

文章编号: 1674-5566(2018)01-0149-12

DOI:10.12024/jsou.20170502057

## 基于海气耦合浮标分析北欧海夏季海气热通量及其对 ERA-Interim/OAFlux 的评估

刘喻道<sup>1,2</sup>, 高郭平<sup>1,2</sup>, 赵进平<sup>3</sup>, 矫玉田<sup>3</sup>, 王晓宇<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 基于 2012 年我国首次在北欧海进行了 23 d 连续的现场浮标观测的海表面空气温度、湿度、风速和海表皮温等观测资料, 利用 COARE 3.5 块体算法计算得到海气界面湍流热通量, 感热通量为  $9.34 \text{ W/m}^2$ , 潜热通量为  $31.55 \text{ W/m}^2$  (海洋向大气为正)。ERA-Interim 和 OAFlux 是国际通用的海洋气象数据集, 将浮标观测结果与两类数据集进行了对比分析和验证。结果显示: 北欧海暖流区夏季海气温差对于海气界面的感热输送起到主要影响作用, 而在中低风速 ( $< 10 \text{ m/s}$ ) 的情况下对潜热输送起主导作用的是海气间的湿度差。在夏季北欧海暖流区域内 ERA-Interim 和 OAFlux 相对于使用 COARE 计算的浮标感热通量分别偏高和偏低 12.58% 与 26.33%, 造成差异的主要因素是两个数据集对海表皮温和海表气温的估算误差; ERA-Interim 和 OAFlux 对潜热通量分别偏高 17.54% 和 7.76%, 造成差异的原因是对海表空气湿度的估算误差。

**关键词:** 浮标观测; 北欧海; 热通量; COARE 3.5; OAFlux; ERA-Interim

**中图分类号:** P 733      **文献标志码:** A

北欧海 (The Nordic Seas) 是对格陵兰海 (Greenland Sea)、挪威海 (Norwegian Sea) 和冰岛海 (Iceland Sea) 的统称<sup>[1]</sup>, 被莫恩海脊、Knipovick 海脊和扬马延破碎带分成了 3 个相对独立的海盆, 即格陵兰海盆、罗弗敦海盆和挪威海盆。

作为北大西洋暖流进入极区的唯一通道<sup>[2,3]</sup>, 北欧海是北半球亚极区海洋径向热量输送的最重要通道<sup>[4,5]</sup>, 在运输过程中海洋内部的热量以感热和潜热的方式源源不断向大气中释放, 成为驱动北半球高纬度大气环流的重要一环。研究表明: 北欧海海域是北极涛动 (The Arctic Oscillation, AO) 和北大西洋涛动 (The North Atlantic oscillation, NAO) 的核心区域<sup>[6]</sup>, 海气热交换过程一方面影响北欧海大气下界面的能量收支, 与 AO 存在显著的耦合关系<sup>[7]</sup>; 另一方面海气湍流热交换的变化还会导致局地海表面的冷却, 从而引起上层海洋热含量的异常变化<sup>[1]</sup>, 进

而对北大西洋深层水的形成存在间接影响<sup>[8]</sup>。北欧海海气热量输送的变化还与格陵兰海气旋活动存在密切关系<sup>[9]</sup>, 而格陵兰海气旋活动的路径和强度变化影响着北极大西洋扇区的液态水输送和海冰变化。因此, 研究北欧海海气热通量对于研究整个北半球大尺度大气环流的变化有着重要贡献<sup>[10-11]</sup>。

海气界面湍流热通量的变化对于海洋与大气环流模式的驱动, 海气相互作用的研究, 以及数值天气预报模式的评估和评价等都有重要意义<sup>[12-14]</sup>。然而, 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, JOSEY<sup>[15]</sup> 曾在 2000 年利用 5 个伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 浮标数据对 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 和 ERA-Interim (ECMWF Reanalysis-

收稿日期: 2017-05-16      修回日期: 2017-10-08

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 (2015CB953901)

作者简介: 刘喻道 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向极地海洋学。E-mail: dao027@163.com

通信作者: 高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

Interim)提供的热通量数据集进行过评估,发现二者都存在对潜热通量高估的现象。造成偏差的主要原因:一是块体算法中对海表面粗糙度参数的估算不够精确;二是计算热通量所需的各海气界面要素存在测量误差。这些自身的不确定性限制了利用通量数据集对数值模式产品进行评估<sup>[15-19,30]</sup>,因此,充分利用浮标现场观测数据,改进海气热通量估算方法,以及对目前常用的相关数据产品进行验证和比较评估,显得十分迫切和重要。

FAIRALL等<sup>[20]</sup>于1996年首次提出耦合性海气响应试验(Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, COARE)块体算法,并于2003年改进<sup>[21]</sup>到应用最为广泛的COARE 3.0版本。BRUNKE等<sup>[22]</sup>对12种国际较为通用的块体算法进行了评估,发现在热带和亚热带海域利用COARE 3.0估算的结果最可靠。为了能适用于高纬度海域风速更高的条件,2013年EDSON等<sup>[23]</sup>针对块体算法中的海面粗糙度和拖拽系数,以及查诺克系数进行了评估和改进,将COARE 3.0算法改进为在中高风速(13~25 m/s)条件下计算更精准的3.5版本。除改进算法以外,想要获得接近真实的海气热通量还需要对海气界面各要素的取值大小进行估算,这就需要借助观测船、海气耦合浮标等海洋平台的现场观测结果进行验证和校正<sup>[24-28]</sup>。

2012年夏季中国第五次北极科学考察期间,考察队在北欧海海域(70°N,5°E)布放了一套锚碇式海气耦合浮标。本文主要基于该浮标观测的海气参数(海表温度、海面气温、空气湿度和海表风速等),分析了各海气要素的分布变化特征,并使用COARE 3.5块体法计算了该处海气界面的湍流热通量,并与两个全球通用的再分析数据集,即英国的欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的最新再分析数据集ERA-Interim和WHOI提供的客观性分析海气通量数据集(Objectively Analyzed air-sea Fluxes, OAFflux)进行了对比和评估。

## 1 资料来源及计算方法

### 1.1 资料来源

#### 1.1.1 海气耦合浮标观测资料

为获得北欧海相关海气参数的现场第一手资料,在国家极地专项的支持下,于2012年夏季中国第五次北极考察期间,首次在北欧海海域的罗弗敦海盆(70°N,5°E)投放了一个大型海气耦合浮标(图1)。在浮标上的气象观测平台距水面3、5、7、9 m处,安装有观测湍流和气象要素的传感器,浮标下部还装有观测海表波浪、水温和盐度的传感器。

气象要素观测数据主要来自梯度观测仪和分量辐射传感器及要素自动传感器。其中梯度观测仪能够对距海表3 m、5 m、7 m、9 m高度的4个分层进行采样,获取的气象要素主要包括风速风向、空气温度、空气湿度和大气压强,以及海表皮温等;分量辐射传感器能够提供海气界面的入射(向下)和反射(向上)长波及短波辐射通量;自动要素传感器作为备用系统,会同时对风、温、湿、压等进行连续观测,以保证数据质量。所有传感器的采样周期均设定为30 min。由于受恶劣环境条件的影响,该浮标获得了2012年8月5日至27日,共计23 d的有效观测数据。

