

南黄海海气热通量观测及其与 OAflux 数据集比较研究*

肖 斌^{1,2}, 乔方利^{1,2}, 吕连港^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:2007 年在南黄海进行了 3 个航次的热通量观测, 包括长、短波辐射, 近海表空气温度、湿度, 风速, 海表皮温等观测数据。依据计算的冬季、春季、秋季三个航次的海气热通量分析了热通量不同季节特征, 南黄海海域冬季、春季和秋季平均潜热通量分别为 80.7 W/m^2 , 5.6 W/m^2 和 142.1 W/m^2 , 感热通量分别为 32.0 W/m^2 , -12.5 W/m^2 和 18.9 W/m^2 (海洋向大气传递为正)。将国际较为通用的 OAflux 数据集与 3 个季节观测数据做了逐点的对比, 作为对 OAflux 数据集在南黄海海域的评估, 结果显示: OAflux 数据集热通量结果与观测数据在 2006—2007 年冬季最为接近, 感热和潜热通量均方差是 15.3 W/m^2 和 21.4 W/m^2 。春季的潜热通量存在明显偏差, 均方差为 28.4 W/m^2 。秋季的感热和潜热通量均存在显著偏差, 均方差分别为 20.5 W/m^2 和 57.5 W/m^2 。导致春季偏差的主要原因是 OAflux 数据集和现场观测的近海表空气湿度差异, 而秋季偏差则应主要归因于海表温度的偏差。

关键词:热通量观测; 南黄海; COARE3.0; OAflux

中图分类号: P732.6

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2013)01-0043-12

海洋和大气之间的热量传递是研究海—气相互作用中的关键问题, 其中海气界面处的海气热通量强烈影响着上层海洋以及大气边界层结构。研究表明, 中国近海感热通量冬、秋季较强, 春、夏季较弱, 其地理分布特点是冬季感热通量的分布随纬度变化十分明显, 纬度越高感热通量越大, 且等值线分布密集; 潜热通量冬、秋季在台湾东北部、日本南部和东南部海域形成极大值区, 等值线呈 SW—NE 走向^[1]。在黄海海域水深较浅, 受海气热交换影响尤其显著。钱粉兰等针对黄海、东海海域气旋发展过程的热通量进行过走航观测^[2], 闫俊岳等在南海海域开展了较为全面的海气通量观测^[3], 然而, 在黄海海域连续的覆盖海域较广的热通量观测非常有限。Na 等^[4]通过分析 1978—1995 年的天气图, 计算了东亚地区 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的海表热通量, 对黄海海域进行了净热通量估计。Hirose 等^[5]对 COARDS (Cooperative Ocean/Atmosphere Research Data Service), NODC (National Oceanographic Data Center), SD2 (Oceanographic Station Data), JODC (Japan Oceanographic Data Center) 航次报告的通量相关数据进行了分析, 计算了东海、黄海海域的热通量。Chu 等^[6]利用 MOODS (U. S. Navy's Master Oceanographic Observation Data Set) 和 COARDS 数据集, 结合黄海流系、地形、水团因素将黄海分为若干区域, 分析黄海海域内各个区域内热通量的特征。与东海海域相比, 黄海海域可用的数据明显偏少, 从而导致在此海域计算得到的热通量数据不准确。2007 年 3 个航次的热通量观测加深了我们对南黄海海域热通量季节变化特征的准确了解。

热通量的数据基本有下面 4 种: 走航观测、卫星数据、模式再分析数据和浮标观测。各种数据都有不同特点。走航观测数据的优点是精确度高, 一直以来计算海气通量气候态的主要方法^[7], 缺点是成本高, 数据覆盖海域有限, 不能满足时间和空间连续性要求, 因此利用有限的观测资料对已有的数据集进行比对就成为

* 收稿日期: 2012-02-13

资助项目: 国家自然科学基金——南黄海热通量的观测分析和 SST 变化、季节变化的机理研究 (40806015)

作者简介: 肖 斌 (1988-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学方面研究。E-mail: xiaobin@fio.org.cn

(高 峻 编辑)

更有效利用观测资料的一种方法^[8-9]。随着卫星遥感技术的不断发展和提高,国内利用卫星遥感资料反演中国近海海面热通量和亚印太边缘海海气热通量产品^[10-16]增多。

利用2007年南黄海通量走航观测中得到的大气与海洋数据(包括近海表空气温度、相对湿度、海表温度和风速等),用整体参数法^[17]计算相应的海气热通量。针对感热通量、潜热通量以及通量相关变量的季节特点进行分析,并与常用的通量数据集进行比对,为黄海海域热通量研究提供参考。

1 观测与方法

1.1 观测

2007年在中国南黄海进行了3个航次的多学科综合海洋调查(图1)。调查中获得与海气热通量相关的气象和海洋观测数据。图1中黑点为3个航次观测航线的OAflux(Objectively Analyzed air-sea Flux)数据格点及编号。这3个航次都由青岛沿岸海域的观测开始,其中冬季、秋季航次走航顺序是在调查海域由南向北,春季航次中走航顺序则是由北向南。冬季航次时间是2007-01-08—02-05,春季航次时间是04-03—27,秋季航次时间为10-06—11-05。关于此次调查航次的详细信息可参见文献^[18]。

主要测量要素包括温度、湿度探头(HMP45C)测量空气温度和湿度;红外皮温传感器(IRR-P)测量海表皮温;日辐射强度计测量来自太阳和大气漫射的短波辐射,波段为310~2800 nm;长波辐射表用来测量长波辐射,波段4.5~40 μm 。风速、气压等气象资料来自船舶气象仪。

1.2 数据处理方法

资料在后期经过分析汇总处理成了30 min平均数据,原始的观测数据中包括大雾、下雨、大风靠港和设备维护等非工作状态,为提高数据可信度,在后期数据处理中根据观测日志把这些数据都去掉。其中风速、气温和相对湿度的测量高度均为海面以上15 m。

本次观测数据应用COARE3.0(COARE Bulk Flux Algorithm version 3.0b)^[19]计算海气热通量。COARE3.0起源于1992年的COARE(The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment)

