

基于遥感和实测数据对台风 LEO 和 SOULIK 期间的飞沫热通量研究*

艾德强 林 都 李海艳

(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文应用高风速条件下海面动力粗糙度长度, 拓展了 COARE3.0 块体通量算法, 考虑高风速下, 海洋飞沫对热通量的贡献。利用 GSSTF3(Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes Version 3)遥感产品、GSSTF_NCEP(National Centers Environmental Prediction)再分析资料和浮标 KEO 实测数据, 探讨了中国南海台风 LEO 和西北太平洋台风 SOULIK 期间湍流热通量的变化。研究结果表明: 感热通量与潜热通量相比很小; 台风的轨迹与潜热通量的分布密切相关且在台风轨迹的东偏北区域潜热通量数值大; 在热带低压之前, 原潜热通量与改进后潜热通量的差值即飞沫热通量很小, 随着台风等级的增加, 飞沫热通量也增加。当台风 LEO 达到最高即台风级别时原潜热通量达到 $300\text{W}/\text{m}^2$, 飞沫热通量与原通量的比值高达 12%, 而台风 SOULIK 达到强台风级别时原潜热通量达到 $1000\text{W}/\text{m}^2$, 飞沫热通量与原通量的比值达到 20%, 显著高于台风 LEO, 飞沫效应更明显。

关键词 海面动力粗糙度长度; 海洋飞沫; COARE 3.0; 热通量; 台风

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170800216

热带气旋是影响中国最具破坏性的一种自然灾害。每年中国的东南沿海都会受到来自南海和西北太平洋的台风袭击。台风因其强烈的海气相互作用、巨大的破坏力以及影响气候能力而一直是人类重点研究的自然现象之一(Zhao *et al.*, 2017)。台风可以看作是一部热量交换机器, 热通量和水汽通量在海气相互作用强化台风的过程中可以看作是“燃料”(Chen *et al.*, 2007)。在台风过程中风动能转化成海水动能从而产生巨大的海浪。反过来海浪作为海洋表面的主要特征, 在很大程度上是调节大气和海洋界面交换的重要因素(Cavaleri *et al.*, 2012)。海气界面的潜热通量和感热通量统称为海气界面湍流热通量。台风发生过程中, 湍流热通量是海气相互作用过程中非常重要的物理参量, 不仅是表征下垫面强迫与大气相互作用的必要参数, 也是影响海洋混合层以及季节温跃层变化的关键因子(杨清华等, 2005)。

COARE 3.0 是世界上较为先进的海气通量计算

方法, 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, 结果表明 COARE 3.0 是最可靠的算法之一。陈锦年等(2012)采用卫星遥感资料反演出的海洋大气参数, 应用此算法, 计算出了印度洋区域的海气热通量。杨清华等(2005)将 COARE 3.0 算法与 MM5 模式进行比较, 认为在中低风速条件下二者热通量计算的结果比较一致。但是在强风情况下, MM5 模式没有单独考虑飞沫热通量的影响, 计算的热通量与 COARE 3.0 算法计算的热通量结果差异明显, MM5 模式计算的热通量数值较大, 这主要取决于 MM5 模式中边界层模块的选取。在高风速(台风)下, 海洋与大气的相互作用更加复杂, 比如海气界面出现大量飞沫以及混合层与下层剧烈对流导致的海温变化等, 使得现有通用的热通量计算结果不准确。

在过去的几十年中, 台风的轨迹预测精度有所

*中国科学院海洋战略先导科技专项项目, XDA11010104 号。艾德强, 硕士研究生, E-mail: adq618@163.com

通讯作者: 李海艳, 硕士生导师, 副教授, E-mail: lihaiyan@ucas.edu.cn

收稿日期: 2017-08-29, 收修改稿日期: 2018-01-03

提高, 而强度预测的验证结果则较少(Rappaport *et al.*, 2012)。台风期间海气热通量的变化会直接影响台风的强度, 为了更精确地预报和模拟台风发生时的路径和强度, 针对台风发展过程中热通量进行分析研究的工作亟待展开。

在台风期间影响热通量的因素有海水飞沫、海面温度、大气压强等, 其中海水飞沫起着非常重要的作用。Andreas 等 (2001)指出在台风发生时海水飞沫引起的动量通量与海气界面总的动量通量具有可比的量级, 由于计算动量通量与热通量中都含有风速这一重要的物理量, 并且根据 OAFLUX 和 NCEP 通量产品与浮标数据的差值绝对值少于 16W/m^2 、占比低于浮标数据的 10%(Yu *et al.*, 2008), 所以可以推测当风速达到台风强度时, 海水飞沫是影响热通量的重要因素。强风条件下的海水飞沫的蒸发会导致大气下界面的冷却, 从而增强海气界面的感热交换, 从而对台风强度产生影响(Anthes, 1982)。海水飞沫对边界层的影响会随着高度的增加而减弱 (Perrie *et al.*, 2005)。除此之外飞沫自身的浓度和蒸发率与边界层的高度也有很大关系(Bao *et al.*, 2000)。Gall 等 (2008)考虑飞沫的垂直和水平拖曳作用, 指出飞沫能通过复杂的物理过程改变台风内部的结构。同时, 表面波的破碎产生的飞沫会显著加强海气热通量(Andreas *et al.*, 2015)。

一些科研工作者也研究了海水飞沫对台风的热力学作用过程。Kepert 等(1999)指出海洋上飞沫蒸发会增加低层大气湿度, 改变大气边界层的层结状态和结构。同时, 由于感热交换, 飞沫会冷却大气下界面, 从而加强海气界面的感热交换, 进而影响风暴强度。赵栋梁(2012)、Bianco 等(2011)和 Kudryavtsev 等 (2011)等多位研究人员发现: 海水飞沫的生成除了跟风速有关外, 还与海浪的生长状态如海面粗糙度、白冠覆盖率以及波浪等因素有关。因此海水飞沫是海洋和大气状态的复杂函数。

由于台风现场观测资料的缺乏, 前人多从微观、理论或者模式角度对海洋飞沫进行研究, 缺少统一有效的海水飞沫增长函数。同时, 由于缺少实测资料的验证, 不利于实际的应用, 飞沫对海洋热通量的影响一直没有明确的认识。张连新等(2014)从宏观出发, 以海水飞沫对海面动力粗糙度长度的影响为切入点, 分析了台风不同发展阶段海水飞沫对湍流热通量的影响, 讨论了飞沫对热通量的作用。张连新等(2014)对飞沫热通量的研究主要是基于台风经过某一固定

浮标观测站时记录的数据, 也就是空间某一固定点的时间序列数据。本文在张连新工作的基础上, 考虑了台风过程中飞沫对热通量的作用, 改进了 COARE 3.0 算法。不仅利用浮标实测数据而且主要利用遥感数据对台风个例发生期间的潜热和感热通量进行了重新计算, 获得了整个台风过程中时空连续的热通量分布, 并与基于原 COARE 3.0 算法数据产品进行比较, 分析讨论了台风过程中飞沫对热通量的贡献。

1 数据和方法

1.1 台风过程介绍

由于台风 LEO 的空间分布均在南海以及发生期间所获数据的时间连续性较好, 因此我们选定 JTWC(Joint Typhoon Warning Center) 1999 年热带气旋报告中记录的台风 LEO 作为研究对象。台风 LEO 具体过程为: 1999 年 4 月 26 日, 在南海的西部生成一个热带低压, 随后向西又向北移动, 于 28 日增强为热带风暴, 其中心向东北方向移动, 于 29 日发展成台风。台风 LEO 活动区域见图 1 中的红框, 其发展路径见图 1 红框中的红线。

