

徐小慧, 高志球. 2012. 利用船测近海层湍流热通量资料验证 OAFlux 数据集 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 281–291, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10096. Xu Xiaohui, Gao Zhiqiu. 2012. Testing OAFlux field by using the shipborne heat flux measurements [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 281–291.

利用船测近海层湍流热通量资料验证 OAFlux 数据集

徐小慧^{1,2} 高志球²

1 中国科学院研究生院, 北京 100049

2 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 美国伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 的客观分析海气通量 (Objectively Analyzed air-sea Fluxes, OAFlux) 数据集中的近海层湍流热通量数据被公认为最可信, 并被广泛地用于气候模式模拟结果检验。利用 NOAA ETL (Environmental Technology Laboratory) 两个固定观测站点的科学试验的船测通量数据库 (TOGA COARE 试验观测资料和 KAWJEX 试验观测资料), 对 OAFlux 的热通量进行验证。结果表明: OAFlux 的潜热通量普遍高于船测值, 并且风速较大时, 两者差异较大。风速对潜热通量的变化趋势起主导作用, 海表和大气湿度差影响甚微。低风条件下, OAFlux 的潜热通量和船测值差异则很小。海面湍流感热交换很弱, 通量值本身依然受到风速的主导作用, 但由于感热通量值与观测仪器误差十分接近, 导致比较分析异常困难。分析结果表明: 在上述两个观测试验期内, 由于海表空气湿度和大气的湿度差变化不显著, 海气相互作用的强度主要取决于海面风速的变化。

关键词 OAFlux 潜热通量 感热通量 风速

文章编号 1006-9585 (2012) 03-0281-11 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10096

Testing OAFlux Field by Using the Shipborne Heat Flux Measurements

XU Xiaohui^{1, 2} and GAO Zhiqiu²

1 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The OAFlux (Objectively Analyzed air-sea Fluxes) database, provided by the Woods Hole Oceanographic Institution, and widely applied in the validation of climate models, is tested by using the TOGA COARE and KAWJEX measurements which are two serial survey databases of NOAA ETL (Environmental Technology Laboratory). The result shows that the latent heat flux of OAFlux is systematically higher than that of ETL, and the difference between them is comparatively large when the heat flux is large itself. Wind velocity plays a dominant role on the change of latent heat when the influence of humidity difference is minimal. In addition, when the sea surface temperature, air temperature, and wind direction do not vary much, the latent difference between OAflux and direct measurements is significant under medium to large wind speed condition and is minimal under the low wind condition. Meanwhile, the sensible heat exchange is very weak and the values are still mainly controlled by wind speed.

收稿日期 2010-08-09 收到, 2011-11-25 收到修定稿

资助项目 中国科学院“百人计划”项目: 海一气、陆一气相互作用观测与模拟研究

作者简介 徐小慧, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候模式研究。E-mail: xuxiaohui@mail.iap.ac.cn

However, the values of the measured sensible heat flux are very close to the instrument error, leading to difficulty in comparison analysis. The result also shows that the interaction between air and sea mainly depended on the wind velocity when the humidity difference between sea surface and air did not change much during the experimental periods.

Key words OAFflux, TOGA COARE, latent heat flux, sensible heat flux, wind speed

1 引言

海—气界面动量、热量和水汽通量交换是海—气相互作用的重要环节,它影响着所有尺度的天气过程和气候变化(赵鸣,2000)。海表作为大气的下垫面之一,通过湍流交换过程影响近海层大气的稳定性和大气边界层结构的演变。潜热输送所提供的水汽决定着区域甚至全球的降水;另一方面,海水海流和海浪的大部分驱动力也来自海气界面的动量通量交换;海—气界面处的动量通量、感热通量、潜热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(杨清华等,2005)。

如何精确地计算区域乃至全球的海气通量对于驱动海洋环流模式和大气环流模式,了解大气和海洋的相互作用,评估和评价数值天气预报模式等有重要意义(丁一汇等,2003;班军梅,2010)。现有的海气通量数据集(包括卫星遥感反演数据和再分析数据)中的海—气通量场都存在着不确定性,误差主要源于通量算法的不精确性和计算通量过程中所用基本观测量的测量误差(Zeng et al., 1998; Josey, 2001; Smith et al., 2001; Wang and McPhaden, 2001)。这些自身不确定性限制了利用通量数据集评估数值模式的产品。因此,对通量数据库进行质量评估迫切需要。

海—气通量的合理估算对气候模式具有重要意义(WCRP/GEWEX, 1996),主要体现在以下3个方面:(1)为全局和区域气候模式提供边界条件:海表通量是大气模式最重要的下边界条件之一,是海洋模式最重要的上边界条件之一;(2)评估耦合模式:对海—气通量的模拟能力是评估耦合模式的重要因子;(3)为大气模式参数化的设计和发展提供校准和评估资料。大量的科学研究证明,气候模式是理解和预测气候系统极为重要的科学工具(IPCC, 2007),因此,对各种气候

模式进行评估已经成为当前的热点研究。班军梅(2010)以海—气通量的客观分析资料(Objectively Analyzed air-sea Fluxes, OAFflux)为标准,对美国 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 的 CAM3 (Community Atmosphere Model version 3) 大气模式的海—气湍流热通量模拟性能进行评估,从而给出了该模式对海—气湍流热通量的模拟偏差,并分析了产生偏差的可能原因。然而, OAFflux 通量产品是基于合成算法得到的通量资料(Yu and Weller, 2007)。合成算法采用权重目标分析方法来提高对基本变量场(如风速、气温和海表温度等)的计算精度。但是,使用此算法时,会因变量来源不同产生尺度不匹配的问题(Fairall et al., 2009)。因此,利用通量观测资料,对 OAFflux 资料进行验证很有必要。

