

中国沿岸ERA-Interim和MERRA感热通量和潜热通量的资料评估

骆敬新¹ 高志刚¹ 刘克修¹ 宋翔洲² 武双全¹ 范振华¹

(1 国家海洋信息中心, 天津 300171; 2 国家海洋局, 北京 100860)

摘要: 选择33个沿岸代表性海洋站, 采用1981—2012年海洋站观测数据统计计算中国沿岸整体的海气感热通量和潜热通量历年逐月平均值, 并对ERA-Interim、MERRA两种再分析数据的感热通量和潜热通量数据进行对比检验分析, 为ERA-I、MERRA热通量资料的使用提供参考。结果表明: 1) 历年逐月均值检验显示, 两种再分析资料感热通量和潜热通量与海洋站计算结果均值差异不显著, ERA-I结果略高于海洋站结果, MERRA的均值与海洋站更接近。再分析资料的感热通量和潜热通量与海洋站相关性显著, 但方差差异均明显, ERA-I与海洋站的方差差异比MERRA小。2) 季节变化特征检验显示, 两种再分析数据感热通量和潜热通量的季节变化时间序列与海洋站统计计算结果相关性均显著, 能够较好地体现中国沿岸整体的感热通量和潜热通量季节变化特征。但也存在一些差异: 2—7月中国沿岸整体的感热通量, 海洋站数据明显低于再分析数据; 潜热通量季节变化振幅海洋站大于再分析数据, MERRA数据季节变化振幅最小。3) 年际变化特征的检验结果显示: 1981—2012年, 对于中国沿岸整体, ERA-I数据感热通量和潜热通量年际变化和海洋站相关性显著, 均下降趋势明显, 可以用于海气热通量的年际变化趋势分析; MERRA数据的感热通量年际变化略有下降趋势, 但和海洋站的相关性不显著, MERRA数据潜热通量的年际变化呈略上升的趋势, 与海洋站计算的潜热通量趋势明显不一致, 在1981—2012年不能代表中国沿岸整体的海气热通量的年际变化特征。

关键词: 感热通量, 潜热通量, ERA-Interim, MERRA, 中国沿岸

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.04.001

Evaluation of ERA-Interim and MERRA Sensible Heat Flux and Latent Heat Flux along Coast of China

Luo Jingxin¹, Gao Zhigang¹, Liu Kexiu¹, Song Xiangzhou², Wu Shuangquan¹, Fan Zhenhua¹

(1 National Marine Information Center, Tianjin 300171

2 State Oceanic Administration, People's Republic of China, Beijing 100860)

Abstract: In this study, data from 33 typical coastal stations (station data) during 1981–2012 were used to calculate mean monthly sensible heat fluxes and latent heat fluxes to evaluate two types of reanalysis data, i.e., the ERA-Interim (ERA-I) and the MERRA reanalysis monthly sensible flux and latent flux data. The objective was to provide a reference for the user of ERA-I or MERRA heat flux data. The results indicate that: (1) from the monthly mean sensible heat flux and latent heat flux data, neither the average of the ERA-I data nor the average of the MERRA data deviated from the station data for the whole coast of China. The mean value of MERRA monthly heat flux was closer to the mean value of the station data than ERA-I's. Both the ERA-I and MERRA data were significantly correlated with station data. There were significant differences in variance between the reanalysis data and the station data. The differences of variances between ERA-I data and the station data were less than those between MERRA data and the station data. (2) Analysis of the seasonal changes suggests that both ERA-I data and MERRA data have significant correlations with station data for the whole coast of China. The reanalysis data could reflect the seasonal variations in sensible heat flux and latent heat flux. There are some differences noted. For example, in both sets of reanalysis data, sensible heat fluxes from February to July were greater than the station data; the amplitude of seasonal change in latent heat flux from the reanalysis data was less than the station data. The lowest seasonal changes occurred in the MERRA data. (3) The analysis of inter-annual variability from 1981 to 2012 showed that both the ERA-I heat flux data and the station heat flux data had declining trends for the whole coast of China. There was a significant correlation between ERA-I data and the station data. The MERRA sensible heat flux data had a slightly declining trend. The MERRA

latent heat flux data series showed a slightly increasing trend and showed different trends compared with the station latent heat fluxes. The correlation was not significant between MERRA heat flux and station heat flux. The heat flux data from MERRA did not represent the inter-annual change features for the whole China coast.

Keywords: sensible heat flux, latent heat flux, ERA-Interim, MERRA, Coast of China

收稿日期: 2016年12月26日; 修回日期: 2018年5月11日
第一作者: 骆敬新(1973—), Email: luo_jingxin@163.com
通信作者: 高志刚(1983—), Email: zhggao@souhu.com
资助信息: 国家重点研发计划(2016YFF0204006); 国家重点研发计划(2017YFA0603203); 国家重点研发计划(2017YFC1405304)

0 引言

海气界面热通量是海洋热力学、动力学和海洋气候学的重要研究内容,是揭示和解释海洋和大气热力学和动力学过程的重要基础,可用于海洋环流、海气相互作用和气候理论等研究^[1]。

精准的海气热通量资料对于气候分析、天气预报模式的发展非常关键。由于海气界面通量不是常规观测,海上观测又非常困难,这使得热通量观测起步很晚。很长一段时间国内外没有空间分辨率高、时间序列长的热通量资料。获得海气热通量的最基本方法有:块体动力学方法、廓线法、涡动相关法(涡动相关法、梯度法、整体输送系数法)。廓线法、涡动相关法对观测技术设备要求高,获取难度很大,获得资料的时间空间分布有限。块体动力学方法将基本的海洋气象观测要素与湍流热通量联系起来,使得获取长序列、高时空分辨率的热通量成为可能,因此也得到了许多研究人员关注和青睐。