因为浮标 KEO(Kuroshio Extension Observatory)记录下台风“苏力”(SOULIK)经过时的气象参数, 所以选择“苏力”台风。台风“苏力”是 2006 年太平洋台风季中第 18 个命名的热带气旋。2006 年 10 月 9 日产生于关岛以东海面上, 10 月 16 日减弱为温带气旋。台风 SOULIK 活动区域和发展路径见图 1 中黄框和黄线。

1.2 数据

本文采用的湍流热通量数据来源于 GSSTF3 (Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes Version 3), <https://disc.gsfc.nasa.gov/>, 它是美国航空和宇宙航行局-戈达德地球科学数据信息和服务中心基于卫星遥感数据计算得到的全球海域海气参数与通量数据产品, 气象输入参数来源于卫星遥感资料和再分析资料。其中我们采用的热通量数据产品包括: 潜热通量、感热通量、海表温度、海气湿度差、海面 10m 高度处风速、海面空气比湿、海面饱和比湿、海面 2m 处气温、海面气压等, 其中, 潜热通量、感热通量为采用 COARE 3.0 算法计算的结果, 为本研究直接采用的数据产品, 其作为未考虑飞沫效应的热通量结果。该数据产品的时间跨度为 1987 年 7 月至 2008 年 12 月, 覆盖范围为 70°S — 70°N , 180°W — 180°E , 空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$, 有月平均、日平均两种不同时间尺度的数据产品, 以科学数据格式 HDF-EOS 进行存储。

同时, 本文也采用了日本东南部的黑潮延伸体 KEO 浮标(32.3°N, 144.6°E)观测数据估算湍流热通量, <http://www.ndbc.noaa.gov/>。因所在位置, 浮标能够在夏季观测热带气旋向热带风暴的转化并测量其间海洋与大气之间的热量和水分交换。在 2013 年通过 NOAA 的资助使 KEO 浮标成为了风暴浮标, 提高了

数据传输的能力和用实时数据增强短期和季节性台风预测的能力。而选用的观测数据有 10m 高度海表面风速、10m 高度大气温度、10m 高度空气相对湿度、降雨速率、海面温度以及太阳短波辐射和长波辐射, 其中除了太阳长短波辐射时间间隔为 1 小时外, 其余数据时间间隔为 10 分钟。

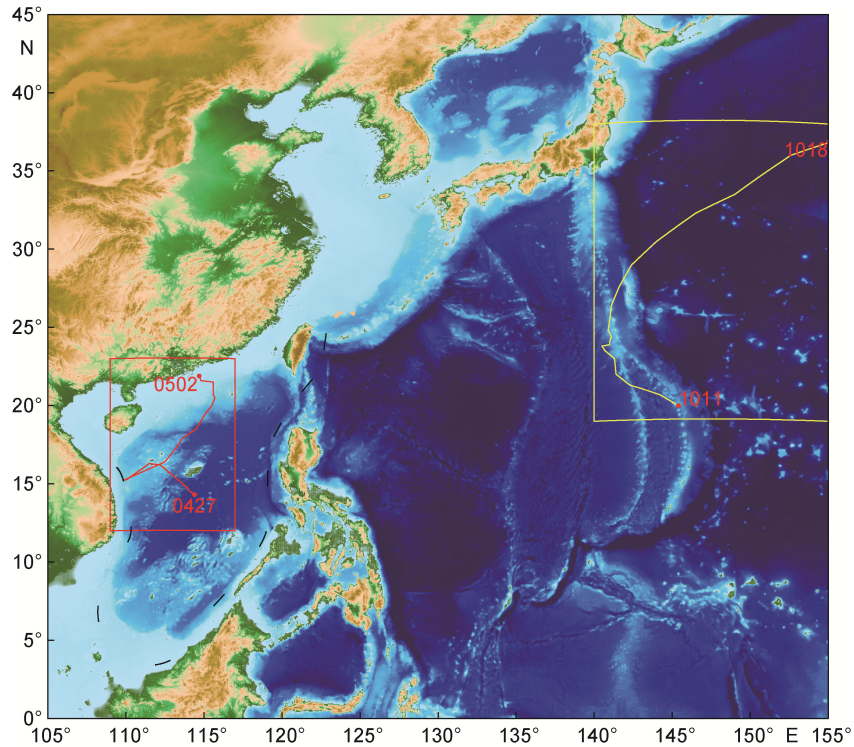


图 1 研究区域

Fig.1 The study areas

注: 红框和红线为台风 1999 年 LEO 活动区及发展路线, 黄框和黄线为 2006 年台风 SOULIK 活动区及发展路线, 数字(月月日日)标注台风起始和终止时间

1.3 方法

块体参数法 COARE 3.0 计算热通量公式(Fairall *et al*, 2003)为:

$$\tau = \rho_0 \left[\langle \omega' \mu' \rangle^2 + \langle \omega' v' \rangle^2 \right]^{1/2} = \rho_a C_D S U, \quad (1)$$

$$Q_L = \rho_0 L_V \langle \omega' q' \rangle = \rho_a L_V C_E S (q_s - q_a), \quad (2)$$

$Q_S = C_p \langle \rho_0 \omega' \theta' \rangle = \rho_0 C_p \langle \omega' \theta' \rangle = \rho_a C_p C_H S (\theta_s - \theta_a)$. (3)
其中, τ 为动量通量, Q_S 为感热通量, Q_L 为潜热通量, S 是考虑了阵风影响的海面 10m 高度处平均风速, U 为海面 10m 高度处风速, C_p 为大气定压比热, ρ_0 为湿空气密度, L_V 为水汽蒸发潜热, ω 、 μ 、 v 、 q 、 θ 分别为垂直海面方向上的风速、沿纬线方向的风速、沿

经线方向的风速、比湿度、位温。位温 $\theta = t + 0.0098 Z_t$ 。
 $\langle \omega' \phi' \rangle$ (其中 $\phi = \mu, v, q, \theta$) 是垂直方向上风速与 ϕ 的协方差, $\langle \rangle$ 代表取时间或者空间平均值。 q_s 由 t_s 温度下纯水的饱和比湿计算得到, q_a 则由 t_a 温度下的饱和比湿与空气相对湿度计算得到。

公式(1)—(3)中, 交换系数 C_D 、 C_E 和 C_H 是热通量计算中决定性的物理参数。而海面动力粗糙度长度是计算这三个参量中最为关键的物理量, 其公式为:

$$z_0 = \frac{\alpha \mu_*^2}{g} + \frac{0.11 \gamma}{\mu_*}, \quad (4)$$

$$\mu_* = \left[\langle \omega' \mu' \rangle^2 + \langle \omega' v' \rangle^2 \right]^{1/4}. \quad (5)$$

α 为 Charnock 常数, γ 为空气运动学黏性系数,

μ_* 为摩擦速度。

COARE 模型是国际上常用的海气热通量算法, 其风速适用范围可达 20m/s, 但未包含飞沫等高速下的影响因子, 将其直接扩展到 20m/s 以上风速的海况不够合理。张连新等(2014)在块体通量算法 COARE 3.0 (Fairall *et al.*, 1996, 2003) 即公式(4)的基础上考虑了飞沫影响, 提出了适合各种风速条件下的包含飞沫影响的海面动力粗糙度长度参数化方案, 为拓展了 COARE 3.0 提供了必要条件。公式为:

$$z_0 g / \mu_*^2 = 0.0847^{(1-1/\delta)} 0.42^{1/\delta} \beta_* \left(\frac{3-253}{2-100\delta} \right). \quad (6)$$