为此,本文选取美国国家海洋和大气技术管理实验室(National Oceanic and Atmospheric Administration Environmental Technology Laboratory, NOAA ETL)航次的船测数据来验证 OAFflux 场。因为船测数据是仅有的准全球、几十年尺度的海表气象数据集,也是许多气候通量数据集的基础,例如, Bunker (1976) 计算大西洋表面能量通量时,用到各种观测资料计算的交换系数,并发现船测数据计算出的交换系数比其他研究设备好约 10%; Esbensen and Kushnir (1981) 利用船测数据去计算海表各种气候数据的月平均值; Hsiung (1986) 使用船测数据计算全球海表热量平衡,并发现风速、云量和绝对湿度梯度是决定表面通量最重要的气象参数; Isemer and Hasse (1987) 利用船测资料和各种气候公式去计算海—气热通量,包括感热通量、潜热通量、长波辐射和短波辐射; Oberhuber (1988) 结合 3 年甚至更多年的船测资料,使用参数化方法,去计算全球海表月平均的热通量; Da Silva et al. (1994) 使用船测资料来计算海—气热和动量交换,以此来定

量化海洋和大气之间的能量传输; Josey et al. (1999) 在不同气候区域, 使用高质量的船测数据来计算个别月通量场的精度。由此可见, 使用船测资料作为验证的依据, 更具可靠性和科学性。本文接下来的部分分别介绍这两种资料的来源和处理方法; 然后在第三部分首先验证 OAFflux 的各基本气象要素, 再选取具有代表性的通量数据潜热通量和感热通量来进行验证分析; 第四部分则总结两资料产生偏差的原因, 并得出本研究的结论。

2 资料介绍

2.1 OAFflux 热通量资料

美国伍兹霍尔海洋研究所 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) 的客观分析海气通量 OAFflux 中, 输入数据海表温度来自卫星反演的甚高分辨辐射计数据 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR), 风速反演来自专用传感器微波成像仪 (Special Sensor Microwave Imager, SSM/I) (Wentz, 1997), 海表风矢量反演来自 QuikSCAT, 海表气象场源于欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium range Weather Forecasting, ECMWF) 和美国大气成分中心第 2 版再分析资料 (National Centers for Environmental Prediction 2, NCEP2)。OAFflux 通过综合卫星资料、NCEP2 和 ECMWF 数值天气预报产品, 通过变分客观分析方法来获取与通量相关联海表基本气象变量的最佳估计, 再利用 COARE2.6a 算法计算潜热和感热通量场 (Yu et al., 2004a, 2004b; Yu and Weller, 2007)。资料的有效时期为 1958~2006 年, 空间分辨率 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度), 网址 ftp://ftp.whoi.edu/pub/science/oafux/data_v3/daily/ [2010-03-27]。

2.2 船测资料

船测数据源于 NOAA 环境技术实验室 ETL 的海洋观测试验, 数据获取网址 <ftp://www.seaflux.org/INSITU/ETL/> [2010-03-27], 航线和浮标位置在班军梅 (2010) 中有具体给出。考虑到 OAFflux 资料的格点化和热带海洋与全球大气的海-气耦合响应实验 (Tropical Ocean Global Atmosphere Couple Ocean Atmosphere Response

Experiment, TOGA COARE) 所采集数据的完整性, 本文选取 TOGA COARE 中 (1.7°S , 156.0°E) 点处的观测资料, 其观测船为 NOAA R/V Moana Wave, 海上观测试验分为 3 个观测期: 1992 年 11 月 11 日~12 月 3 日, 1992 年 12 月 17 日~1993 年 1 月 11 日, 1993 年 1 月 28 日~2 月 16 日。同时, 在本分析中还选取 Kwajalein 海湾的试验区 (KWAJEX) 中的 (8.4°N , 167.7°E) 和 (8.5°N , 167.5°E) 两点的观测资料。其观测期为 1999 年 7 月至 8 月。本文只选取 8 个航测数据中的两个航测数据来对卫星资料进行验证, 这是因为只有这两个航测数据是固定点, 避免了航行带来的不确定性。

2.3 资料处理

为了尽可能减少观测资料和 OAFflux 资料对比分析中的不确定性, 本文选取两组资料同一时段为研究对象, 这些时段分别为: 1992 年 11 月 11 日~12 月 2 日、1992 年 12 月 20~31 日、1993 年 1 月 1~11 日、1993 年 1 月 28 日~2 月 5 日、1999 年 7 月 28 日~8 月 19 日和 1999 年 8 月 23 日~9 月 12 日。其中, 用到的船测资料有: 风速、风向、海表温度、气温、空气比湿, 海表湿度、降水量, 涡动相关 (以下简称 COV) 的热量和水汽通量; 而用到的 OAFflux 资料有: 风速、海表温度、气温、空气比湿, 净短波辐射、净长波辐射, 热量和水汽通量。OAFflux 中海表比湿值由下列公式计算,

$$q_s = 0.98q_{\text{sat}}(T_s), \quad (1)$$

其中, 系数 0.98 是用来考虑 34 psu (1 psu 代表 1 kg 海水中含 1 g 的氯化钠) 的典型盐度而引起的气压减少, $q_{\text{sat}}(T_s)$ 是纯水在温度为 T_s 时的饱和比湿。在处理船测资料时, 首先剔除由于降水、大风、缺测等造成损坏的数据, 保证船测资料可靠性和精确性的前提下, 将船测资料进行日平均。OAFflux 资料进行二维格点插值, 这样得到相同地点相同时段的两组资料量值, 尔后进行逐一比较分析。

3 结果分析与讨论

3.1 气象要素的比较

本文分两个区域讨论, 分别是 TOGA

COARE 试验区 and KAWJEX 试验区。图 1 是 TOGA COARE 试验区的各气象要素时间序列。可以看到:

(1) 风速: OAFflux 值普遍大于船测值, 其中 1992 年的第 329 日 (即 11 月 24 日) 和 1993 年的第 31 日 (即 1 月 31 日) 差异较大, 差值分别