#### 1.1.2 再分析数据产品

(1) ERA-Interim再分析数据集选取了ECMWF的再分析资料集ERA-Interim来做对比分析。ERA-Interim是ECMWF继ERA40(40年再分析资料)之后推出的一套新的再分析资料,在时间段上有部分和ERA40数据重叠(1989—2002)并且由三维同化系统变成四维同化系统,更改了模型参数,水平分辨率由T159(1.125°)加强到T255(0.703°),应用了更多的卫星和地面观测资料等<sup>[18]</sup>,提高了数据集的精度。本文使用的日变化场数据包括海气界面感热通量、潜热通量、海表面10 m风速、海表面2 m大气温度和海表面空气湿度及海表温度,其空间分辨率选为1°×1°,为了与浮标数据做比较分析,时间跨度选为2012年8月5日至27日,时间分辨率为12 h。

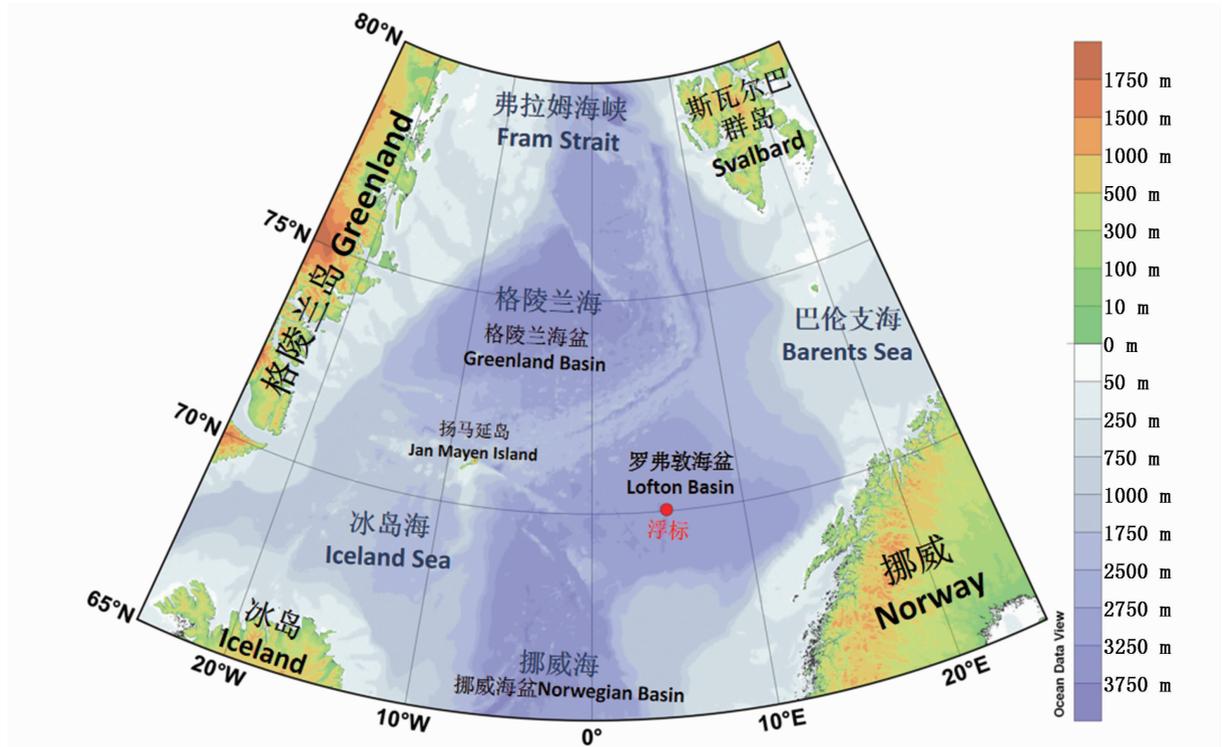


图1 研究海域地形及浮标位置

Fig.1 Topography of the Nordic Seas and location of the moored buoy

(2) OAFlux 混合资料。OAFlux 数据集由 WHOI 研制,其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), 风速来自微波成像仪 (Special Sensor Microwave Imager, SSM/I, Wentz, 1997), 海表风矢量来自 QuickSCAT, 海表气象场源于 ECMWF 再分析资料和美国环境预报中心第 2 版再分析资料 (NCEP2)。OAFlux 通过综合卫星资料、NCEP2 和 ECMWF 数值天气预报产品, 利用变分客观分析方法获取与通量相关联海表基本气象变量的最佳估计, 再利用 COARE 块体算法计算潜热和感热通量场<sup>[29]</sup>。数据集的有效时期为 1958 年至 2014 年, 空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ , 数据所在位置为每个经纬网格点  $\pm 0.5^\circ$ 。

同样为了与实测资料进行对比分析, 仅选取了 2012 年 8 月 5 日至 27 日时间段, 其海洋气象要素包括海表面风速和海表面水温、海表面气温、空气湿度, 以及感热通量和潜热通量。由于 OAFlux 数据在空间上的位置定在  $\pm 0.5^\circ$  上, 所以本文选取  $4.5^\circ\text{E}, 70.5^\circ\text{N}$ ;  $4.5^\circ\text{E}, 69.5^\circ\text{N}$ ;  $5.5^\circ\text{E}, 70.5^\circ\text{N}$ ;  $5.5^\circ\text{E}, 69.5^\circ\text{N}$  4 个数据点, 采取最邻近插值法将数据集资料插值到浮标位置进行比

较分析。时间分辨率为天。

## 1.2 计算方法

本文采用的热通量计算方法是目前应用最为广泛的 COARE 3.5 块体算法。从 COARE3.0 开始, 计算过程中使用整体稳定度参数代替 Monin-Obukhov 相似性理论的稳定度参数, 减少了迭代计算所需次数, 由上个版本的 20 多次减少为 3 次。其具体公式为:

$$\text{感热通量为: } H_s = \rho_a C_{p_a} C_h S (T_s - \theta) \quad (1)$$

$$\text{潜热通量为: } H_l = \rho_a L_e C_e S (q_s - q) \quad (2)$$

$$\text{动量通量为: } \tau_i = \rho_a C_d S (u_{si} - u_i) \quad (3)$$

式中:  $\rho_a$  为空气密度,  $C_{p_a}$  为空气的定压比热,  $L_e$  为水气的蒸发潜热,  $T_s$  为海表面海水温度,  $\theta$  为海面上空 (一般取为 10 m) 的空气位温,  $q_s$  为海表面比湿,  $q$  为海面空气比湿 (一般取为 10 m),  $u_{si}$  为海面上空 (同样一般取在 10 m) 在水平方向上的平均风速速率,  $u_i$  为海表面海流在水平方向上的平均流速速率。S 为不考虑阵风影响的近海表平均风速, 实际运算中可以理解为  $S = (u_{si} - u_i)$ 。 $C_d$  为湍流动量交换系数, 也称为风应力的拖拽系数 (drag-coefficient),  $C_h$  为感热交换系数 (即 Stanton number),  $C_e$  为潜热交换系数 (即 Dalton

