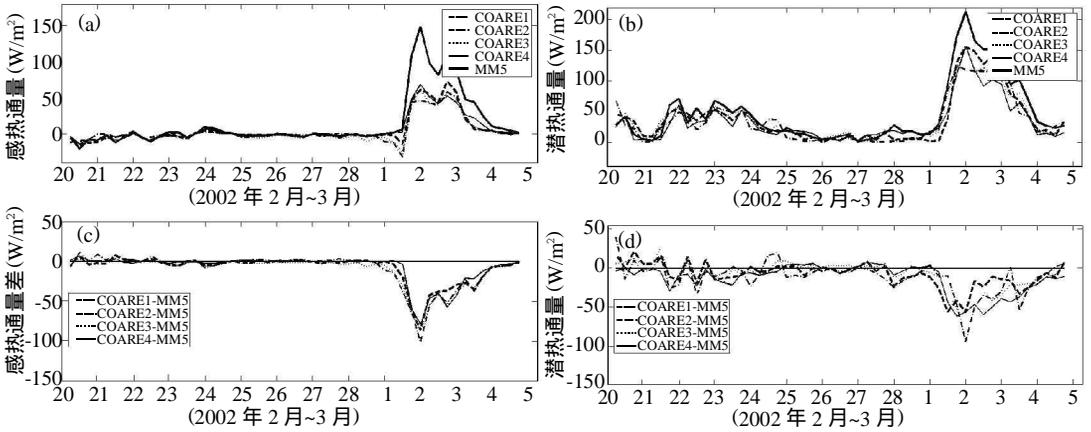


图 9 点 3 热通量随时间变化 (说明同图 7)

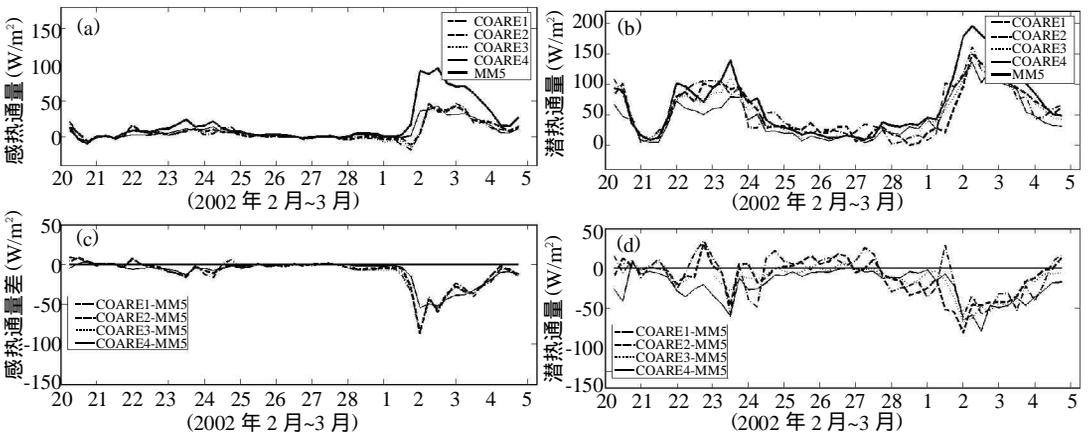


图 10 点 4 热通量随时间变化 (说明同图 7)

### (1) 感热通量

各点 MM5 结果同 COARE 算法各试验所得通量随时间变化曲线比较相似,尤其是在中、低风速情况下(见图 7a~10a);高风速情况下,变化趋势和出现峰值的时间也都比较吻合,但极大值存在较大偏差,极值差均达到或超过  $50\text{w/m}^2$ (见图 7c~10c)。

COARE 4 与 MM5 使用相同的资料计算通量,MM5 感热通量同 COARE 4 结果最为接近 2 月 10~28 日点 2、点 3、点 4 的均方根差分别为  $3.0\text{w/m}^2$ 、 $1.6\text{w/m}^2$ 、 $4.1\text{w/m}^2$ (见表 3),3 月 1~4 日分别为  $28.2\text{w/m}^2$ 、 $35.3\text{w/m}^2$ 、 $31.4\text{w/m}^2$ (见表 4),均为各试验最小,这也很好地说明了在低风速情况下,MM5 同 COARE 算法计算感热通量偏差较小,随着风速的加大,两者的偏差不断增大。4 个区域中,代表近岸海域的点 1 偏差较大(见图 1a、1c),强风期间的均方根差达到了  $48.2\text{w/m}^2$ ,这可能是由于两者近岸资料处理存在差异。