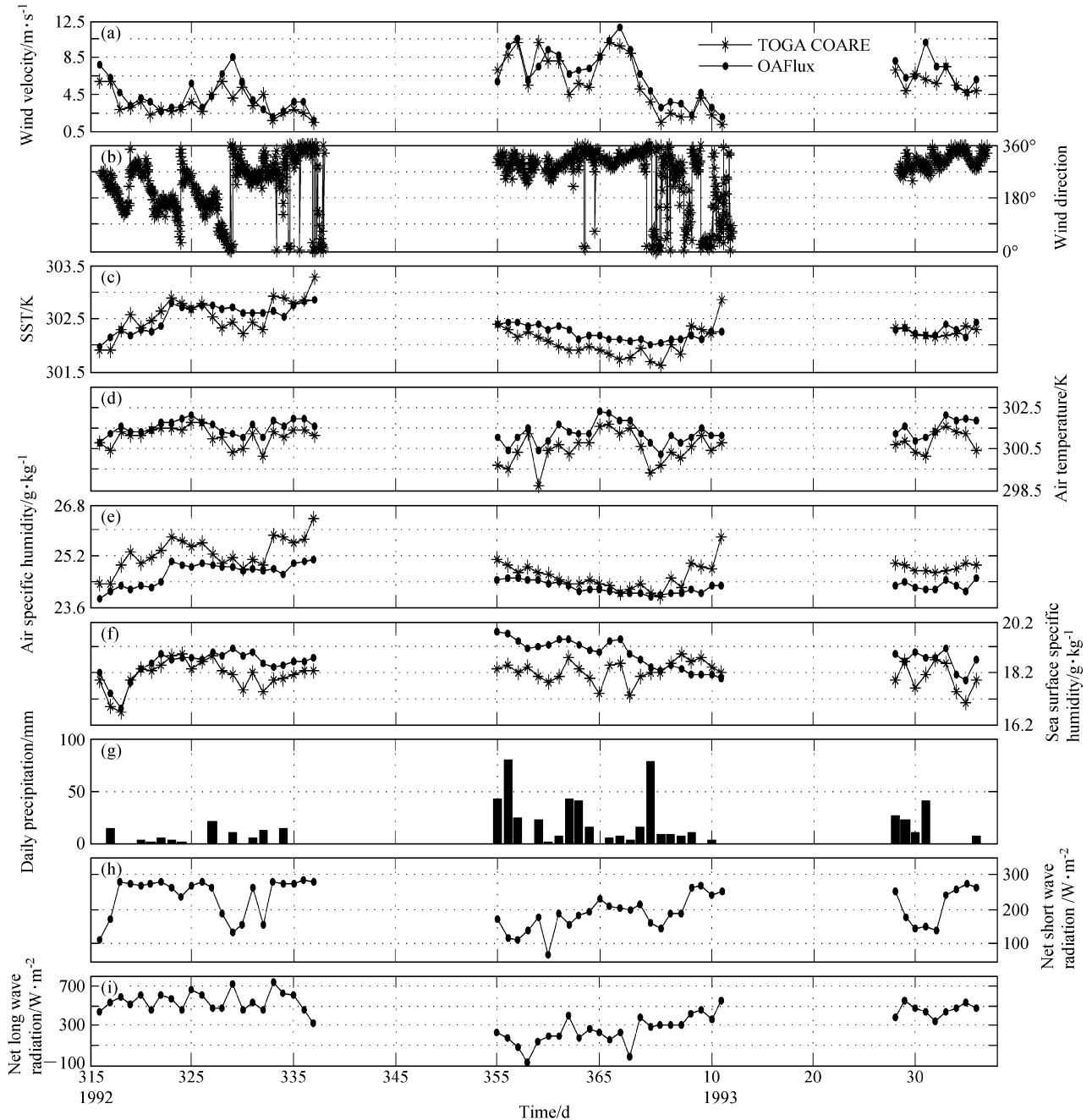


图 1 TOGA COARE 试验区各气象要素时间序列图: (a) 平均风速; (b) 风向; (c) 海表平均温度 (SST); (d) 空气平均温度; (e) 空气平均比湿; (f) 海表平均湿度; (g) 日降水量; (h) 净短波辐射; (i) 净长波辐射。星线代表 TOGA COARE 船测值, 点线代表 OAFflux 值

Fig. 1 The time series of (a) mean wind velocity, (b) wind direction, (c) mean sea surface temperature, (d) air temperature, (e) mean air specific humidity, (f) sea surface specific humidity, (g) daily precipitation, (h) net short-wave radiation, and (i) net long-wave radiation. The star line represents the TOGA COARE measured values on board, the dot line represents the values of OAFflux during TOGA COARE experiments

为 $4.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这些明显的差异可能是由于观测点附近 OAFflux 网格点上的风速较大, 影响了插值结果。最小差异在第 33 日 (即 2 月 2 日), 是船测值大于 OAFflux 值 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 风向: 只有船测值, 整体来看, 西北风较多, 其中 1992 年的第 355 至 364 日 (即 12 月 20 日至 12 月 29 日), 1993 年的第 28 日至第 36 日 (即 1 月 28 日至 2 月 5 日), 风向 (西北风) 整体趋于平稳状态, 风向变化差异不大。

(3) 海表温度: 最大差异出现在 1993 年的第 1 日 (即 1 月 1 日), 船测值大于 OAFflux 值 0.62 K ; 最小差异出现在 1992 年的第 325 日 (即 11 月 20 日), 船测值小于 OAFflux 值 0.01 K ; 从整体来看, 海表温度是 OAFflux 值大于船测值的。

(4) 空气温度: OAFflux 值明显大于船测值, 最大差异出现在 1992 年的第 359 日 (即 12 月 24 日), 为 1.63 K ; 最小差异出现在第 321 日 (即 11 月 16 日), 船测值大于 OAFflux 值 0.02 K 。

(5) 海表比湿: 最大差异在 1993 年的第 11 日 (即 1 月 11 日), 船测值大于 OAFflux 值 $1.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小差异出现在 1993 年的第 1 日 (即 1 月 1 日), 船测值大于 OAFflux 值 $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(6) 空气比湿: OAFflux 值普遍大于船测值, 最大差异在 1993 年的第 2 日 (即 1 月 2 日), 为 $1.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小差异在 1992 年的第 320 日 (即 11 月 15 日), 船测值略大于 OAFflux 值, 几乎为 0。可以看到, 海气温差和湿度差都大于 0, 这说明, 近洋面大气温度小于海表温度, 有热量从海表向大气输送, 近洋面空气比湿小于海表湿度, 从而有水汽从洋面向大气输送。

(7) 日降水量: 只有船测值, 由图 1g 可以看到, 降雨主要集中在 1992 年的第 355 日 (即 12 月 20 日) 至 1993 年的第 11 日 (即 1 月 11 日) 以及 1993 年的第 28 日至 31 日, 其余时间段, 降雨很少, 甚至没有。

