

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2024.03.001

海洋热浪背景下海气湍流热通量资料的评估 ——以2019年东北太平洋“Blob 2.0”事件为例

马婧¹, 宋翔洲¹, 闫运伟¹, 王斌², 陈陟³

(1. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210024; 2. 自然资源部国家海洋技术中心, 天津 300112; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 2019年夏季, 东北太平洋地区经历了一次名为“Blob 2.0”的海洋热浪事件, 对海洋生态系统造成了严重影响。利用美国国家数据浮标中心的浮标观测资料、全球客观分析通量产品 OAFlux, 以及大气再分析数据集 ERA5、NCEP2 和 MERRA-2, 综合分析了“Blob 2.0”事件期间海气湍流热通量的特征, 并研究了其物理因素。浮标观测显示, 在“Blob 2.0”事件期间, 潜热通量呈现正增长趋势, 而感热通量呈现负增长趋势, 这一现象可归因于海气比湿度差呈正增长, 而风速和海气温差呈负增长。评估结果表明: 4种通量数据产品都低估了潜热通量的增长, ERA5 的增长率与浮标最为接近。对于感热通量, MERRA-2 和 NCEP2 产品的增长趋势与浮标观测相同, 其中 MERRA-2 的增长率更接近; 而 OAFlux 和 ERA5 产品的增长趋势与观测相反。

关键词: 海洋热浪; 湍流热通量异常; 浮标观测; 通量数据集

中图分类号: P731.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)03-0001-11

0 引言

海洋热浪是指在特定位置出现的离散、持续且异常温暖的海水事件, 可能会持续数月, 覆盖数千平方公里, 这一现象已经在全球范围内被观测到^[1-2]。海洋热浪的形成原因复杂多样, 可由大气和海洋单独或共同作用引起^[3-4]。大气强迫作用包括风应力、太阳辐射、潜热(Latent Heat, LH)和感热(Sensible Heat, SH)等变化导致的海表热通量变化, 例如2003年地中海的海洋热浪事件^[5]、2012年美国东北海岸的海洋热浪事件^[6]、2016年中国东海的海洋热浪事件^[7]和2017/2018年塔斯曼海的海洋热浪事件^[8]等。海洋的动力过程主要包括暖平流的增强、混合层变浅和海洋层结增强、垂向混合过程减弱和减弱的上升流等, 例如2015/2016年塔斯曼海的海洋热浪事件^[9]、2017年大西洋中部海域和日本海域的海洋热浪事件^[10-11]。大尺度气候系统模态,

如厄尔尼诺、太平洋十年涛动、热带大气季节内振荡和北大西洋涛动等, 也对海洋热浪的发生、发展起到重要作用, 例如2014—2016年北太平洋的海洋热浪事件^[12-14]。此外, 北极海冰的大幅退缩以及人类活动引起的全球变暖等也对海洋热浪产生影响^[15-17]。海洋热浪会对海洋生态系统的结构和功能带来危害, 例如珊瑚白化、海藻森林持续减少和有有毒藻类大量繁殖等^[1-4]。在过去的几十年中, 这类极端事件的持续时间更长、频率更高、范围更广、强度更大, 且随着全球变暖的加剧, 这一趋势将加速发展, 并对海洋生态系统造成持续破坏^[3-4, 17]。因此, 海洋热浪已经成为海洋学研究的热门领域^[18]。

一个典型的海洋热浪事件是2013年秋季在东北太平洋阿拉斯加湾水域出现的“巨大海洋热浪”, 被称为“The Blob”。这一事件持续了两年多, 其海表温度异常超过了3倍标准差, 主要与东北太平洋上空持续存在的高气压有关。这个事件对区域海

收稿日期: 2023-10-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42122040, 42076016)。

作者简介: 马婧(1996-), 女, 硕士在读, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: jingma@hhu.edu.cn

洋系统造成了严重影响,被认为是有史以来观测到的最大且持续时间最长的海洋热浪之一^[19-21]。随后,在2019年夏季,该区域附近的上层海洋温度再次上升到前所未有的水平,被称为“Blob 2.0”,这主要与北太平洋高压系统的持续减弱有关。异常的北太平洋高压导致表面风减弱,从而减少了蒸发冷却和风驱动的上层海洋混合,导致海表温度升高,云量减少,通过云反馈机制使海洋热浪再次增强^[22]。

AMAYA 等^[22]指出潜热通量的减小可能对“Blob 2.0”的形成至关重要。然而,目前的潜热通量和感热通量产品通常是基于海面气象观测数据(如风速、大气相对湿度和温度梯度等)利用块体公式计算得到,与实际的通量测量相比存在较大的不确定性^[23]。例如,JOSEY^[24]使用伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)的5个浮标数据资料评估了美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)产品和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA-Interim 再分析产品的热通量数据集,发现这两个产品都高估了潜热通量。目前尚不清楚在海洋热浪背景下海气湍流热通量产品的准确性,需要进一步评估。因此,结合浮标现场观测资料,对目前常用的通量数据产品进行检验和评估,并在此基础上不断改进海气热通量的估算方法,对海气相互作用的认识和研究尤为重要^[25]。

本文以东北太平洋“Blob 2.0”海洋热浪事件为背景,利用浮标观测数据来估算该极端事件期间的海气湍流热通量及异常值,并研究其物理机制。浮标观测提供了最接近实际观测的海气界面变量,因此其估算的热通量具有较小的不确定性^[26],可作为直接观测的参考。在此基础上,我们将浮标观测结果与3个大气再分析数据集以及1个客观分析的海气通量产品进行比较,以识别不同产品之间的估算误差,并为未来改进通量产品提供参考,从而更准确地分析海洋热浪等极端海洋事件。本文第1节介绍数据和海气通量算法;第2节展示“Blob 2.0”事件期间浮标观测的湍流热通量及相关变量的异常,并评估4个通量产品的估算偏差;第3节进行总结和讨论。

1 数据和方法

1.1 数据描述

1.1.1 浮标观测

本文选用的浮标(标号为46006)位于 40.764°N , 137.377°W (见图1a),是由美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)拥有和维护的3 m浮标。该浮标场地标高是海平面,测量的主要变量包括风速(高于海平面3.7 m)、海平面气压(高于海平面2.7 m)、大气温度(高于海平面3.7 m)、海表温度(低于海平面1.5 m)和露点温度(高于海平面3.7 m)等。