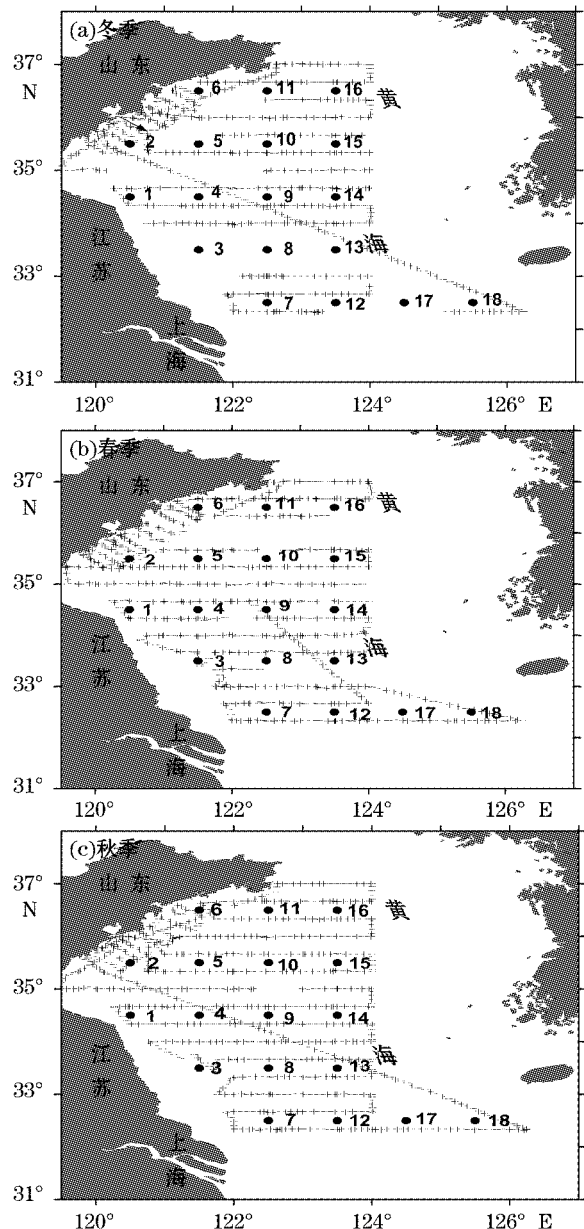


图1 2007年3个航次的观测数据点及OAflux数据格点编号

Fig. 1 The observed data points of the three cruises in 2007 and the grid points of OAflux dataset

实验,针对全球、同时兼顾高风速的海气通量版本的发展过程中进行过大量的实际观测,包括走航、浮标、飞机、卫星等,到目前该公式在 1~10 m/s 的风速区域计算精度已较为可靠^[19],对高风速条件下的热通量计算精度也有较大进步。因此,COARE3.0 已成为估算海气通量较可靠的公式之一。其潜热通量(Q_{LH})与感热通量(Q_{SH})的表达式:

$$Q_{LH} = \rho L_e c_e U (q_s - q_a) \quad (1)$$

$$Q_{SH} = \rho c_p c_h U (T_s - \theta) \quad (2)$$

式中, ρ 表示空气密度; L_e 表示蒸发潜热; c_p 表示定压比热容; U 表示在海面高度 Z_r 的风速,需要另外说明的是,由于 OAflux 数据集的风速是卫星反演数据,是等价中性风速(Equivalent Neutral Wind),虽然实测风速已订正的与 OAflux 相同的高度,但是没有考虑实测风速与等价中性风速的差别,这个差别被认为是次要的; c_e 和 c_h 分别表示潜热和感热湍流交换系数,其为风速、测量高度、大气稳定度的函数; q_s 和 q_a 分别表示对应于海表温度的大气饱和比湿和近海表大气比湿; T_s 和 θ 分别表示海表皮温和近海表气温。需要指出的是,通常提到的海表温度有 2 种:一种是海表的浮标或 CTD 测得的海表温度数据(the mixed layer or the bulk SST),另一种则是皮温(the skin SST)包括卫星遥测和红外皮温探测等,2 种海表温度存在一定的差别^[20-21],OAflux 与本次走航观测中的海表温度都属于皮温 T_s 。在式(1)和(2)中只有 U, T_s, q_a 和 θ 是独立的变量,这意味着其它的变量包括湍流交换系数均可通过 U, T_s, q_a 和 θ 计算得到。

表 1,表 2 分别给出各航次的热通量和相关海洋气象数据的平均值,其中辐射通量数据参见文献[10]。

表 1 2007 年 3 个航次的辐射通量和海气热通量平均值(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Table 1 Averaged values of the radiant heat flux and the air-sea heat flux observed in the three cruises in 2007(unit: $W \cdot m^{-2}$)

航次	净短波辐射	净长波辐射	Q_{LH}	Q_{SH}	Q_{net}
冬季	-101.7	93.2	80.7	32.0	104.2
春季	-204.1	57.7	5.6	-12.5	-153.5
秋季	-144.0	83.7	142.1	18.9	100.7

表 2 2007 年的海气通量相关数据的航次平均值

Table 2 Average values of the flux-related meteorological and oceanic data for the three cruises in 2007

航次	$U/m \cdot s^{-1}$	$T_s/^\circ C$	$\theta/^\circ C$	相对湿度/%
冬季航次	5.1	7.9	4.6	55.7
春季航次	6.4	10.2	12.2	82.1
秋季航次	5.3	18.6	16.5	54.4

2 观测结果

2.1 冬季航次

冬季航次中因为天气原因(避风和大雾等)不可避免地需去掉几个时间段数据。2007-01-23—27 和 01-29—30 因受强风影响,调查船靠港;01-12,01-15 和 01-16 均有降雨;感热通量的观测变化范围是 $-40.1 \sim 127.2 W/m^2$ (海洋向大气传递为正),潜热通量变化范围是 $-3.7 \sim 292.6 W/m^2$,观测到风速变化范围是

0.3~13.0 m/s,海表温度变化范围是 2.6~16.8 °C,气温变化范围-3.2~9.4 °C,相对湿度变化范围 21.3%~95.4%。感热通量、潜热通量、海表温度和气温的最大值均出现在 2007-01-12(图 2)。冬季黄海海域的感热通量与潜热通量的变化与海表温度的变化有很大的相关性。在冬季,黄海海气热通量主要从海洋向大气输送能量为主,且以潜热通量方式为主,潜热通量和感热通量的航次平均值为 80.7 W/m²和 32.0 W/m²。相比而言,冬季感热通量是这 3 个航次中最显著的,表 2 中显示该航次中的平均海气温差达 3.3 °C,为 3 个航次最高,这是造成感热通量最为显著的主要原因。