(8) 净短波辐射和净长波辐射只有 OAFflux 值, 由图 1h 和图 1i 中可以看出, 在晴好天气, 辐射明显增强; 其中长波辐射值明显高于短波辐射值。

图 2 是 KAWJEX 试验区的各气象要素时间序列, 断点表示缺测。TOGA COARE 试验区在南半球, 而 KAWJEX 试验区在北半球, 两者经度

差异约为 11° , 之所以再增加一个试验区域进行验证, 使得我们能够进一步明确 OAFflux 资料的精确性, 从而改进气候模式模拟结果质量时, 有据可循。可以看到:

(1) 风速: OAFflux 值普遍大于船测值, 最大差异在第 247 日 (即 9 月 3 日), 为 $4.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小差异在第 222 日 (即 8 月 9 日), 为 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 风向: 除个别时间段, 主要以偏东风为主。

(3) 海表温度: 船测值普遍大于 OAFflux 值, 最大差异出现在第 255 日 (即 9 月 11 日), 达 1.29 K , 最小差异出现在第 252 日 (即 9 月 8 日), 为 0.01 K 。

(4) 空气温度: OAFflux 值普遍大于船测值, 最大差异出现在第 227 日 (即 8 月 14 日), 达 0.83 K , 最小差异出现在第 243 日 (即 8 月 31 日), 达 0.04 K 。

(5) 海表比湿: 船测值普遍大于 OAFflux 值, 最大差异在第 255 日 (即 9 月 11 日), 为 $2.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小差异在第 235 日 (即 8 月 22 日), 且为 OAFflux 值大于船测值 $0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(6) 空气比湿: 整体上是 OAFflux 值大于船测值, 最大差异在第 246 日 (即 9 月 2 日), 达 $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小差异在第 236 日 (即 8 月 23 日), 达 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(7) 日降水量: 除第 211 日 (即 7 月 29 日), 218 日 (即 8 月 5 日) 和 224 (即 8 月 11 日) 日时间段降水比较明显, 其余时间降水很少。

(8) 净辐射: 明显的看到, 在阴天, 由于云的强迫效应, 辐射减小。

综合图 1 和图 2 可见, OAFflux 值和船测值有差异, 有降雨时比晴好天气时差异要大。这和 OAFflux 本身是遥感资料有关, 其输入数据海表温度来自卫星反演数据, 而此数据由辐射计测得, 当有降雨, 或受其它因素干扰时, 辐射计测量数据的任何一点差异都有可能造成资料本身较大的误差。

3.2 潜热通量的比较

图 3 和图 4 分别是 TOGA COARE 试验区和 KAWJEX 试验区的观测值, 在分析潜热通量之前, 潜热通量的公式:

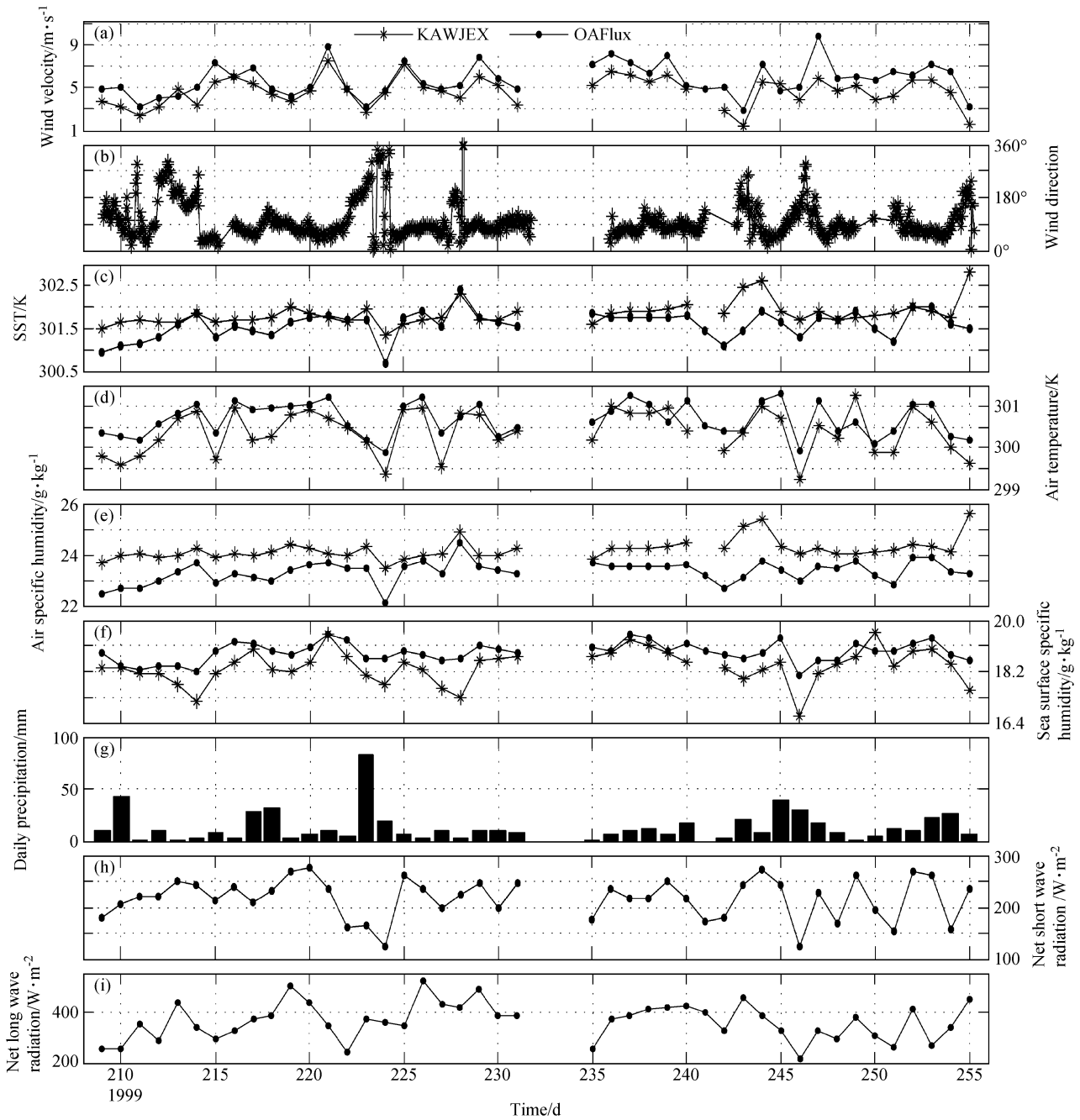


图2 与图1相同, 但为 KAWJEX 试验区

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for KAWJEX experiment area

$$Q_{LH} = \rho L_e C_e U (q_s - q_a), \quad (2)$$

其中, L_e 是潜热输送系数, C_e 为水汽输送系数, U 为 10 m 高度处的平均水平风速, q_s 是在海表温度下的饱和空气比湿, q_a 是近海面空气比湿, 可知, 潜热通量直接与平均风速和海表与大气湿度差有关。