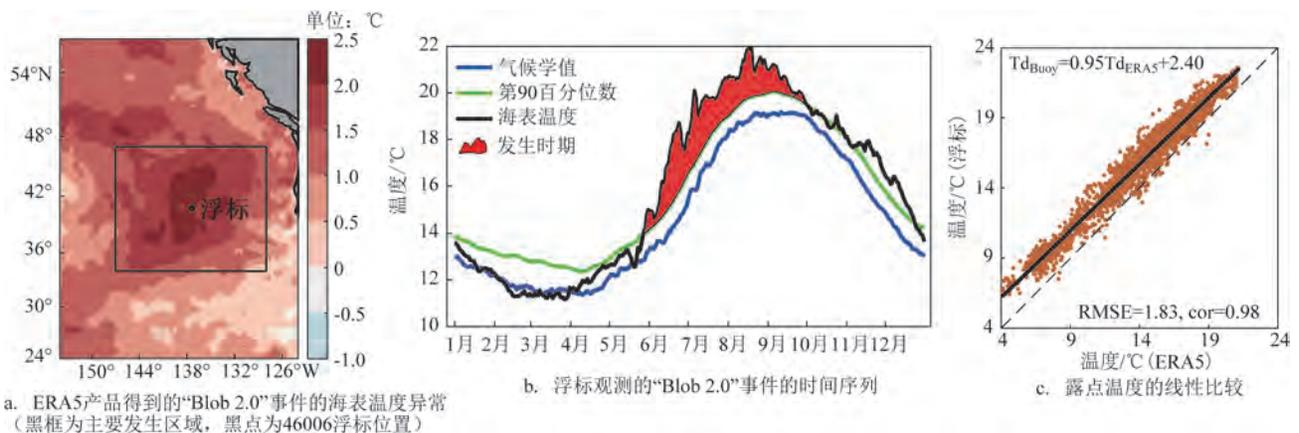


图1 2019年东北太平洋的“Blob 2.0”事件及 NDBC 浮标观测露点温度与 ERA5 的回归关系

Fig.1 The “Blob 2.0” event in the Northeast Pacific in 2019, and the regression relationship between dew point temperature observed by NDBC buoys and ERA5

根据HOBDAY等^[1]的定义,如果异常温暖的事件持续5天或更长时间,并且温度高于30年历史基线的第90百分位数,就可将其视为海洋热浪事件。基于这个定义,本文对浮标原始数据进行了选择和处理。首先,将1989—2018年浮标观测数据的时间分辨率处理成小时级;然后,选取6—9月海气变量(包含风速、海平面气压、大气温度和海表温度)观测数据缺失均少于5天的年份(共9 a),并进行线性插值,再取其平均值作为后续分析的气候态平均;接着,采用以这9 a数据为基础的11 d滑动窗口内每日海表温度数据计算每日的第90百分位数,并使用31 d的移动平均线进行平滑处理。将2019年的数据处理为日平均后,得到该年海洋热浪的开始时间为5月28日,结束时间为10月1日,共持续127 d(见图1b)。

由于NDBC浮标的露点温度数据存在缺失,给湍流热通量的估算带来不便。因此,我们利用2019年研究时间段内该浮标的露点温度与ECMWF的再分析数据产品ERA5的露点温度数据构建回归关系($T_{d_{\text{Buoy}}}=0.95T_{d_{\text{ERA5}}}+2.40$)来补充浮标的露点温度数据(见图1c),二者相关性(cor)高达0.98,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为1.83。再结合耦合海洋-大气响应实验3.5版(Coupled Ocean - Atmospheric Response Experiment version 3.5, COARE 3.5),使用浮标观测的海气界面变量进行湍流热通量的估算和分析^[27]。

1.1.2 客观分析海气通量产品

全球海洋客观分析海气通量产品(Objectively Analyzed Air - Sea Flux, OAFlux)采用耦合海洋-大气响应实验3.0版(COARE 3.0)^[28],为全球能源收支和气候变化研究提供了海气热量通量和动量通量的多年代际分析^[29]。OAFlux数据集提供1970年至今的潜热通量、感热通量以及海表温度、大气温度、比湿度和风速等海气界面变量。该数据集的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为1 d,被广泛视为海气通量评估和全球海表热量预算的重要基准^[26]。

1.1.3 大气再分析数据集

本文使用了3个再分析数据集。第一个数据集是MERRA-2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2, MERRA-2)^[30],由美国宇航局全球建模和同化办公室(Global

Modeling and Assimilation Office)使用戈达德地球观测系统模型第5版(Goddard Earth Observing System-5, GEOS-5)编制,提供了1980年至今的数据。该数据集的空间分辨率为 $0.625^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为1 h^[31]。第二个数据集是ECMWF的第五代再分析产品(ERA5),提供了从1940年开始的大气、海浪和陆地表面量的估计值。该数据集的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h^[32]。MERRA-2和ERA5都结合了大量的历史观测数据和先进的数据同化系统。第三个数据集是美国环境预测中心/美国能源部(National Centers for Environmental Prediction / Department of Energy, NCEP/DOE)全球气候预测系统再分析数据集NCEP2,其空间分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$,时间分辨率为6 h^[33]。这3个再分析数据集都提供了海表潜热通量、感热通量以及与之相关的海表温度、大气温度、海气湿度和风速等变量。

1.2 海气湍流热通量计算方法

海气湍流热通量包括与海表面蒸发过程紧密相关的潜热通量和与海气界面热对流相关的感热通量。根据莫宁-奥布霍夫相似理论^[34],海表潜热通量和感热通量可由块体公式进行估计^[27-28, 35-36]。估算公式为:

$$Q_{\text{LH}} = \rho_a L_e c_e |u| \Delta q \quad (1)$$

$$Q_{\text{SH}} = \rho_a c_p c_H |u| \Delta T \quad (2)$$

式中: Q_{LH} 和 Q_{SH} 分别为潜热通量和感热通量; ρ_a 为空气密度; L_e 为潜热蒸发系数; c_p 为空气热容系数; c_e 和 c_H 表示潜热通量和感热通量的湍流交换系数; $|u|$ 代表风速; Δq 和 ΔT 分别表示海气比湿度差和温度差。这里的风速使用的是绝对风速而不是相对表层的相对风速,因为表层流很弱,量级约为0(~ 0.1) m/s,通常被忽略^[37]。

