

三种再分析资料在西沙海域的适用性分析

罗琪^{1,2*}, 刘少军^{1,2}, 张廷龙^{1,2}, 蔡大鑫^{1,2}, 赵婷^{1,2}, 韩静^{1,2}

¹海南省气象科学研究所, 海南 海口

²海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2022年3月21日; 录用日期: 2022年6月3日; 发布日期: 2022年6月15日

摘要

利用2008年南海西沙永兴岛观测站(16°50'N, 112°20'E)的地面资料与2020年季风爆发前后的高空资料, 与CRA40、ERA5和CFSR三种再分析资料进行了对比分析, 讨论了三种再分析资料在西沙海域的适用性。结果表明: 对于地面资料三种再分析在西沙站的适用性较好, 均能够反映出海气要素和海气通量的变化趋势及南海季风爆发时的变化, CRA40和CFSR的海温与观测值相关性一般且显著低于观测值, ERA5的10 m风速和观测值相关性较差且明显偏低, 对于海表温度的相关性则较好, 优于其他两种再分析资料。CRA40的感热通量与观测数据相关性一般, 其主要原因可能是CRA40的海温偏低, ERA5的相关性略好于CFSR, 但其均方根误差和平均偏差偏高, 三种再分析资料对潜热通量均表现出了较高的相关性, 但三种再分析资料的潜热通量均偏高。总体上CFSR的海气通量在西沙海域的适用性优于其他两种再分析资料。对于高空资料, CRA40在各高度与观测值均有很好的相关性, 整体上明显优于其他两种再分析资料, 对于风速、相对湿度和比湿CFSR和ERA5适用性较差, 在各层的相关性均较低, 均方根误差和平均偏差也偏大, CRA40的高空资料在南海的适用性优于CFSR和ERA5。

关键词

南海, 再分析资料, 适用性分析

Applicability Analysis of Three Reanalysis Data in Xisha Sea Area

Qi Luo^{1,2*}, Shaojun Liu^{1,2}, Tinglong Zhang^{1,2}, Daxin Cai^{1,2}, Ting Zhao^{1,2}, Jing Han^{1,2}

¹Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou Hainan

²Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou Hainan

Received: Mar. 21st, 2022; accepted: Jun. 3rd, 2022; published: Jun. 15th, 2022

*通讯作者。

Abstract

Based on the surface data of Yongxing Island observation station (16°50'N, 112°20'E) in Xisha, South China Sea in 2008 and the upper air data before and after the onset of monsoon in 2020, the three reanalysis data of CRA40, ERA5 and CFSR are compared and the applicability of the three reanalysis data in Xisha sea area is discussed. The results show that the three reanalyses of surface data have good applicability in Xisha site, and can reflect the changing trend of air sea elements and air sea flux during the outbreak of the South China Sea monsoon. The correlation between the sea surface temperature of CRA40 and CFSR and the observed value is general and significantly lower than the observed value, and the correlation between the 10 m wind speed and the observation data of ERA5 is poor and significantly lower. The correlation of sea surface temperature is better than the other two reanalysis data. The sensible heat flux of CRA40 is generally correlated with the observed data. The main reason may be that the sea surface temperature of CRA40 is lower, and the correlation of ERA5 is slightly better than CFSR, but its root mean square error and average deviation are higher. The three reanalysis data show high correlation to the latent heat flux, but the latent heat flux of the three reanalysis data is much higher. In general, the applicability of CFSR sea air flux in Xisha sea area is better than the other two reanalysis data. For the upper air data, CRA40 has a good correlation with the observation data on each height, which is obviously better than the other two reanalysis data on the whole. For wind speed, relative humidity and specific humidity, CFSR and ERA5 have poor applicability. The correlation in each layer is low. The root mean square error and average deviation are also large. The applicability of CRA40's upper air data in the South China Sea is better than CFSR and ERA5.

