封宝鑫, 刘海龙, 林鹏飞, 等. 2018. 南海卫星遥感海表湍流热通量资料的评估 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 332-340. Feng Baoxin, Liu Hailong, Lin Pengfei, et al. 2018. Evaluation of the satellite remote sensing surface turbulent heat flux data over the South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 332-340, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17046.

南海卫星遥感海表湍流热通量资料的评估

封宝鑫1 刘海龙2 林鹏飞2 王启1

1 中国海洋大学海洋和气象学院,山东青岛 2661002 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

摘 要 利用现场观测资料、OAFlux 的湍流热通量,评估了 JOFURO (Japanese Ocean Flux Data Sets with use of Remote Sensing Observations)、HOAPS-2 (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite data version 2)、GSSTF-2 (Goddard Satellite-Based Surface Turbulent Fluxes version 2) 3 种卫星资料在南海区域的表现。 3 套卫星资料可以说各有千秋,总体而言 JOFURO 和 GSSTF-2 资料的空间分布和时间变化与 OAFlux 资料整体上 较一致,但是这两套资料都在很大程度上低估了海盆平均的潜热和感热,前者低估约 10%~20%,后者则可以达 到 50%以上。HOAPS-2 资料与现场观测资料有较好的一致性,但在时间变化上和其他资料的差异则较大,特别是 感热方面,季节变化振幅、年际变化位相等都与其他资料不一致。通过比较我们发现,海南岛周边以及南海南部 区域估算的潜热和感热释放偏小是造成整体偏小的主要原因。 关键词 卫星遥感 湍流热通量 潜热通量 感热通量 南海

文章编号1006-9585 (2018) 03-0332-09中图分类号P47文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17046

Evaluation of the Satellite Remote Sensing Surface Turbulent Heat Flux Data over the South China Sea

FENG Baoxin¹, LIU Hailong², LIN Pengfei², and WANG Qi¹

1 College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong Province 266100

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this study, in situ observations of turbulent heat flux and the OAFlux data are compared with three satellite-derived datasets, i.e., JOFURO (Japanese Ocean Flux Data Sets with use of Remote Sensing Observations), HOAPS-2 (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite data version 2), and GSSTF-2 (Goddard Satellite-Based Surface Turbulent Fluxes version 2), in the South China Sea (SCS). The three satellite-derived datasets have different features. In general, the spatial distributions and temporal variabilities of JOFURO and GSSTF-2 data are consistent with those of the OAFlux data. However, these two datasets largely underestimate the average latent and sensible heat fluxes over the entire basin. The former underestimates the heat fluxes by 10%–20% and the underestimation in the latter can reach up to more than 50%. The HOAPS-2 data are consistent with the in situ data, but there exist distinct differences in the temporal variability when compared with other datasets, especially the amplitude of

收稿日期 2017-03-20; 网络预出版日期 2017-04-26

作者简介 封宝鑫, 男, 1988年出生, 博士, 讲师, 主要从事南海中尺度涡数值模拟研究。E-mail: fbxforever@126.com

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目2013CB956204,中国科学院战略重点研究项目"西太平洋系统:结构、动力、影响"All010304,国家自然科学基金项目41376019、41275084、41075059

Funded by National Basic Research and Development Program of China (Grant 2013CB956204), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA11010304), National Natural Science Foundation of China (Grants 41376019, 41275084, and 41075059)

seasonal variation and the phase of interannual variation in the sensible heat flux. The comparison reveals that the underestimation of the latent and sensible heat fluxes in the vicinity of Hainan Island and the southern SCS is the main reason for the underestimation in the entire SCS basin.