式中, z_0 为海面动力粗糙度长度, g 为重力加速度, μ_* 为摩擦速度, μ_* 通过公式计算, δ 是海洋飞沫对对数风廓线影响的修正参数, β_* 为波龄。同时, 在中低风速情况下, 海洋飞沫对对数风廓线影响的修正参量 δ 等于 1, 在高风速下为 $a_{cr} / \alpha \mu_*$, a_{cr} 是海水飞沫影响拖曳系数的临界速度, 经观测 a_{cr} 等于 0.64m/s (Makin, 2005), von Karman 常数 $\kappa=0.4$ 。从 δ 可以看出海洋飞沫效应在低风速下不足以影响海面动力粗糙度长度, 所以全风速下的海面动力粗糙度长度转化为中低风速下的海面动力粗糙度长度式 (Donelan, 1990):

$$z_0 g / \mu_*^2 = 0.42 \left(c_p / \mu_* \right)^{-1.03}. \quad (7)$$

c_p 为谱峰相速。在高风速下, 海水飞沫对海面动力粗糙度长度就会产生影响, 使得海面粗糙度长度减小, 进而影响海面拖曳系数。同时波龄数据由于缺少海洋观测, 但可以结合公式(8)和公式(9):

$$c_1 = 0.1 \frac{gH}{\mu_*^2}, \quad (8)$$

$$\frac{gH}{\mu_*^2} = 0.062 \left(\frac{gT}{\mu_*} \right)^{3/2}, \quad (9)$$

得到:

$$\beta_* = \frac{c_p}{\mu_*} = \frac{1}{1.82\pi} \left(\frac{gH}{B\mu_*} \right)^{2/3}. \quad (10)$$

其中, c_l 为无量纲的飞沫悬浮层厚度。公式(10)能够在缺少谱峰相速 c_p 的情况下由有效波高 H 计算波龄 β_* , B 这里取 0.062 (Toba, 1972)。

2 结果和讨论

2.1 台风 LEO 原潜热通量与改进后潜热通量比较
在研究区域采用 GSSTF3 和 GSSTF_NCEP 再分

析数据先对台风 LEO 发生期间(4月 26 日到 5 月 4 号)潜热通量进行分析, 见图 2。

通过图 2 的 a 到 f 的台风 LEO 期间考虑飞沫后潜热通量的日均变化可以发现:

4 月 26 日即图 2a, 在热带低压生成地的南部出现大范围潜热通量相对高值区域。4 月 27 日即图 b 中潜热通量高值区域的值由 200W/m² 进一步升高到 300W/m², 高值中心距离低压生成地约四百公里。因此推测, 低压中心南侧的海洋, 向大气输送潜热通量, 为台风的形成提供了主要的能量来源。由图 c—f 看到, 随着台风的发展, 可以观察到潜热通量的最高值区域, 基本上都在轨迹的东侧偏北。同时, 由 c 和 d 还发现: 28 日后即低压中心形成三天后, 潜热通量的高值中心与台风中心的地理位置越来越接近, 并且通量高值中心量值越来越高。潜热通量的高值中心与台风中心的地理位置有较高的相关程度, 不仅随着台风加强, 潜热通量的高值中心的强度增强, 二者在地理位置上接近重合; 同时随着台风强度的减弱, 潜热通量高值区域的量值和面积也减少, 并且二者在地理位置上的差别也增大。到了台风消亡阶段, 潜热通量再也无明显高值区域。

如图 2 所示, 考虑飞沫影响后潜热通量在量值和空间范围有所增加(改进算法前的潜热通量未在此给出)。接下来我们对图 2 中考虑海洋飞沫的潜热通量算法的结果与改进前原通量比值分布进行分析, 如图 3。

通过图 3a 可知, 考虑飞沫后改进算法的结果与改进前结果的比值约占 8%, 但此时从图 2 的 b 看出, 改进算法潜热通量高值区的值维持在 300W/m² 左右。到了 28 日和 29 日, 从图 3b、c 中存在的数据可以看到此比值最高达 12%, 对应图 2 的 c、d, 热通量的高值维持在 500W/m² 左右, 此时也是台风发展的成熟时期。由此可见, 改进后的算法虽然只是对粗糙度长度进行了改进, 但抓住了关键参数, 因此能反映出高风速下海水飞沫对热通量贡献。

与潜热通量分析类似, 我们对台风 LEO 发生时的 4 月 29 日—5 月 1 日感热通量也进行考虑飞沫影响的相关分析, 如图 4。感热的量值基本小于 30W/m², 相对潜热通量对热通量的贡献很小, 并且随时间变化的幅度较小。总体上飞沫对感热通量的贡献相对其对潜热通量的贡献要小。