Keywords

China South Sea, Reanalysis Data, Applicability Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

再分析资料是融合了地面站点观测、卫星遥感、数值模式模拟的综合数据，是对大气情况的最优反映，目前已成为研究全球气候变化和认识大气运动规律的重要手段。从上个世纪 90 年代开始欧盟、美国、日本等实施了一系列大气再分析计划，到目前为止已经开发出了几代的再分析数据集。目前应用最为广泛的再分析资料有美国国家环境预报中心(NCEP)的 NECP/NCAR、NCEP/DOE 及 CFSR，欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-interim、ERA5，日本气象厅(JMA)的 JRA-25 等[1]，许多学者也利用它们做过研究：孟宪贵等利用 ERA5 对山东省周边 10 个站点的资料进行了评估，结果表明 ERA5 的海平面气压和 2 m 温度相关性优于 2 m 相对湿度和 10 m 风场，整体上优于 ERA-Interim [2]；杨显玉等利用三种国际常用的再分析资料驱动 WRF 模式，并结合观测资料，对模式中不同边界层参数化方案和陆面过程参数化方案在青藏高原鄂陵湖、扎陵湖以及纳木错湖区域的感热、潜热通量等陆-气相互作用参量进行了适用性研究[3]；朱智等利用 1979~2010 年中国 805 个站点的逐日地表温度观测资料和五种再分析地表温度资料，对五种再分析地表温度资料在中国区域的适用性进行了比较与分析[4]。CRA40 是中国第一代全球大气和陆面再分析产品，也填补了我国在全球大气再分析领域的空白，经过多家业务科研单位的试用评估，

产品质量与国际第三代全球再分析产品质量总体相当。Xiaojing Yu 等分析了 CRA40 在描述亚洲副热带西风急流特征方面的优势和局限性, 并与 ERA5 和 CFSR 进行了比较, 结果表明三种再分析资料结果基本一致[5]; Li C 等将 1980~2018 年间 CRA40 降水数据集与其他四种再分析资料进行了对比评估, 结果表明 CRA40 在所有月份表现出最潮湿的偏差, 尤其是在 30°N 带的南部, 且 CRA40 倾向于略微低估低降雨量, 但高估高降雨量[6]。通过再分析资料前人的研究取得了许多有意义的结果[7]-[13], 然而作为一种利用资料同化技术把数值预报产品与观测资料融合起来的产物, 再分析资料必然包含有数值模式、同化方案和观测系统变更等引入的误差, 因而, 再分析资料并不能完全取代观测资料来描述大气真实的状态, 再分析资料的适用性能够影响到气候变化研究结果和气候模式验证的可靠性[14]。

南海处于东亚季风区, 是亚洲与澳洲、太平洋与印度洋的中间地带, 是南北半球赤道气流交换的重要通道、太平洋信风和亚澳季风的交叉路口, 地理上的独特性导致它与全球气候变化的一系列重大事件相关联[15]。南海及邻近海域有地球上最暖的海表温度和最强的大气对流, 南海季风爆发开启了从印度洋经南海到我国大陆的水汽通道, 季风发展过程中的水汽输送成为东亚海-陆-气相互作用的重要形式和纽带。海气通量交换是海气相互作用的关键环节, 海洋和大气间相互影响、相互作用的过程最初都是由海气界面通量交换来实现的[16]。南海海-气界面的通量交换强烈地影响上层海洋结构及大气边界层结构, 进而影响大气环流和海洋环流, 造成不同尺度的气候变化, 在一定程度上影响着东亚及我国的天气气候变化[17]。认识南海海-气通量交换过程对于研究海洋环流模式, 海气耦合模式及深入了解能量和水循环过程都非常重要[18][19]。为了深入了解南海海气相互作用的特点和南海季风爆发的机制, 观测试验和对观测资料的分析研究是非常重要的, 然而在海上进行长时间序列的观测难度和成本较高, 现有观测资料难以满足研究的需求[20], 因此利用再分析资料已成为非常必要的手段。再分析资料具有连续性好、时间序列长、分辨率高等优点, 可以一定程度上弥补南海观测资料不足的问题。现有的几种再分析资料基本能合理地反映中国区域气候变化的时空分布特征, 但与观测结果相比仍然存在一定的差异, 而且不同的再分析产品在不同区域、不同时段的可信度也不一致, 选取适合南海区域的再分析资料非常有必要。

鉴于此, 本研究利用 CFSR、ERA5 和 CRA40 三种高分辨率再分析资料与南海季风爆发期间西沙观测站的地面和高空观测资料进行了对比分析, 利用相关系数、均方根误差和平均偏差进行了误差分析, 分析了三种再分析资料在南海的适用性, 以期得到适合南海的再分析资料, 为南海海气相互作用的研究提供依据。