COARE (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) 模式是一种常用的块体动力学方法计算海气热通量的模式。2005年杨清华等^[2]将COARE 算法作为检验大气和海洋耦合预报模式所采用的通量计算方法。Fairall等^[3]对COARE模式中块体动力学算法进行了评估和改进,公布了其最新版本3.0(简称COARE 3.0),使其应用范围从低纬扩展至中高纬,风速范围也从12 m/s扩至20 m/s,其误差分别在5% (0~10 m/s)和10% (10~20 m/s)之内。Brunke等^[4]使用热带和中纬(5°S—60°N)海域中进行的12个航次的直接湍流通量观测结果对国际上经常使用的12个块体算法进行了评估,结果发现COARE 3.0是最可靠的算法之一。COARE 3.0方法在强风情况下计算海气热通量虽然有了进一步的改进,但是需要相应观测时次的波浪特征值和阵风值^[2,5],很难有充分满足条件的资料存在。因为资料匮乏,这里采用褚健婷等^[6]改进的COARE 2.5b方法进行海洋站感热通量和潜热通量的统计计算。2006年褚健婷等^[6]对COARE 2.5b进行改进,改进后的方法在弱风和中风条件下感热通量的模拟结果较好,而潜热通量却在中风和强风条件下的模拟结果较优,在强风下,感热通量误差较大,可是这部分在研究资料中所占比重较小(不到200组数据),所以可靠性不高。总体而言,感热通量的平均标准偏差不超过2 W/m²,潜热通量的标准偏差为12.372 W/m²,二者基本满足国际上平均标准偏差在10 W/m²左右的要求。

20世纪90年代后,随着再分析资料的问世,全

球气候变化研究得到了迅速而广泛的发展。目前再分析资料在气候变化和变率、气候诊断和分析、海洋气候数值模拟等研究中得到了广泛地应用。国际上常用的海气热通量再分析资料主要有NCEP/NCAR、GSSTRF、ERA 40、ERA-Interim(简称ERA-I)、OAFflux、MERRA等几种。与单站数据相比,再分析的网格化数据空间分布均匀,时间序列长,可用来研究要素的趋势、空间分布特征,但在使用之前必须对资料的可靠性进行全面评估。高志刚等^[7]利用海洋站实测数据对ERA-I的气温、气压、表层水温进行了评估,ERA-I气温、气压和海温累年月平均变化特征和观测数据吻合较好,可以反映气候态的季节变化特征。但对于局部区域ERA-I海温数据与台站观测数据存在偏差。赵瑞霞等^[8-9]、何浪等^[10]将实测资料同ERA 40再分析资料作对比分析,发现ERA 40再分析资料中的降水与实测也存在偏差,只是不像NCEP资料那么显著。黄艳松等^[11]对NCEP再分析资料和浮标观测资料计算的海气热通量进行了比较,研究表明在统计意义上NCEP2给出的海表气象参数比NCEP1与浮标观测值更接近,而净辐射通量则是NCEP1更接近浮标观测值。徐小慧等^[12]利用船测近海层湍流热通量资料验证OAFflux数据集,结果表明:OAFflux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。由此可见再分析资料产品与实际观测结果会存在各种差异,海气热通量资料很有可能也存在一些偏差,不准确的海气热通量数据对于海洋气候预测模式结果将产生较大的影响,造成预测结果不准确,因此资料使用前进行评估很有必要。

本文利用海洋站实测的常规气象要素资料,采用COARE 2.5b方法计算中国沿岸整体的海气感热通量和潜热通量,对再分析数据MERRA和ERA-Interim的月平均感热通量和潜热通量进行系统性的检验和分析评估,互相验证。文中既包含了表现海气热通量气候特征的统计结果,也包含了对两种再分析数据的评估分析结果,这些研究结果为海气相互作用研究、海洋气候变化研究、数值预报模式数据的使用提供借鉴和参考。

1 资料和处理方法

1.1 资料介绍

1.1.1 海洋站观测资料

海洋站观测资料是国家海洋局多年来业务化观测获取的资料,观测位置固定,时间序列长,质量相对较好,是开展气候变化研究、工程设计等最可信的数据。本文中选取1981—2012年观测资料最完整,在中国沿海位置分布相对均匀的33个海洋站,包括渤海5

个站、黄海8个站、东海10个站、南海10个站。用33个海洋站的平均值代表全中国沿岸的整体平均值。

1.1.2 再分析资料

ERA-I资料,来源于欧洲中心(ECMWF),是使用ECMWF的综合预报系统(IFS)模型同化的数据产品^[7]。时间范围为1979年至今,时间分辨率包括逐时、日平均和月平均等,空间分辨率最高达 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。本文中采用了其中的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的月平均海气热通量数据。

MERRA(The Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications)资料,来源于美国国家航空航天局(NASA)的GESDISC(Goddard Earth Science Data Information and Services Center),MERRA是利用GEOS-5(The Goddard Earth Observing System Model V.5)同化系统生成的再分析数据产品。数据的时间范围从1979年至今。时间尺度有逐时、3 h、6 h、日平均和月平均等;空间分辨率有 0.66° (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度)、 1.25° (经度) $\times 1^{\circ}$ (纬度)、 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 等多种网格,本文中选用了其中的 0.66° (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度)空间分辨率的海气热通量月平均数据。

1.2 资料处理方法

1.2.1 海洋站观测资料处理

海洋站观测资料依据《海滨观测规范》(GB/T14914—2006)进行了质量控制处理。本文中选取33个海洋站1981—2012年每日4个时次(00、06、12和18时世界标准时)实测气温、水温、风、气压、相对湿度数据,然后利用改进后的COARE 2.5b方法^[6]进行4个时次的感热通量和潜热通量的计算。计算前气温、气压、风都进行了高度订正。在4个时次热通量数据的基础上进行逐年月平均统计,对于缺测值采用邻近站观测数据进行线性插补,形成完整、均一的海洋站感热通量和潜热通量历年逐月均值时间序列。

感热通量计算方法如下^[6]:

$$Q_h = C_p \times \rho_a \times C_s \times W \times (T_s - T_a); \quad (1)$$

潜热通量计算方法如下^[6]:

$$Q_e = L \times \rho_a \times C_e \times W \times (q_s - q_a); \quad (2)$$

ρ_a 用以下公式计算:

$$\rho_a = \frac{1008.0 \times 100}{287.1 \times (T_a + 0.0098 \times Z_r) \times (1.0 + 0.00061 q_a)}; \quad (3)$$

L 用以下公式计算:

$$L = (2.501 - 0.00237 \times t_s) \times 10^3. \quad (4)$$

式中, Q_h 为感热通量(W/m^2); C_p 为定压比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$),取值1004.67; ρ_a 为湿空气密度

(kg/m^3); C_s 为感热交换系数; W 为10 m高风速(m/s); T_s 为表层海水温度(K); T_a 为空气温度(K); Q_e 为潜热通量(W/m^2); L 为蒸发潜热系数(J/kg); C_e 为潜热交换系数; q_s 为海水饱和比湿(g/kg); q_a 为空气比湿(g/kg); Z_r 为气温观测高度(m); t_s 为表层海水温度($^{\circ}C$)。