2.2 台风 SOULIK 原潜热通量与改进后潜热通量变化
与 2.1 类似, 我们对台风“苏力”也采用 GSSTF3

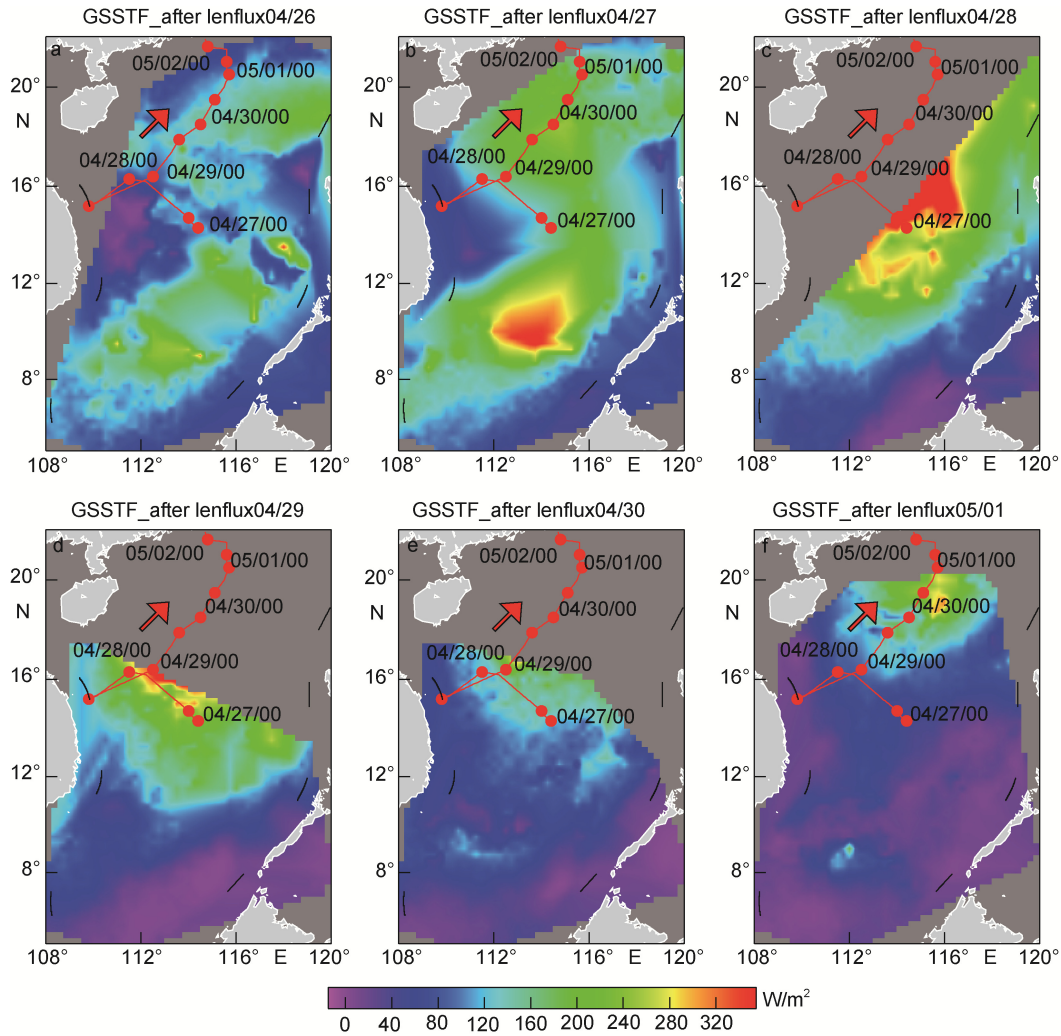


图2 台风 LEO 改进后潜热通量随时间演化图

Fig.2 The map of the improved latent heat flux of typhoon LEO

注: 4月26日—5月1日, 标题代表日期, 改进后算法计算出的潜热通量分布, 横、纵坐标分别为北纬和东经, 红线为台风轨迹, 红色箭头代表台风 LEO 移动方向, 红点为每隔 12 小时的气旋中心, 红点旁边的 04/27/00 代表 4 月 27 日 0 时, 其余类推, 图中灰黑色区域为数据缺测区域, 灰白色代表陆地

和 GSSTF_NCEP 数据对台风经过前后热通量时空分布进行分析, 结果见图 5。

我们从图 5 的 a 到 f 可以看出台风苏力改进后潜热通量的时空演化: 在该区域台风经过前的 11 日到 13 日潜热通量基本没有什么区别(11 日与 12 日改进后潜热通量分布在此未给出); 在台风经过该区域的 14 日到 16 日, 可以看到比较明显的变化, 高值区的范围明显比前一天的广阔; 在台风经过后的 17 日到 18 日, 这两天的高值区范围又基本达到相当水平, 但是在 10 月 14 日到 16 日, 台风发展的鼎盛时期, 潜热通量的峰值会达到 $1200\text{W}/\text{m}^2$ 。同时, 通过类似图 3 比值分布图方法分析台风苏力改进前后潜热通量差值占比(台风苏力改进前后差值占比图在此未给出),

改进前后差值占比达到 20%, 明显高于台风 LEO 的 12%, 说明飞沫效应更明显。

同理, 再分析一下感热通量在算法改进前后区别, 如图 6。

14 日的 a 和 b 图中感热的高值区在 $60\text{W}/\text{m}^2$, 前后变化幅度小, 15 日的 c 和 d 图感热的高值区在 $80\text{W}/\text{m}^2$, 改进后算法的结果较改进前的结果差值占原通量的 4%, 到 16 日即 e 和 f 图, 感热的高值区在 $100\text{W}/\text{m}^2$, 改进后较之前差值约占原通量的 6%。

2.3 采用浮标数据对台风 SOULIK 原潜热通量与改进后潜热通量变化分析

由于缺乏南海浮标实测数据, 为了和实测数据进行对比, 本文采用日本东南部的黑潮延伸体 KEO

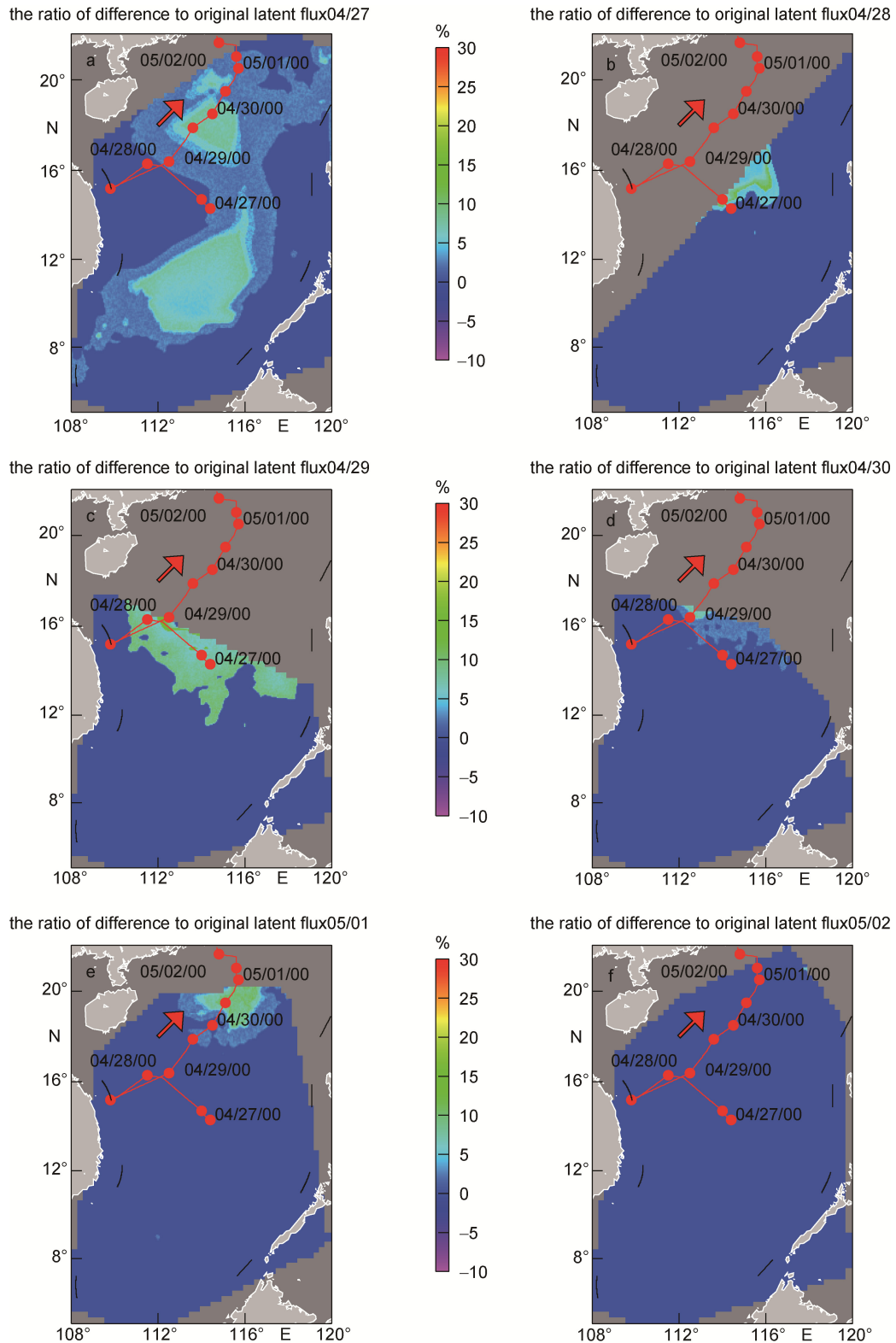


图 3 台风 LEO 潜热通量两种算法计算后的差值与原通量比值分布图

Fig.3 Ratio distribution of the difference between the two algorithms for the latent heat flux of LEO corresponding to the original flux
注: a—f 分别代表 4 月 27 日—5 月 2 日, 标题为日期, 红线代表台风轨迹, 红色箭头代表台风 LEO 移动方向, 红点为每隔 12 小时的气旋中心, 红点旁边的 04/27/00 代表 4 月 27 日 0 时, 其余类推