Keywords Satellite remote sensing, Turbulent heat flux, Latent heat flux, Sensible heat flux, South China Sea

1 引言

南海是西北太平洋最大的边缘海,它与周围的 边缘海和大洋通过众多的海峡和水道相连: 在东北 部通过台湾海峡和吕宋海峡分别与中国东海和太 平洋相连:在南部则是通过民都洛海峡和巴拉巴克 海峡与苏禄海连接,并通过卡里马塔海峡和爪哇海 相通;此外,南海还通过马六甲海峡与印度洋相连。 由于南海位于北回归线以南,海盆平均的情况下南 海从大气中获得热量,因此南海是一个存储热量的 海域 (Qu et al., 2006), 而这些热量会通过各海峡 输送到其他海域。由于海洋观测资料的缺乏,不足 以估算出通过海峡的热通量,估算表层热收支成为 了解热输送的主要途径。近来, Qu et al. (2009)利 用 OAFlux(Objectively Analyzed Air-Sea Heat Flux) 和 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)资料估算了南海海盆平均的净热通量, OAFlux 资料估算出的净热通量可达 49 W/m², 大约是 COADS 资料的估算(23 W/m²)的2倍。这些结果 表明,在南海中估算热收支存在很大的不确定性, 仍需要进一步的研究。

海表热收支是由4个通量之和组成:两个辐射 通量,短波辐射通量和长波辐射通量;两个湍流通 量,潜热通量和感热通量。在过去的几十年里,有 多套全球的格点海表热通量数据发布,这些数据也 大量应用于气候研究。全球格点海表热通量数据可 以分为3类:第一类卫星遥感数据估算的(Schulz et al., 1997; Kubota et al., 2002; Chou et al., 2003); 第二类是用船测观测(走航或定点)估算的(Da Silva et al., 1994; Josey et al., 1998; Berry and Kent, 2009; Large and Yeager, 2009); 第三类则是模式 同化数据(Kalnay et al., 1996; Gibson and Harper, 1997; Uppala et al., 2005; Yu et al., 2008)。辐射 通量可以从卫星资料中获得,并且具有较高的准确 性 (Frouin and Chertock, 1992)。然而, 潜热通量 和感热通量具有较大的不确定性,特别是卫星资 料,因为估算湍流热通量需要的近表面大气湿度和 温度,在卫星资料中存在较大的不确定性。但是,

卫星资料在空间和时间分辨率上有显著的优势,是 传统的船载、浮标观测所不能比拟的。因此,非常 有必要分析卫星资料中的湍流热通量的偏差,有助 于今后此类资料的使用。

除了上面提到的 Qu et al. (2009)的研究之外, 还有一些工作对南海的海表热通量进行了分析。 Zeng et al. (2009)利用 7 种卫星潜热通量与浮标观 测资料进行比较,并发现这些格点资料与现场观测 资料的一致性都不是很好。Feng et al. (2016)利用 现场观测数据和浮标数据与第二类格点数据和第 三类格点数据中的 OAFlux 进行了比较,发现船舶 资料整理的格点数据中潜热通量和感热通量比现 场观测数据和浮标数据要偏小,而 OAFlux 资料的 潜热通量则与观测比较接近。

本文的主要目的是,利用现场观测资料(船测 或观测塔)和 OAFlux 数据,从空间分布、时间变 化等角度,评估 3 种常用的卫星遥感数据中的湍流 热通量在南海的偏差情况,发现卫星遥感资料存在 的问题。第二节介绍本文所用的资料,第三节探讨 4 种格点数据湍流热通量与现场观测的差别,第四 节对 4 种格点资料的空间分布和时间变化进行分 析,第五节是总结。

2 数据介绍

2.1 格点数据

本文使用的 4 种格点湍流热通量数据分别包 括:卫星遥感数据 JOFURO (Japanese Ocean Flux Data Sets with use of Remote Sensing Observations) (Kubota et al., 2002)、HOAPS-2 (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite data version 2)、GSSTF-2 (Goddard Satellite-Based Surface Turbulent Fluxes version 2) (Chou et al., 2003),以及分析数据 OAFlux (Yu et al., 2008)。 表 1 展示了 4 种格点数据的具体信息。

3 种卫星资料的有许多类似的地方,比如海表 面风都是来自 SSM/I (Special Sensor Microwave/ Image)(Wentz, 1994)等,同时 3 份资料之间还 是存在显著的差异,主要包括两个方面:一是计 表1 4种海表热通量格点数据的基本描述,包括数据名称、时空分辨率、计算方法和参考文献等

Table 1Basic description of the four gridded surface heat flux datasets, including the name, spatial and temporal resolution,calculation method, and reference etc.