1.2.2 再分析资料处理

本文中使用的再分析资料为1981年1月—2012年12月逐月平均值资料。为便于同我国沿岸海洋站实测资料进行比较,采用双三次插值法得到再分析资料海洋站位置处的感热通量和潜热通量月平均数据。

1.2.3 资料检验分析内容及方法

1.2.3.1 检验分析内容

检验分析的内容包括海洋站与ERA-I资料、海洋站与MERRA资料的历年逐月感热通量、潜热通量均值序列、季节变化特征、年际变化趋势特征,检验指标包括均值偏差、方差、相关性、趋势一致性等。

1.2.3.2 检验分析方法

1) 均值偏差检验^[13]。为比较再分析数据和实测数据的偏差,需进行数据的偏差检验,计算各自的算术平均值,进行 t 值检验。

2) 方差检验^[13]。计算各时间序列的方差,进行 f 值检验。

3) 相关性检验^[13]。开展实测数据和再分析数据的相关性分析,计算其相关系数。

4) 年际变化趋势一致性检验。对逐年的年均值序列采用线性拟合方法计算线性拟合的斜率,对比分析各种类型数据的趋势变化特征。

2 资料检验分析

2.1 历年逐月均值检验

2.1.1 感热通量

研究首先对中国沿岸整体的历年逐月平均感热通量时间序列进行均值检验分析,结果显示(表1),海洋站与ERA-I、海洋站与MERRA的历年逐月平均感热通量时间序列检验 t 值分别为2.538和1.750,均小于 $\alpha=0.01$ 的 t 值2.576,通过了均值偏差检验,均值差异不显著,其中,两种再分析数据时间序列均值略高于海洋站,且MERRA数据均值与海洋站更接近。分析再分析数据均值偏大的原因可能是秋、冬季海洋站的平均水温整体低于再分析数据的平均水温^[7],风速高于再分析数据,感热通量差异不大;春、夏季水温、气温差异不大^[7],但海洋站的风速整体低于再分析数据的风速,造成海洋站感热通量均值偏低。各海区沿岸再分析资料感热通量均大于海洋站计算值。渤海和

表1 1981—2012年历年逐月感热通量和潜热通量时间序列检验结果
Table 1 The check of sensible heat flux and latent heat flux monthly mean series during 1981—2012

海区	要素类型	平均值/(W/m ²)			与海洋站均值偏差检验值		与海洋站方差检验值		与海洋站相关系数	
		海洋站	ERA-I	MERRA	ERA-I	MERRA	ERA-I	MERRA	ERA-I	MERRA
感热通量	中国沿岸	15.7	25.0	21.7	2.538	1.750	1.711	2.680	0.931	0.862
	渤海沿岸	16.3	33.0	28.7	4.348	3.269	4.638	5.465	0.705	0.599
	黄海沿岸	19.8	31.1	25.8	2.100	1.203	2.718	5.313	0.915	0.878
	东海沿岸	17.5	24.1	20.3	1.461	0.690	1.313	2.164	0.936	0.871
	南海沿岸	10.2	17.1	16.2	3.181	2.662	2.030	2.243	0.852	0.690
潜热通量	中国沿岸	76.6	89.1	73.8	1.448	0.350	1.655	2.554	0.950	0.941
	渤海沿岸	70.4	61.0	48.4	-1.252	-3.041	1.817	2.282	0.864	0.854
	黄海沿岸	66.8	72.4	53.9	0.571	-1.375	2.642	3.550	0.905	0.919
	东海沿岸	80.9	91.8	78.9	0.936	-0.185	1.798	3.701	0.948	0.932
	南海沿岸	82.7	113.8	97.4	4.138	2.229	1.426	1.153	0.887	0.888

注：检验参考临界值 $t_{\alpha}=1.960$ ($\alpha=0.05$)， $t_{\alpha}=2.576$ ($\alpha=0.01$)； $f_{\alpha}=1.35$ ($\alpha=0.05$)， $f_{\alpha}=1.53$ ($\alpha=0.01$)； $r_{\alpha}=0.113$ ($\alpha=0.05$)， $r_{\alpha}=0.148$ ($\alpha=0.01$)^[19]。表中黑体数据表示该值超出检验临界值，检验差异明显。

南海沿岸感热通量未通过均值偏差检验，差异显著，再分析资料在该区域的感热通量明显高于海洋站计算值；黄海、东海沿岸感热通量通过了均值检验，差异不显著。渤海和南海沿岸的海洋站气温比再分析资料整体偏低，表层水温比再分析资料偏高^[7]是该区域感热通量偏差较大的主要因素。ERA-I与海洋站历年逐月感热通量时间序列的方差检验 f 值为1.711，MERRA与海洋站历年逐月感热通量时间序列的方差检验 f 值为2.680，差异均显著，与MERRA数据相比ERA-I感热通量方差与海洋站更接近。分析原因可能是因为数据同化模式建立时会考虑将运行结果的方差控制在一定范围内，因此模式中有专门的数据过滤和控制方差的处理。

ERA-I、MERRA与海洋站历年逐月平均感热通量时间序列的相关系数分别为0.931和0.862，均有着明显的相关性。各海区均明显相关，渤海沿岸和南海沿岸感热通量相关系数略小于其他海区。

2.1.2 潜热通量

研究对于中国沿岸整体的历年逐月平均潜热通量时间序列进行了均值检验（表1），ERA-I、MERRA与海洋站历年逐月潜热通量时间序列均值偏差检验 t 值分别为1.448和0.350，均值差异均不显著，但ERA-I的潜热通量均值最高，其次是海洋站，MERRA潜热通量均值最低，MERRA潜热通量均值与海洋站更接近。分析其原因，ERA-I的表层水温数据整体上（尤其是冬、春季）比海洋站观测的数据偏高^[7]，海气间比湿差偏大，造成ERA-I的潜热通量均值略偏大。渤海沿岸潜热通量MERRA数据与海洋站计算的结果均值差异显著，海洋站计算结果明显高于MERRA数据；南海沿岸潜热通量ERA-I数据与海洋站计算结果均值差异显著，海洋站计算结果明显低于ERA-I数据；其他