### (2) 潜热通量

潜热通量也是在风速较小时,MM5 结果同 COARE 算法各试验相差较小;但当高风速时,通量相差很大,图 7b、d~图 10b、d 以及表 3、4 明显地显示出。

表 3 感热通量均方根差 ( $\text{W/m}^2$ )

点列	时间	COARE1	COARE2	COARE3	COARE4
点 1	2 月 20 日~2 月 28 日	3.5	4.5	3.5	10.5
	3 月 1 日~3 月 4 日	47.0	51.8	45.3	48.2
点 2	2 月 20 日~2 月 28 日	4.6	4.2	4.0	3.0
	3 月 1 日~3 月 4 日	31.9	38.1	33.9	28.2
点 3	2 月 20 日~2 月 28 日	2.8	3.8	2.9	1.6
	3 月 1 日~3 月 4 日	35.0	41.2	39.1	35.3
点 4	2 月 20 日~2 月 28 日	5.4	6.1	5.5	4.1
	3 月 1 日~3 月 4 日	34.7	35.6	35.9	31.4

表 4 潜热通量均方根差 ( $\text{W/m}^2$ )

点列	时间	COARE1	COARE2	COARE3	COARE4
点 1	2 月 20 日~2 月 28 日	12.1	13.7	14.3	16.6
	3 月 1 日~3 月 4 日	41.4	51.5	34.5	51.4
点 2	2 月 20 日~2 月 28 日	9.0	8.6	7.0	5.7
	3 月 1 日~3 月 4 日	21.7	26.6	22.0	30.8
点 3	2 月 20 日~2 月 28 日	10.6	14.8	8.2	9.7
	3 月 1 日~3 月 4 日	28.3	36.8	31.4	38.6
点 4	2 月 20 日~2 月 28 日	15.3	20.3	10.7	20.9
	3 月 1 日~3 月 4 日	39.5	37.2	36.9	42.0

对于渤海中部和黄海北部海域,MM5 潜热输出通量和 COARE 4 试验结果相当一致,均方根差分别为  $5.7\text{w/m}^2$  和  $9.7\text{w/m}^2$ ,但强风速期差异偏大。而总体来讲,MM5 输出潜热通量同 COARE 3 结果最为接近,2 月 10~2 月 28 日点 2、点 3、点 4 的均方根差分别为  $7.0\text{w/m}^2$ 、 $8.2\text{w/m}^2$ 、 $10.7\text{w/m}^2$ (见表 4) 3 月 1~4 日分别为  $22.0\text{w/m}^2$ 、 $31.4\text{w/m}^2$ 、 $36.9\text{w/m}^2$ (见表 4)。相对 COARE 1、COARE 2 来说,COARE 3 采用的是 MM5 分析风资料,这说明了 COARE 算法潜热计算中,风起着重要作用。另一方面,COARE 3 和 COARE 4 存在明显差别,说明潜热计算对大气温、湿也比较敏感。值得注意的是,对于点 1 和点 4

以及强风期间 MM5 潜热通量同 COARE 4 偏差较大,这与感热通量结果明显不同,表明即使给定相同的变量资料,由于 MM5 和 COARE 算法潜热通量参数化方案的不同也会导致较大的偏差。高风速时 MM5 和 COARE 算法各试验潜热通量均方根差总体上为 20~40,与感热通量均方根差基本相当。由于感热通量数值明显小于潜热通量,特别是强风时期,这说明 MM5 给出的强风时期的感热通量相对偏差明显高于 MM5 潜热通量,MM5 过高地估计了强风时期的感热通量。这都表明 MM5 通量计算方案有待进一步改进,特别是强风情况下的计算方案。

## 5 小结

为了检验 MM5 模式输出的热通量,本文采用 COARE 算法和不同来源资料,选取 2002 年 2 月 20 日~3 月 4 日后期冷空气侵袭渤海的一次天气过程,计算渤海海域感热和潜热通量,并进行对比分析。

(1) 本文首先对比分析不同资料来源风场资料,结果显示 NCEP 分析风资料给出的高风速数值明显偏小;利用 GTS 实测资料初始化后的 MM5 分析风场较为可信,但高风速数值还是相对偏小;QSCAT/NCEP 混合风资料虽然给出了较好的高风速数值,但强风出现时间和中风速数值还存在较大偏差。