		时间分	空间分辨率				
数据名称	时间	辨率	(纬度×经度)	海表温度数据	海表风场数据	通量计算方法	参考文献
JOFURO	1988~2008年	月平均	1°×1°	NCEP	SSM/I	Kondo (1975)	Kubota et al. (2002)
HOAPS-2	1988~2002 年	月平均	$0.5^{\circ} imes 0.5^{\circ}$	AVHRR	SSM/I	Fairall et al. (1996)	无
GSSTF-2	1988~2008 年	月平均	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$	NCEP	SSM/I	Chou (1993)	Chou et al. (2003)
OAFlux	1958~2010年	月平均	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$	AVHRR 和预报	SSM/I、AMSR-E、	COARE (Coupled Ocean-	Yu et al. (2008)
				模式	快速散射计卫星和	Atmosphere Response Experiment	
					预报模式	algorithm) 2.6 a 版本	

表 2 观测调查船和观测塔数据的基本描述,包括位置、时间范围和参考文献等

Table 2 Basic description of the observation ships and tower, including the position, time range, reference etc.

数据	来源	位置	时间范围	观测仪器	变量	参考文献
科学1号船	南海季风试验	6°15′N, 110°E	1998.05.05 至 1998.05.25,	Chris Fairall 型海蛇温度计;旋桨式风向风速	潜热通量、感	曲绍厚等
(KX1)	中的调查船		1998.06.05 至 1998.06.20	计; Vaisala 标准温度、湿度和气压传感器	热通量	(2000)
实验3号船	南海季风试验	20°24′N, 116°54′E	1998.05.05 至 1998.05.25,	Chris Fairall 型海蛇温度计;旋桨式风向风速	潜热通量、感	曲绍厚等
(SY3)	中的调查船		1998.06.05 至 1998.06.20	计; Vaisala 标准温度、湿度和气压传感器	热通量	(2000)
永兴塔 (YX)	塔测资料	16°50′N, 112°20′E	2008.04.25 至 2008.10.07	109-L 水温表;风速风向传感器; HMP45C	潜热通量、感	孙启振等
				空气温度湿度传感器	热通量	(2010)

算使用的海表面温度来源不同。JOFURO 和 GSSTF-2 使用了 NCEP-NCAR (National Centers for Prediction-National Environmental Center for Atmospheric Research)再分析资料的海表温度,是现 场观测和卫星数据的混合,而 HOAPS-2 使用了卫 星观测的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)海表面温度。二是使用的计算湍流通 量的方法不同。JOFURO 资料使用 Kondo (1975) 的方法,在计算大气稳定度系数时没有考虑大气温 度和海表气压。HOAPS-2数据的湍流通量计算方法 来自于 Fairall et al. (1996),是现在计算海气湍流 通量通用的方法。GSSTF-2资料的通量计算方法是 基于 Chou (1993),其通量计算方法中考虑了大气 温度和海表气压对大气稳定度的影响。

OAFlux 资料是结合多种观测资料、卫星资料 和再分析资料,通过客观分析的方法得到大气和海 洋的状态量,然后再用于计算湍流通量。其中,也 用到了前面提到的卫星资料所采用的 AVHRR 海表 面温度资料和 SSM/I 的海表面风场资料等。OAFlux 资料的湍流通量的计算方法也来源于 Fairall et al. (1996)。

除了 HOAPS-2 数据空间分辨率为 0.5°, 其他 3 种资料的空间分辨率均为 1°。但是 HOAPS-2 数据时间长度略短,从 1988 年到 2002 年,其他资料都

延续到 2008 年。现场观测资料分为 1998 年和 2008 年两段,在 HOAPS-2 数据对照 2008 年的现场观测 资料时使用的是气候平均值代替。另外,下面的分 析我们都将资料处理成月平均。