海区数据差异不明显。渤海沿岸2002年以前海洋站计算的海气比湿差大于MERRA，且风速偏大；南海沿岸海洋站计算的海气比湿差明显小于ERA-I，是两个海区潜热通量差异的主要因素。ERA-I、MERRA与海洋站历年逐月潜热通量时间序列的方差检验 f 值分别为1.655和2.554，均超过 $\alpha=0.01$ 的 f_{α} 值1.53，与感热通量相似，方差差异显著，与MERRA数据相比ERA-I潜热通量方差与海洋站更接近。原因与感热通量相同。

中国沿岸的ERA-I、MERRA与海洋站历年逐月平均潜热通量时间序列的相关系数分别为0.950和0.941，均明显相关，各海区均明显相关。

2.2 季节变化特征检验

2.2.1 感热通量

研究对1981—2012年海洋站与再分析数据累年逐月平均感热通量时间序列进行统计和变化特征检验（图1），结果显示，中国沿岸整体的感热通量再分析资料与海洋站实测数据统计结果均呈现秋、冬季高，春、夏季低的季节变化分布形式。海洋站感热通量4月最低，月平均感热通量约为 -0.9 W/m²；4—7月感热通量均较低，月平均感热通量在 0 W/m²左右，12月最高，月平均感热通量约为 45.2 W/m²；ERA-I感热通量7月最低，月平均感热通量约为 11.1 W/m²，12月最高，月平均感热通量约为 48.3 W/m²；MERRA感热通量8月最低，月平均值约为 8.9 W/m²，12月最高，月平均感热通量约为 39.5 W/m²，再分析资料与海洋站资料最高值出现月份一致，最低值出现月份略有差异。ERA-I各月平均感热通量均高于海洋站；MERRA月平均感热通量2—7月高于海洋站，1月、10—12月低于海洋站，9月两种数据基本持平（图2、图3）。感热通量在2—7月再分析数据明显高于海洋站数据的原

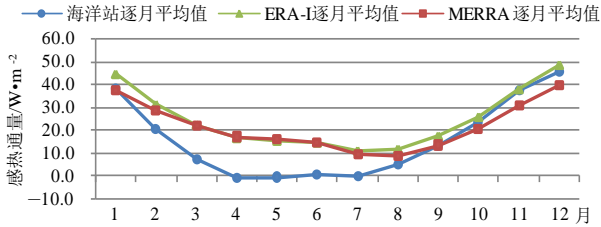


图1 1981—2012年中国沿岸海洋站、ERA-I和MERRA的累年逐月平均感热通量

Fig. 1 The normal monthly mean sensible heat flux from the coastal station, ERA-I and MERRA during 1981–2012

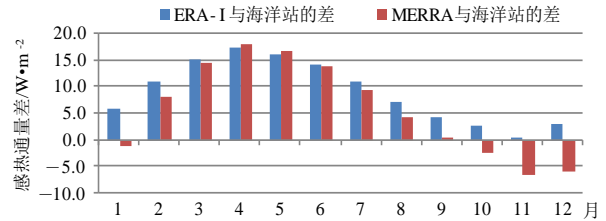


图2 1981—2012年中国沿岸MERRA数据、ERA-I数据与海洋站累年逐月平均感热通量的差

Fig. 2 The normal monthly mean sensible heat flux difference between the coastal station, ERA-I and MERRA during 1981–2012

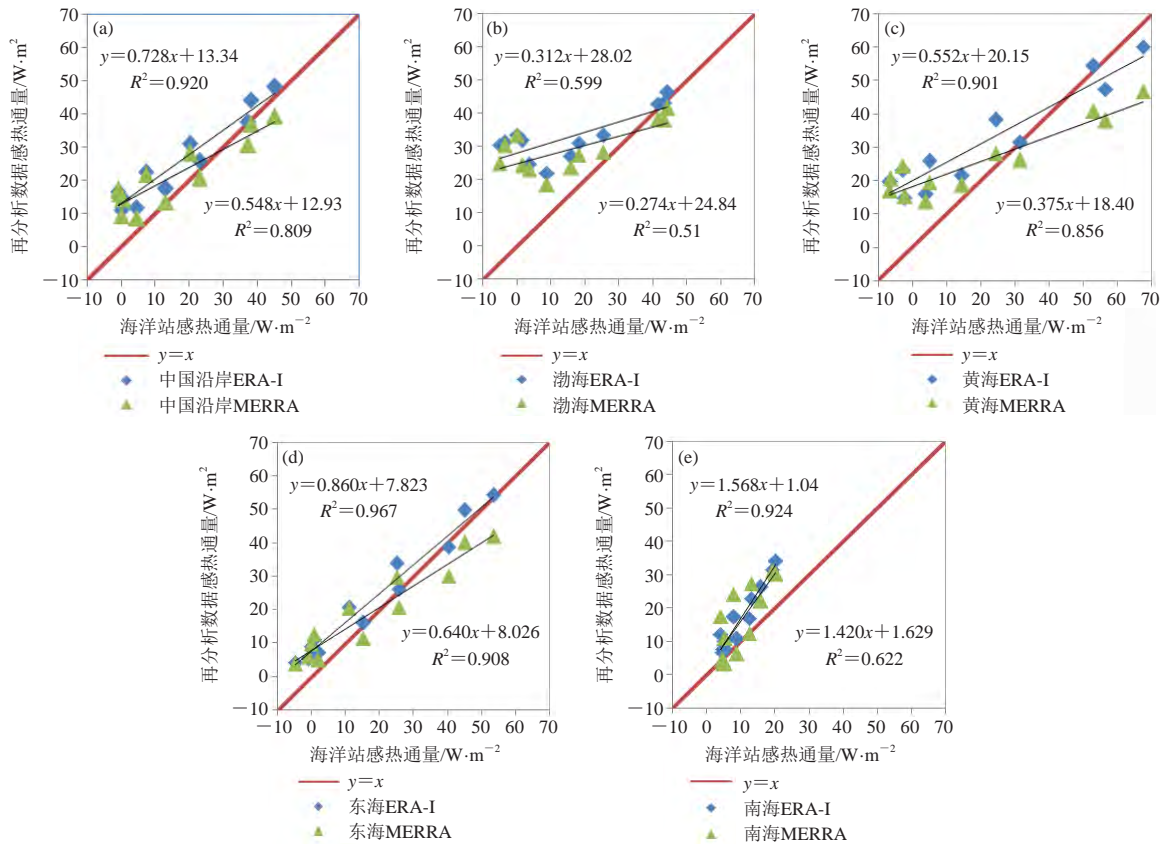


图3 1981—2012年累年逐月感热通量的线性拟合分析比较

(a) 中国沿岸, (b) 渤海沿岸, (c) 黄海沿岸, (d) 东海沿岸, (e) 南海沿岸

Fig. 3 The normal monthly mean sensible heat flux linear fitting for the

(a) coast of the China Sea, (b) coast of the Bohai Sea, (c) coast of the Yellow Sea, (d) coast of the China East Sea, and (e) coast of China South Sea during 1981–2012