由图 3 可知, TOGA COARE 试验区的潜热

通量, 整体是 OAFlux 试验值大于船测值, 其中, 1992 年的第 332 日 (即 11 月 27 日), 第 359 日 (即 12 月 24 日) 和第 365 (即 12 月 30 日) 日, 船测值大于 OAFlux 值较明显。为了进一步理解上述差异的根源, 我们分 3 个观测期来分析, 第一观测期是从 1992 年的第 315 日 (即 11 月 10 日) 至第 337 日 (即 12 月 2 日), 第二观测期是

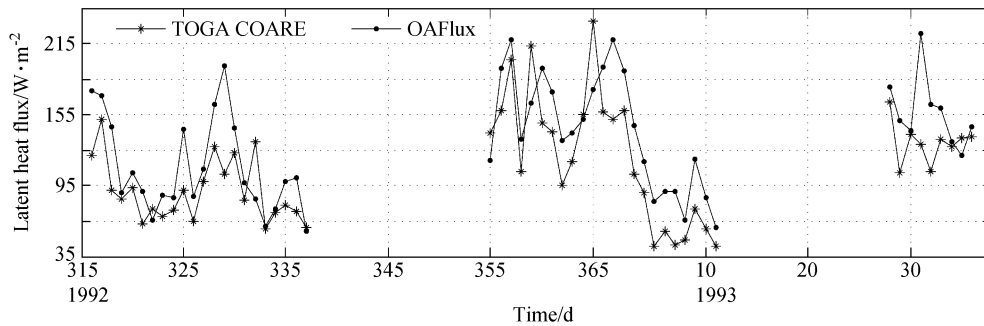


图3 TOGA COARE 试验区潜热通量。星线代表 TOGA COARE 船测值，点线代表 OAFflux 值

Fig. 3 The latent heat flux of TOGA COARE experiment area. The star line represents the TOGA COARE measured value on board, the dot line represents the value of OAFflux

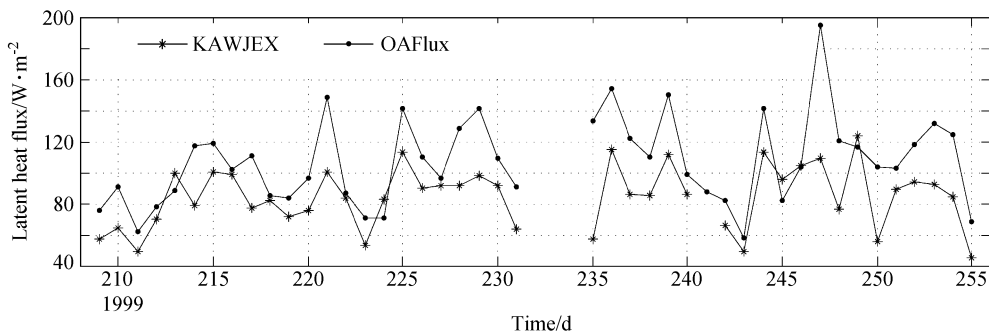


图4 与图3 相同，但为 KAWJEX 试验区

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for KAWJEX experiment area

从1992年的第355日（即12月20日）至1993年的第11日（即1月1日），第三观测期是从1993年的第28日（即1月28日）至第36日（即2月5日）。具体分析由表1详细给出，可以看到，第一观测期，两者最大差异出现在第329日（即11月24日），为 $91.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温的观测值分别为 $4.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 302.44 K 、 300.33 K ，风向在 $226^\circ \sim 354^\circ$ 之间；最小差异出现在1992年的第333日（11月28日），为 $2.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温分别为 $1.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 302.92 K 、 301.31 K ，风向在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 和 $318^\circ \sim 360^\circ$ 之间；第二观测期，两试验值最大差异出现在1993年的第1日（即1月1日），为 $67.45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温分别为 $9.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 301.72 K 、 301.20 K ，风向在 $301^\circ \sim 325^\circ$ 之间，最小差异出现在1992年的第364日（即12月29日），为 $4.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温分别为 $5.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 301.98 K 、 300.77 K ，风向在 $0^\circ \sim 65^\circ$ 和 $344^\circ \sim 360^\circ$ 之间；第

三观测期，两试验值最大差异出现在第31日（即1月31日），为 $93.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温分别为 $6.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 302.18 K 、 300.17 K ，风向在 $257^\circ \sim 350^\circ$ 之间；最小差异出现在第30日（即1月30日），为 $3.00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时风速、海温、气温分别为 $6.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 302.20 K 、 300.31 K ，风向在 $271^\circ \sim 292^\circ$ 之间；重点分析1993年第36日（即2月5日）两者潜热通量差异，可以看到，OAFflux 值要大于船测值，对应看图1，当日风速也是 OAFflux 值大于船测值，而湿度差 OAFflux 值要小于船测值，换言之，湿度差对潜热通量的影响要远远小于风速对其影响，再横向看，从第35日至第36日，OAFflux 测得的潜热通量值上升幅度明显大于船测值，再看图1，风速的上升幅度亦是如此，而湿度差 OAFflux 值几乎不变，船测值略有下降，并且这些差异都不受当日降水，辐射的影响。总体看来，由于海表和空气的湿度差变化不大，TOGA COARE 和 OAFflux 的潜热通量变化趋势与风速的变化趋势基本一致，

表 1 潜热通量出现最大和最小差异时各气象要素的特征
Table 1 The characteristics of various meteorological elements when the differences of the two latent heat fluxes are maximum and minimum