为研究湍流热通量异常的主要影响因子,将 $|u|$ 、 Δq 和 ΔT 分解为平均值和异常值,即 $|u| = \overline{|u|} + |u|'$ 、 $\Delta q = \overline{\Delta q} + (\Delta q)'$ 和 $\Delta T = \overline{\Delta T} + (\Delta T)'$,并分别带入式(1)和(2),得:

$$Q_{\text{LH}}' = C_1 [(\Delta q)' \overline{|u|} + \overline{\Delta q} |u|' + (\Delta q)' |u|'] \quad (3)$$

$$Q_{\text{SH}}' = C_2 [(\Delta T)' \overline{|u|} + \overline{\Delta T} |u|' + (\Delta T)' |u|'] \quad (4)$$

式中: Q_{LH}' 和 Q_{SH}' 分别代表潜热通量和感热通量的

异常,等式右边3项分别代表湿度或温度效应、风效应和非线性效应。这里假设 $C_1 = \rho_a L_e c_E$ 和 $C_2 = \rho_a c_p c_H$ 为常数^[37]。

2 结果与讨论

2.1 浮标观测的海气湍流热通量

海洋热浪事件的典型特征是持续5天及以上的区域海表温度变暖,例如图1b中显示的“Blob 2.0”海洋热浪事件。NDBC浮标观测到该事件持续了127 d,最大强度为4.2 °C(出现在7月7日),累积强度达到281.4 °C·d,平均强度为2.1 °C。海洋热浪期

间潜热通量由30.3 W/m²增加到37.2 W/m²,增加了22.8%(见图2和表1)。比较潜热通量各因子,发现其增加主要是由于海气比湿度差(0.4 g/kg)的增加所导致,而后者的增加是由增加的海表温度(2.1 °C)和减少的大气相对湿度(2.2%)共同引起。热浪期间风速下降了约0.7 m/s,抑制了潜热通量的增加。海表感热通量总体上从6.8 W/m²减小到5.5 W/m²,减少了19.0%。感热通量的减小由减小的风速和减小的海气温差(0.1 °C)共同导致。海气温差减小是因为大气温度增加了约2.2 °C,超过了海表温度的增加。

为了进一步研究影响湍流热通量异常的主要

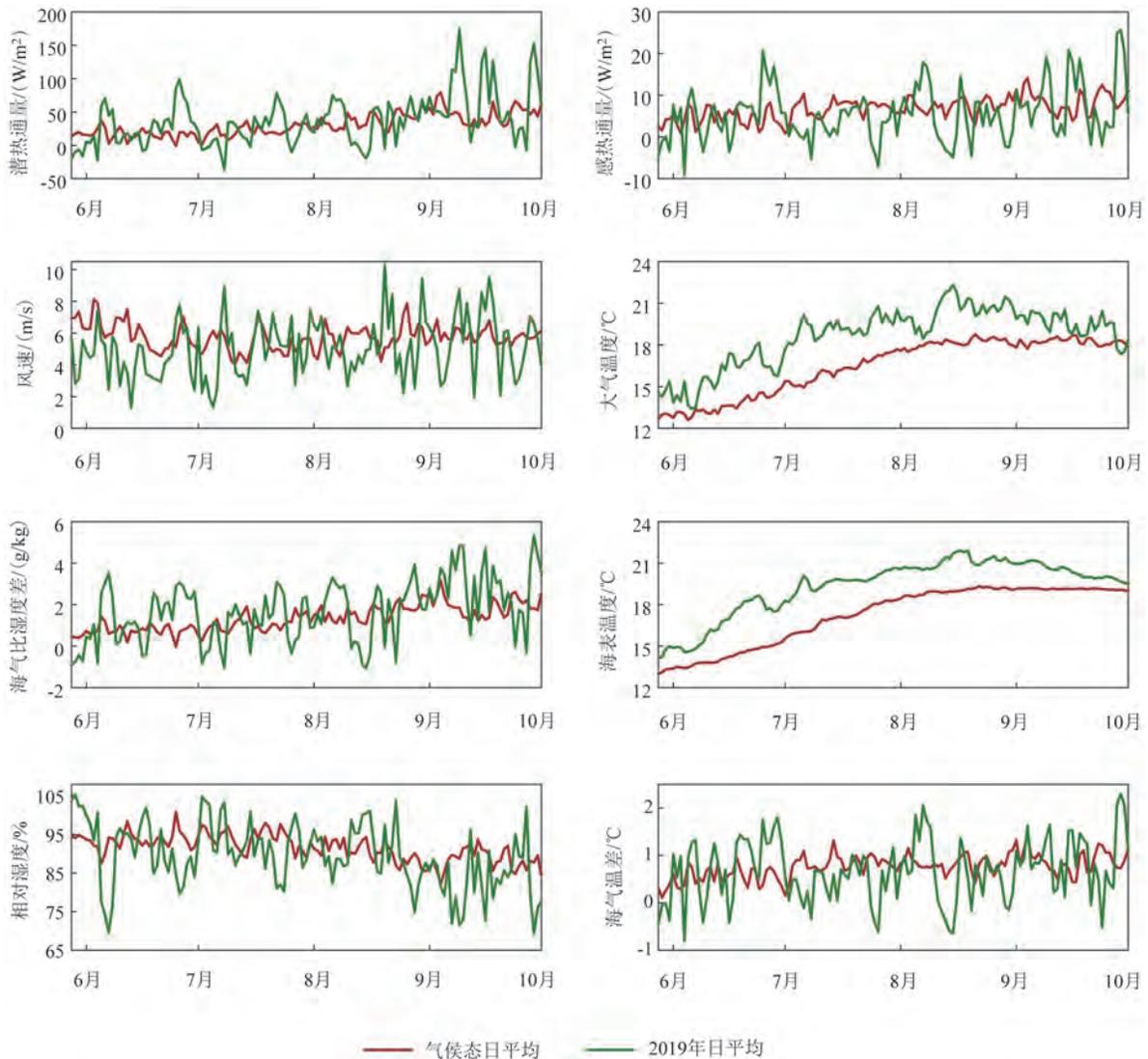


图2 NDBC浮标观测的“Blob 2.0”海洋热浪期间的海气参数

Fig.2 Air-sea parameters observed by the NDBC buoy during the "Blob 2.0" marine heatwave