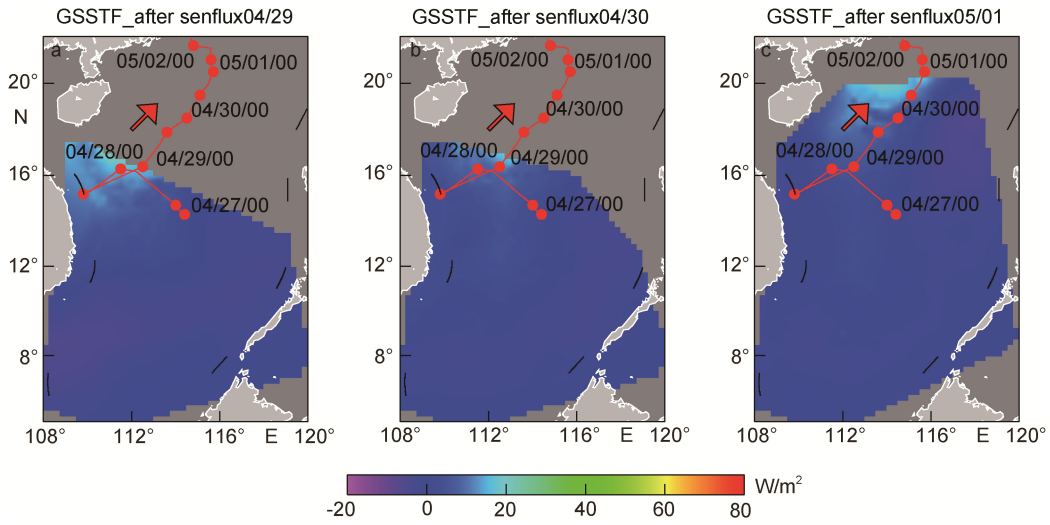


图 4 台风 LEO 改进后感热通量随时间演化图

Fig.4 The map of the modified sensible heat flux of typhoon LEO

注: 4月29日—5月1日, 标题代表日期, a、b、c 代表改进后算法计算出的感热通量, 红线为气旋轨迹, 红色箭头代表台风 LEO 移动方向, 图中 04/27/00 为 4月27日 0时, 其余类推

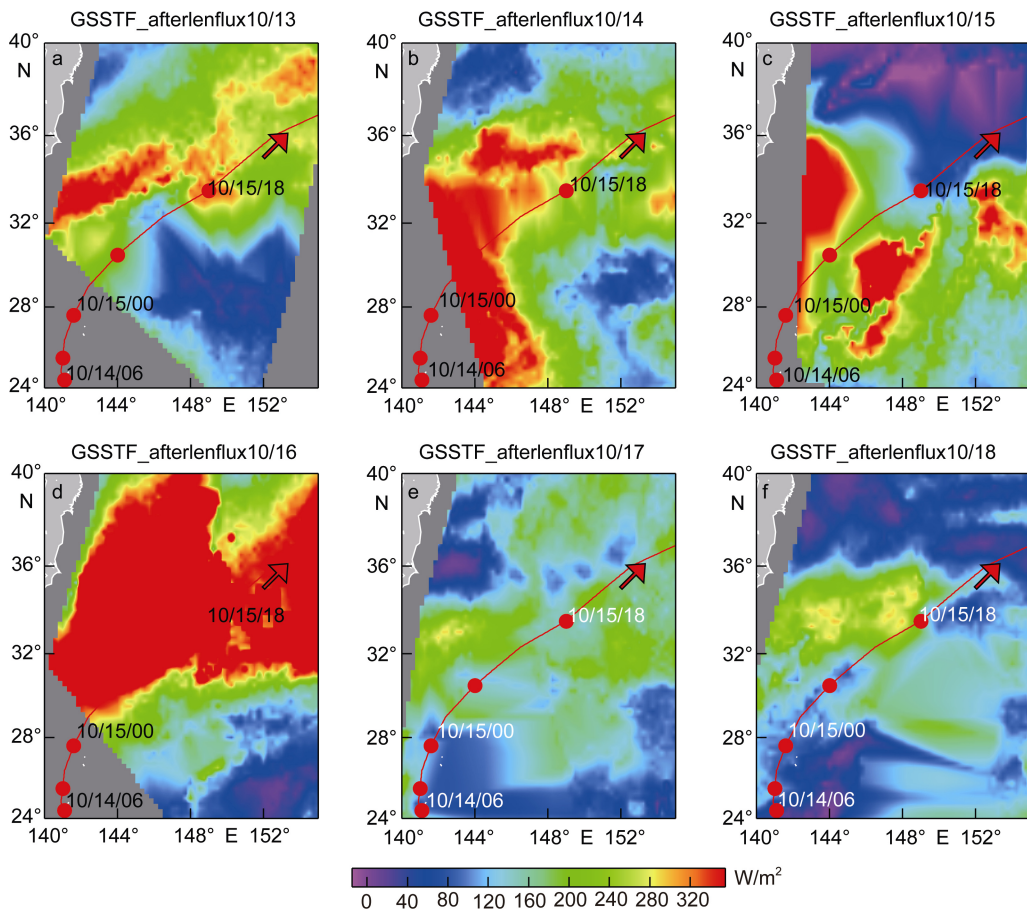


图 5 台风苏力改进后潜热通量随时间演化

Fig.5 The evolution of the modified latent heat flux of typhoon Soulik

注: 10月13日—18日, 改进后算法计算出的潜热通量, 红线代表台风轨迹, 红色箭头代表台风 SOULIK 移动方向, 红点为每隔 9 小时的台风中心, 横坐标为东经, 纵坐标为北纬