number)。云底高度一般取为 600 m。

公式(2)中  $q_s$  由温度为  $t_s$  的纯水的饱和比湿计算出,  $q$  则由温度为  $t$  的空气中的饱和比湿与相对湿度算出。计算方式如下:

$$q_s = 0.98q_{sat}(t_s) \quad (4)$$

$$q = RHq_{sat}(t) \quad (5)$$

式中:饱和比湿是指一定的温度和气压下,湿空气达到饱和时的比湿。而比湿是融化在一团空气中的水的质量与这团湿空气的总体质量之间的比。由于海水中有盐分,所以海表面水分子的数量就会相对减少,使得饱和比湿降低,从而抑制水分的蒸发,导致公式(4)中海气界面的比湿需要乘以 0.98。公式(5)中 RH(Relative Humidity)为空气的相对湿度。

## 2 浮标观测及计算结果分析

### 2.1 海表面气象要素及海表皮温

#### 2.1.1 海表气温及海表皮温

对四个高度上测得的温度以 24 h 为时间窗口进行滑动平均(图 2)。其中海表皮温的平均值为 9.11 °C,三层气温较为接近,3 m 和 9 m 的气温平均值都为 8.00 °C,5 m 处的气温均值为 7.75 °C。由图 2 可知海表皮温的变化范围为 7.81 ~ 9.98 °C,其中最高温度出现在 14 日,最低在 5 日。海面以上 3 m 气温变化范围是 5.99 ~ 9.55 °C,最高温度出现在 9 日,最低在 23 日。海面 5 m 处气温变化范围是 5.66 ~ 9.39 °C,最高、最低温度同样出现在 9 和 23 日。最上层 9 m 处的气温从 23 日的最小值(5.74 °C)变化到 11 日的最大值(9.59 °C)。

海面气温变化规律大体一致,从 5 日开始显著提升,在 13—16 日,16—19 日及 19—27 日这 3 个时间段有明显的周期性波动。海面皮温从 5 日至 14 日持续升高 2 °C 左右,从 12 日开始则明显高于气温。海气温差  $T_s - T_a$  变化范围为 -0.7 °C 到 3.5 °C,大部分时间里水温皆高于气温,可能与浮标位于罗弗敦海盆有关,这里是北大西洋暖流在北欧海海域的延伸区,海水温度较高。从 12 日开始温差有明显的 3 段周期性峰值。

#### 2.1.2 海表风速

经平滑处理后的风速时间序列分布见图 2 所示。3 m 处的最大风速为 7.72 m/s(出现在 24

日),最小为 1.06 m/s(出现在 14 日)。5 m 处的最大风速出现在 27 日(8.57 m/s),最小(1.33 m/s),同样出现于 14 日。7 m 处的有效数据显示,第三层最大风速为 7.82 m/s(出现于 9 日),最小值为 1.35 m/s,和前两层相同也出现于 14 日。最上层(9 m)的风速变化范围是 1.40 ~ 8.77 m/s,最小值也是处于 14 日,最大值出现于 27 日。

值得指出的是,三层风速的平均值(从下至上)分别为 4.77 m/s、5.23 m/s 和 5.51 m/s。显而易见,由于受到海面摩擦的影响,导致风速随海面高度的降低从上至下依次减小。观测期间各层风速变化规律基本相同,在 9—11 日和 23—27 日两时间段内有明显的相对高风速峰值,而在 13—14 日风速降至最小值。

#### 2.1.3 海表空气相对湿度

四个不同层上的空气相对湿度经过插值和 24 h 平滑处理后得到如图 2 所示的时间序列分布图。可以看到:3 m 处的空气湿度变化范围是 69.68% ~ 97.95%,在 19 日达到最低值,最高出现在 13 日;5 m 层空气湿度变化范围是 68.53% ~ 99.00%,最大值和最小值同样分别出现在 13 日和 19 日;7 m 层空气湿度变化范围是 69.01% ~ 99.85%,最大最小值出现在和前两层相同的日期;9 m 层空气湿度变化范围是 66.33% ~ 98.95%,因为离海面较远更容易受到空气扰动的影响,因此和前三层不同,最大值出现在 10 日,而最小值出现在 27 日。

四层空气湿度的均值(从下至上)分别为 84.93%,84.59%,85.42% 和 83.80%。它们的变化规律也较为一致,在 5 日至 10 日空气湿度持续增大,到达峰值后基本维持到 14 日,这段时间空气湿度基本处于接近饱和状态。14 日到 19 日空气湿度由近饱和状态骤降至 70%,最后一周稳定在 75% 左右。

#### 2.1.4 海面气压

由图 2 可见,海面气压平均值为 1 009.8 hPa,最大值为 1 022.1 hPa,出现在 15 日,最小值为 987.9 hPa,时间处于 24 日。大气压在 19 日到 24 日有显著降低,对照该时间段海气温差和风速明显增大的分布,推测这里呈现的低气压有可能是小型气旋过境所致。