控制因子,结合式(3)和(4),计算了“Blob 2.0”热浪事件期间的风速效应、海气比湿度差/温差效应及非线性效应。结果显示(见图3),影响潜热通量异常项的因子主要是海气比湿度异常项,其相关性为0.85,均方根误差为18.7。风速异常项和非线性项的相关性分别为0.39和0.44,均方根误差分别为32.9和32.1,对潜热通量异常的影响较小。感热通量异常主要受到海气温差异常的影响,相关系数为0.93,均方根误差为3.0,风速异常项和非线性项的影响也较小,相关系数分别为0.26和0.24。

2.2 湍流热通量数据集评估

基于NDBC浮标观测到的海气状态变量结果,我们对OAFlux、ERA5、MERRA-2和NCEP2这4类通量产品进行了评估。在匹配再分析数据与浮标观测时,我们将通量数据插值到浮标位置。评估结果为:在“Blob 2.0”热浪事件期间,OAFlux、ERA5、MERRA-2和NCEP2的风速分别减少了6.6%、11.0%、12.4%和7.5%(见表2),减少幅度基本低于浮标观测的12.4%;海气比湿度差分别增长了

表1 NDBC浮标观测的“Blob 2.0”海洋热浪期间的海气参数及相对偏差

Tab.1 Air-sea parameters and relative deviations observed by the NDBC buoy during the "Blob 2.0" marine heatwave

类别	潜热通量	感热通量	风速	大气温度	海气比湿度差	海表温度	相对湿度	海气温差
2019年平均值	37.2 W/m ²	5.5 W/m ²	5.0 m/s	18.6 °C	1.7 g/kg	19.3 °C	89.4%	0.7 °C
气候态平均值	30.3 W/m ²	6.8 W/m ²	5.7 m/s	16.5 °C	1.3 g/kg	17.2 °C	91.6%	0.8 °C
相对偏差	22.8%	-19.0%	-12.4%	13.1%	28.4%	12.0 %	-2.4%	-11.9%

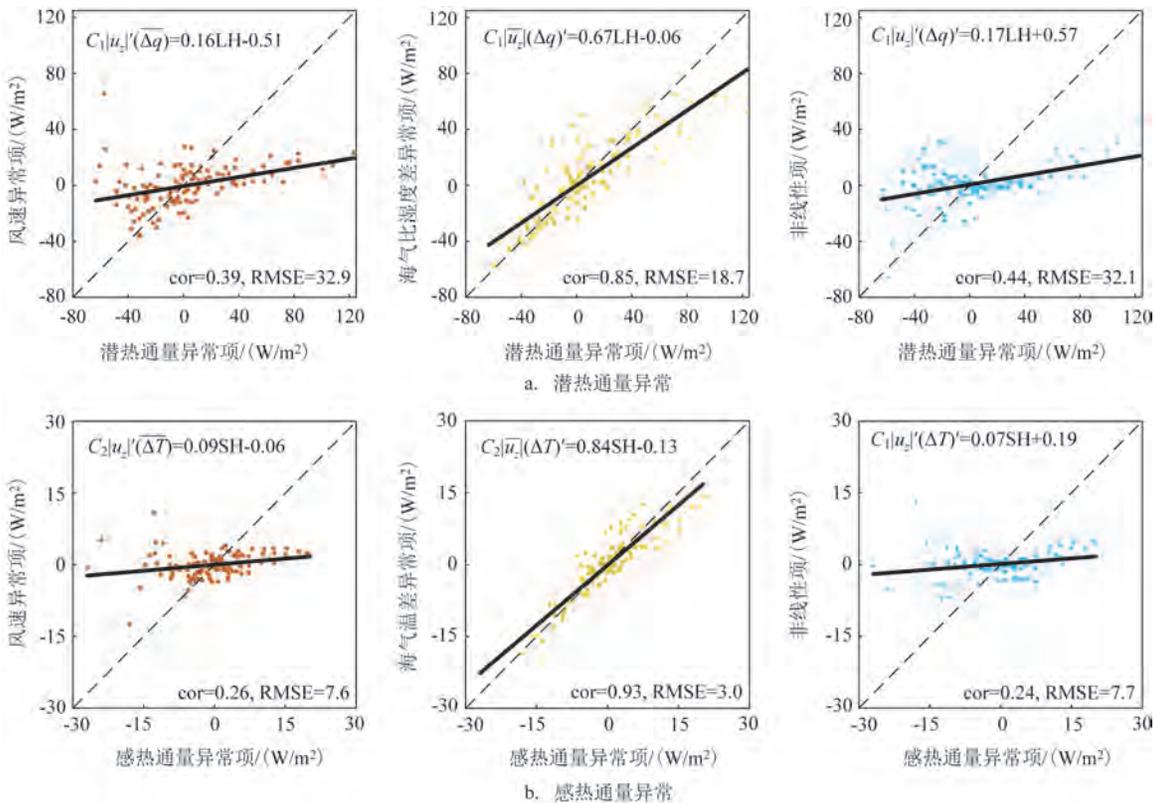


图3 NDBC浮标观测到的湍流热通量异常及其线性化分解

Fig.3 Turbulent heat flux anomalies observed by the NDBC buoy and their linearized decomposition

表2 4类产品海气参数的相对偏差(单位:%)

Tab.2 Relative errors of air-sea parameters for four different products(unit:%)

产品名称	潜热通量	感热通量	风速	大气温度	海气比湿度差	海表温度	相对湿度	海气温差
OAFlux	8.3	12.6	-6.6	11.3	10.6	11.3	0.7	12.3
ERA5	15.3	24.1	-11.0	12.6	21.3	13.0	-0.5	25.1
MERRA-2	11.7	-7.9	-12.4	11.2	20.0	10.7	-1.3	-12.1
NCEP2	-3.8	-124.0	-7.5	13.2	28.0	11.5	-3.3	-117.7

10.6%、21.3%、20.0%和28.0%，也低于浮标观测的28.4%。而潜热通量的表现并不一致，NCEP2减少了3.8%，而OAFlux、ERA5、MERRA-2分别增加了8.3%、15.3%和11.7%，均低于浮标观测的22.8%，其中ERA5与浮标观测最为接近。对于感热通量，OAFlux和ERA5产品的增长率分别为12.6%和24.1%，主要受到海气温差的影响(增长率分别为12.3%和25.1%)，而MERRA-2和NCEP2产品减少

了7.9%和124.0%，对应海气温差分别减少了12.1%和117.7%；与NDBC浮标观测资料相比(感热通量和海气温差分别减少了19.0%和11.9%)，MERRA-2产品的表现最为一致。