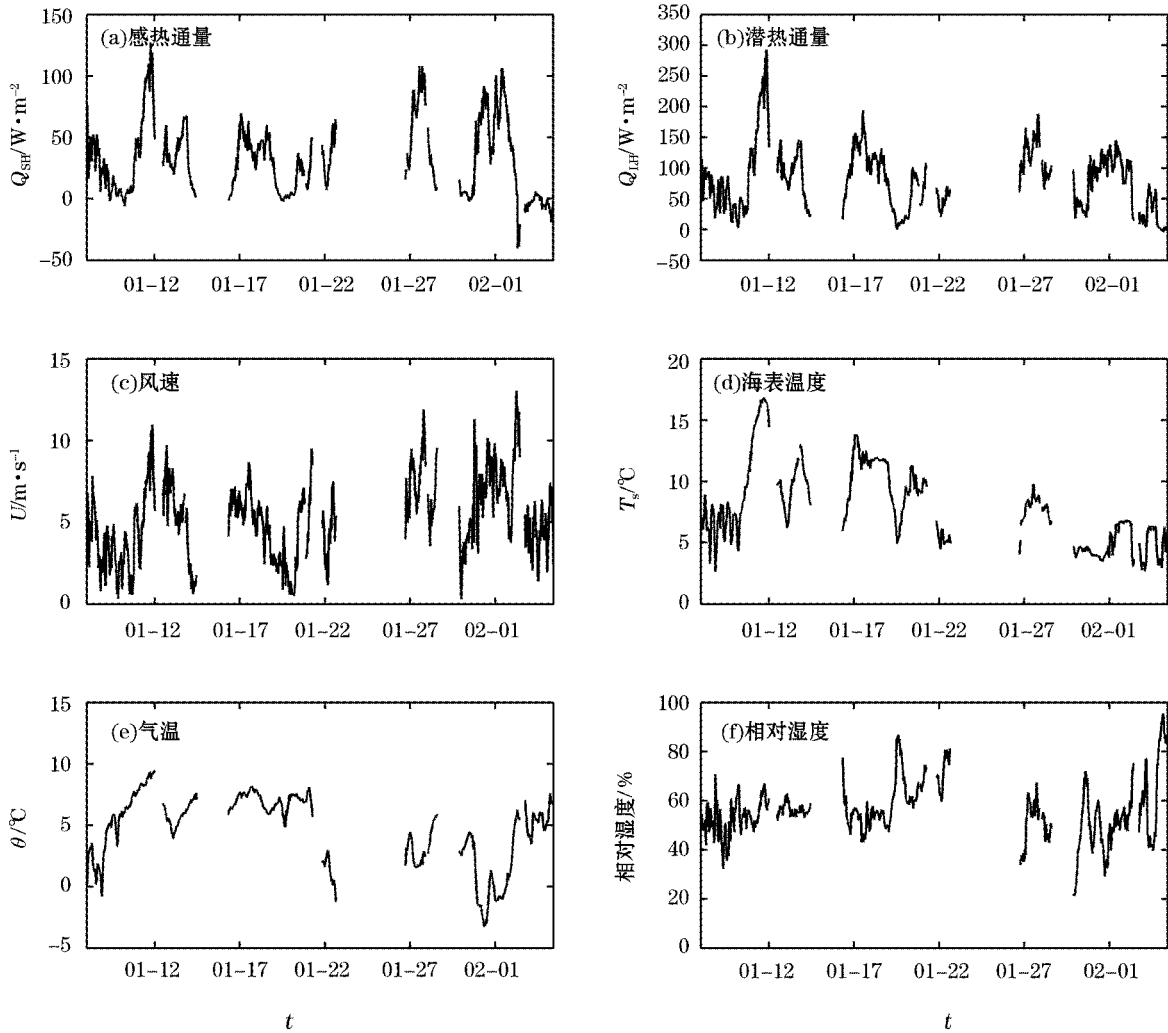


图 2 2007 年冬季航次的海气热通量以及通量相关气象和海洋观测数据

Fig. 2 Air-sea heat flux and the flux-related meteorological and oceanic data obtained in the winter cruise in 2007

2.2 春季航次

在春季航次中,2007-04-07—08 大雾,04-15 下午有降雨,鉴于不满足辐射计设备的使用要求停止了通量观测。观测到的风速范围是 0.4~16.6 m/s,海表温度变化范围是 5.6~15.1 °C,气温变化范围为 7.4~18.1 °C,平均海气温差为-2.0 °C。航次平均相对湿度达到 82.1%。由于平均气温高于平均海表温度,春季南海海域的感热通量转为主要从大气向海洋输送,感热通量的观测变化范围是-62.0~20.0 W/m²,平均值为-12.5 W/m²(图 3)。近海表相对湿度在这 3 个航次中最大,较大的海表相对湿度抑制了海水的蒸

发相变导致该航次的潜热通量为最弱,潜热通量变化范围是 $-32.3\sim 103.6\text{ W/m}^2$,平均值为 5.6 W/m^2 。春季在南黄海海域海气热通量是从大气向海洋输送能量(3个航次中唯一的航次),其平均海气热通量方向由大气向海洋。在春季,南黄海区域近海表空气湿度较大,且大气温度高于海表温度,是造成大气向海洋输送能量的主要原因。