2.2 现场观测数据

本文所应用的船测和定点观测资料的具体信息在图1和表2中展示。图1展示了两个船测和一个定点观测在南海的具体位置。实验3号船(SY3)位于南海北部,具体位置为(20°24'N,116°54'E),观测期为南海季风试验期间1998年5月5日到5月25日和6月5日到6月20日。科学1号船(KX1)位于南海南部区域,具体位置为(6°15'N,110°E),观测期与SY3相同。两艘观测船所用的计算湍流热通量的方法相同,是考虑风速和大气层结的块体海气通量计算公式(Kondo,1975)。永兴塔(YX)处的定点观测资料来源于距岛360m,位于永兴岛东北海洋中的观测塔,其具体位置为(16°50'N,112°20'E),观测期为2008年4月25日到2008年10月7日。永兴岛处湍流热通量的计算方法是COARE3.0算法,来源于Fairall et al. (2003)。

3 格点资料与现场观测比较

由于所用的格点资料都是月平均的,为了方便



图 1 南海季风试验期间调查船的位置。填色是 WOA09 (World Ocean Atlas 2009) 年平均的海表温度。蓝色的矩形框是计算海盆平均的潜热 通量和感热通量的计算区域

Fig. 1 The position of the observation ship during the South China Sea monsoon experiments. Shadings show the sea surface temperature from WOA09 (World Ocean Atlas 2009). The blue rectangle denotes the area over which the basin mean latent and sensible heat fluxes are calculated

比较我们将现场数据也处理为月平均的。另外,定 义海洋从大气中获得热量为正。图2是现场资料和 格点资料潜热通量和感热通量的散点图,观测时段 的平均值在表3中。在图2中不同形状和颜色的点 代表不同的格点数据,而对角线代表着格点数据和 现场观测数据相等的位置。因为,潜热通量和感热

表 3 观测位置处的观测和格点数据的潜热通量和感热通量 的平均值

Table 3 Average values of latent and sensible heat fluxes from observations and gridded data at observation sites W/m^2

		0						
	潜热通量				感热通量			
	KX1	YX	SY3	平均	KX1	YX	SY3	平均
观测	-110 ± 52	-93 ± 27	-91 ± 32	-98	-10 ± 5	-6 ± 3	-8 ± 2	-8
JOFURO	-82	-92	-67	-80	-2	-2	-4	-3
HOAPS-2	-77	-91	-75	-81	-4	-4	-3	-4
GSSTF-2	-81	-88	-61	-77	-3	-1	-2	-2
OAFlux	-81	-96	-84	-90	-4	-1	-4	-3
集合平均				-85				-4

注: 表中士号后的数值为标准偏差。

通量均为负值,所以当散点位于对角线下面时,表 明格点数据大于现场观测数据;而当散点位于对角 线上面时,格点数据小于现场观测数据。

由图2我们可以发现,对于潜热通量来说,卫 星资料的绝大部分散点都位于对角线以上, JOFURO、HOAPS-2 和 GSSTF-2 仅有个别点位于 对角线下方。也就是说,卫星数据的潜热通量要明 显比观测偏小。相比卫星资料而言, OAFlux 资料 则要好许多,其大部分点都位于对角线附近,只有 一个点偏离对角线较远。这表明与卫星数据相比, OAFlux 资料的潜热通量与现场观测资料更为接近。 从表3中的数值我们也可以发现,卫星资料的3个 观测点的平均潜热通量都要小于现场观测资料至 少 15 W/m², 尤其是 GSSTF-2 资料, 比观测小 21 W/m²。卫星资料潜热通量比观测资料的明显偏小, 导致了4种格点资料的平均潜热通量,82 W/m², 也要明显小于观测值, 98 W/m², 大约 20%。在卫 星资料中,HOAPS-2的结果相比于其他2个资料要 更接近现场观测。而 OAFlux 资料的潜热通量仅比 观测小8W/m²,比卫星观测资料明显更好一些。

在感热通量方面,几乎所有格点数据的散点都 位于对角线的上方,仅有 HOAPS-2 的一个散点位于 对角线的下面,即格点数据的感热通量都要小于现 场观测的结果,也就是说格点数据显著低估了感热 通量的释放。同样的结果也出现在表 3 中, 3 种卫星 数据在 3 个现场观测点的感热通量平均值最大也仅 为现场观测值得一半,即 4 W/m²。OAFlux 资料和卫 星资料的偏差是一致的。综合考虑散点分布图和平 均值的结果,在四种格点资料中,我们认为 HOAPS-2 的潜热、感热通量都要大些,更接近于现场观测。