我们进一步对OAFlux、ERA5、MERRA-2和NCEP2这4类产品的湍流热通量异常的物理机制进行了简要分析。结果显示，海气比湿度差异常项与潜热通量异常项的线性相关性最好(见图4)，这与

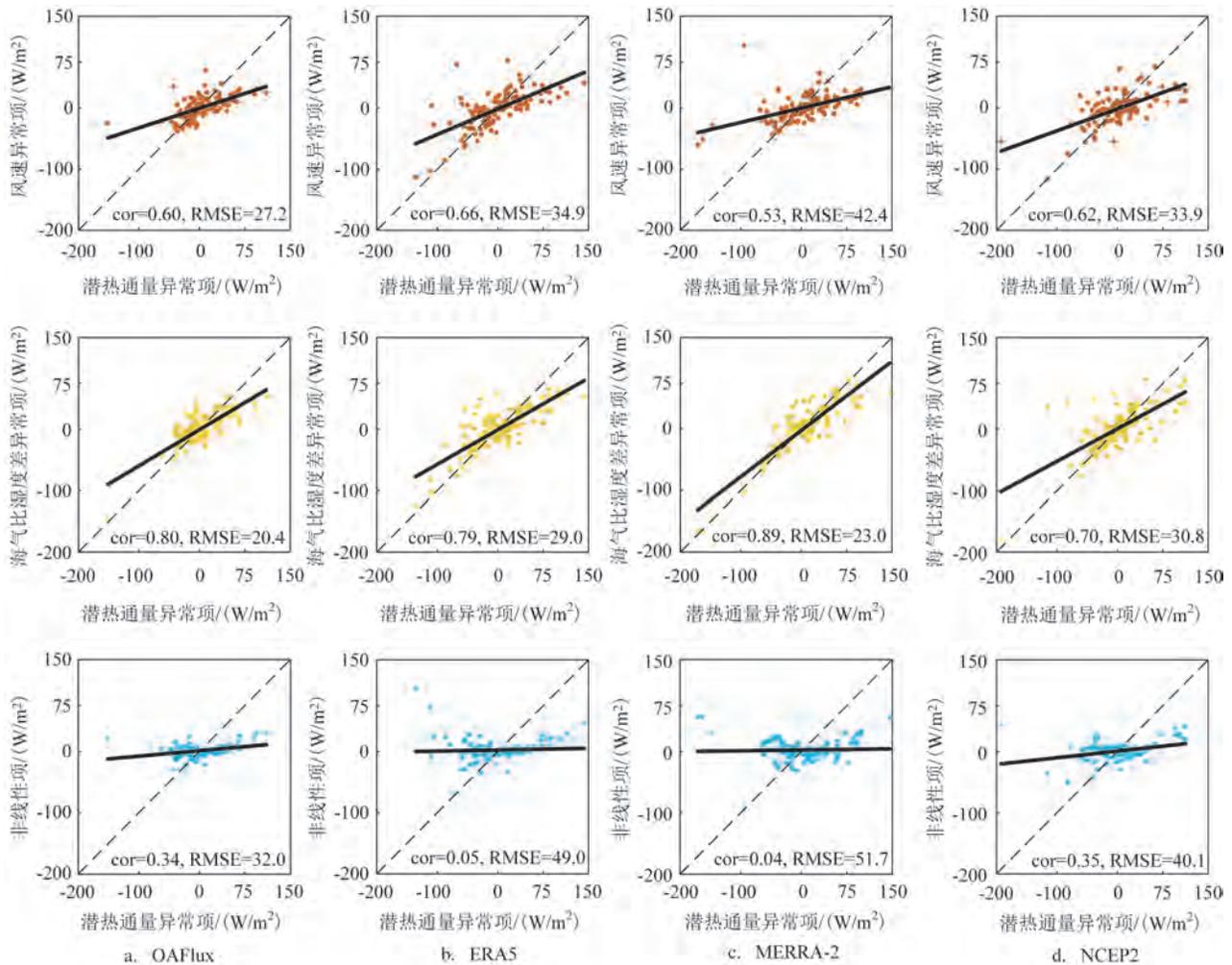


图4 4个产品潜热通量异常项与线性化分解项的比较

Fig.4 Comparison of the latent heat flux anomaly terms with linearized decomposition terms for four products

浮标观测一致;其次是风速异常项,其与潜热通量异常项的相关性分别为0.60、0.66、0.53和0.62,对潜热通量异常的影响也较大;非线性项的影响较小,尤其是ERA5和MERRA-2产品,其与潜热通量异常项的相关性分别为0.05和0.04。4个产品的感热通量异常主要受到海气温差异异常的影响(见图5),两者的相关性均为0.90以上,并且海气温差和感热通量在整体上呈正相关。OAFIux、MERRA-2和NCEP2产品的感热通量异常还受到非线性项的影响,而风速异常项的影响较小。

进一步对NDBC浮标、OAFIux、ERA5、MERRA-2和NCEP2产品在“Blob 2.0”热浪事件期间海气湍流热通量异常及相关变量异常的月平均变化情况进行了分析。总体来看,5—6月是“Blob 2.0”事件发生和发展的时期(见图6)。6月,海表温度和大气温度

度均出现了显著异常升温,增幅超过了 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均风速减少 1.6 m/s ;此外,由于海气比湿度差平均增加了 0.7 g/kg ,使得潜热通量的平均值增加了 5.6 W/m^2 ,这一变化在浮标观测资料中表现得最为显著;同时,海气温差平均增加了 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应的感热通量也平均增加了 2.7 W/m^2 。7—8月,海表温度和大气温度平均增加了 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均风速减小了 0.2 m/s ,但海气比湿度差仍增加了 0.1 g/kg ,导致潜热通量平均增加了 0.2 W/m^2 ;此时,海气温差平均减小了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应的感热通量平均减小了 2.2 W/m^2 。9月,海气比湿度差增加了约 0.9 g/kg ,对应潜热通量增加了 21.3 W/m^2 ;同时,海气温差平均增加了 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,使得感热通量平均增加了 1.5 W/m^2 。10月,尽管风速呈现增加趋势,但海气比湿度差和海气温差整体上又出现减小,导致潜热通量平均仅增加了