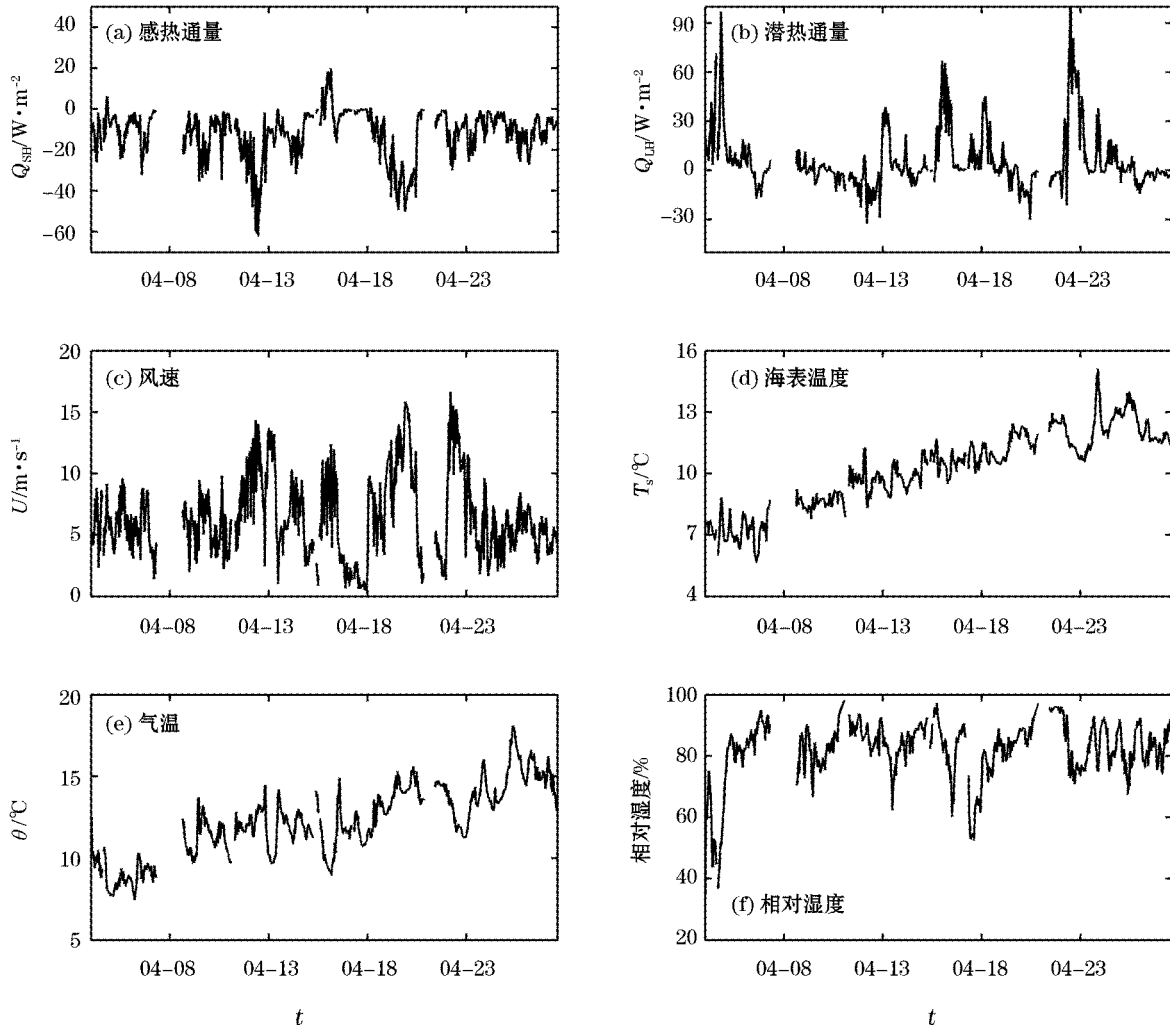


图 3 2007 年春季航次的海气通量以及通量相关气象和海洋数据

Fig. 3 Air-sea heat flux and the flux-related meteorological and oceanic data obtained in the spring cruise in 2007

2.3 秋季航次

秋季,黄海海域的海气热通量完全是由海洋向大气输送,海洋—大气间的热通量在 3 个航次中最为强烈,潜热通量在 3 个航次中亦是最强,其中感热通量的变化范围是 $5.2\sim 101.4\text{ W/m}^2$,平均值为 18.9 W/m^2 ,潜热通量($3.7\sim 428.0\text{ W/m}^2$)平均值高达 142.1 W/m^2 (图 4)。南黄海海域的平均海气温差达到 $2.1\text{ }^\circ\text{C}$,其中海表温度和气温的平均值为 $18.6\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $16.5\text{ }^\circ\text{C}$,为 3 个航次中最高,近海表空气湿度为最低,平均值为 54.4% ,这些相关特征是导致海气热通量在 3 个航次中最为强烈的直接原因。

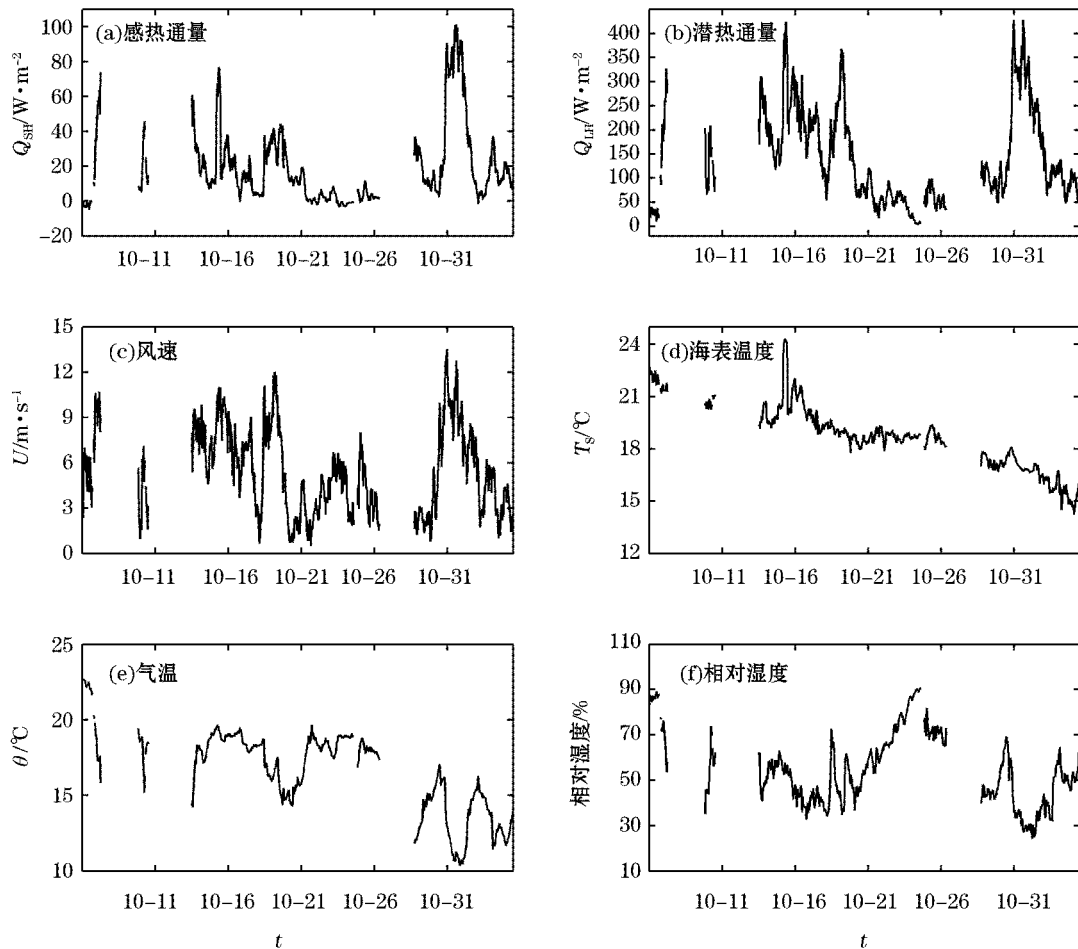


图 4 2007 年秋季航次的海气通量以及通量相关气象和海洋数据

Fig 4 Air-sea heat flux and the flux-related meteorological and oceanic data obtained in the autumn cruise in 2007