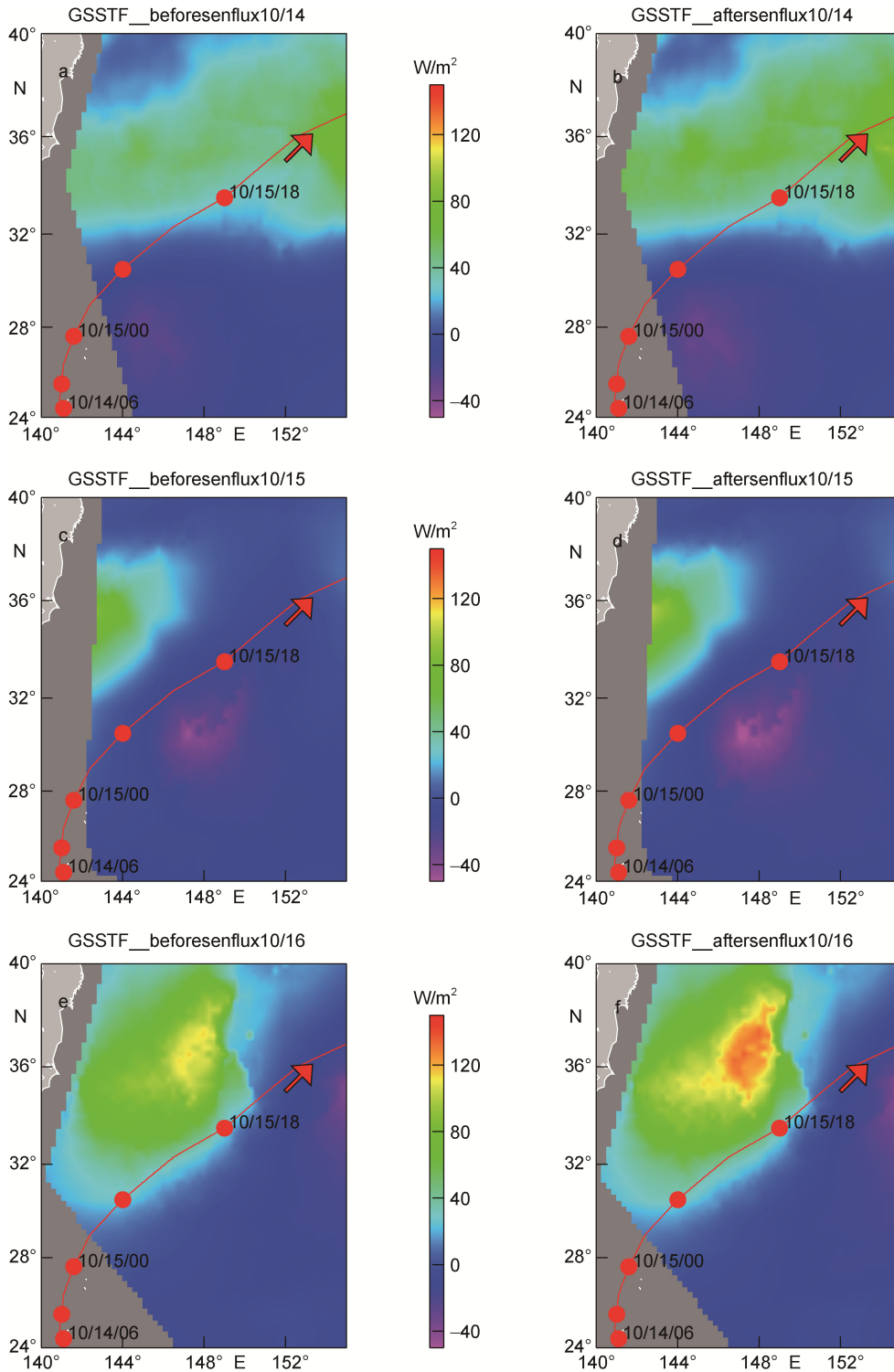


图 6 台风“苏力”原感热通量与改进后感热通量变化对比

Fig.6 The comparison of the primary sensible heat flux and the modified sensible heat flux of typhoon Soulik
注: 10 月 14 日—16 日, 标题 GSSTF_beforesenflux10/14 与 GSSTF_aftersenflux10/14 代表采用 10 月 14 日 GSSTF 数据改进前后分析结果, 红线代表台风轨迹, 红色箭头代表台风 Soulik 移动方向, 红点为每隔 9 小时的台风中心, 横坐标为东经, 纵坐标为北纬

浮标(32.3°N,144.6°E)观测数据估算湍流热通量。因为所在位置, 浮标能够在夏季很好的观测热带气旋向

热带风暴的转化, 并测量这些风暴发生时海洋与大气之间的热量和水分交换, 具体位置如图 7。

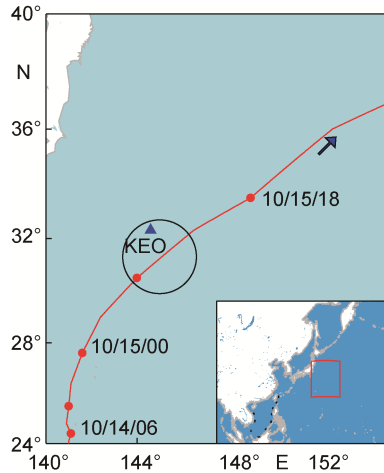


图7 台风 SOULIK 经过浮标 KEO 的相对地理位置

Fig.7 The relative geographical location of the Soulik track to the buoy KEO

注: 黑色圆圈为台风作用范围, 蓝色三角代表浮标 KEO 位置, 红色曲线代表台风轨迹, 蓝色箭头代表台风 Soulik 移动方向, 红点为台风中心, 横坐标为东经, 纵坐标为北纬, 10/14/06 代表 2006 年 10 月 14 号 06 时

我们根据浮标 KEO 在台风“苏力”发展过程中观测的海洋气象数据分别计算出利用原算法得到的潜热通量和改进后算法得到的潜热通量以及二者差值即飞沫热通量, 结果见图 8。

高风速会使海洋表面产生破碎波, 形成两位相

层: 海水中的气泡和大气中的飞沫(Soloviev *et al*, 2010)。当风速超过 25—30m/s 时, 海洋表面几乎完全由两位相层所覆盖(Powell *et al*, 2003)。如图 8 所示 10 月 14 日之前, 台风未影响到浮标站, 潜热通量主要集中在 0—200W/m²。当台风经过 KEO 浮标站时, 结合图 10 所示, 随着风速大于 20m/s, 飞沫浓度开始迅速增加, 从而加强海气间的潜热交换。通量增加值最大为 140W/m², 增加量占原通量的 20.6%。

图 8 中 10 月 11 日到 13 日原潜热通量与改进后潜热通量分布的趋势基本相同, 主要集中在 0—30W/m², 反映出海洋向大气传输热量。此时由于风速集中在 5—15m/s, 风速较小, 海面上的飞沫的浓度也比较低, 所以飞沫对海气潜热通量并未产生明显的影响。但是当 10 月 14 日到 16 日台风“苏力”经过 KEO 浮标站时, 风速达到极值 30m/s, 同时二者差值于 15 日也达到了极值 140W/m², 说明随着风速增加飞沫对通量的影响增大, 当风速到达极值时, 飞沫对通量的影响最大。

从图 9 可以看出, 改进后感热通量与原通量相比最大处增加了 50W/m², 增加值占原感热通量的 17%。但我们看到通量峰值在台风经过后比台风经过前大, 说明台风经过后的飞沫对感热通量和潜热通量的影响大于经过前的。

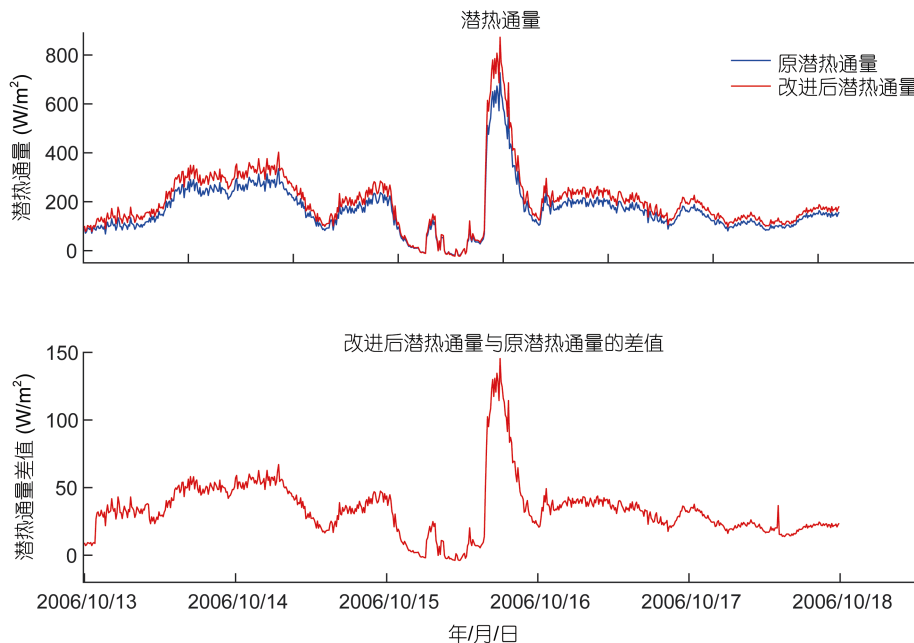


图 8 运用浮标数据计算的原潜热与改进后潜热变化

Fig.8 The change of the primary latent heat flux and the modified latent heat flux calculated from buoy data