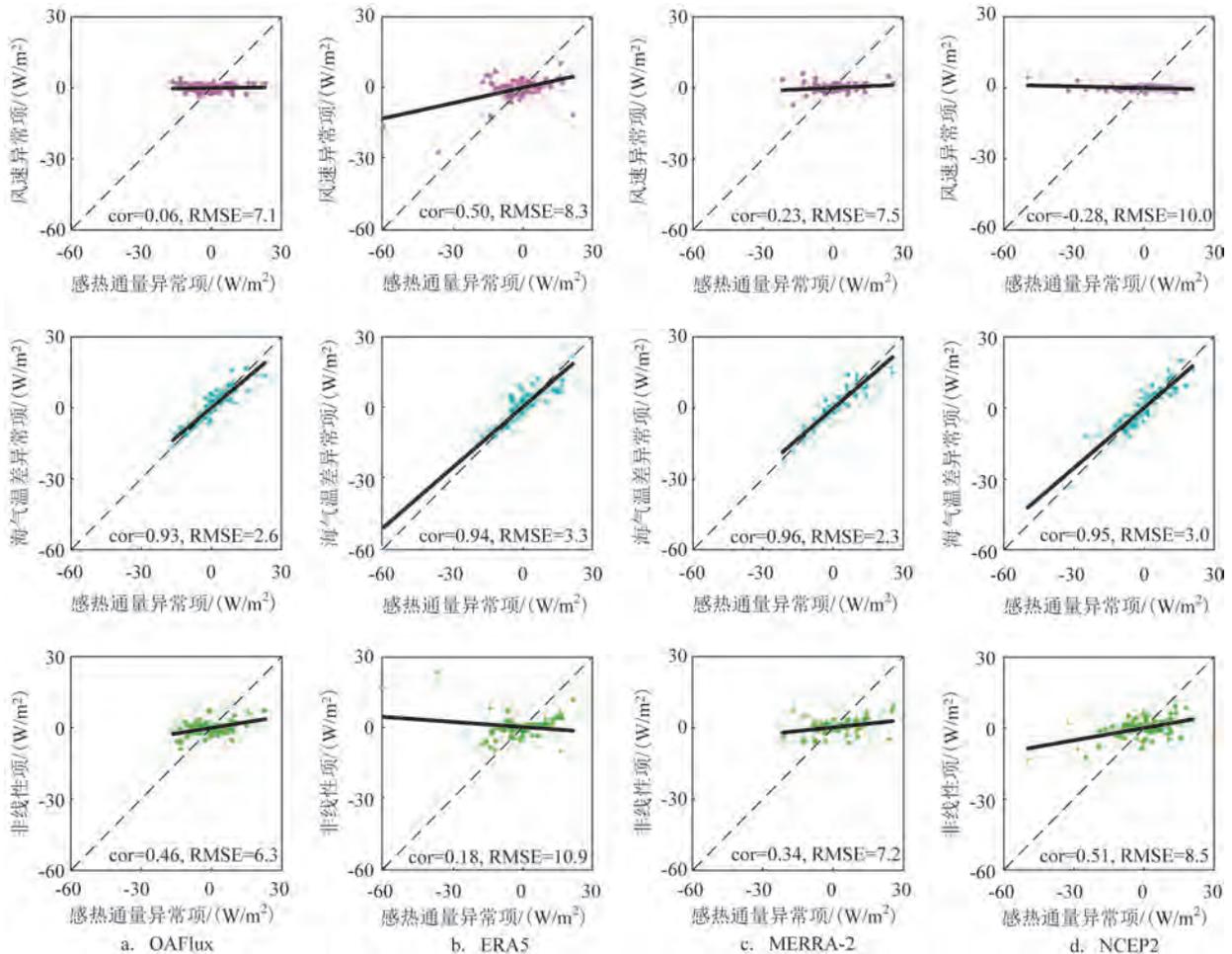


图5 4个产品感热通量异常项与线性化分解项的比较

Fig.5 Comparison of the sensible heat flux anomaly terms with linearized decomposition terms for four products