因,可能主要是由于在2—3月海洋站表层水温整体低于再分析数据,4—7月海洋站风速整体低于再分析数据所致。

研究对中国沿岸整体的ERA-I、MERRA感热通量累年逐月平均值时间序列和海洋站结果做相关性分析,相关系数分别为0.959和0.899,呈现明显的相关(图3)。各海区沿岸的ERA-I、MERRA感热通量累年逐月平均值时间序列和海洋站结果相关性各不相

同,其中东海沿岸的相关性最好,其次是黄海沿岸,再次是南海沿岸,渤海沿岸的相关性最弱,ERA-I资料与海洋站计算结果的相关性比MERRA资料好。

2.2.2 潜热通量

研究对于中国沿岸整体,分别进行海洋站、ERA-I数据和MERRA数据1981—2012年的累年逐月平均潜热通量时间序列统计和变化特征检验,结果显示(图4),中国沿岸整体3种数据潜热通量均呈现春夏

季低，秋冬季高的季节变化形式，平均值最低月份均为4月，最高月份均为10月，海洋站潜热通量的统计结果季节变化振幅最大，MERRA数据季节变化振幅最小。ERA-I潜热通量1、8及12月平均值高于海洋站，11月平均值低于海洋站，9和11月两种数据基本持平；MERRA数据2—8月平均潜热通量高于海洋站，9—12月低于海洋站，1月两种数据基本持平；潜热通量低的月份，ERA-I数据和MERRA数据偏高，潜热通

量高的月份，ERA-I数据和海洋站数据接近，MERRA数据比海洋站数据偏低（图5、图6）。分析产生差异的原因主要是因为ERA-I数据海气比湿差偏大，海洋站风数据秋季高于再分析资料，春、夏季低于再分析资料所致。

中国沿岸ERA-I、MERRA与海洋站累年逐月潜热通量时间序列的相关系数分别为0.984和0.982，相关性均显著（图6）。各海区沿岸的ERA-I、MERRA潜

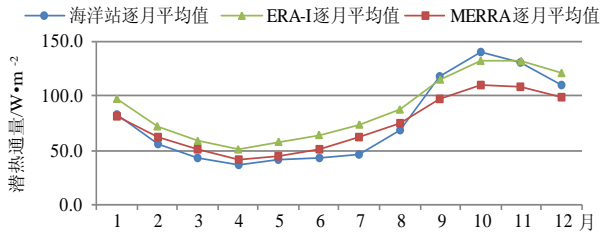


图4 1981—2012年中国沿岸海洋站、ERA-I、MERRA累年逐月平均潜热通量变化图（1981—2012年）
Fig. 4 The normal monthly mean latent heat flux of the coastal station, ERA-I and MERRA from 1981 to 2012

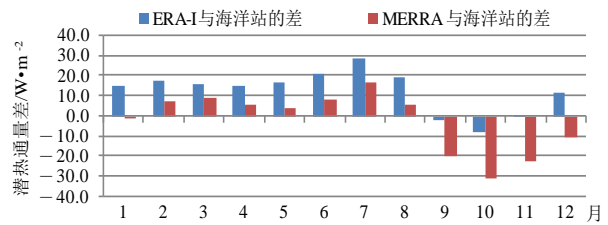


图5 1981—2012年中国沿岸ERA-I数据、MERRA数据与海洋站累年逐月平均潜热通量之差
Fig. 5 The normal monthly mean latent heat flux difference between the coastal station, ERA-I and MERRA from 1981 to 2012