3 对 OAflux 数据集在南黄海海域的评估

OAflux 是 WHOI 的全球通量产品^[22],分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。OAflux 应用了客观分析方法^①对卫星数据、模式、再分析数据进行了融合,并以 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 数据作为主要依据在综合分析中选择权重^[23],应用 COARE3.0 来计算热通量,是比较常用的海气通量数据集。一些针对中国近海的热通量研究应用了 OAflux^[24]。

将根据航次资料计算的海气热通量与 OAflux 数据集进行对比,作为对 OAflux 数据集在南黄海海域的评估。由于同样是应用了 COARE3.0 来计算海气热通量,所以可以通过对比通量相关的气象和海洋数据进一步分析造成偏差的原因。

OAflux 数据集主要是对潜热通量和感热通量的估算,其中长波辐射与短波辐射采用 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)数据^[25]。在走航观测海域内有 18 个 OAflux 热通量数据格点,选择了逐点对比的方式。先选取距离 OAflux 数据格点最近(距离 8 km 左右)的一个走航点,以该走航点为

① YU L S, JIN X, WELLER R A. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed airsea fluxes (OAflux) project: latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. Woods Hole Oceanographic Institution, OAflux Project Technical Report. 2008

基准,选择之前和之后 12 h 的观测数据,将这 24 h 通量的平均值作为该走航点的日平均数据与 OAflux 相应数据格点上该天的日平均数据进行比对。OAflux 数据集的海表面风速、近海表气温和近海表大气湿度的测量高度分别为 10 m,2 m 和 2 m,进行比对之前已经将实测数据依据 COARE3.0 进行了相应的高度订正,其中走航观测的比湿由相对湿度换算得到。

OAflux 数据格点编号见图 1,冬季航次的比对结果见图 5 和图 6。由于图 5 和图 6 中 3,8 和 17 号格点附近缺少走航观测而未能对比。对比结果显示,OAflux 数据集在冬季航次中不论是感热通量还是潜热通

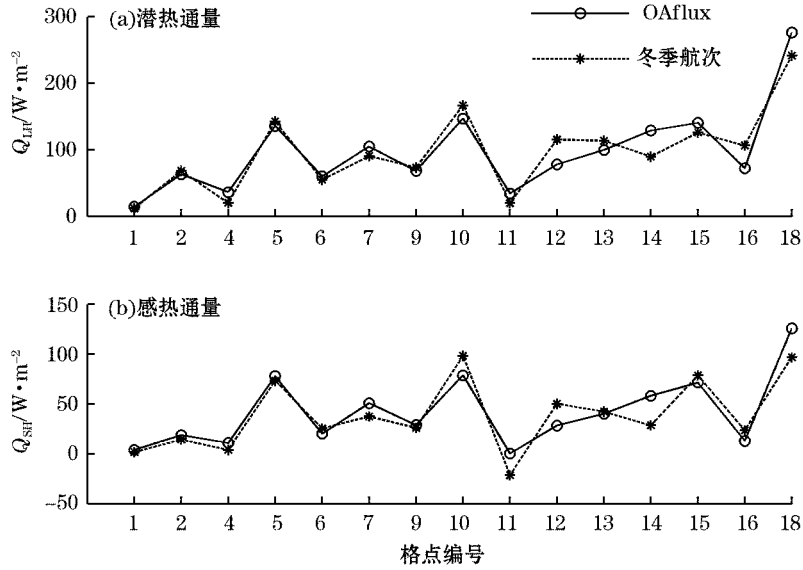


图 5 OAflux 海气热通量与 2007 年冬季航次观测结果对比

Fig. 5 Comparison of the air-sea heat fluxes in the OAflux dataset with those observed in the winter cruise in 2007

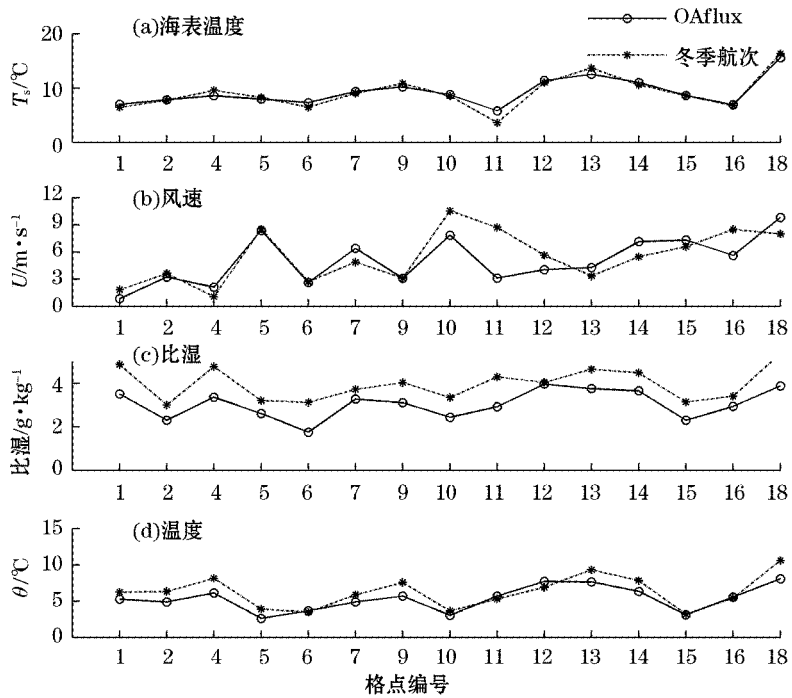


图 6 OAflux 通量相关变量与冬季航次观测结果对比

Fig. 6 Comparison of the related meteorological and oceanic data in the OAflux dataset with those observed in the winter cruise

量,结果吻合均很好。感热和潜热通量的均方差分别为 15.3 W/m^2 和 21.4 W/m^2 ,表明 OAflux 在 2006/2007 年冬季南黄海海域有较可靠的海气热通量估算。在通量相关的海洋气象数据的进一步对比中显示,OAflux 数据集的比湿较实测数据偏低(图 6),但并没有对热通量的估算产生较大影响。说明冬季海气温差及风速对热通量起着控制作用。

春季航次的对比显示 OAflux 潜热通量明显比观测值偏高(图 7),但是随格点变化有相似的变化趋势,均方差为 28.4 W/m^2 。OAflux 感热通量与观测数据基本吻合,均方差为 8.4 W/m^2 。为分析造成潜热通量偏差的原因,进一步对比了相关气象和海洋数据(图 8)。可以看出,OAflux 的湿度对比观测中的湿度明显呈偏低趋势,均方差为 1.0 g/kg ,这也是造成图 7 中 OAflux 潜热通量大于实测潜热通量的主要原因。