潜热通量最大差异时						潜热通量最小差异时					
时间	潜热通量 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	海温 /K	气温 /K	风向	时间	潜热通量 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	海温 /K	气温 /K	风向
第一观测期 1992 年 11 月 24 日	91.07	4.12	302.44	300.33	226°~354°	1992 年 11 月 28 日	2.13	1.63	302.92	301.31	0°~3°, 318°~360°
第二观测期 1993 年 1 月 1 日	67.45	9.70	301.72	301.20	301°~325°	1992 年 12 月 29 日	4.09	5.19	301.98	300.77	0°~65°, 344°~360°
第三观测期 1993 年 1 月 31 日	93.02	6.11	302.18	300.17	257°~350°	1993 年 1 月 30 日	3.00	6.61	302.20	300.31	271°~292°

表 2 与表 1 相同, 但为 KAWJEX 试验区
Table 2 Same as Table 1, but for KAWJEX experiment area

潜热通量最大差异时						潜热通量最小差异时					
时间	潜热通量 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	海温 /K	气温 /K	风向	时间	潜热通量 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	海温 /K	气温 /K	风向
第一观测期 8 月 8 日	48.58	7.44	301.74	300.71	41°~93°	8 月 5 日	2.70	4.30	301.76	300.29	82°~115°
第二观测期 9 月 3 日	85.64	7.80	301.81	300.82	41°~93°	9 月 2 日	1.03	3.94	301.72	299.23	24°~91°

这符合潜热公式 2 其中, 当海表和空气的湿度差恒定时, 潜热通量与风速成正比关系的规律。

由公式 2 还可以看出, 潜热通量与湿度差也成正比关系, 当风速相同时, 我们视海表空气比湿为饱和比湿, 其值与空气湿度之差越大, 潜热通量越大, 以第 365 日 (即 12 月 30 日) 为例, 由图 1 可以看出当日风速的船测值和 OAFlux 值相当, 而两者海—气湿度差, 船测值大于 OAFlux 值明显, 再由图 3 可知, 两者潜热通量, 也是船测值远远大于 OAFlux 值。

图 4 是 KAWJEX 试验区的潜热通量, 分两个观测期, 前一观测期是从 1999 年的第 209 日至 231 日 (即 7 月 27 日至 8 月 18 日), 地点在 (8.4°N, 167.7°E), 后一观测期是从第 235 日至第 255 日 (即 8 月 21 日至 9 月 11 日), 地点在 (8.5°N, 167.5°E)。可以看到, 整体上潜热通量依然是 OAFlux 值大于船测值, 前一观测期, 两试验值最大差异出现在第 221 日 (即 8 月 8 日), 为 $48.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温的观测值分别为 $7.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、301.74 K、300.71 K, 风向在 41°~93°; 最小差异出现在第 218 日 (即 8 月 5 日), 为 $2.70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温分别为 $4.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、301.76 K、300.29 K,

风向在 82°~115°; 后一观测期两试验值最大差异出现在第 247 日 (即 9 月 3 日), 为 $85.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温的观测值分别为 $7.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、301.81 K、300.82 K, 风向在 41°~93°; 最小差异出现在第 246 日 (即 9 月 2 日), 为 $1.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温分别为 $3.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、301.72 K、299.23 K, 风向在 24°~91°。总体看来, 风速对潜热通量的影响起主导作用, 湿度差有影响, 但影响不大, 以图 4 中第 247 日 (即 9 月 3 日) 潜热通量为例, 再联系图 2 中当日的风速, 湿度差情况, 不难看出, 风速对热通量的作用要远远大于海—气湿度差的作用。

3.3 感热通量的比较

和潜热通量的分析相似, 分两个区域讨论。感热通量的公式:

$$Q_{SH} = \rho_p c_p U (T_s - T_a), \tag{3}$$

其中, c_p 为定压比热, C_h 为热量整体输送系数, T_s 是海表温度, T_a 是近海面大气温度。可见, 感热通量取决于风速和海气温差。

由图 5 可以看出, 感热通量值明显小于潜热通量值, 这说明热带海洋主要通过海表的潜热输送 (即水汽蒸发) 方式向大气释放能量, 而感热通量的量值与观测仪器的误差 (0~50

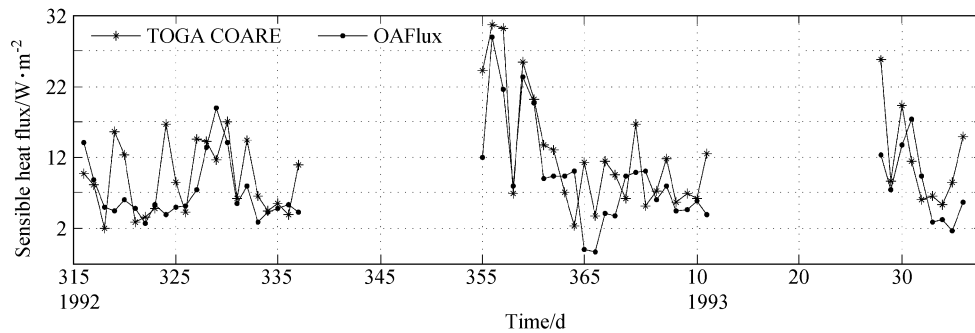


图5 TOGA COARE 试验区感热通量。星线代表 TOGA CORE 船测值，黑色点线代表 OAFflux 值

Fig. 5 The sensible heat flux of TOGA COARE experiment area. The star line represents the TOGA CORE measured value of ship, the dot line represents the value of OAFflux