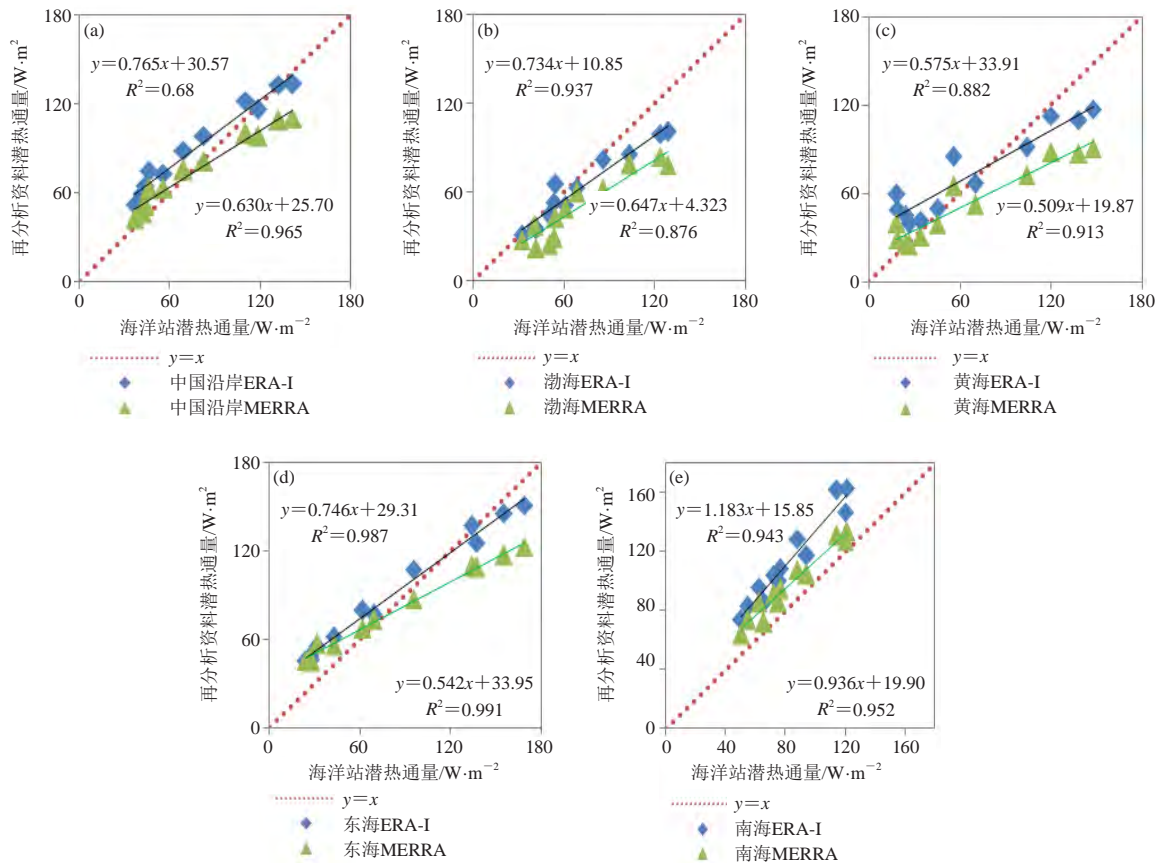


图6 1981—2012年累年逐月潜热通量的线性拟合分析比较

(a) 中国沿岸，(b) 渤海沿岸，(c) 黄海沿岸，(d) 东海沿岸，(e) 南海沿岸

Fig. 6 The normal monthly mean latent heat flux linear fitting from 1981 to 2012 for the (a) coast of the China Sea, (b) coast of the Bohai Sea, (c) coast of the Yellow Sea, (d) coast of the East China Sea, and (e) coast of the South China Sea

热通量累年逐月平均值时间序列和海洋站计算结果相关性均显著, 季节变化一致性较好, 其中, 东海沿岸的相关性最好。

2.3 年际变化特征检验

2.3.1 感热通量

研究首先对1981—2012年中国沿岸的感热通量逐年平均值序列进行统计和变化特征检验(图7), 结果显示, 海洋站感热通量有明显的下降趋势, 下降率为0.257 W/(m²/a), 尤其是在2002—2007年感热通量下降明显, 在2006—2009年为感热通量最低的4年; ERA-I数据的下降率为0.082 W/(m²/a), MERRA数据的下降率为0.010 W/(m²/a), 两种分析资料的下降趋势均不显著。1981—2012年ERA-I与海洋站年平均感热通量序列的相关系数为0.541, 相关性显著; MERRA与海洋站年平均感热通量序列相关系数为0.270, 相关性不显著(表2)。各海区沿岸感热通量海洋站计算结果与再分析资料年际变化的相关性分析结果显示, 黄海、东海、南海沿岸海洋站计算结果与ERA-I资料相关性显著, 而渤海沿岸的相关性不显著; 南海沿岸海洋站计算结果与MERRA资料的相关性显著, 其他海区相关性不显著(表2)。

表2 1981—2012年感热通量和潜热通量年际变化分析
Table 2 The analysis of sensible heat flux and latent heat flux interannual variability from 1981 to 2012

要素	区域	年际变化率/(W/(m ² /a))			年际变化相关系数	
		海洋站	ERA-I	MERRA	海洋站与ERA-I	海洋站与MERRA
感热通量	中国沿岸	-0.257	-0.082	-0.011	0.541	0.270
	渤海沿岸	-0.267	-0.050	0.106	0.322	-0.062
	黄海沿岸	-0.169	0.014	0.009	0.371	0.313
	东海沿岸	-0.359	-0.189	-0.058	0.648	0.343
	南海沿岸	-0.222	-0.088	-0.053	0.502	0.352
潜热通量	中国沿岸	-0.768	-0.116	0.019	0.581	0.231
	渤海沿岸	-0.965	0.114	0.081	-0.010	-0.106
	黄海沿岸	-0.529	0.131	0.108	0.012	-0.008
	东海沿岸	-0.886	-0.246	0.056	0.603	0.142
	南海沿岸	-0.753	-0.310	-0.117	0.601	0.458

注: 检验参考临界值 $r_{0.349}$ ($\alpha=0.05$), $r_{0.449}$ ($\alpha=0.01$)^[13]。表中黑体数据表示该值超出检验临界值, 检验差异明显。

由图7a看出中国沿岸1981—2000年3种数据的年际变化趋势较一致, 继续对1981—2000年3种资料的年际变化趋势特征进行分析, 结果显示, 1981—2000年海洋站、ERA-I、MERRA感热通量年际变化率分别为-0.126 W/(m²/a)、-0.176 W/(m²/a)、-0.078 W/(m²/a), 其中海洋站和ERA-I感热通量数据变化趋势显著, MERRA感热通量的变化趋势不显著。1981—2000年ERA-I数据、MERRA数据与海