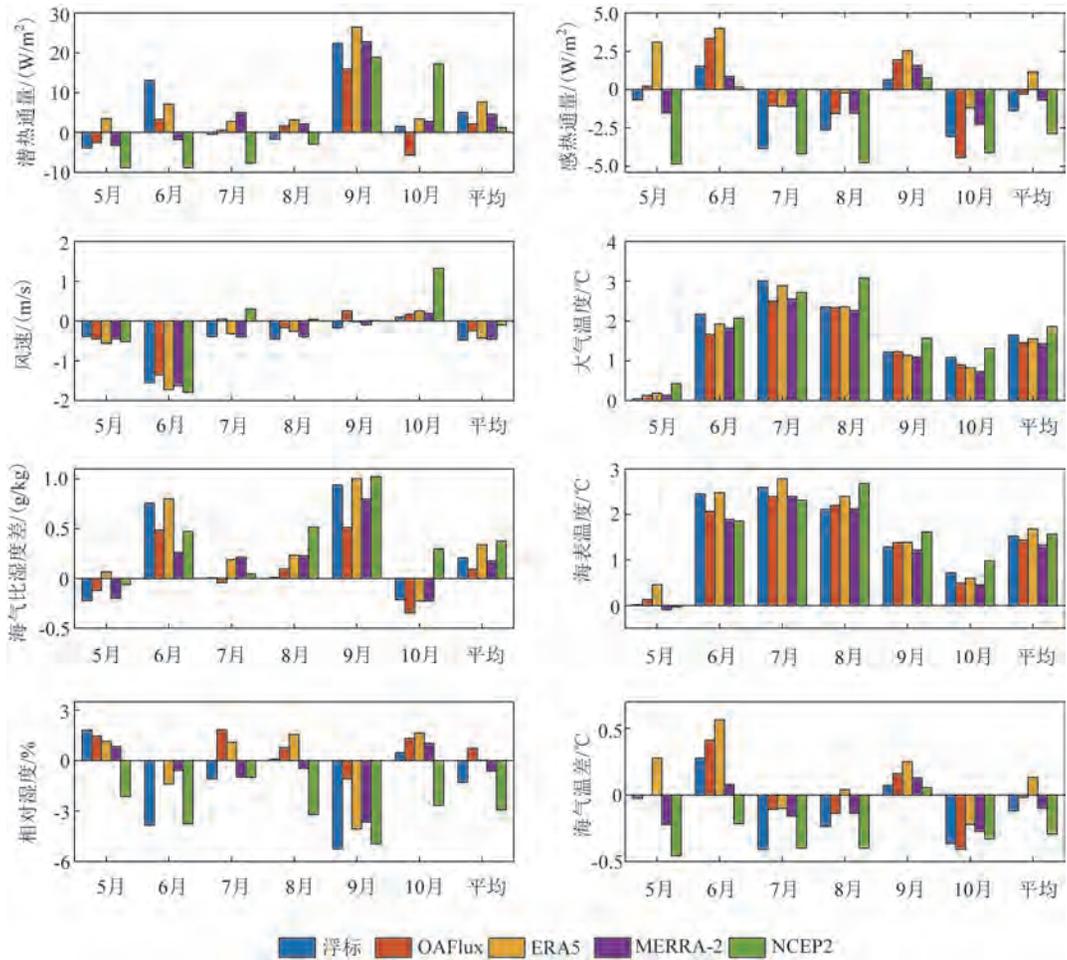


图6 NDBC浮标与通量产品的月平均海气参数异常

Fig.6 Monthly average air-sea parameter anomalies from the NDBC buoy and flux products

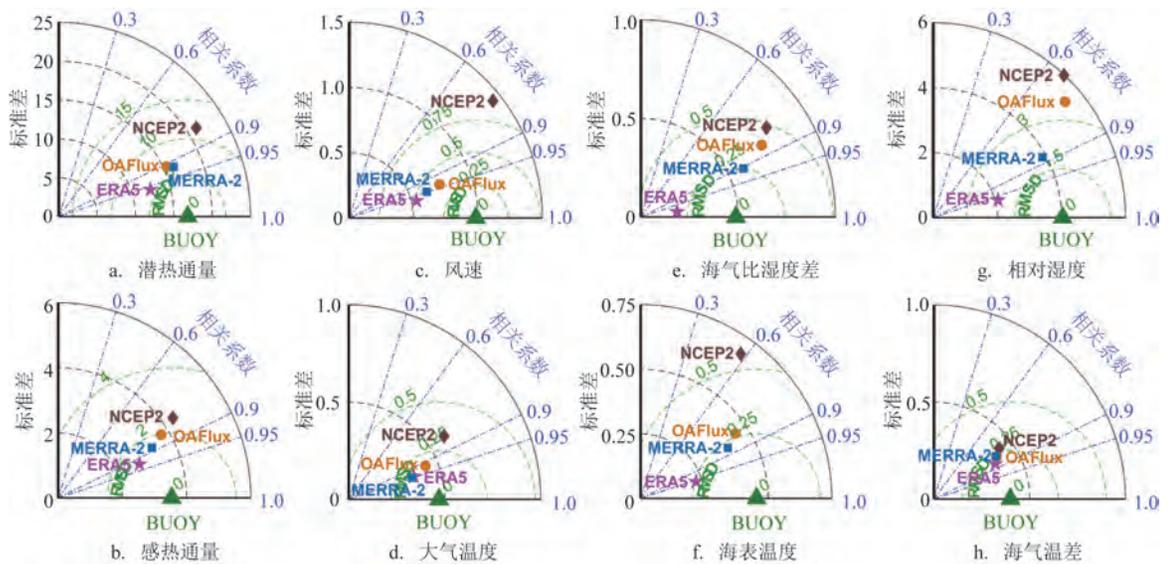


图7 基于浮标观测的通量产品的海气参数异常的泰勒图

Fig.7 Taylor diagram of air-sea parameter anomalies based on flux products observed by the NDBC buoy

3.8 W/m²,而感热通量平均减少了3.0 W/m²。

基于 NDBC 浮标数据 (BUOY), 我们对 OAFlux、ERA5、MERRA-2 和 NCEP2 这 4 类通量产品的海气状态变量进行了评估, 并将结果展现在泰勒图中。评估结果显示 (见图 7), ERA5 产品与浮标观测的相关性较好, 且均方根误差也较小; 而 MERRA-2 和 OAFlux 产品与浮标观测的相关性稍低于 ERA5, 但他们的标准差与观测更为接近。相比之下, NCEP2 产品的拟合效果较差。总体而言, 4 个通量数据集中的变量, 如海气比湿度差、海表温度和相对湿度等, 仍然有改进的空间。

3 结论

海洋热浪事件是一种异常的海水升温现象, 给海洋生态系统以及人类社会和经济活动都带来了潜在威胁。然而, 目前对海洋热浪的研究主要集中在其基本特征、物理驱动因素和遥相关等方面, 对海洋热浪如何影响湍流热通量的研究还相对较少。本文以 2019 年夏季东北太平洋“Blob 2.0”海洋热浪事件为例, 研究了海洋热浪对湍流热通量的影响。通过对 NDBC 浮标的观测数据进行分析, 比较了在该事件期间海气状态变量与气候态平均值的差异, 并研究了湍流热通量异常的主要物理机制, 此外, 还评估了 OAFlux、ERA5、MERRA-2 和 NCEP2 这 4 个产品的表现。结论如下:

①在“Blob 2.0”事件中, 浮标观测显示平均海表温度上升了 2.1 °C, 海气温差减小了 0.1 °C, 风速减少了 0.7 m/s, 大气相对湿度减少了 2.2%, 海气比湿度差增加了 0.4 g/kg, 这些因素导致感热通量减少了 1.3 W/m², 而潜热通量增加了 6.9 W/m²。这其中, 海气比湿度异常是潜热通量异常的主要贡献者, 而海气温差异常是感热通量异常的主要贡献者, 风速异常对湍流热通量异常的影响较小。

②在“Blob 2.0”事件中, OAFlux、ERA5 和 MERRA-2 产品的潜热通量呈增加趋势, 但相较于浮标观测则低估了潜热通量的增长率; NCEP2 产品的潜热通量则呈减少趋势。这 4 类数据集均表明, 海气比湿度异常是潜热通量异常的主要控制因素。对于感热通量, 浮标观测、MERRA-2 和 NCEP2 产品均显示出减少趋势, 主要是由于海气温差的减