2. 观测数据及再分析资料

2.1. 观测数据

地面观测资料选取了 2008 年 5 月 1 日~9 月 30 日西沙永兴岛近海面层 10 m 风速、2 m 气温、海表温度、相对湿度、感热和潜热通量等观测资料, 2008 年属于亚洲季风年, 受国家重点基础研究发展计划 973 项目“亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响”支持, 选取西沙永兴岛作为第四次海气相互作用观测试验基地, 对季风从爆发到强盛和中断直至撤退的全部过程进行海气通量观测试验。观测中采用了多种新型的观测设备, 获取了从 2008 年 4 月 25 日~2008 年 10 月 7 日的海气要素资料 2008 年观测试验由于仪器先进、监控实时、维护良好, 所得数据精度较高, 具有很好的代表性和连续性[18]。其中 2 m 气温和海表温度的时间分辨率为 1 分钟, 10 m 风速、相对湿度、感热和潜热通量的时间分辨率为 30 分钟, 对变量均进行了日平均处理。高空资料选取了 2020 年 5 月 1 日~9 月 30 日西沙永兴国家观测站 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 的气温、风速、相对湿度和比湿。为了提高数据准确性, 对涡动观测数据进行了质量控制, 包括野点剔除、感热通量的超声虚温校正等方面, 剔除了其中明显异常的数据, 然后将剔除和缺失的数据采用内插方法补齐。

2.2. 再分析资料

再分析资料是对观测资料(包括地面观测、卫星, 还有雷达、探空、浮标、飞机、船舶等)进行质量控制, 然后再同化入全球模式后, 所获得的资料。一定程度上可以近似的认为是实际的大气状况。本研究选取了 CFSR、ERA5 和 CRA40 三种高分辨率再分析资料进行研究。

CRA40 是中国第一代全球大气再分析数据集, 由国家气象信息中心牵头, 多部门、多单位参与协同创新, 瞄准国际上前沿的同化方案, 有层次地开展了多组全球大气再分析试验, 提升了中国基础气象资料质量及同化效果, 成功研制出全球大气再分析产品。CRA40 时间分辨率 6 小时, 空间分辨率 34 km, 垂直层次 64 层, 模式层顶 0.27 hPa, 可在中国气象数据网查看(网址: <http://data.cma.cn/analysis/cra40>) [5]。

ERA5 再分析资料是由欧盟资助、ECMWF 打造的最新一代再分析资料, ERA5 在其前身 ERA-Interim 的基础上实现了很大升级。ERA5 资料起始时间为 1979 年, 并持续更新至实时 5 d 以内, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为逐小时。ERA5 再分析资料可在 ECMWF 的气象资料归档和检索系统下载(网址: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>) [2]。

CFSR 是 NCEP 第三代再分析产品。它是一个全球性的、高分辨率的、大气-海洋-陆地-表面-海冰耦合系统, 旨在提供这一时期这些耦合域状态的最佳估计。CFSR 全球大气分辨率约为 38 公里(T382L64), 时间分辨率 6 小时, 可从以下网址检索下载 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>) [21]。

3. 结果分析

研究方法主要利用了相关系数(R), 均方根误差(RMSE)和平均偏差(Bias)进行了误差分析, 其计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ob,i} - \overline{X_{ob}})(X_{re,i} - \overline{X_{re}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ob,i} - \overline{X_{ob}})^2 (X_{re,i} - \overline{X_{re}})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ob,i} - X_{re,i})^2}}{n} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ob,i} - X_{re,i})}{n} \quad (3)$$

其中 X_{ob} 是观测值, X_{re} 是再分析资料的值。

3.1. 地面资料

三种再分析资料的地面气象要素众多, 本研究选取了 2008 年 2 m 气温、海表温度、相对湿度、10 m 风速等海气要素及感热、潜热通量等海气通量与观测资料进行对比分析。在三种再分析资料中, ERA5 和 CRA40 的分辨率均为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, CFSR 的分辨率为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$, 时间分辨率均为 6 h。

图 1 是 2008 年 5~9 月西沙站 2 m 气温和海温观测值和再分析资料的对比, 三种再分析资料能较好的反映出气温的变化趋势, 相关系数均通过了 0.01 的显著性水平检验(表 1), 与观测值相关性较高, 同时也能够反映出 5 月中旬季风爆发时气温的显著下降。CFSR 的相关系数为 0.76, 优于其他两种再分析资料, 但 CFSR 的值比观测值明显偏高, 均方根误差和平均偏差分别为 0.56 和 0.41, CRA40 的均方根误差为 0.45°C , 是三种再分析资料里效果最好的。对于海表温度, ERA5 的变化趋势比 CFSR 和 EAR40 更接近