根据上述的比较我们发现,在潜热通量方面,4 种格点数据都比现场观测结果要小,低估了潜热通量 的释放,但是相比于卫星观测的结果,OAFlux资料 要更接近与观测一些。在感热通量方面,4种格点资 料的感热通量都明显低于现场观测资料,都明显低估 了感热通量的释放,OAFlux资料也是如此,只有 HOAPS-2 的感热通量的结果要稍大些。因此,综合 潜热和感热通量的结果,在卫星资料中的 HOAPS-2 资料比其他两种卫星资料表现的稍好一些。

4 热通量时空分布特征

我们将分析4种格点资料的空间分布和时间变

化特征,进一步了解4种格点资料在空间分布与时间变化上的差别。图3分别是4种资料的潜热通量和感热通量年平均空间分布图,其平均的时间范围是1988年1月到2002年12月。图3的潜热通量空间分布,我们可以发现4种格点资料的潜热通量的空间分布形式较为相近,均体现出北部潜热通量偏强,南部偏弱的情况,其大值区多集中在15°N以北,潜热释放基本大于110W/m²。计算了3种卫星资料分别与OAFlux的相关系数,JOFURO、HOAPS-2和GSSTF-2分别为0.61、0.78和0.58,HOAPS-2资料相关系数最高,而GSSTF-2相关性最低。这个结果与HOAPS-2和OAFlux都选用了相同的海表温度资料和海表热通量的计算方法有关。

表4展示了南海全海盆平均的潜热通量和感热通量的平均值,其区域为(1.5°N~22.5°N,106.5°E~121.5°E),去掉了苏禄海区域。根据表4我们发现, JOFURO和GSSTF-2的海盆平均的潜热通量明显小于HOAPS-2和OAFlux的结果,并且GSSTF-2的结果最小。对照图3可以发现,这与JOFURO和GSSTF-2的潜热通量释放在海南岛周边以及南海南部区域偏小有关。考虑到表1中3种卫星资料的差异,推测差异主要是海表面温度造成的。HOAPS-2的南海海盆平均的潜热通量释放甚至要强于OAFlux的结果,二者的主要差异也发生在海南岛周边和南海南部。

表 4 4 种格点数据的南海海盆平均的潜热通量和感热通量 在 1988 年 1 月到 2002 年 12 月的平均值和标准差

Table 4Average values of latent and sensible heat fluxesfrom the four gridded data over the entire SCS (SouthChina Sea) basin during Jan 1988 to Dec 2002 W/m^2

数据名称	潜热通量	感热通量	
JOFURO	-97 ± 21	-8 ± 4	
HOAPS-2	-110 ± 20	-6 ± 3	
GSSTF-2	-90 ± 23	-5 ± 4	
OAFlux	-104 ± 23	-8 ± 5	

注: 士号前的数值为平均值, 士号后的数值为标准差。

4 种格点资料的感热通量的空间分布也体现出 北部感热释放较强,南部感热释放较弱的情况。感 热释放的大值区多位于 20°N 以北,JOFURO 在越 南沿岸出现了高于 15 W/m²的释放。同样计算了 3 种卫星资料分别与 OAFlux 的相关系数,JOFURO、 HOAPS-2 和 GSSTF-2 分别为 0.73、0.45 和 0.88, GSSTF-2 资料的空间形式与 OAFlux 的结果更为相 近一些。从全海盆平均的结果看(表4), JORURO 资料的全海盆平均平均的感热通量与 OAFlux 相同,均为8 W/m²,这可能与 JOFURO 资料在沿岸 地区存在感热释放的高值区有关。而 GSSTF-2 的空 间形式虽然与 OAFlux 较为接近,但是海盆平均值 要略小一些。