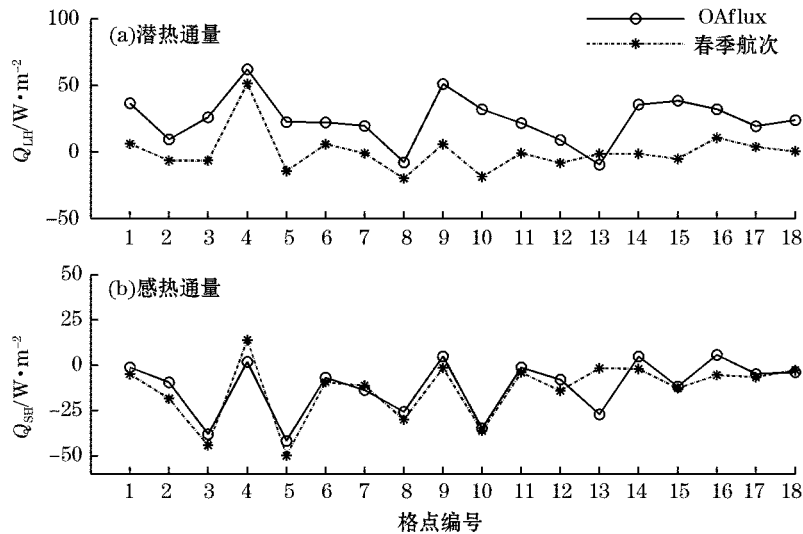


图 7 OAflux 海气热通量与 2007 年春季航次观测结果对比

Fig. 7 Comparison of the air-sea heat fluxes in the OAflux dataset with those observed in the spring cruise in 2007

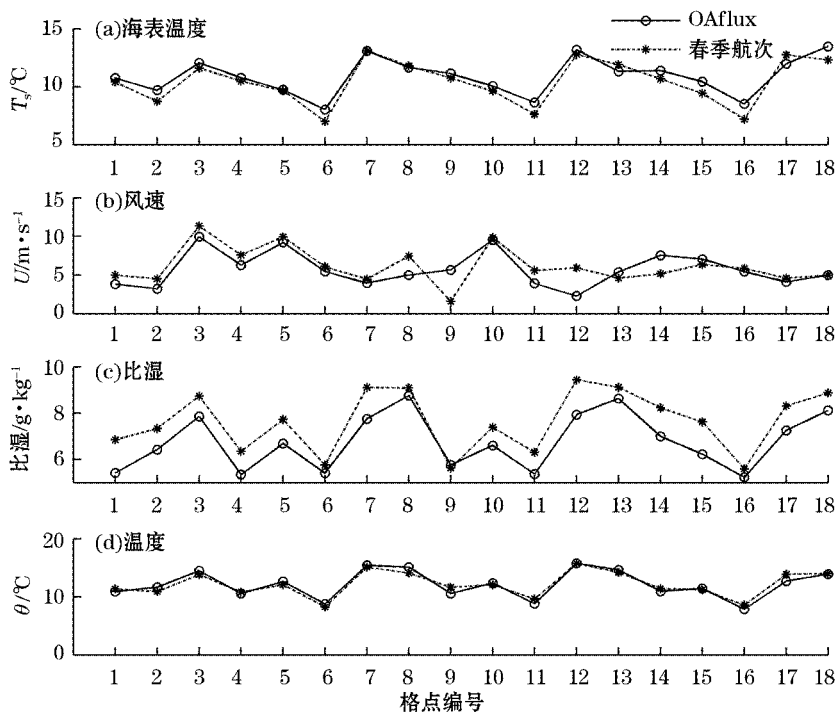


图 8 OAflux 通量相关变量与春季航次观测结果对比

Fig. 8 Comparison of the related meteorological and oceanic data in the OAflux dataset with those observed in the spring cruise

秋季,不论是潜热通量还是感热通量,OAflux 数值均比走航观测数值高(图 9),感热通量与潜热通量的均方差分别为 20.5 W/m^2 和 57.5 W/m^2 。海表温度的差异是造成上述海气通量偏差的主要原因(图 10)。

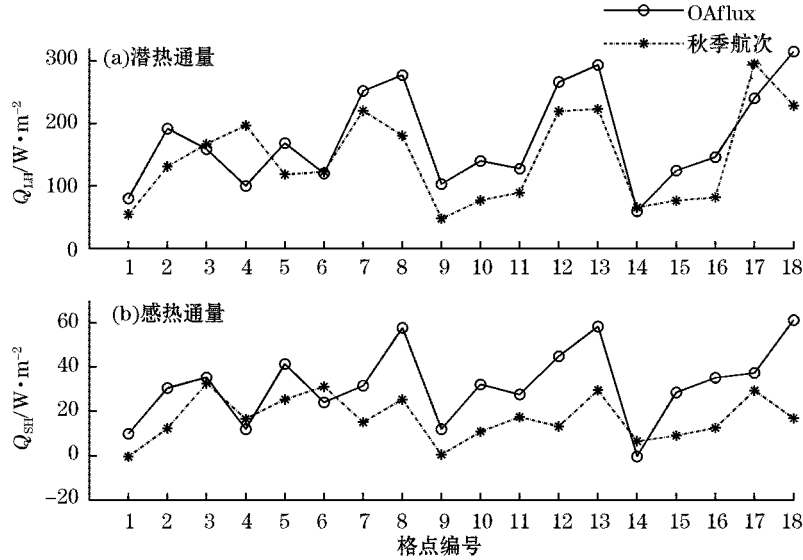


图 9 OAflux 海气热通量与 2007 年秋季航次观测结果对比

Fig. 9 Comparison of the air-sea heat fluxes in the OAflux dataset with those observed in the autumn cruise in 2007