于观测值, 其相关系数达到了 0.73, 在 5 月中旬南海季风爆发时海表温度大幅下降, 达到了观测期间的最低值 27.81°C, 而同气温类似, 三种再分析资料均能捕捉到这一趋势。7 月到 10 月期间三种再分析资料的值均低于观测的海表温度, 尤其是 CRA40 和 CFSR, 其值显著低于观测值, 均方根误差和平均偏差分别达到了 0.86°C、-0.68°C 和 0.72°C、-0.53°C, ERA5 的值更接近于观测值, 其效果优于 CFSR 和 EAR40。

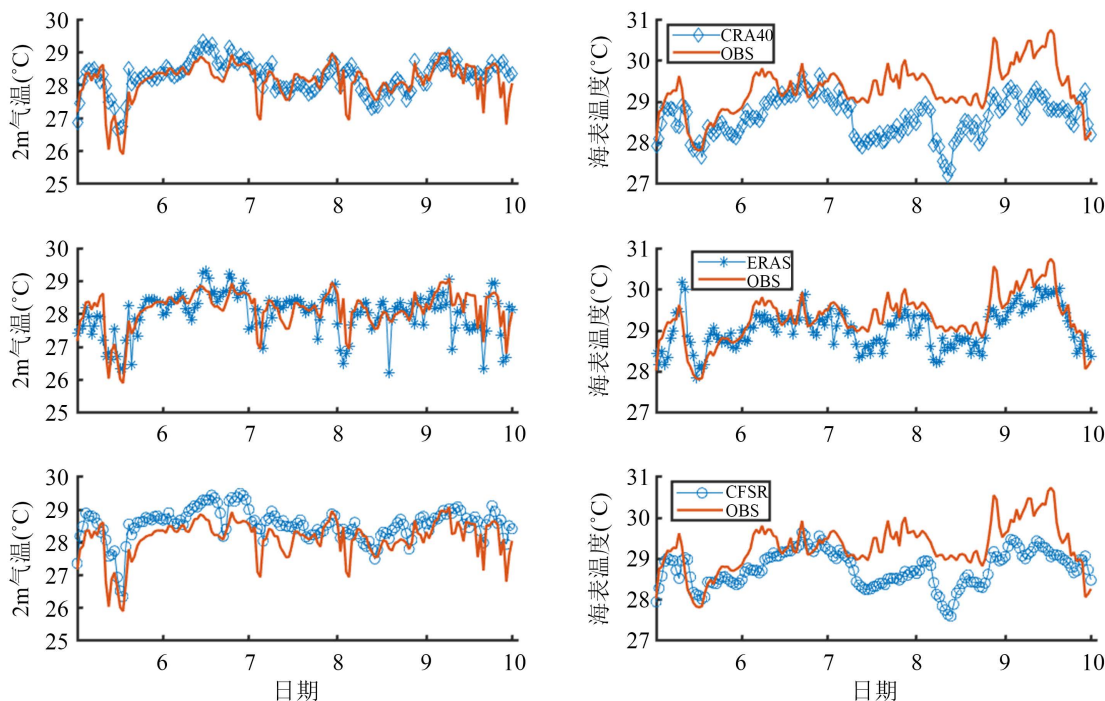


Figure 1. Observation and reanalysis data of 2 m air temperature and sea surface temperature at Xisha site in 2008
图 1. 2008 年西沙站 2 m 气温和海表温度的观测值和再分析资料

图 2 是西沙站 10 m 风速和相对湿度观测值和再分析值的对比, ERA5 的风速与观测值的相关性较差, 整体上比观测值显著偏低, 相关系数只有 0.3, 均方根误差达到了 4.03 m/s。CFSR 和 CRA40 的与观测值的相关性优于 ERA5, 相关系数分别为 0.67 和 0.61, 均方根误差和平均偏差也较低。在南海季风爆发时 10 m 风速有显著的增加趋势, 三种再分析资料均能反映风速的显著增加趋势, 但再分析资料的值均高于观测值。在 6 月中旬左右南海季风的二次活跃期风速又大幅度增加, CFSR 和 CRA40 均反映了其变化, 但 CRA40 表现出了一定的滞后性。ERA40 和 ERA5 的相对湿度与观测值的相关性优于 CFSR, 分别达到了 0.69 和 0.72, 均方根误差和平均偏差也非常接近, 在南海季风爆发时相对湿度也达到了最低值 71.38%, ERA5 和 CRA40 能够很好地反映这一变化趋势。而 CFSR 对于相对湿度相关性较差, 与观测值为负相关关系(-0.2)且显著低于观测值, 未能反映出相对湿度的变化趋势。