为了进一步了解4种格点资料的特点和差别, 我们分析4种格点资料的时间变化特征。图4是4 种格点资料全海盆平均的潜热通量和感热通量的 季节变化,其平均的区域与表4相同。在潜热通量 方面,3种卫星数据的变化基本相同,存在两个峰 值,分别出现在5月和9月。OAFlux资料虽然也 存在两个峰值,但是第一个峰值发生比卫星资料提 前一个月,出现在4月,第二个峰值与卫星资料相 同。JOFURO 和 HOAPS-2 的季节变化振幅比较相 近,分别为15.4 W/m²和15.7 W/m²,而GSSTF-2 和 OAFlux 的季节变化振幅要略大一些,大约为 19.1W/m²和19.4W/m²。4种格点资料的高值区(在 曲线图中表现为谷值)多出现在冬季和夏季,与南 海季风冬夏季较强,而在季风转换季节较弱有关。 而在量值方面,则与前面表 4 体现出来的一样, JOFURO 和 GSSTF-2 资料的潜热通量明显弱于 HOAPS-2 和 OAFlux 的结果。而 HOAPS-2 的结果 在7月份以前均强于 OAFlux 的结果,7月之后则 变为 OAFlux 的潜热通量略强。

图 4b 是感热通量的季节变化,JOFURO、 GSSTF-2 和 OAFlux 资料的变化趋势较为相近, HOAPS-2 无论是振幅还是位相都与其他 3 份资料 有显著差异。与潜热通量的结果相似,感热通量同 样存在两个峰值,分别发生在 4 月和 8 月,低值区 同样出现在冬夏季。但是 HOAPS-2 两个峰值出现 的时间都要比其他资料滞后 1 个月,分别发生在 5 月和 9 月。JOFURO、GSSTF-2 和 OAFlux 的季节 变化振幅较为相近,均为 3 W/m² 左右,而 HOAPS-2 的季节变化振幅为它们的一半,仅有 1.5 W/m²。至 于感热通量的量值,而 JOFURO 资料的感热通量释 放最强,GSSTF-2 的感热通量释放最小。

图 5 是 4 种格点资料的全海盆平均潜热通量和 感热通量的逐年变化,其平均的区域也与表 4 相同。 在 1999 年以前,HOAPS-2 的潜热通量释放在 4 种 格点资料中是最强的,GSSTF-2 是最弱的。1999 年之后,OAFlux 的潜热通量释放变为最强, GSSTF-2 依旧是最弱的。我们发现,OAFlux 的潜 热通量释放存在显著的逐年递增趋势,可达到每年 0.5 W/m²。JOFURO 的递增趋势和 OAFlux 资料量 值接近,GSSTF-2 资料是弱的递增趋势,仅为每年

0.05 W/m²,而 HOAPS-2 则的趋势为递减,可达每年 0.2 W/m²。这种潜热通量释放的长时间的趋势可能与计算中所用的风场资料的趋势有关。



图 3 1988 年 1 月至 2002 年 12 月 4 种格点数据的年平均的 (a-d) 潜热通量和 (e-f) 感热通量空间分布: (a、e) JOFURO; (b、f) HOAPS-2; (c、g) GSSTF-2; (d、h) OAFlux

Fig. 3 Annual mean (a-d) latent and (e-f) sensible heat fluxes for the four gridded datasets during Jan 1988 to Dec 2002: (a, e) JOFURO; (b, f) HOAPS-2; (c, g) GSSTF-2O; (d, h) AFlux





3 种卫星资料的逐年变化比较相近,而与 OAFlux 的变化则略有不同。4 种格点资料潜热通量 都有显著的年际变化,HOAPS-2、GSSTF-2 和 OAFlux 的年际变化的振幅均在 4.5 W/m² 左右, JOFURO 的振幅最大,可达 5.4 W/m²。JOFURO、 HOAPS-2 和 GSSTF-2 资料在 1995 年、1998 年和 2003 年均出现了潜热通量释放的高值,而这 3 年都 是 ENSO 正位相的次年。OAFlux 资料在 1995 年和 2003 年的情况与卫星资料相一致,但是 1998 年 OAFlux 资料并未出现高值,其高值出现在 1999 年。