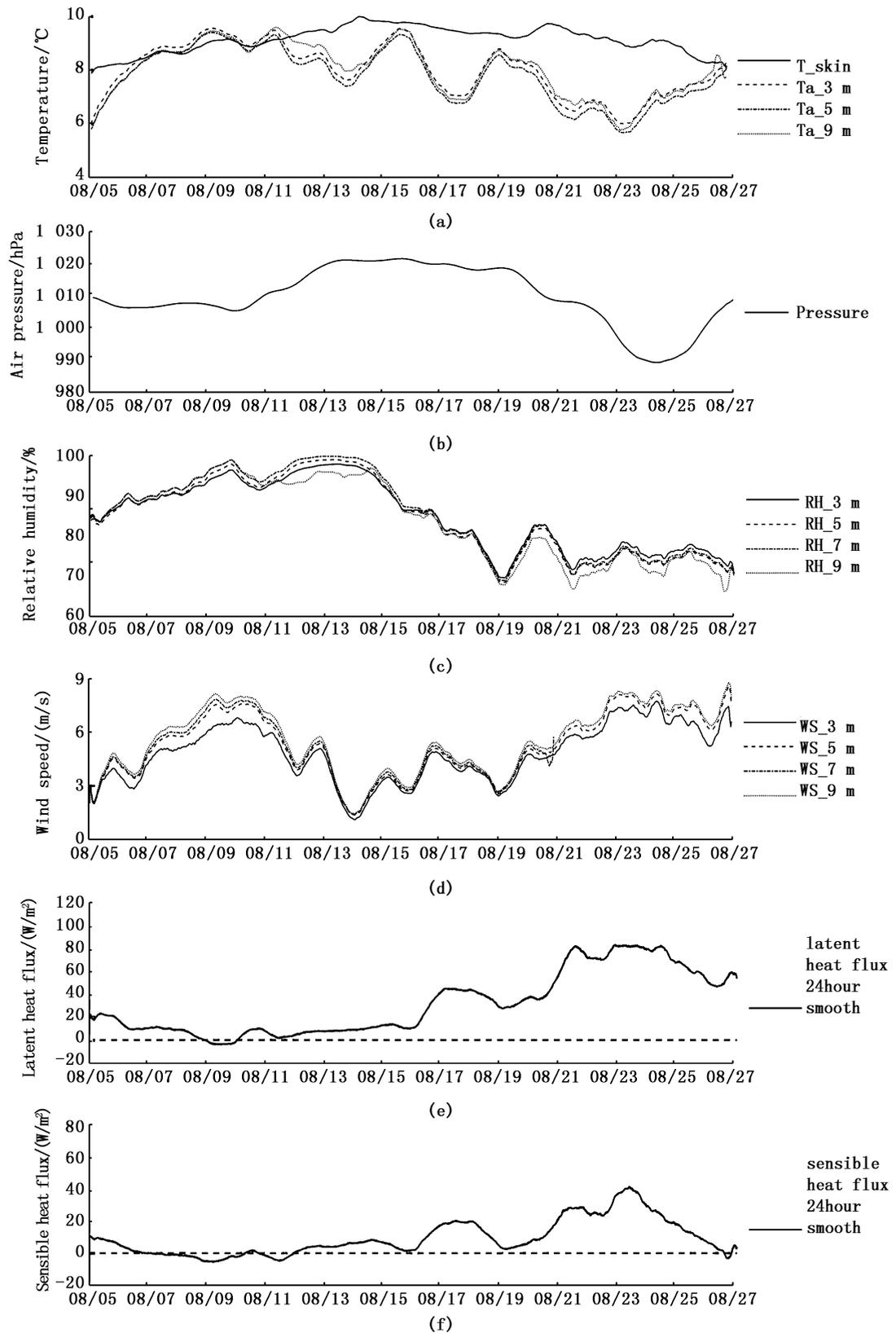


图 2 源标观测的海气界面各要素的时间序列

Fig. 2 Time series of variables near air-sea interface observed on buoy

(a) 海表气温及海表皮温; (b) 海面气压; (c) 海面相对湿度; (d) 海面风速; (e) 潜热通量; (f) 感热通量

(a) represents for air & skin temperature; (b) for air pressure; (c) for relative humidity; (d) for wind speed; (e) for latent heat flux and f for sensible heat flux

## 2.2 海气界面湍流热通量估算及分析

### 2.2.1 感热通量

2012年8月5日至27日浮标位置海气界面感热通量变化范围是 $-5.21 \sim 41.15 \text{ W/m}^2$ ,海洋向大气为正(图2)。其最大值出现在23日,最小值出现在9日。这23天的平均值为 $9.34 \text{ W/m}^2$ 。图2也显示出,北欧海罗弗敦海盆海域在夏季以海洋向大气释放热量为主,除了8日到12日这几天是大气向海洋输送热量,其余时间里感热通量基本都为正值。可以发现感热通量和海气温差的变化较为一致,在最后一周的时间里温差达到最大值,感热通量也同样达到最大值。

### 2.2.2 潜热通量

由图2可以看到,2012年夏季三周中该处海域潜热通量的变化范围是 $-3.59 \sim 82.81 \text{ W/m}^2$ ,

同样取海洋向大气为正。最大值和最小值分别出现在23日和9日。这23天潜热通量的平均值为 $31.55 \text{ W/m}^2$ 。图2中也显示除了9日外,其他时间都是海洋向大气输送(潜热)热量的,并且潜热通量远大于该海域感热通量(约为3.4倍)。在21日潜热通量显著提升也说明海表面风速、海表面空气湿度是影响其变化的主导因素。

为进一步研究热通量的变化规律,同时为排除太阳辐射日夜变化对海气界面热量交换的影响,将求得热通量数据进行24 h滑动平均然后进行了频谱分析(图3)。由于观测时间为23 d,因此谱分析仅考虑周期小于12 d的物理过程。结果显示潜热通量的可信特征频率为0.326(循环/天),即存在3 d左右的变化周期。

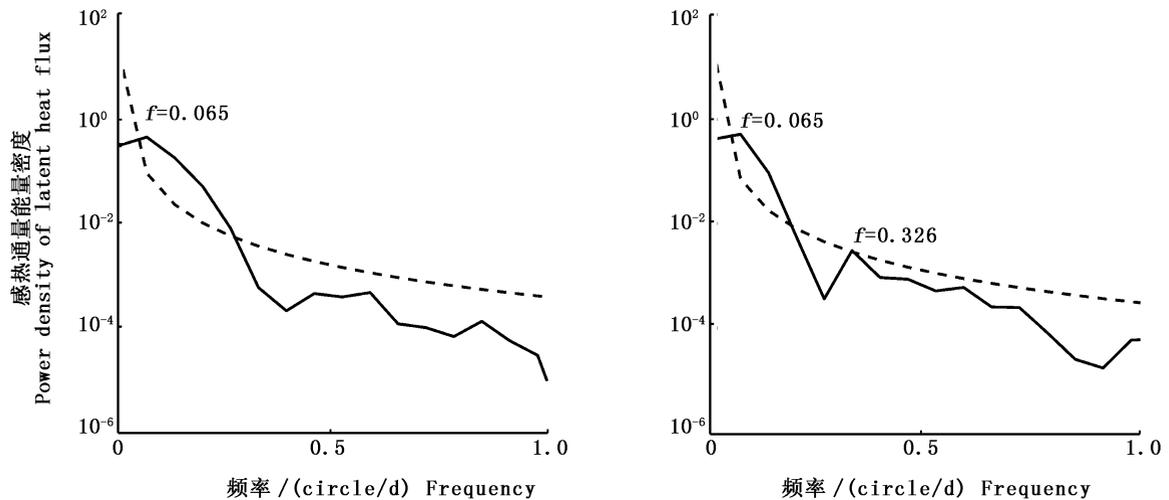


图3 感热(左)及潜热(右)通量时间序列的能量-频率谱,实线为频谱,虚线为95%置信水平

Fig.3 Spectrum of the 24 hour running mean buoy sensible heat flux(left) and latent heat flux(right) solid line as the spectrum and dashed line is the 95% confidence level

## 3 浮标产品对其他两类数据集的评估

### 3.1 海表面气象要素及海表皮温对比

#### 3.1.1 海表气温

通过对比2 m气温和实测海表气温数据的统计特征,发现两类综合数据集对气温的估算存在一定偏差,它们相对浮标的平均偏差分别是 $0.42 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.89 \text{ }^\circ\text{C}$ ,分别高估了气温的5.22%和11.15%。从平均的角度看,ERA-I的数据相对偏