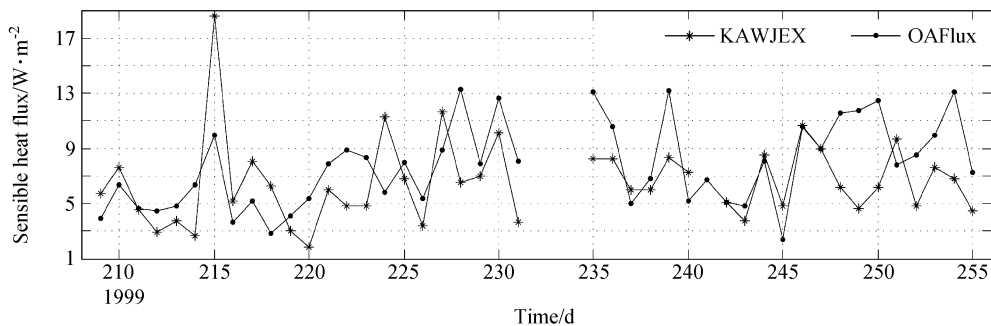


图6 与图5相同，但为 KAWJEX 试验区

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for KAWJEX experiment area

$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 十分接近, 且仅占潜热通量的大约 $1/4$, 不是海表可用能量的主要消费者。另外可以看出, 船测值和 OAFflux 值基本相当, 但在 1992 年的第 317 至第 325 日 (即 11 月 12~20 日), 两者差异较大, 这可能是由于观测仪器本身误差引起的。因为 OAFflux 值是由风速, 温度反演而来, 任何气象要素的微小误差, 都会引起感热通量的较大差异, 其误差甚至超过本身感热通量大小。

由图 6 可以看出, 在 1999 年的两个观测期, 除第 215 日 (即 8 月 2 日) 感热通量船测值大于 OAFflux 值明显, 普遍还是船测值小于 OAFflux 值, 再由图 2 可以看出, 这段时期的风速, 是 OAFflux 值普遍大于船测值, 而海气温差, 是 OAFflux 值普遍小于船测值, 由此可以得出, 风速对感热通量的作用明显高于海气温差。重点分析差异颇大的第 215 日 (即 8 月 2 日) 和第 249 日 (即 9 月 5 日)。第 215 日 (即 8 月 2 日), 两者差异为 $8.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温分别为 $6.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 301.46 K 、 300.04 K , 风

向在 $16^\circ \sim 83^\circ$; 第 249 日, 两者差异为 $7.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时风速、海温、气温分别为 $5.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 301.82 K 、 300.94 K , 风向在 $108^\circ \sim 111^\circ$, 并且可以看到从第 248 至 249 日, 两者变化趋势相反, OAFflux 测得的感热通量值轻微上升, 而船测值明显下降。对应看图 2, 可以发现, 风速从前一日到当日, 两者都略有上升, 而温度差, OAFflux 值略有上升, 船测值则明显下降, 其下降幅度要远大于风速上升幅度。究其原因, 当日船测值测得的空气温度要比前一日高出很多, 而 OAFflux 值变化不大, 这也就合理解释了当日 OAFflux 值误差很大的原因。

3.4 讨论

图 7 给出了潜热通量和感热通量的船测值和 OAFflux 值的对比分析。

总体而言, OAFflux 得到的潜热通量值比船测值偏高, 尤其在潜热通量值比较大的时刻, 两者差别显著, 如果将风速划分为 3 个区间: 低风速 ($U < 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、中等风速 ($4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq U <$

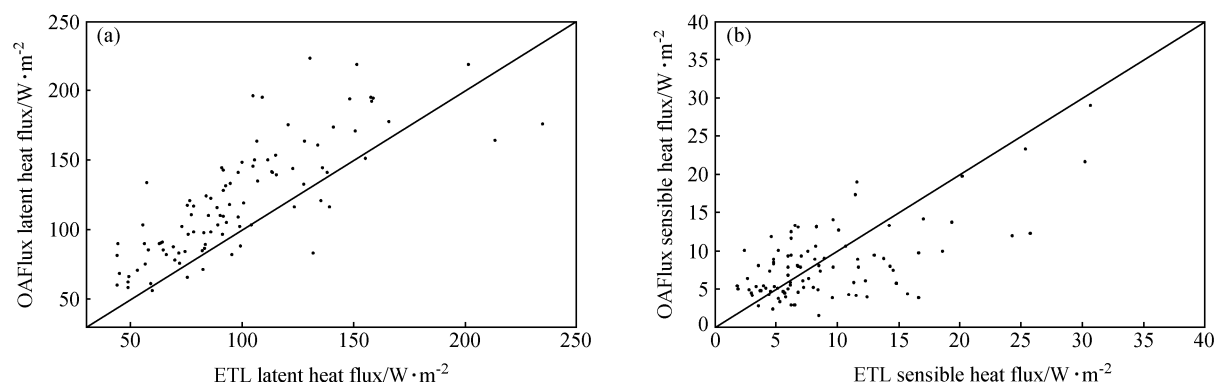


图7 (a) 潜热通量、(b) 感热通量 OAF flux 值与 ETL 船测值的对比分析

Fig. 7 Comparison between the OAF flux values and ETL (Environmental Technology Laboratory) measurement values; (a) Latent heat flux; (b) sensible heat flux

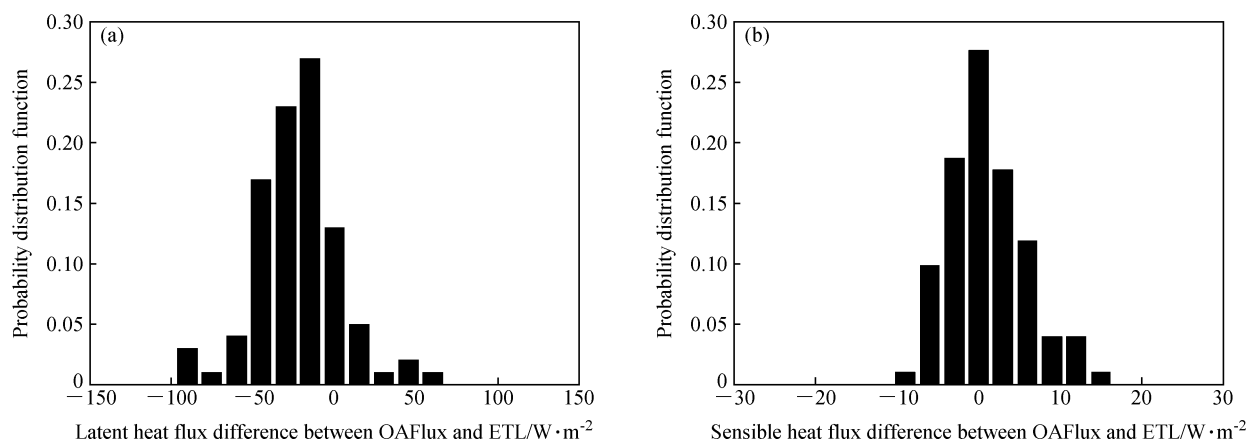


图8 (a) 潜热通量、(b) 感热通量 OAF flux 值与 ETL 船测值的差值概率分布图

Fig. 8 The probability distribution functions of OAF flux and ETL; (a) Latent heat flux; (b) sensible heat flux