注: 横坐标 2006/10/11 代表 2006 年 10 月 11 日, 其他类推

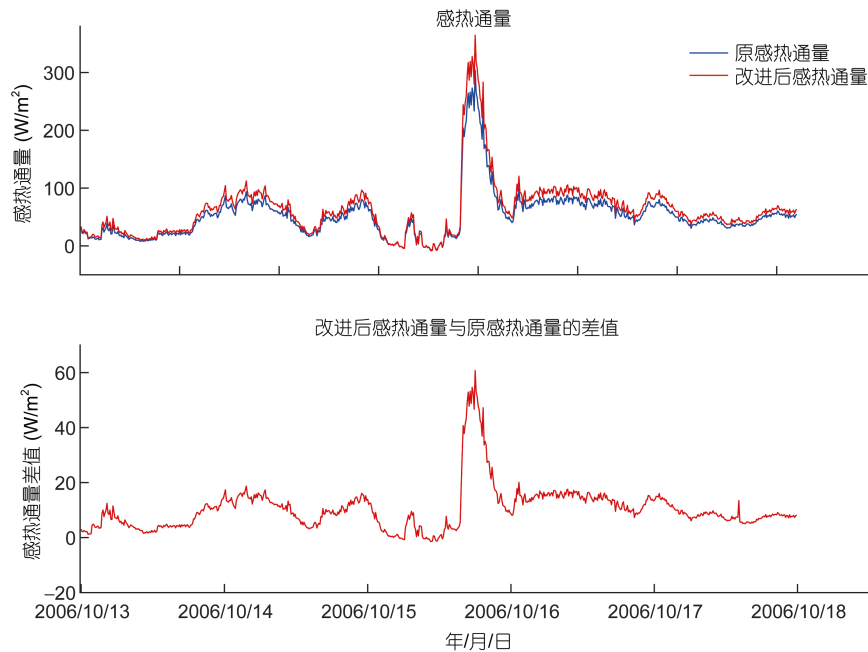


图 9 运用浮标数据计算的原感热与改进后感热变化

Fig.9 The change of the primary sensible heat flux and the modified sensible heat flux calculated from buoy data

注: 横坐标 2006/10/11 代表 2006 年 10 月 11 日, 其他类推

刘斌(2007)和 Andreas 等(2008)对高风速下的海水飞沫的物理过程有具体陈述: 当飞沫由海洋进入上层空气中, 在空气中开始冷却, 增大了海洋同大气之间的感热交换, 当飞沫与周围环境达到平衡后再进行潜热交换, 这时候的飞沫的潜热交换蒸发吸热的热量一部分来自之前的感热交换, 其余部分来自湿度差异和风速, 最终飞沫潜热会吸收掉飞沫的一部分感热。所以看起来飞沫对感热的影响没有对潜热的影响明显。

图 10 显示了台风“SOULIK”经过期间飞沫热通量(改进后热通量与原通量差值)随风速的分布变化。飞沫热通量与 10m 风速存在一定的相关性。当风速小于 9m/s 时, 飞沫感热和潜热都几乎为 0, 这说明在 9m/s 以下时飞沫对海气湍流热通量的影响很弱; 当风速大于 9m/s 后飞沫热通量值开始变大, 说明飞沫开始发挥作用; 当风速大于 20m/s 后飞沫潜热随风速的变化开始出现指数性增长, 说明飞沫对海气潜热通量的影响迅速增强; 当风速出现极值时, 潜热对应也出现最大值。而感热随风速的变化由于值域较小, 只能分析出随着风速增大飞沫也会影响感热通量, 与潜热相比, 影响较小。

3 结论

由于高风速下, 海水飞沫对海洋热通量有着重要的贡献, 本文通过张连新等(2014)提出的考虑飞沫

影响的高风速下的海面动力粗糙度长度公式, 改进了块体通量算法 COARE 3.0。本文以 1999 年 4 月的台风 LEO 和 2006 年 10 月的台风 SOULIK 为例, 不仅只利用浮标实测数据, 而且主要利用 GSSTF3(Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes Version 3)遥感产品、GSSTF_NCEP(National Centers Environmental Prediction)再分析资料, 获得了整个台风过程中连续的时空热通量分布, 探讨了两个台风期间湍流热通量的变化以及考虑飞沫影响的改进后块体通量算法对湍流热通量计算的影响。主要结论如下:

(1) 结合遥感数据获得结果图 2 与图 4 的比对、图 5 与图 6 的比对, 通过分析得出: 在两个台风期间感热通量与潜热通量相比都低于 20%, 占比很小, 海气湍流热通量中以潜热为主。

(2) 采用遥感数据对台风 LEO 和 SOULIK 进行了算法改进前后潜热通量和感热通量的比对分析, 得出台风发生时原通量的量值越高, 飞沫热通量的贡献越大。

(3) 采用浮标数据对台风 SOULIK 的发生过程进行了潜热和感热通量的分析比较, 得出风速低于 9m/s 时, 海面上的海水飞沫的浓度也比较低, 所以飞沫对海气潜热通量并未产生明显的影响; 当风速达到极值 32m/s 时飞沫对通量的影响最大。

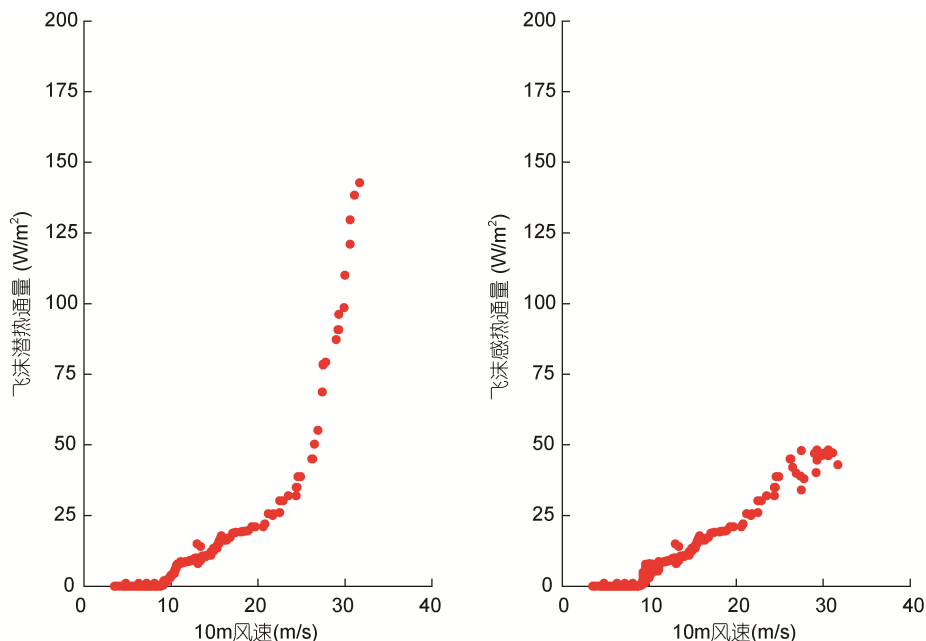


图 10 台风 SOULIK 经过 KEO 浮标时, 通过浮标观测计算出的飞沫潜热通量和感热通量随风速变化

Fig.10 The change of the latent heat flux and the sensible heat flux calculated from buoy data with the wind speed, when the typhoon Soulik passes the buoy KEO