差小很多,估算更加可靠。从均方根误差上看,ERA-I值为 $0.81 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在各时间点上相对于OAFflux的 $1.09 \text{ }^\circ\text{C}$ 偏离真实值更小。两者和实测气温的相关性良好,值也相似,但是并不能很好的代替实测值,两者相关系数都不超过85%。主要原因是在12—16日,海表气温存在明显下降并在14日回升,但是这两类数据对温度回升反映得都不明显。在20—23日,实测数据和两者也呈现相反的变化趋势。

### 3.1.2 海面皮温

通过分析海表皮温和实测海表温度数据的统计特征,发现两类数据集估算存在一定偏差,它们相对浮标的平均偏差分别是 0.89 °C 和 0.61 °C,分别高估了皮温的 9.83% 和 6.68%。从平均的角度看,此期间 ERA-I 的数据相对偏差更大,估算没有 OAFlux 数据集可靠。从均方根差上看,ERA-I 值为 1.02 °C,在各时间点上相对于 OAFlux 的 0.73 °C 偏离真实值更多一些。ERA-I 数据和观测皮温的相关性一般,曲线变化趋势不一致。OAFlux 数据和观测皮温的相似性良好,但是也不能很好的代替实测值。在 5—15 日和 15—27 日两段时间里,两个数据集的皮温估算都存在一定偏差,仅在 15 日左右它们和浮标观测值较为接近。

### 3.1.3 海表比湿

从表 1 中可以看出两类数据集对比湿的估算较为准确,相对浮标的平均偏差分别是 0.13 g/kg 和 0.19 g/kg,分别高估了比湿的 2.28% 和 3.39%。从均方根误差上看,ERA-I 和 OAFlux 相对于实测分别为 0.44 g/kg 和 0.37 g/kg。它们和实测比湿的相关性也非常好,两者都为 93%,说明两个数据集对海表面空气湿度的变化控制

比较到位。图 4 中显示出三条曲线变化趋势较为一致,从 8 日到 17 日 ERA-I 数据相对实测数据有明显波动和偏差;而在 21 日前后实测数据存在明显波动,此处有明显差异。从图 2 中可以看到观测平台上四个层面的空气湿度在 20—21 日都有明显提升,随后降低,ERA-I 数据在 22 日有相似变化,但是 OAFlux 的海表面比湿数据并没有捕捉到这一变化。

### 3.1.4 风速

在风速值小于 4 m/s 时,两类数据都存在低估的现象,而在风速大于 7.5 m/s 时它们都存在高估的现象(图 4)。表 1 中给出了 ERA-I 和 OAFlux 数据集中的海表面 10 m 风速和实测风速数据的统计特征,包括平均偏差,相对误差,均方根误差和相关系数。两类综合数据集对风速的计算均值相近,它们相对浮标的平均偏差分别是 -0.23 m/s 和 -0.23 m/s,分别低估了风速的 4.19% 和 4.21%。从均方根误差上看,ERA-I 值为 0.87 m/s,相对于 OAFlux 的 1.11 m/s,偏离真实值的误差更小。两者和实测风速的相关性也都不错,但是 ERA-I 95% 的相关性表明此期间其对于风速的计算优于 OAFlux。

表 1 2012 年 8 月 5—27 日两类数据集与浮标的数据对比

Tab. 1 Comparison of daily-Averaged buoy data to ERA-Interim and OAFlux data

	平均偏差 Bias		相对误差(%) Relative Error		均方根误差 RMSE		相关系数 <i>r</i>	
	ERA-I	OAFlux	ERA-I	OAFlux	ERA-I	OAFlux	ERA-I	OAFlux
U/(m/s)	-0.23	-0.23	-4.19	-4.21	0.87	1.11	0.95	0.89
T <sub>a</sub> /°C	0.42	0.89	5.22	11.15	0.81	1.09	0.84	0.85
T <sub>s</sub> /°C	0.89	0.61	9.83	6.68	1.02	0.73	0.39	0.62
Q/(g/kg)	0.13	0.19	2.28	3.39	0.44	0.37	0.93	0.93
H <sub>g</sub> /(W/m <sup>2</sup> )	1.61	-3.38	12.58	26.33	8.20	7.76	0.91	0.91
H <sub>l</sub> /(W/m <sup>2</sup> )	5.22	2.31	17.54	7.76	14.17	9.61	0.92	0.95

## 3.2 湍流热通量对比

### 3.2.1 感热通量

通过表 1 中 ERA-I 和 OAFlux 数据集的感热通量和实测感热通量数据的统计特征比较可以看出两类综合数据集对感热通量的估算相对浮标的平均偏差分别是 1.61 W/m<sup>2</sup> 和 -3.38 W/m<sup>2</sup>,分别高估了感热通量的 12.58% 和低估了 26.33%。从平均的角度看 ERA-I 的数据相对偏差小很多,估算更加可靠。从均方根差上看,

ERA-I 值为 8.20 W/m<sup>2</sup>,在各时间点上相对于 OAFlux 的 7.76 W/m<sup>2</sup> 偏离真实值的差异更大。两者和观测气温的相关性良好。由块体公式(1)可以看出影响感热通量的要素主要是海气温差和风速差,但是通过表 1 可以看出风速的偏差影响较小,所以造成 ERA-I 和 OAFlux 感热通量分别高估和低估的原因是海气温差,ERA-I 对皮温的高估比对气温的高估更多,因此其对海气温差的估算偏高,而 OAFlux 对皮温的高估比对气温