海气通量交换是海气相互作用的关键环节, 海洋和大气间相互影响、相互作用的过程最初都是由海气界面通量交换来实现的。一方面海洋通过感热、潜热交换过程影响大气边界层, 提供水汽输送进而影响大气环流; 另一方面海水运动的大部分驱动力也来自海气界面处的通量交换, 海气界面处的感热通量、潜热通量以及辐射通量是影响海洋上混合层乃至季节温跃层变化的重要因子。

图 3 是感热通量和潜热通量观测值和再分析值的对比, CRA40 感热通量与观测值的相关性一般, 相关系数为 0.45, 低于 ERA5 的 0.69 和 CFSR 的 0.67。在南海季风爆发的 5 月 ERA5 的感热通量值与观测值的相关性高于 CFSR 和 CRA40, 相关系数达到了 0.88, ERA5 的相关性较好, 但其均方根误差和平均

偏差偏高, CFSR 的均方根误差和平均偏差分别为 4.44 w/m^2 和 -1.06 w/m^2 , 整体上优于其他两种再分析资料。

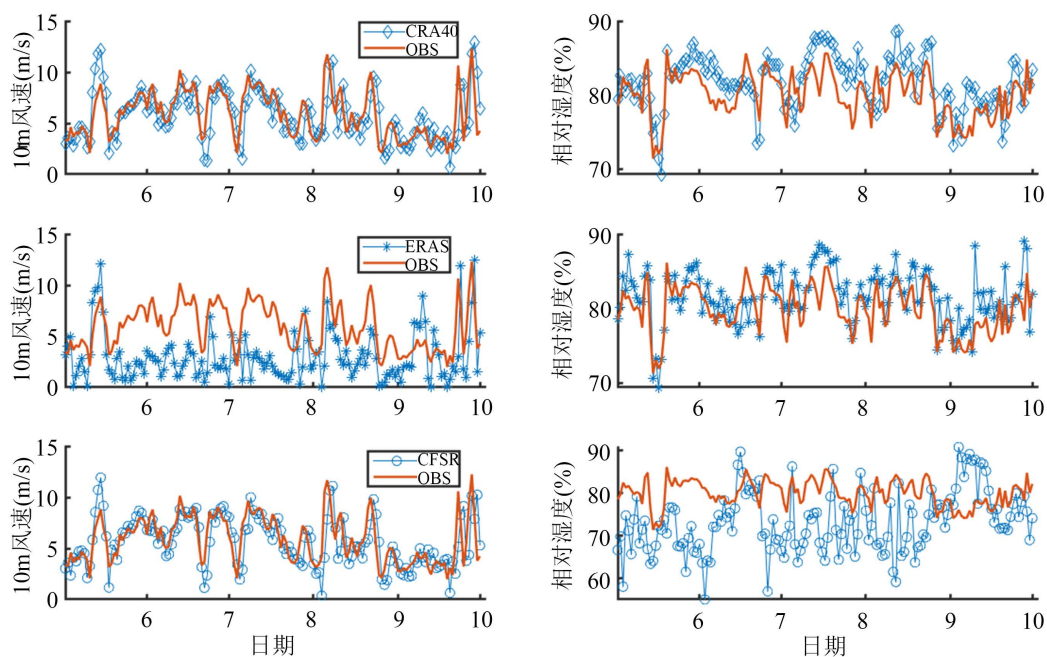


Figure 2. Observation and reanalysis data of 10 m wind speed and relative humidity at Xisha site in 2008