洋站年平均感热通量序列相关系数分别为0.721和0.448, 均通过了 $\alpha=0.05$ 的相关系数显著性检验, 相关性较好。

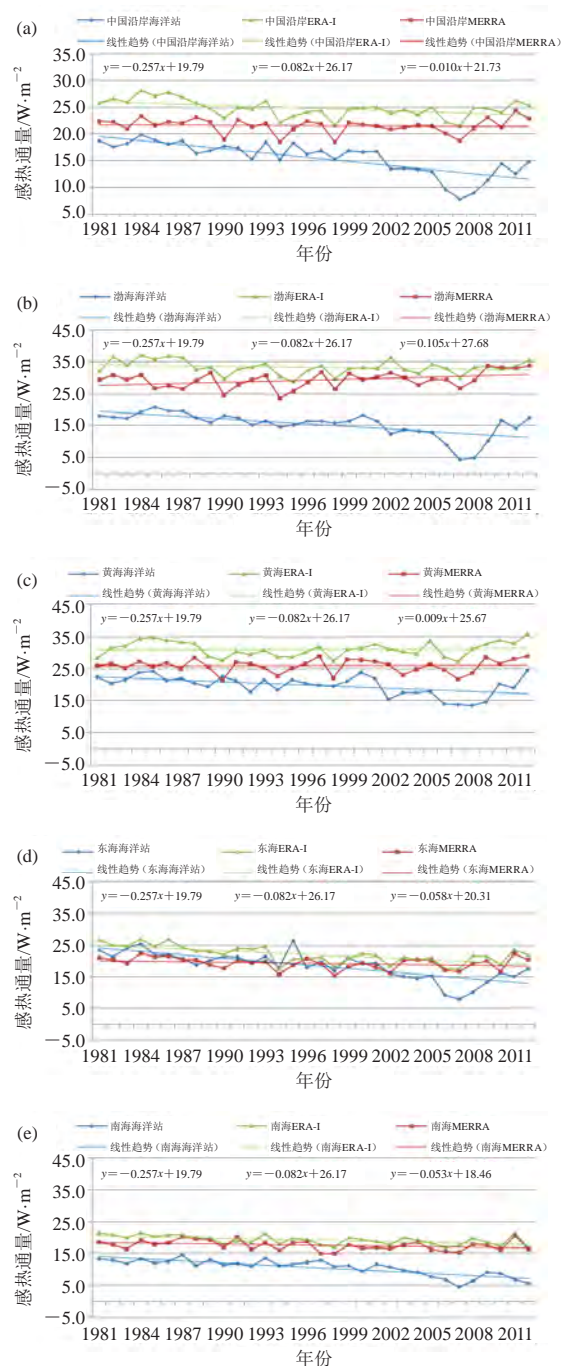


图7 1981—2012年海洋站、ERA-I和MERRA历年平均感热通量年际变化

(a) 中国沿岸, (b) 渤海沿岸, (c) 黄海沿岸, (d) 东海沿岸, (e) 南海沿岸

Fig. 7 The annual sensible heat flux of the coastal station, ERA-I and MERRA from 1981 to 2012 for the (a) coast of the China Sea, (b) coast of the Bohai Sea, (c) coast of the Yellow Sea, (d) coast of the East China Sea, and (e) coast of the South China Sea

分析1981—2012年再分析资料与海洋站感热通量年际变化趋势不一致，海洋站感热通量下降趋势明显大于再分析数据的原因主要是因为2000—2007年与2000年前比，海洋站数据气温升高的趋势仍比较明显，2007年达到最高值，而再分析数据气温在2000—2007年气温上升基本是停滞，甚至略有下降趋势，海洋站的海气温差下降率大于两种再分析资料，期间海洋站的风速下降率也较大，因此海洋站感热通量整体的下降率大于再分析数据，渤海区域这种特征最为明显。

2.3.2 潜热通量

研究对1981—2012年中国沿岸整体潜热通量逐年平均值序列进行了统计和变化趋势检验，结果显示（表2），海洋站潜热通量年际变化有明显的下降趋势，下降率为 $0.751 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ，尤其是在2002—2008年潜热通量下降明显；ERA-I数据在1981—2012年下降趋势较明显，下降率为 $0.103 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ，MERRA数据在1981—2012年略有上升的趋势，上升率为 $0.027 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ，趋势不明显。ERA-I与海洋站年平均

潜热通量时间序列的相关系数为0.581，相关性显著；MERRA与海洋站年平均潜热通量时间序列的相关系数为0.231，相关性不显著（图8）。各海区沿岸海洋站计算结果与再分析资料潜热通量年际变化的相关性分析结果显示：黄海和东海沿岸，海洋站计算结果与ERA-I资料相关性显著，而渤海和南海沿岸的相关性不显著；东海沿岸海洋站计算结果与MERRA资料的相关性显著，其他海区相关性不显著（表2）。

图8a显示中国沿岸2000年前后，ERA-I和MERRA潜热通量年平均序列的变化趋势明显不同，研究进一步分段分析了2000年前、后变化趋势一致性和相关性。1981—2000年，海洋站潜热通量年际变化呈下降趋势，下降率为 $0.352 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ，下降趋势明显；ERA-I潜热通量年际变化呈略上升的趋势，上升率为 $0.124 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ；MERRA潜热通量年际变化上升趋势明显，上升率为 $0.290 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$ ；海洋站与两种再分析数据的年际变化趋势均不一致，相关性也不显著。2001—2012年，三种数据的潜热通量年际变化均呈现明显的下降趋势，其中，海洋站数据的下

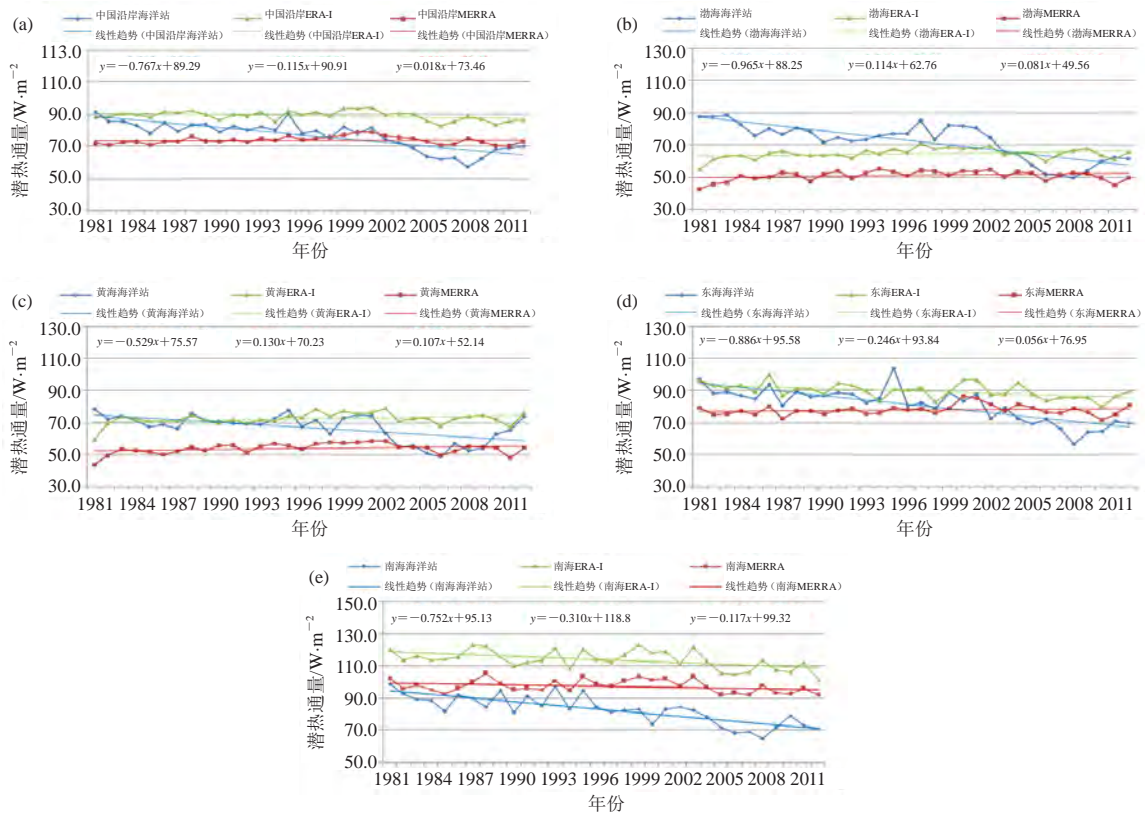


图8 1981—2012年海洋站、ERA-I、MERRA历年平均潜热通量年际变化

(a) 中国沿岸，(b) 渤海沿岸，(c) 黄海沿岸，(d) 东海沿岸，(e) 南海沿岸

Fig. 8 The annual latent heat flux of the coastal station, ERA-I and MERRA from 1981 to 2012 for the (a) coast of the China Sea, (b) coast of the Bohai Sea, (c) coast of the Yellow Sea, (d) coast of the East China Sea, (e) coast of the South China Sea