的高估更少,因此其对海气温差的估算偏低。从图 5 可以看出 OAFflux 相比于 ERA-I 对感热通量的估算更接近实测值。再通过两图的差值概率

分布图 6 可以更加直观地看出,ERA-I 的感热通量与实测值的差异分布在 0 值两侧较为对称, OAFflux 值则更多地小于实测值。

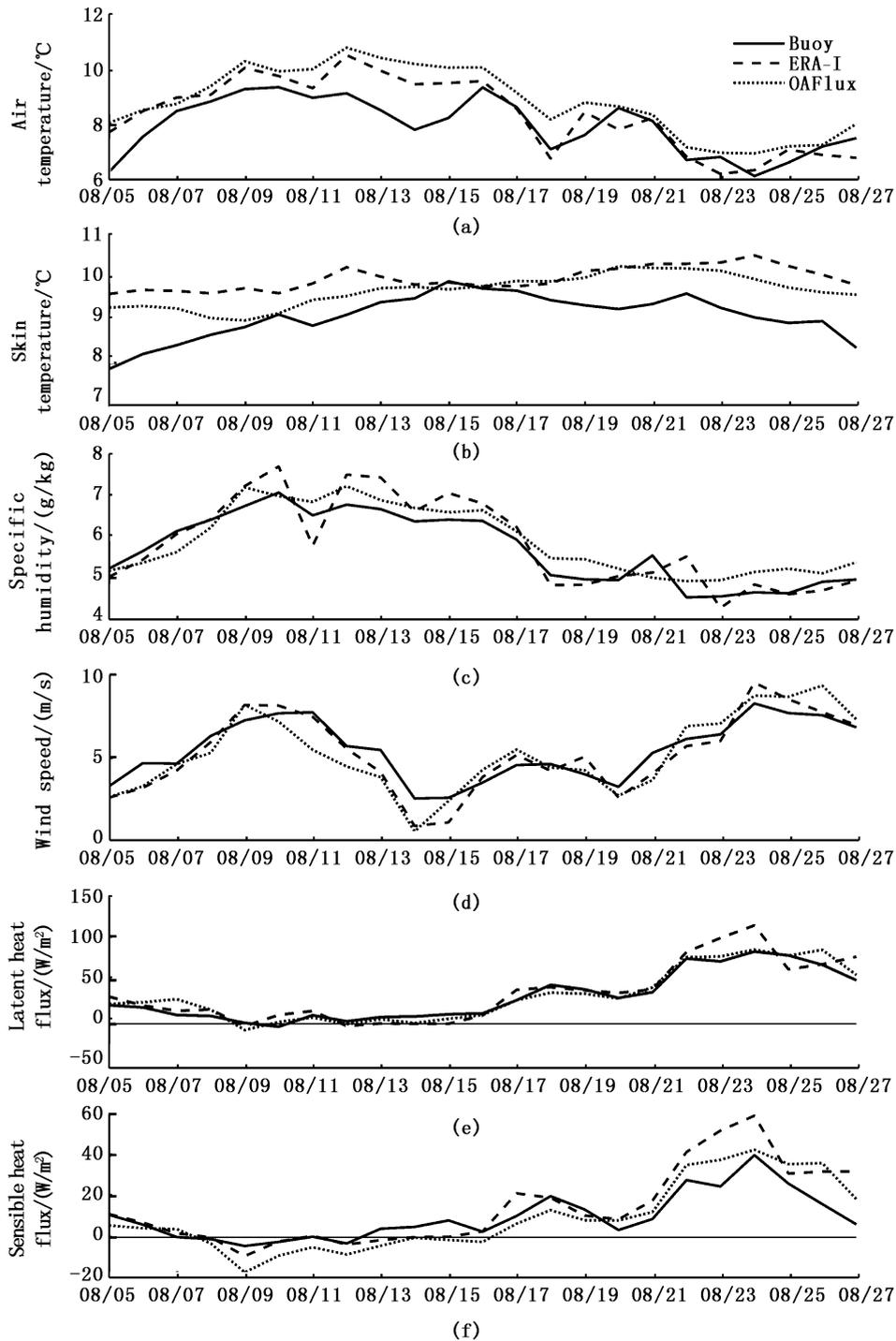


图 4 源标观测数据与 ERA Interim 和 OAFflux 比较由上至下依次为海表面空气温度,海表皮温,海表面空气比湿,海表面风速,潜热通量,感热通量

Fig. 4 Comparison of daily Averaged buoy data to ERA-Interim and OAFflux data, it represents for sea surface air temperature, skin temperature, specific humidity, wind speed, latent heat flux and sensible heat flux from top to bottom

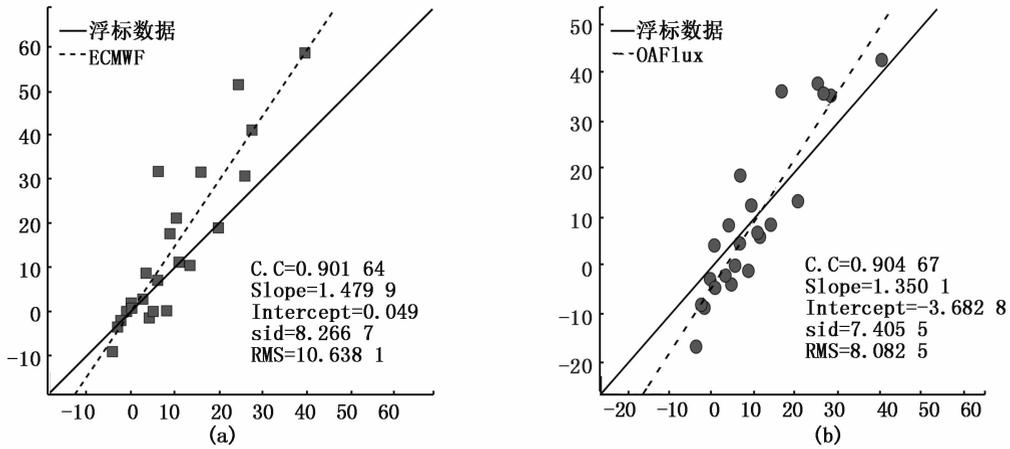


图5 ERA-I 及 OAFlux 与浮标感热通量数据的点聚图对比

Fig.5 Scatter diagram of daily-averaged buoy sensible heat flux to ERA-Interim and OAFlux

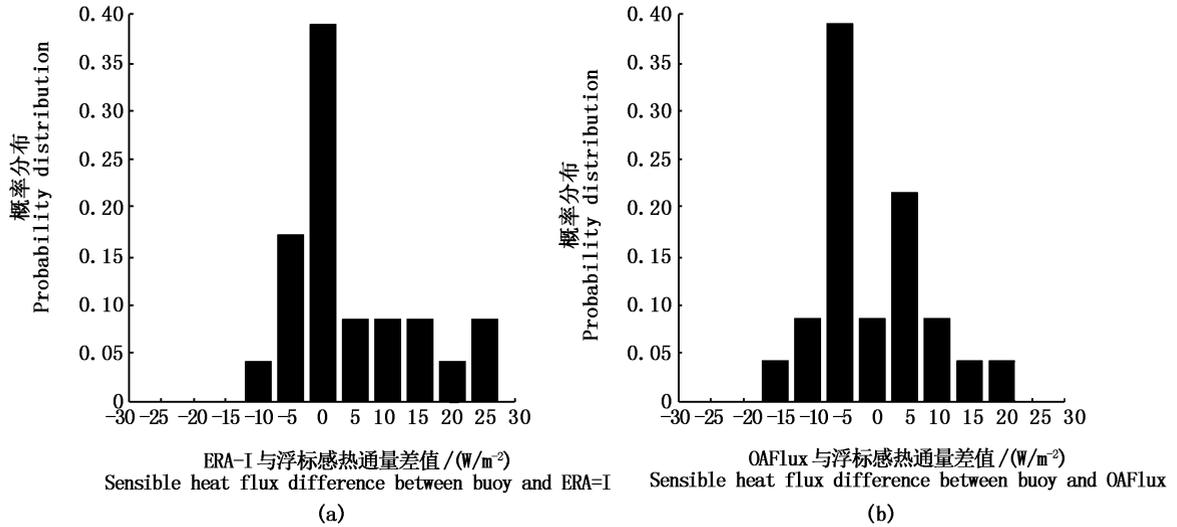


图6 ERA-I 及 OAFlux 与浮标感热通量数据的差值概率分布

Fig.6 Probability distribution of sensible heat flux difference between buoy and ERA-I/OAFlux