感热通量方面,与气候态变化的结果相似, JOFURO、GSSTF-2 和 OAFlux 的变化趋势较为相 近,而 HOAPS-2 的结果则与其他 3 种格点资料完 全不相关。JOFURO 和 OAFlux 的感热通量的年际 变化的振幅均为1.1 W/m²,而HOAPS-2和GSSTF-2的振幅则要略小一些,仅为0.8和0.7 W/m²。GSSTF-2资料的感热通量释放依旧是最弱,最强的则是JOFURO资料和OAFlux资料,而HOAPS-2的结果介于三者之间。在1995年和2003年,4种格点资料的感热通量同样再现了显著的年际变化信号,但在1998年,只有HOAPS-2的感热通量出现了高值,而其他3种格点资料的高值则出现在了1999年。

造成湍流热通量估算偏弱的因素很多,可能是 海表温度偏低、海表面风场偏弱等资料方面的原 因,也可能是来自计算湍流热通量的方法,这些方 面通过我们所掌握的信息很难分析出结果。但是通 过比较我们发现,海南岛周边以及南海南部区域估 算的潜热和感热释放偏小是造成整体偏小的主要 原因,今后加强这些区域的观测对减小南海湍流热 通量整体的偏差是非常有必要的。

5 总结

本文利用现场观测资料、OAFlux 的湍流热通 量,评估了 JOFURO, HOAPS-2 和 GSSTF-23 种卫 星资料在南海区域的表现。通过与现场观测资料的 比较我们发现,总体而言3种卫星资料都明显的低 估了潜热通量和感热通量,其中 HOAPS-2 资料相 比于其他两种卫星资料与观测更为接近一些。3种 卫星资料的年平均潜热通量的空间分布与 OAFlux 资料较为相近,均体现出北部偏强,南部偏弱的分 布。HOAPS-2 资料的空间分布与 OAFlux 的结果最 为相近,海盆平均的结果比 OAFlux 略强。JOFURO 和 GSSTF-2 感热通量的空间分布与 OAFlux 资料的 空间形式相近,而 HOAPS-2 资料则差别较大。虽 然空间相关上 GSSTF-2 与 OAFlux 更好些, 但海盆 平均的量值却是 JOFURO 资料的结果与 OAFlux 的 结果相同,均为8 W/m²,这与 JOFURO 资料的感 热通量在沿岸区域较强有关。JOFURO 和 GSSTF-2 资料可以较好地再现潜热和感热的季节变化、年际 变化和长期趋势,在量值上、位相上与 OAFlux 有 些差异。3种卫星资料中 HOAPS-2 资料和其他资料 的差异则较大,特别是感热方面,季节变化振幅偏 弱、年际变化位相与其他资料差别较大。

综合前面的分析结果,3 套卫星资料可以说各 有千秋,总体而言 JOFURO 和 GSSTF-2 资料的空 间分布和时间变化与 OAFlux 资料整体上较一致, 但是这两套资料都在很大程度上低估了海盆平均 的潜热和感热,前者低估约 10%~20%,后者则可 以达到 50%以上。因此,在利用这样的资料估算净 热通量时,会高估南海的经热通量,从而夸大海洋 环流对热量的输送作用。

通过各数据之间的比较,我们发现海南岛周边 及南海南部海区潜热通量和感热通量的估算偏小 是导致湍流热通量整体偏小的原因。另外,不同的 数据库所采用的不同的通量计算方法,其是否考虑 对流风作用,是否考虑盐度对饱和比湿的影响以及 交换系数的选取和计算等都会影响其计算出的湍 流热通量,这些细节的处理都会造成结果产生或大 或小的差异。但是,其具体的影响效果,仍需收集 更多的资料和信息,从而进行进一步的研究。

参考文献(References)