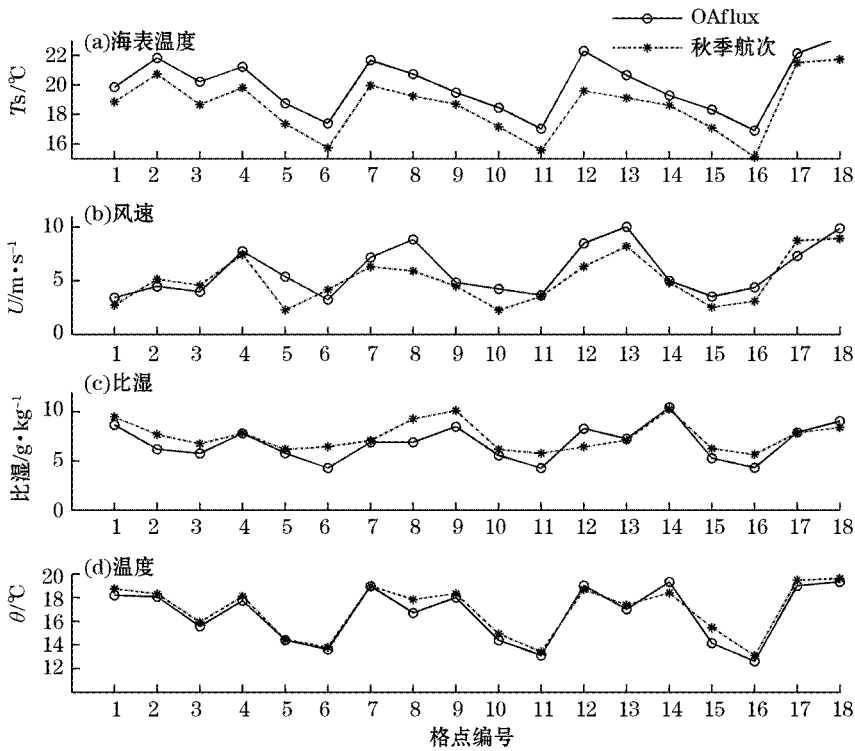


图 10 OAflux 通量相关变量与 2007 年秋季航次观测结果对比

Fig. 10 Comparison of the related meteorological and oceanic data in the OAflux dataset with those observed in the autumn cruise in 2007

海表温度的对比中显示了相同的趋势,2条近似平行的曲线表明,OAflux所用的海表温度与观测数据存在着系统偏差(均方差为 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$),可能对应着卫星数据在近海的系统偏差。为了验证秋季走航数据的可靠性,可以利用测量设备中长波辐射表的辐射数据来推算海表皮温作为参考^[26]。海洋向大气传递的长波辐射包括海洋表面的长波辐射以及向下的长波辐射被海面反射的部分^[27]:

$$ULR = \epsilon \sigma T_s^4 + \alpha_1 DLR \quad (3)$$

式中, ULR 为向上长波辐射; DLR 为向下的长波辐射; ϵ 为表面辐射系数,取 0.98 ; σ 为Stefan-Boltzmann常数; α_1 为长波反照率,取 0.02 ^[28]。依据式(3)利用长波辐射表测量到的向上、向下的长波辐射数据可以计算表皮温,计算得到表皮温与红外表皮温仪的实测数据基本一致,没有系统偏差。将要对比格点的表皮温数据挑选出来(图11),相比OAflux的表皮温数据,秋季走航直接观测和推算的表皮温数据保持一致。该结果进一步表明,秋季南黄海海域OAflux数据集的通量与实测通量之间由于海表温度的偏差导致了通量数据差异。3个航次的对比中热通量和相关海洋气象数据的均方差见表3。

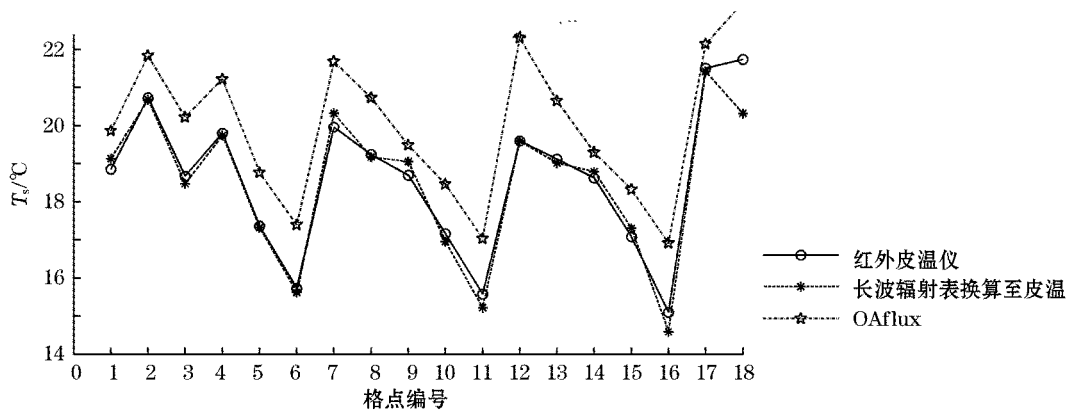


图11 红外皮温仪观测、长波辐射换算表皮温和OAflux所用海表温度数据的比较

Fig. 11 Comparison among the skin SST data observed by IR Radiometer, calculated from long wave radiation and in the OAflux dataset

表3 OAflux数据与观测数据的均方根误差

Table 3 The RMS errors between the OAflux dataset and the observed data

航次	$Q_{SH}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{LH}/W \cdot m^{-2}$	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$\theta/^{\circ}\text{C}$	$U/m \cdot s^{-1}$	比湿/ $g \cdot kg^{-1}$
冬季航次	15.3	21.4	0.8	1.3	2.0	1.0
春季航次	8.4	28.4	0.7	0.6	1.7	1.0
秋季航次	20.5	57.5	1.4	0.5	1.5	1.2

4 结 语

基于2007年在南黄海进行的冬、春和秋季3个航次的热通量观测,分析了南黄海海气热通量的季节变化特征:春季南黄海有净热通量收入,而冬季和秋季为净热通量支出。冬、秋季海气热通量远强于春季的。春季南黄海海域近海表空气湿度远大于秋季和冬季的,从而导致春季的潜热通量最弱。秋季南黄海海域海表温度和近海表空气温度较高,而近海表空气湿度又较低,这些特征导致了秋季海气热通量最为强烈。冬季、春季和秋季平均潜热通量分别为 80.7 、 5.6 和 $142.1\text{ }W/m^2$,感热通量分别为 32.0 、 -12.5 和 $18.9\text{ }W/m^2$ (海洋向大气传递为正)。

走航观测计算得到的热通量与OAflux数据集进行对比可知,OAflux在2006—2007年冬季数据最为

可靠,感热通量与潜热通量的均方差分别是 15.3 W/m^2 和 21.4 W/m^2 。春季 OAflux 的近海表空气湿度数据与实测数据存在较明显偏差,均方差为 1.0 g/kg ,造成了 OAflux 潜热通量与实测潜热通量存在偏差,感热通量与潜热通量的均方差分别为 8.4 W/m^2 和 28.4 W/m^2 。秋季 OAflux 的海表温度与实测数据的系统偏差(均方差为 $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$)造成了其海气热通量与实测存在较大偏差,秋季感热通量与潜热通量的均方差分别为 20.5 W/m^2 和 57.5 W/m^2 。对比中所发现的 OAflux 数据集中春季的近海表空气湿度偏差、秋季的海表温度偏差暗示了卫星反演数据在南黄海海域所存在的问题,这是我们在选用这些数据时需要格外注意的。

参考文献(References):