3.2.2 潜热通量

表1中给出了ERA-I和OAFlux数据集中的潜热通量和实测潜热通量数据的统计特征。两类综合数据集对潜热通量的估算存在一定偏差,它们相对浮标的平均偏差分别是 $5.22 \text{ W/m}^2$ 和 $2.31 \text{ W/m}^2$ ,分别高估了潜热通量的17.54%和7.76%。从平均的角度看OAFlux的数据相对偏差小很多,估算更加可靠。从均方根误差上看,ERA-I值为 $14.17 \text{ W/m}^2$ ,在各时间点上相对于OAFlux的 $9.61 \text{ W/m}^2$ 偏离真实值的差异大很多。

两者和实测气温的相关性良好。综上所述,OAFlux在该期间的潜热通量估算要优于ERA-I。由块体公式(1)可以看出影响潜热通量的要素主要是海表空气湿度差和风速差,而由图5可以看出ERA-I和OAFlux在22~27日风速较高时都有较大的估算偏差,并且可看出在潜热通量值本身较大时存在更大的偏差。从图7可以看出OAFlux相比于ERA-I对潜热通量的估算更接近实测值。再通过图8可以明显地看出,两者潜热通量的估算大多大于实测值。

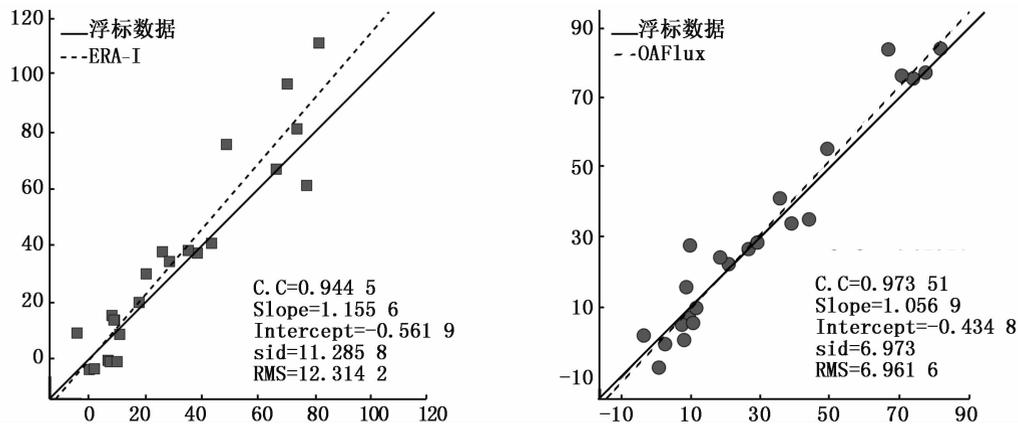


图7 ERA-I及OAF flux与浮标潜热通量数据的对比

Fig.7 Scatter diagram of daily-averaged buoy latent heat flux to ERA-Interim and OAF flux

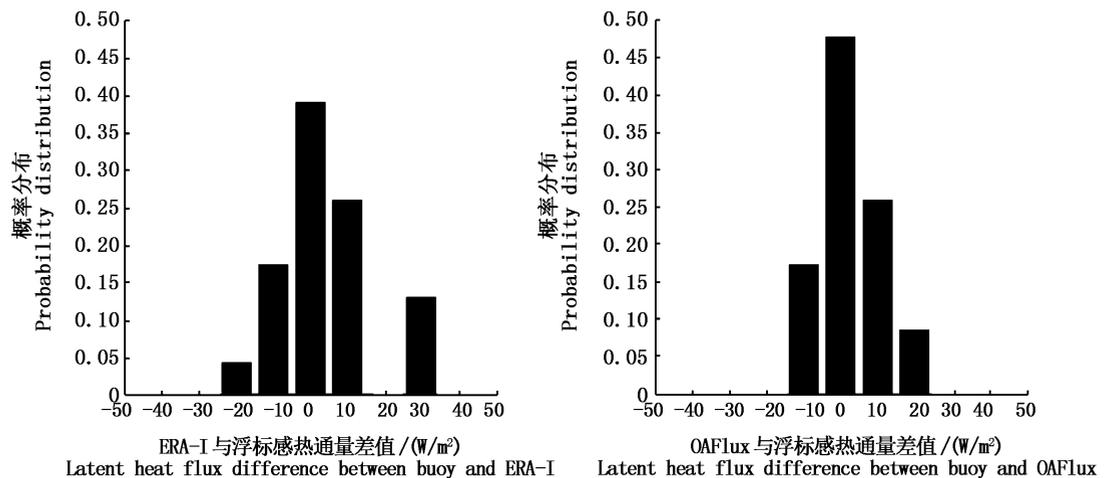


图8 ERA-I及OAF flux与浮标潜热通量数据的差值概率分布

Fig.8 Probability distribution of latent heat flux difference between buoy and ERA-I/OAF flux

#### 4 总结

本研究表明,北欧海暖流区罗弗敦海盆在夏季的湍流热通量基本全部是海洋向大气输送,感热通量的变化范围是 $-5.21 \sim 41.15 \text{ W/m}^2$ ,均值为 $9.34 \text{ W/m}^2$ ,而潜热通量的变化范围是 $-3.59 \sim 82.81 \text{ W/m}^2$ ,均值是 $31.55 \text{ W/m}^2$ 。潜热输送占据主导地位,约为感热通量的3.4倍。而同期对应的净辐射通量为 $62.56 \text{ W/m}^2$ ,方向向下。北欧海暖流区夏季海气温差对于海气界面的感热输送起到主要影响作用,而在中低风速( $< 10 \text{ m/s}$ )的情况下对潜热输送起主导作用的是海气间的湿度差。

对潜热通量的频谱分析显示出3 d的特征变化周期,这和SUN等<sup>[30]</sup>在北大西洋西部观测到

的结果(3~4 d)类似。这说明该地区夏季海气界面潜热通量更容易受到表面要素(空气湿度、海表风速)高频波动的影响,同时也表明这和罗弗敦海盆短周期(1~3 d)极地低压的频繁活动有密切关系。

和浮标热通量观测数据进行对比后发现,在夏季北欧海暖流区域内ERA-I和OAF flux对感热通量分别高估和低估了12.58%与26.33%,ERA-I的估算更优。两者与观测值变化趋势一致但存在一定差异,造成差异的主要因素是两个数据集对海表皮温和海表气温的估算与真实海洋存在差异,这也是使用这两类数据集需要注意和加以适当订正的地方。另一方面ERA-I和OAF flux对潜热通量分别高估了17.54%和7.76%,OAF flux的估算更优。在22日到27日海