- Berry D I, Kent E C. 2009. A new air–sea interaction gridded dataset from ICOADS with uncertainty estimates [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90 (5): 645–656, doi:10.1175/2008BAMS2639.1.
- Chou S H. 1993. A comparison of airborne eddy correlation and bulk aerodynamic methods for ocean-air turbulent fluxes during cold-air outbreaks [J]. Bound.-Layer Meteor., 64 (1-2): 75–100, doi:10.1007/ BF00705663.
- Chou S H, Nelkin E, Ardizzone J, et al. 2003. Surface turbulent heat and momentum fluxes over global oceans based on the goddard satellite retrievals, version 2 (GSSTF2) [J]. J. Climate, 16 (20): 3256–3273, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3256:STHAMF>2.0.CO;2.
- Da Silva A M, Young C C, Levitus S. 1994. Atlas of surface marine data 1994 Vol. 1: Algorithms and procedures [R]. NOAA Atlas NESDIS 6, 83pp.
- 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 [J]. J. Geophys. Res., 101 (C2): 3747– 3764, doi:10.1029/95JC03205.
- 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 [J]. J. Climate, 16 (4): 571–591, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0571: BPOASF>2.0.CO;2.
- Feng Baoxin, Liu Hailong, Lin Pengfei, et al. 2016. Estimation of the surface heat budget over the South China Sea [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9 (3): 191–197, doi:10.1080/16742834.2016. 1164011.
- Frouin R, Chertock B. 1992. A technique for global monitoring of net solar irradiance at the ocean surface. Part I: Model [J]. J. Appl. Meteor., 31 (9): 1056–1066, doi:10.1175/1520-0450(1992)031<1056:ATFGMO>2.0.CO; 2.

- Gibson M M, Harper R D. 1997. Calculation of impinging-jet heat transfer with the low–Reynolds-number q-ζ turbulence model [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 18 (1): 80–87, doi:10.1016/S0142-727X(96)00135-X.
- Josey S A, Kent E C, Taylor P K. 1998. The Southampton Oceanography Centre (SOC) ocean–atmosphere, heat, momentum and freshwater flux atlas [R]. Tech. Rep. 6, 306pp.
- Kalnay E, Kanamitsu, M, Kistler, R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kondo J. 1975. Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions [J]. Bound.-Layer Meteor., 9 (1): 91–112, doi:10.1007/BF00232256.
- Kubota M, Iwasaka N, Kizu S, et al. 2002. Japanese ocean flux data sets with use of remote sensing observations (J-OFURO) [J]. Journal of Oceanography, 58 (1): 213–225, doi:10.1023/A:1015845321836.
- Large W G, Yeager S G 2009. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set [J]. Climate Dyn., 33 (2–3): 341–364, doi:10.1007/s00382-008-0441-3.
- Qu T D, Du Y, Sasaki H. 2006. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (23): L23617, doi:10.1029/2006GL028350.
- Qu T D, Song Y T, Yamagata T. 2009. An introduction to the South China Sea throughflow: Its dynamics, variability, and application for climate [J].
 Dyn. Atmos. Oceans, 47 (1–3): 3–14, doi:10.1016/j.dynatmoce.2008.05.
 001.
- 曲绍厚, 胡非, 李亚秋. 2000. 1998 年 SCSMEX 期间南海夏季风海气交

换的主要特征 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 434-446. Qu Shaohou, Hu Fei, Li Yaqiu. 2000. Some characteristics of air-sea exchange for the South China Sea summer monsoon in the period of SCSMEX98 [J]. Climatic and Environmental Research, 5 (4): 434-446, doi:10.3969/j.issn. 1006-9585.2000.04.009.

- Schulz J, Meywerk J, Ewald S, et al. 1997. Evaluation of satellite-derived latent heat fluxes [J]. J. Climate, 10 (11): 2782–2795, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2782:EOSDLH>2.0.CO;2.
- 孙启振,陈锦年,闫俊岳,等. 2010. 2008 年南海季风爆发前后西沙海域 海气通量变化特征 [J]. 海洋学报, 32 (4): 12–23. Sun Qizhen, Chen Jinnian, Yan Junyue, et al. 2010. The variation characteristics of air-sea fluxes over the Xisha Area before and after the onset of the South China Sea monsoon in 2008 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 32 (4): 12–23.
- Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961–3012, doi:10. 1256/qj.04.176.
- Wentz F J. 1994. User's manual SSM/I-2 geophysical tapes [R]. Tech. Rep. 070194, 20pp.
- Yu Lisan, Jin Xiangze, Weller R A. 2008. Mutidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. Tech. Rep. OA-2008-01, 64pp.
- Zeng Lili, Shi Ping, Liu W T, et al. 2009. Evaluation of a satellite-derived latent heat flux product in the South China Sea: A comparison with moored buoy data and various products [J]. Atmospheric Research, 94 (1): 91–105, doi:10.1016/j.atmosres.2008.12.007.