(2) 对比试验指出,COARE 算法计算的感热通量和潜热通量结果,风资料起着重要作用,同时对海上大气温、湿也具有不同程度的敏感。

(3) 试验显示 MM5 海气界面通量计算方案是基本合理。对于相同资料来源,与 COARE 算法所得渤海感热和潜热通量在空间分布和时间变化均较为一致,给出的低、中风速情况下的通量数值也比较接近。但是在强风情况下,试验显示 MM5 输出结果和 COARE 计算结果差别显著。说明目前国家海洋环境预报中心所发展的海上大气模式的风分析场和输出的海气界面热通量基本上是合理的,但对于强风速情况还有待进一步改进。

### 参考文献:

- [1] 蒋国荣,何金海,吴咏明,等. 海-气界面通量计算模式的敏感性试验研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20 :346~354.
- [2] 陈 陟,李诗明,吕乃平,周明煜,等. TOGA—COARE IOP 期间的海气通量观测结果[J]. 地球物理学报, 1997, 40 :753~762.
- [3] 姚华栋,李 骥,丁一汇. TOGA—COARE IOP 海表通量估算[J]. 气象学报, 1996, 54 : 693~708.
- [4] C W Fairall, E F Bradley, J E Hare, A A Grachev, et al. Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes : Updates and Verification for the COARE Algorithm. JOURNAL OF CLIMATE. 2003, 16 :571~591.
- [5] Brunke M A, C W Fairall, X Zeng, L Eymard and J A Curry. Which Bulk Aerodynamic Algorithms are Least Problematic in Computing Ocean Surface Turbulent Fluxes? JOURNAL OF CLIMATE. 2003, 16 : 619~635.
- [6] 赵 鸣,曾旭斌. 热带西太平洋海面通量与气象要素关系的诊断分析[J]. 热带气象学报. 1999, 15 :280~288.
- [7] 沙文钰,潘玉萍. 用 COARE 算法测试 4 种最新海面空气动力粗糙度方案[J]. 自然科学进展. 2004, 14 :196~200.
- [8] C W Fairall, E F Bradley, D P Rogers, J B Edson and G S Young, Bulk parameterization of air-sea fluxes for TOGA COARE [J]. J Geophys Res, 1996b, 101 : 3747~3764.
- [9] C W Fairall, A A Grachev, E F Bradley and J B Edson. Preliminary Results From The ETL Open Ocean Air-Sea Flux

- Database. Preprints, 11th Conf.on Interaction of the sea and Air, San Diego, C A, Amer Meteor Soc, 1996b ,5~8.
- [10] Businger J A, J C Wyngaard, Y Izumi and E F Bradley. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. *J Atmos Sci*, 1971 ,28 :181~189.
- [11] Hong S Y and H L Pan. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Wea Rev*, 1996 , 124 :2322~2339.
- [12] Tron I and L Mahrt. A simple model of the atmospheric boundary layer : Sensitivity to surface evaporation. *Bound Layer Meteor*, 1986 ,37 :129~148.
- [13] 孙兰涛, 宋宇, 张蕴斐, 吴辉斌. 一个嵌套于 MM5 的高分辨率大气边界层模式 [J]. *海洋预报*, 2005 , 22 : 94 ~105.

## COMPARATIVE ANALYSES ON A CASE OF THE AIR-SEA INTERFACE HEAT FLUX ESTIMATED BY THE COARE ALGORITHM

YANG Qing-hua <sup>1</sup>, ZHANG Yun-fei <sup>1</sup>, SUN Lan-tao <sup>2</sup>, WU Hui-ding <sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing, 100081 China; 2. Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871 China)

**Abstract :** The different wind data including the NCEP analysis winds, QSCAT/NCEP blended winds, MM5 analysis winds are firstly compared in this paper. It is found that the blended winds with high resolution can give a good high wind value, but the start time of the strong winds is relatively earlier. The high values of the strong winds from NCEP are apparently smaller. The MM5 analysis winds are well agree with the observed results except during strong wind speeds. The wind data with other different marine data of air temperature and humidity are used for computing the heat fluxes at the air-sea interface by using the COARE algorithm (Version : 3.0) for a synoptic case in the sea area of the Bohai sea and Yellow sea. The results are used for verifying the flux output from the MM5 model operationally running in National Marine Environmental Forecasting Center. The comparative analyses show the output of the air-sea fluxes from MM5 is well agree with the COARE fluxes under the middle and the low winds, but much different under the strong winds.

**Keywords :** COARE algorithm ; MM5 ; sensible heat flux ; latent heat flux ; air-sea interface