值得指出的是, 由于本文采用的遥感数据为日平均数据, 在分析台风发生过程中热通量的分布时不能完全捕捉到台风发展不同阶段热通量分布, 所以需要时间分辨率更高的数据; 本文主要探究了高风速下潜热和感热的计算改进问题, 通过对结果分析得出飞沫对热通量贡献可达 20%, 我们认为这一量级会对台风路径和强度预报产生影响, 但就其对台风预报具体影响量级并没有进行深入分析, 这也将是我们下一步进行研究的工作内容之一; 本文只是对飞沫的影响进行了分析, 对影响台风发生时热通量分布的其他因素如海气温度等, 只是用来计算热通量, 并没有对其与热通量分布的具体关系进行深入分析; 同时, 本文只是对两个台风个例进行分析比较, 但是要完全了解台风期间飞沫对海气界面热通量的贡献, 还需要更多的理论研究和观测资料的支持。

参 考 文 献

- 刘 斌, 2007. 大气-海浪耦合模式的物理基础及数值研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 杨清华, 张蕴斐, 孙兰涛等, 2005. COARE 算法估算海气界面热通量的个例对比分析. 海洋预报, 22(4): 1—13
- 张连新, 韩桂军, 李威等, 2014. 台风期间海洋飞沫对海气湍流通量的影响研究. 海洋学报, 36(11): 46—56
- 陈锦年, 左 涛, 王宏娜, 2012. 印度洋热通量变化及其对南海夏季风爆发的影响. 海洋与湖沼, 43(5): 884—890
- 赵栋梁, 2012. 海洋飞沫及其对海-气相互作用影响的研究进展. 地球科学进展, 27(6): 624—632
- Andreas E L, Emanuel K A, 2001. Effects of sea spray on tropical cyclone intensity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 58(24): 3741—3751
- Andreas E L, Mahrt L, Vickers D, 2015. An improved bulk air-sea surface flux algorithm, including spray-mediated transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(687): 642—654
- Andreas E L, Persson P O G, Hare J E, 2008. A bulk turbulent air-sea flux algorithm for high-wind, spray conditions. *Journal of Physical Oceanography*, 38(7): 1581—1596
- Anthes R A, 1982. Simulation of tropical cyclones by numerical models. In: Anthes R A ed. *Tropical Cyclones*. Boston, MA: American Meteorological Society, 91—118
- Bao J W, Wilczak J M, Choi J K *et al*, 2000. Numerical simulations of air-sea interaction under high wind conditions using a coupled model: A study of hurricane development. *Monthly Weather Review*, 128(7): 2190—2210
- Bianco L, Bao J W, Fairall C W *et al*, 2011. Impact of sea-spray on the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 140(3): 361—381
- Brunke M A, Fairall C W, Zeng X B *et al*, 2003. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? *Journal of Climate*, 16(4): 619—635
- Cavaleri L, Fox-Kemper B, Hemer M, 2012. Wind waves in the coupled climate system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(11): 1651—1661

- Chen S S, Price J F, Zhao W *et al.*, 2007. The CBLAST-Hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(3): 311—317
- Donelan M A, 1990. Air-sea interaction. In: Le Méhauté B, Hanes D M eds. *The Sea, Ocean Engineering Science*. New York: Wiley, 239—292
- Fairall C W, Bradley E F, Hare J E *et al.*, 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of climate*, 16(4): 571—591
- Fairall C W, Bradley E F, Rogers D P *et al.*, 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C2): 3747—3764
- Gall J S, Frank W M, Kwon Y, 2008. Effects of sea spray on tropical cyclones simulated under idealized conditions. *Monthly Weather Review*, 136(5): 1686—1705
- Keperth J, Fairall C, Bao J W, 1999. Modelling the interaction between the atmospheric boundary layer and evaporating sea spray droplets. In: Geernaert G L ed. *Air-Sea Exchange: Physics, Chemistry and Dynamics*. Dordrecht: Springer, 363—409
- Kudryavtsev V N, Makin V K, 2011. Impact of ocean spray on the dynamics of the marine atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 140(3): 383—410
- Makin V K, 2005. A note on the drag of the sea surface at hurricane winds. *Boundary-Layer Meteorology*, 115(1): 169—176
- Perrie W, Andreas E L, Zhang W Q *et al.*, 2005. Sea spray impacts on intensifying midlatitude cyclones. *Journal of Atmospheric Sciences*, 62(6): 1867—1883
- Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A, 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929): 279—283
- Rappaport E N, Jiing J G, Landsea C W *et al.*, 2012. The joint hurricane test bed: Its first decade of tropical cyclone research-to-operations activities reviewed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(3): 371—380
- Soloviev A, Lukas R, 2010. Effects of bubbles and sea spray on air-sea exchange in hurricane conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 136(3): 365—376
- Toba Y, 1972. Local balance in the air-sea boundary processes. *Journal of Oceanography*, 28(3): 109—120
- Yu L, Jin X, Weller R A, 2008. Multidecade global flux datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. OAFlux Project Tech Rep OA-2008-01. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 74
- Zhao B, Qiao F L, Cavaleri L *et al.*, 2017. Sensitivity of typhoon modeling to surface waves and rainfall. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3): 1702—1723

STUDY ON SEA SPRAY HEAT FLUX DURING TYPHOON LEO AND SOULIK BASED ON REMOTE SENSING AND MEASURED DATA

AI De-Qiang, LIN Du, LI Hai-Yan

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We improved the bulk flux algorithm COARE 3.0 by considering the influence of droplets in the high-speed wind with the improved aerodynamic roughness length at sea surface. The change of turbulent heat fluxes during typhoon LEO in the South China Sea and the typhoon SOULIK in Northwest Pacific based on GSSTF3 (Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes Version 3) remote sensing products and GSSTF_NCEP (National Centers Environmental Prediction) reanalysis data were estimated and compared with the original and improved algorithms. The results show that the sensible heat flux is small than that of the latent heat flux. The typhoon trajectory is closely related to the distribution of latent heat flux and the large-value area is on the northeast side of the track line. The difference between the original latent heat flux and the improved flux (sea spray heat flux) is very small during the period of the tropical depression. As the typhoon level increases, the gap of the two fluxes grows to the highest of 300W/m² at the highest level of typhoon LEO, the ratio of the improved flux to the original flux reached about 12%. The typhoon SOULIK peaks at 1000W/m², the ratio reaches 20%, which is significantly greater than that of typhoon LEO whose spray effect is more obvious.

Key words sea surface aerodynamic roughness length; ocean droplet; COARE 3.0; heat flux; typhoon