小; 而 OAFlux 和 ERA5 产品海气温差增加, 导致海表感热通量增加。

需要注意的是, 尽管浮标观测在记录和估算海气状态变量方面存在误差, 但它仍然是评估客观分析的通量产品 (如 OAFlux) 和再分析数据集产品 (如 ERA5、MERRA-2 和 NCEP2) 的有力工具^[33-34]。此外, 不同产品的分辨率、海气相关参数的测量以及湍流热通量估算算法的差异, 也可能导致与浮标观测结果出现不一致。因此, 本文的结果对改进通量产品的参数误差具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] HOBDAJ A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 141: 227-238.
- [2] HOBDAJ A J, OLIVER E C J, GUPTA A S, et al. Categorizing and naming marine heatwaves[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 162-173.
- [3] GUPTA A S, THOMSEN M, BENTHUYSEN J A, et al. Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 19359.
- [4] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1324.
- [5] OLITA A, SORGENTE R, NATALE S, et al. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response[J]. *Ocean Science*, 2007, 3(2): 273-289.
- [6] CHEN K, GAWARKIEWICZ G, KWON Y O, et al. The role of atmospheric forcing versus ocean advection during the extreme warming of the Northeast U.S. continental shelf in 2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(6): 4324-4339.
- [7] TAN H J, CAI R S. What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016? [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2018, 19(10): e853.
- [8] PERKINS-KIRKPATRICK S E, KING A D, COUGNON E A, et al. The role of natural variability and anthropogenic climate change in the 2017/18 Tasman Sea marine heatwave[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(1): S105-S110.
- [9] OLIVER E C J, BENTHUYSEN J A, BINDOFF N L, et al. The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 16101.
- [10] GAWARKIEWICZ G, CHEN K, FORSYTH J, et al. Characteristics of an Advective marine heatwave in the middle Atlantic bight in early 2017[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 712.
- [11] SUGIMOTO S, QIU B, KOJIMA A. Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander[J]. *Journal of*

- Oceanography, 2020, 76(2): 141-154.
- [12] DI LORENZO E, MANTUA N. Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1042-1047.
- [13] HU Z Z, KUMAR A, JHA B, et al. Persistence and predictions of the remarkable warm anomaly in the northeastern Pacific Ocean during 2014-16[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(2): 689-702.
- [14] TSENG Y H, DING R Q, HUANG X M. The warm blob in the northeast Pacific-The bridge leading to the 2015/16 El Niño[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 054019.
- [15] WALSH J E, THOMAN R L, BHATT U S, et al. The high latitude marine heat wave of 2016 and its impacts on Alaska[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(1): S39-S43.
- [16] VIGLIONE G. Fevers are plaguing the oceans - and climate change is making them worse[J]. *Nature*, 2021, 593(7857): 26-28.
- [17] FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 360-364.
- [18] 胡石建, 李诗翰. 海洋热浪研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 51-64.
- HU S J, LI S H. Progress and prospect of marine heatwave study [J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 51-64.
- [19] GENTEMANN C L, FEWINGS M R, GARCÍA-REYES M. Satellite sea surface temperatures along the West Coast of the United States during the 2014—2016 northeast Pacific marine heat wave[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 312-319.
- [20] SCHMEISSER L, BOND N A, SIEDLECKI S A, et al. The role of clouds and surface heat fluxes in the maintenance of the 2013—2016 Northeast Pacific marine heatwave[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(20): 10772-10783.
- [21] SANFORD E, SONES J L, GARCÍA-REYES M, et al. Widespread shifts in the coastal biota of northern California during the 2014—2016 marine heatwaves[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4216.
- [22] AMAYA D J, MILLER A J, XIE S P, et al. Physical drivers of the summer 2019 North Pacific marine heatwave[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1903.
- [23] YU L S. Global air-sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: energy budget closure and unanswered questions[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2019, 11: 227-248.
- [24] 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.
- [25] 刘喻道, 高郭平, 赵进平, 等. 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[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 149-160.
- LIU Y D, GAO G P, ZHAO J P, et al. Analysis of summer air-sea heat flux based on moored buoy observations and comparison to with the ERA-Interim/OAFlux in the Nordic Seas[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(1): 149-160.
- [26] CRONIN M F, GENTEMANN C L, EDSON J, et al. Air-sea fluxes with a focus on heat and momentum[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 430.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [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): 527-540.
- [30] GELARO R, MCCARTY W, SUÁREZ M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [31] SONG X Z. The importance of relative wind speed in estimating air-sea turbulent heat fluxes in bulk formulas: examples in the Bohai Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37(4): 589-603.
- [32] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [33] ZHANG L, SHI H Q. An evaluation of new satellite-derived latent and sensible heat fluxes with moored buoy data, OAFlux and NCEP2 reanalysis products[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(9): 27-38.
- [34] MONIN A S, OBUKHOV A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground[J]. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst*, 1954, 24(151): 163-187.
- [35] LIU W T, KATSAROS K B, BUSINGER J A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the Molecular Constraints at the interface[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1979, 36(9): 1722-1735.
- [36] LARGE W G, POND S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(3): 324-336.
- [37] SONG X Z, WANG X Y, CAI W B, et al. Observed air-sea turbulent heat flux anomalies during the onset of the South China Sea summer monsoon in 2021[J]. *Monthly Weather Review*, 2023, 151(9): 2443-2464.

Evaluation of air-sea turbulent heat fluxes data under the background of marine heatwaves —A case study of the 2019 Northeast Pacific "Blob 2.0" event

MA Jing¹, SONG Xiangzhou¹, YAN Yunwei¹, WANG Bin², CHEN Zhi³

(1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 410073, China; 2. National Ocean Technology Center, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In the summer of 2019, the Northeastern on Pacific region experienced a marine heatwave event called "Blob 2.0", which had a significant impact on the marine ecosystem. This study conducted a comprehensive analysis of the characteristics of air-sea turbulent heat flux during this event using the buoy data from National Data Buoy Center, the global objective flux product OAFlux, and atmospheric reanalysis datasets ERA5, NCEP2 and MERRA-2. The study also investigated the physical factors influencing these fluxes. The buoy observation revealed that during the "Blob 2.0" event, there was a positive increasing trend in latent heat flux, while sensible heat flux exhibited a negative decreasing trend. This phenomenon can be attributed to the positive increase in the air-sea specific humidity difference and the negative decrease in wind speed and air-sea temperature difference. Evaluation results indicated that all four flux data products underestimated the growth of latent heat flux, with ERA5 showing the closest agreement with buoy observation. Regarding sensible heat flux, both MERRA-2 and NCEP2 products exhibited a similar increasing trend as observed by buoys, with MERRA-2 showing a closer growth rate. However, OAFlux and ERA5 products showed an opposite trend compared to the observations.

Key words: marine heatwaves; turbulent heat flux anomalies; buoy observation; flux datasets