$10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、强风速 ($U \geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，则可以发现，两者差别较大时，为中高风速，而两者差别较小时，为低中风速。还可以看到，海上潜热通量值主要集中在 $80 \sim 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间，而这一量值显然比感热通量要大得多，在弱感热交换条件下，测量值已经十分接近观测仪器本身的误差，此时误差较大。此外可以发现，OAF flux 的感热通量值有高估也有低估，但是经过定量分析，无论是高估还是低估，此时风速、海温和气温并没有明显规律。

再通过 OAF flux 值与船测值的差值概率分布图 (图 8) 可以更加直观地看出两者之间的差异。由图 8 明显看到，潜热通量，普遍是 OAF flux 值小于船测值；而感热通量，概率分布在 0 值两端较为对称。

4 总结

本文利用 NOAA ETL 的两个航测 (TOGA COARE 试验值和 KAWJEX 试验) 观测资料对 OAF flux 的热通量进行验证，研究 OAF flux 的偏差。结果表明：(1) 潜热通量：OAF flux 值普遍高于船测值，并且在热通量值本身较大时，两者差异较大。风速对潜热通量的变化趋势起主导作用，湿度差影响甚微。此外，当两者潜热通量差异较大时，主要为中高风速，两者差异很小出现在低中风速的条件下。在这两种情况下，海温、气温和风向都没有明显日变化规律性。(2) 感热通量：海面感热交换很弱，通量值本身依然受到风速的主导作用，但由于测量值已经十分接近观

测仪器本身误差, 导致误差分析意义不大, 所以本文对感热通量值误差分析相对较少。

上述两个试验的观测期内, 海表空气湿度和大气的湿度差变化不显著, 海气相互作用的强度主要取决于海面风速的变化, 因此, 可以通过改善输入风数据, 来进一步改进 OAFflux 中的热通量场, 从而利用其检验模式模拟结果时, 可信度更高。

参考文献 (References)

- 班军梅. 2010. 基于大气环流模式 CAM3 的海—气界面湍流通量算法研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 1, 16. Ban Junmei. 2010. Study of air-sea surface turbulent fluxes algorithm in Community Atmosphere Model version3 (CAM3) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1, 16.
- Bunker A F. 1976. Computations of surface energy flux and annual air-sea interaction cycles of the North Atlantic Ocean [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 104: 1122–1140.
- Da Silva A M, Young C C, Levitus S. 1994. Atlas of Surface Marine Data, Vol. 3: Anomalies of Heat and Momentum Fluxes [DB]. NOAA Atlas NESDIS 8, 413pp.
- 丁一汇, 张锦, 徐影, 等. 2003. 气候系统的演变及其预测 [M]. 北京: 气象出版社, 27, 31, 70. Ding Yihui, Zhang Jin, Xu Ying, et al. 2003. The Evolution and Prediction of the Climate System (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 27, 31, 70.
- Esbensen S K, Kushnir V. 1981. The heat budget of the global ocean; An atlas based on estimates from surface marine observations [R]. Climate Research Institute, Oregon State University Tech. Rep. 29, 271pp.
- Fairall C W, Barnier B, Berry D I, et al. 2009. Observations to quantify air-sea fluxes and their role in climate variability and predictability [C] // Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Vol. 2. OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Noordwijk. The Netherlands: European Space Agency.
- Hsiung J. 1986. Mean surface energy fluxes over the global ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 91: 10585–10606.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis [R]. Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press.
- Isemer H J, Hasse L. 1987. The Bunker Climate Atlas of the North Atlantic Ocean: Air-Sea Interactions [M]. New York: Springer-Verlag, 252pp.
- Josey S A. 2001. A comparison of ECMWF, NCEP-NCAR, and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the subduction region of the northeast Atlantic [J]. *J. Climate*, 14: 1780–1789.
- Josey S A, Kent E C, Taylor P K. 1999. New insights into the ocean heat budget closure problem from analysis of the SOC air-sea flux climatology [J]. *J. Climate*, 12: 2856–2800.
- Oberhuber J M. 1988. An atlas based on the 'COADS' data set: The budgets of heat, buoyancy and turbulent kinetic energy at the surface of the global ocean [R]. Max-Planck-Institut für Meteorologie Rep. 15, 20pp.
- Smith S R, Legler D M, Verzone K V. 2001. Quantifying uncertainties in NCEP reanalyses using high-quality research vessel observations [J]. *J. Climate*, 14: 4062–4072.
- Wang W M, McPhaden M J. 2001. What is the mean seasonal cycle of surface heat flux in the equatorial Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 837–857.
- WCRP/GEWEX. 1996. Report of the eighth session of the working group on radiative fluxes [R]. WCRP Informal Rep. 13/1996, Killiney Bay, Dublin, Ireland, 26 pp.
- Wentz F J. 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 8703–8718.
- 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 [J]. *海洋预报*, 22 (4): 1–13. Yang Qinghua, Zhang Wenfei, Sun Lantao, et al. 2005. Comparative analyses on a case of the air-sea interface heat flux estimated by the coare algorithm [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 22 (4): 1–13.
- Yu L S, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 527–539.
- Yu L S, Weller R A, Sun B M. 2004a. Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988–99) by a synthesis approach [J]. *J. Climate*, 17: 373–393.
- Yu L S, Weller R A, Sun B M. 2004b. Mean and variability of the WHOI daily latent and sensible heat fluxes at in situ flux measurement sites in the Atlantic Ocean [J]. *J. Climate*, 17: 2096–2118.
- Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. *J. Climate*, 11: 2628–2644.
- 赵鸣. 2000. 关于海面湍流通量参数化的两种方案试验 [J]. *气象科学*, 20 (3): 317–325. Zhao Ming. On the experiments of two schemes about the computation of fluxes over sea [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 20 (3): 317–325.