降率最大, 约为 $0.906 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$; 其次是ERA-I数据, 下降率为 $0.620 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$; MERRA数据的下降率为 $0.576 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{a})$; ERA-I、MERRA与海洋站潜热通量年际变化序列的相关性均显著。

在2000年以前两种再分析资料的潜热通量为上升趋势, 海洋站的潜热通量为下降趋势, 2000年以后三种资料的潜热通量均为下降趋势。分析其原因, 首先1981—2012年3种资料风速均为减小的趋势, 与文献[14]中的结论一致, 对于潜热通量下降产生贡献; 而2000年以前再分析数据水温升高趋势略大于海洋站数据, 空气比湿的上升率小于海洋站数据, 则再分析数据海气比湿差为增大的趋势, MERRA数据尤为明显, 对潜热通量的上升趋势产生贡献, 综合海气比湿差和风速的变化, 2000年前再分析数据潜热通量整体上为略有上升的趋势, 与海洋站实测结果不同; 2000年以后, 3种资料的风速及海气比湿差均为下降趋势, 且海洋站风速和比湿差的下降趋势均强于两种再分析资料, 因此3种资料潜热通量均为下降, 但是海洋站潜热通量下降趋势最大, 渤海、黄海沿岸的这种特征最明显, 造成海洋站计算的潜热通量和再分析数据的潜热通量年际变化特征差异较大, 相关性差。2008年海洋站表现的中国沿岸整体潜热通量最低, 再分析数据没有反映出此特征, 原因可能是海洋站水温比再分析资料低^[7]、空气比湿与再分析资料较一致但均较高, 海气比湿差比再分析资料明显偏小, 且海洋站风速也偏低所致。该年份的再分析资料使用时应注意其存在的偏差。

3 结论

1) 历年逐月平均值检验显示: 对于中国沿岸整体的历年逐月平均感热通量和潜热通量, 两种再分析数据与海洋站的均值没有明显偏差, 相关性均较好。ERA-I数据平均值略偏大, MERRA数据与海洋站的平均状态更接近。方差差异均明显, 海洋站的方差最大, MERRA的方差最小, ERA-I与海洋站更接近。

2) 季节变化特征检验显示: 中国沿岸整体的感热通量季节变化呈春夏季低, 秋冬季高的分布形式, 两种再分析与资料海洋站均显著相关, 最高月份均为12月; 最低月份略有不同, 海洋站最低月份为4月, ERA-I数据最低月份在7月, MERRA数据的最低月份在8月, 在2—7月海洋站月平均感热通量明显低于ERA-I和MERRA的月平均值。中国沿岸整体的潜热通量季节变化呈春夏季低, 秋冬季高的分布形式, 再分析资料与海洋站的时间序列均显著相关, 最低、最高月份相同, 4月最低, 10月最高, 再分析资料能够很

好地体现中国沿岸整体的潜热通量季节性变化特征, 其中也存在略微的差异, 如: 海洋站季节变化振幅最大, 其次是ERA-I数据, MERRA数据的季节变化振幅最小。

3) 年际变化特征检验结果显示: 1981—2012年, 对于中国沿岸整体, ERA-I数据感热通量和潜热通量年际变化和海洋站相关性显著, MERRA数据感热通量和潜热通量年际变化和海洋站相关性不显著; ERA-I和海洋站感热通量和潜热通量数据均下降趋势明显, 与海洋站趋势较一致; MERRA数据感热通量年际变化呈略下降的趋势, 趋势不明显; MERRA数据潜热通量的年际变化呈略上升的趋势, 与海洋站计算的潜热通量趋势明显不一致, MERRA数据不能代表期间的中国沿岸感热和潜热通量的年际变化特征。不论是感热通量还是潜热通量, 与MERRA数据相比, ERA-I数据与海洋站数据的年际变化特征更为接近。

4) 综合分析再分析数据与海洋站观测数据计算的海气热通量月均值、季节变化和年际变化特征差异产生的原因, 主要是由于数据同化模式中所用的中国沿岸海温资料、空气湿度资料量有限, 并且位于海陆相互作用的边界, 使模式运行结果存在误差。另外模式运行时可能对异常值的过度处理, 使数据(特别是风)方差变小, 也会对通量的计算结果产生影响。

参考文献

- [1] 陈锦年, 王宏娜, 左涛, 等. 亚印大海气界面热通量变化特征及气候效应. 北京: 海洋出版社, 2013
- [2] 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. 海洋预报, 2005, 22(4): 1-13.
- [3] Fairall C W, Bradley E F, Hare J E, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. Journal of Climate, 2003, 16: 571-591.
- [4] Brunke M A, Fairall C W, Zeng X, et al. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? Journal of Climate, 2003, 16: 619-635.
- [5] 张连新, 管长龙, 黄健. 海气热通量算法的改进及应用. 中国海洋大学学报, 2011, 41(12): 8-16.
- [6] 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. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 482-487.
- [7] 高志刚, 骆敬新, 刘克修, 等. ERA-Interim再分析数据在中国沿海的质量评估. 海洋科学, 2015, 39(5): 92-105.
- [8] 赵瑞霞, 吴国雄. 黄河流域中上游水分收支以及再分析资料可用性分析. 自然科学进展, 2006, 16(3): 316-324.
- [9] 赵瑞霞, 吴国雄. 长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析. 气象学报, 2007, 65(3): 416-427.
- [10] 何浪, 吴洪宝, 赵晓川. 3种再分析资料基本统计量比较. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 54-63.
- [11] 黄艳松, 宋金宝. NCEP再分析资料和浮标观测资料计算海气热通量的比较. 海洋科学, 2011, 35(12): 113-120.
- [12] 徐小慧, 高志球. 利用船测近海层湍流热通量资料验证OAF flux数据集. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 281-291.
- [13] 胡基福. 统计天气分析与预报. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992.
- [14] 赵佳莹, 徐海明. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析. 气候与环境研究, 2014, 19(5): 587-600.