- [1] ZHOU M Y, QIAN F L. Model calculation of air-sea heat fluxes over ocean area near China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998,20(6): 21-30. 周明煜,钱粉兰. 中国近海及其邻近海域海气通量的模式计算[J]. *海洋学报*,1998,20(6):21-30.
- [2] QIAN F L, ZHOU M Y, LI S M, et al. Observational study on the meteorological characteristics of the cyclone developing processes over the Huanghai Sea and the East China Sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002,24(S1):77-83. 钱粉兰,周明煜,李诗明,等. 黄海、东海海域出海气旋发展过程的气象场特征和热通量的观测研究[J]. *海洋学报*,2002,24(S1):77-83.
- [3] YAN J Y, LIU J M, JIANG G R, et al. Advances in the study of air-sea flux exchange over the South China Sea[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2007, 22(7):685-697. 闫俊岳,刘久萌,蒋国荣,等. 南海海-气通量交换研究进展[J]. *地球科学进展*,2007, 22(7):685-697.
- [4] NA J, SEO J, LIE H J. Annual and seasonal variations of the sea surface heat fluxes in the East Asian marginal seas[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(2):257-270.
- [5] HIROSE N, LEE H C, YOON J H. Surface heat flux in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(3):401-417.
- [6] CHU P, CHEN Y C, KUNINAKE A. Seasonal variability of the Yellow Sea/East China Sea surface fluxes and thermohaline structure [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(1):1-20.
- [7] JOSEY S A, KENT E C, TAYLOR P K. New insights into the ocean heat budget closure problem from analysis of the SOC air-sea flux climatology[J]. *Journal of Climate*, 1999,12: 2856-2880.
- [8] 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*, 2001,14:1780-1789.
- [9] SUN B, 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: 679-695.
- [10] CHEN J N, WANG H N, LÜ X Y. Variation feature of the sensible heat flux and latent heat flux in South China sea[J]. *Advances in Water Science*, 2007,18(3):390-397. 陈锦年,王宏娜,吕新艳. 南海区域海气热通量的变化特征分析[J]. *水科学进展*,2007,18(3): 390-397.
- [11] 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. 褚健婷,陈锦年,许兰英,等. 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.
- [12] CHU J T, CHEN J N, XIA J, et al. An improved algorithm of simulation on air-sea turbulent heat fluxes in China seas[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, 25(3):292-299.
- [13] CHE J N, WU Y M, HE Y J. The remote of the sensible and latent heat fluxes in China coast[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 26-35. 陈锦年,伍玉梅,何宜军. 中国近海海气界面热通量的反演[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 26-35.
- [14] WANG H N, CHE J N, HE Y J. Variability of surface heat budget in China coastal seas[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, 4: 946-949.
- [15] SUN Q Z, CHEN J N, YAN J Y, et al. 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*, 2010, 32(4): 12-23. 孙启振,陈锦年,闫俊岳,等. 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*,2010, 32(4): 12-23.
- [16] CHEN J N, ZUO T, WANG H N. Remote sensing retrieved of air-sea heat fluxes in the Asian and Indian-Pacific ocean area and its analysis[J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011, 2093-2096.
- [17] BLANC T V. Accuracy of bulk-method-determined flux, stability, and sea surface roughness[J]. *JGR*, 1987, 92(c4): 3867-3876.
- [18] LÜ L G, YU F, DIAO X Y, et al. Direct observation of radiative flux in the Southern Yellow Sea[J]. *Ocean Science Journal*, 2008, 43(2):115-126.

- [19] 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, 16:571-591.
- [20] FAIRALL C W, BRADLEY E F, GODFREY J S, et al. Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature[J]. *JGR*, 1996, 101(c1):1295-1308.
- [21] SCHLUSSEL P, SHIN H Y, EMERY W J, et al. Comparison of satellite-derived sea surface temperatures with in situ skin measurements[J]. *JGR*, 1987, 92(C3):2859-2874.
- [22] YU L S, WELLER R A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes (OAFlux) for the global ice-free oceans (1981—2005)[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2007, 88: 527-539.
- [23] YU L S, WELLER R A, SUN B. Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988—1999) by a Synthesis Approach[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17:373-393.
- [24] LIU N, WU D X, LIN X P. Variations of latent heat flux in the East China Sea during the last 50 years[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(4):19-25. 刘娜, 吴德星, 林霄沛. 近 50 年东中国海潜热通量的变化[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(4):19-25.
- [25] ROSSOW W B, SCHIFFER R A. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, 80:2261-2287.
- [26] WEI C J, YU F, LÜ L G, et al. Comparison among computational methods for atmospheric longwave radiation above sea surface in the Southern Yellow Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(3):302-311. 魏传杰, 于非, 吕连港, 等. 南黄海海面大气长波辐射计算方法的比较[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 302-311.
- [27] KANTHA L H, CLAYSON C A. *Small-scale processes in geophysical fluid flows*[M]. New York: Academic Press, 2000.
- [28] PAYNE R E. Albedo of the sea surface[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29:959-970.

Observations of Air-sea Heat Flux in the South Yellow Sea and Their Comparison With OAflux Dataset

XIAO Bin^{1,2}, QIAO Fang-li^{1,2}, LÜ Lian-gang^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM), SOA, Qingdao 266061, China)*

Abstract: Three comprehensive cruises were conducted in the South Yellow Sea in 2007 to investigate the radiation and flux-related meteorological and oceanic data including air temperature, humidity, wind speed and SST etc. Both the sensible and the latent heat fluxes were calculated and the seasonal characteristics of air-sea heat flux were analyzed. The results show that the averaged latent heat flux in the South Yellow Sea is 80.7 W/m^2 , 5.6 W/m^2 and 142.1 W/m^2 in winter, spring and autumn, respectively and the sensible one is 32.0 W/m^2 , -12.5 W/m^2 and 18.9 W/m^2 , respectively. The air-sea heat flux data observed in the three cruises are compared to the OAflux dataset. It is found that the OAflux dataset fit well with the data observed in winter in 2006—2007, with a mean square deviation being 15.3 W/m^2 for the sensible heat flux and 21.4 W/m^2 for the latent one, but there are obvious differences in the latent heat flux in spring (the mean square deviation being 28.4 W/m^2) and in both the sensible and the latent heat fluxes in autumn (the mean square deviation being 20.5 W/m^2 and 57.5 W/m^2 respectively). Further investigation suggests that the air-humidity difference present between the OAflux dataset and the data observed in the cruises could be responsible for the difference in the latent heat flux in spring in 2007, whereas the differences in heat fluxes in autumn are mainly attributed to the difference in SST.

Key words: heat flux observation; South Yellow Sea; COARE3.0; OAflux

Received: February 13, 2012