表面中等风速的情况下,海气温差的增大和海气湿度差的增大都导致两数据集和观测数据的差值偏大。

### 参考文献:

- [1] 邵秋丽,赵进平. 北欧海深层水的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 42-55.  
SHAO Q L, ZHAO J P. On the deep water of the Nordic Seas[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 42-55.
- [2] SIMONSEN K, HAUGAN P M. Heat budgets of the Arctic Mediterranean and sea surface heat flux parameterizations for the Nordic Seas [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C3): 6553-6576.
- [3] RUDELS B, ANDERSON L G, JONES E P. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C4): 8807-8821.
- [4] CAYAN D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: driving the sea surface temperature[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(8): 859-881.
- [5] CAYAN D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(4): 354-369.
- [6] ZHAO J P, CAO Y, SHI J X. Core region of Arctic Oscillation and the main atmospheric events impact on the Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(22): L22708.
- [7] 赵进平, DRINKWATER K. 北欧海主要海盆海面热通量的多年变化[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10): 9-19.  
ZHAO J P, DRINKWATER K. Multiyear variation of the main heat flux components in the Four Basins of Nordic Seas [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(10): 9-19.
- [8] SCHOTT F, VISBECK M, FISCHER J. Observations of vertical currents and convection in the central Greenland Sea during the winter of 1988-1989 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1993, 98(C8): 14401-14421.
- [9] SORTEBERG A, WALSH J E. Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2008, 60(3): 570-586.
- [10] HURRELL J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 1995, 269(5224): 676-679.
- [11] THOMPSON D W J, WALLACE J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [12] 杨清华, 张蕴斐, 孙兰涛, 等. COARE 算法估算海气界面热通量的个例对比分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(4): 1-13.  
YANG Q H, ZHANG Y F, SUN L T, et al. Comparative analyses on a case of the air-sea interface heat flux estimated by the COARE algorithm [J]. *Marine Forecasts*, 2005, 22(4): 1-13.
- [13] 刘娜. 东中国海热通量及热收支变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
LIU N. Variations of heat flux and heat budget in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [14] 张连新. 风浪条件及泡沫对海气热通量的影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
ZHANG L X. Effects of sea spray and wind sea conditions on air-sea heat flux[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [15] JOSEY S A. A comparison of ECMWF, NCEP-NCAR, and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the subduction region of the northeast Atlantic[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(8): 1780-1789.
- [16] SMITH S R, HUGHES P J, BOURASSA M A. A comparison of nine monthly air-sea flux products [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(7): 1002-1027.
- [17] 邓小花, 翟盘茂, 袁春红. 国外几套再分析资料的对比与分析[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 1-8.  
DENG X H, ZHAI P M, YUAN C H. Comparative analysis of NCEP/NCAR, ECMWF and JMA reanalysis [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(1): 1-8.
- [18] 杨新飞. 海气界面潜热通量和感热通量数据产品对比研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
YANG X F. Intercomparison of air-sea latent heat flux and sensible heat flux products[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [19] SANTORELLI A, PINKER R T, BENTAMY A, et al. Differences between two estimates of air - sea turbulent heat fluxes over the Atlantic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C9): C09028.
- [20] FAIRALL C W, BRADLEY E F, ROGERS D P, et al. Bulk parameterization of air - sea fluxes for tropical ocean - global atmosphere coupled - ocean atmosphere response experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C2): 3747-3764.
- [21] FAIRALL C W, BRADLEY E F, HARE J E, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(4): 571-591.
- [22] BRUNKE M A, FAIRALL C W, ZENG X B, et al. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(4): 619-635.
- [23] EDSON J B, JAMPANA V, WELLER R A, et al. On the exchange of momentum over the open ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(8): 1589-1610.
- [24] 褚健婷, 陈锦年, 许兰英. 海-气界面热通量算法的研究

- 及在中国近海的应用[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 481-487.
- CHU J T, CHEN J N, XU L Y. Improved calculation of turbulent heat fluxes at air-sea interface in Maritime China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(6): 481-487.
- [25] 王娟娟. 海气通量的涡相关计算和参数化方法研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- WANG J J. Eddy-covariance method and bulk parameterization on the air-sea fluxes [D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2013.
- [26] 黄艳松. 基于浮标观测资料的海气通量计算方法研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.
- HUANG Y S. Estimation of air-sea fluxes from a buoy observation[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2011.
- [27] 徐小慧, 高志球. 利用船测近海层湍流热通量资料验证 OAFflux 数据集[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 281-291.
- XU X H, GAO Z Q. Testing OAFflux field by using the shipborne heat flux measurements [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, 17(3): 281-291.
- [28] 肖斌, 乔方利, 吕连港. 南黄海海气热通量观测及其与 OAFflux 数据集比较研究[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 43-54.
- XIAO B, QIAO F L, LÜ L G. Observations of air-sea heat flux in the South Yellow Sea and their comparison with OAFflux Dataset[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 43-54.
- [29] YU L S, WELLER R A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981-2005) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 527-539.
- [30] SUN B M, YU L S, WELLER R A. Comparisons of surface meteorology and turbulent heat fluxes over the Atlantic: NWP model analyses versus moored buoy observations[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(4): 679-695.

## Analysis of summer air-sea heat flux based on moored buoy observations and comparison to with the ERA-Interim/OAFflux in the Nordic Seas

LIU Yudao<sup>1,2</sup>, GAO Guoping<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinping<sup>3</sup>, JIAO Yutian<sup>3</sup>, WANG Xiaoyu<sup>3</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Physical Oceanography, College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

**Abstract:** In 2012 for the first time we had a 23-day continuous on-site buoy observation at the Nordic seas. Based on the observation data of sea surface air temperature, humidity, wind speed and skin temperature, the turbulence heat flux at air-sea interface was calculated by COARE 3.5 bulk algorithm. The sensible heat flux was  $9.34 \text{ W/m}^2$ , the latent heat flux was  $31.55 \text{ W/m}^2$  (ocean to atmosphere as positive). ERA-Interim and OAFflux were international widely used oceanographic and meteorological data sets, then the buoy observation data were compared and verified with two data sets. The results show that the summer surface air-sea temperature difference in the warm area of the Nordic Seas plays a major role in the heat transfer at the air-sea interface, while in the case of low wind speed ( $< 10 \text{ m/s}$ ) in latent heat transfer the leading role is the difference between the humidity between sea and air. ERA-I and OAFflux were slightly overestimated and underestimated by 12.58% and 26.33% respectively for sensible heat fluxes in the summer warm current region of Nordic Sea. The main factors contributing to the bias are the differences between the two data sets and the buoy data for the prediction of the air temperature and the skin temperature. ERA-Interim and OAFflux have a 17.54% and 7.76% over estimate of latent heat flux respectively. The difference comes from the estimation of air & sea humidity.

**Key words:** buoy observation; the Nordic seas; heat flux; COARE 3.5; OAFflux; ERA-Interim