图 2. 2008 年西沙站 10 m 风速的观测值和再分析资料

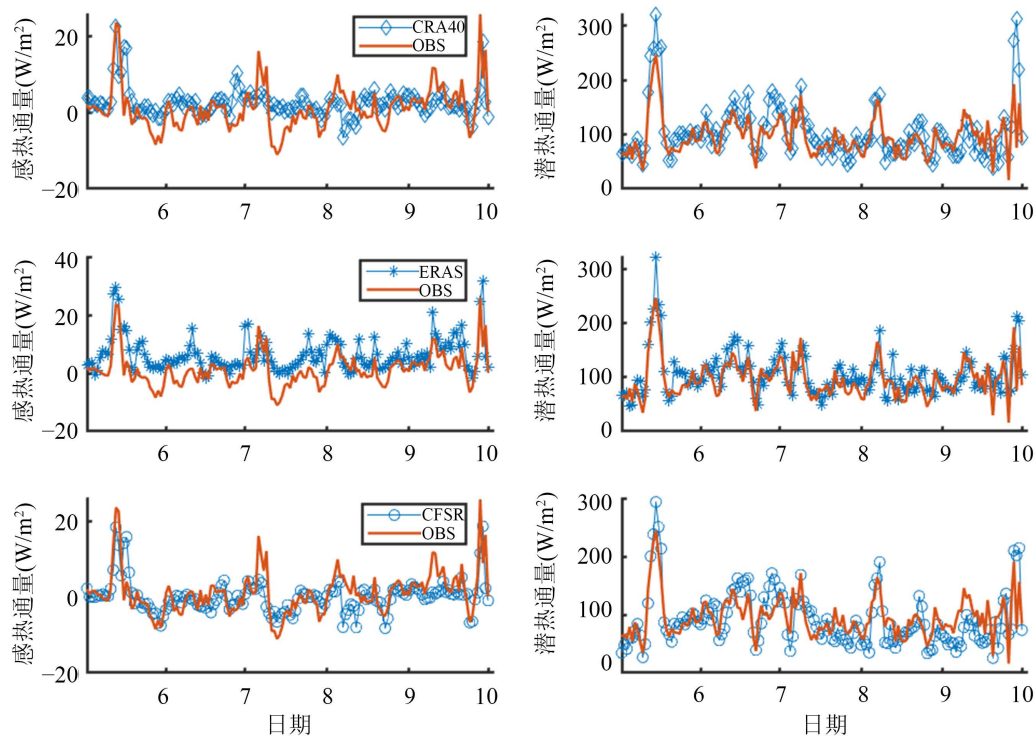


Figure 3. Observation and reanalysis data of sensible flux and latent flux at Xisha site in 2008

图 3. 2008 年西沙站感热和潜热通量的观测值和再分析资料

对于潜热通量, 三种再分析资料均表现出了较高的相关性, 三种在分析资料的相关系数分别为 0.75、0.74 和 0.76, 均方根误差和平均偏差也相近, CFSR 略优于 ERA5 和 CRA40。5 月中旬南海季风爆发, 风速和海气温差迅速增大, 感热和潜热通量都有一定的增长, 潜热通量也到达了观测期间的极值, 三种再分析资料均能够很好反映该时期感热和潜热通量的显著增加趋势, CRA40 的相关系数达到了 0.92, 高于 ERA5 的 0.90 和 CFSR 的 0.91, 但三种再分析资料的潜热通量均明显偏高。对于海气通量, CFSR 在西沙海域的适用性略优于其他两种再分析资料。

Table 1. Correlation coefficient, root mean square error and mean deviation of three reanalysis data for each surface data
表 1. 三种再分析资料对于各地面资料的相关系数、均方根误差和平均偏差

	CRA40			ERA5			CFSR		
	R	RMSE	Bias	R	RMSE	Bias	R	RMSE	Bias
2 m 气温(°C)	0.69*	0.45	0.13	0.65*	0.52	-0.11	0.76*	0.56	0.41
海表温度(°C)	0.51*	0.86	-0.68	0.73*	0.47	-0.25	0.56*	0.72	-0.53
10 m 风速(m/s)	0.61*	2.11	-0.18	0.30*	4.03	-2.91	0.67*	1.93	-0.21
相对湿度(%)	0.69*	3.19	1.67	0.72*	3.0	1.62	-0.20**	10.76	-6.77
感热通量(w/m ²)	0.45*	5.47	1.34	0.69*	6.87	5.11	0.67*	4.44	-1.06
潜热通量(w/m ²)	0.75*	34.73	7.9	0.74*	28.71	8.32	0.76*	31.48	-3.73

注: *通过 0.01 显著性水平检验; **通过 0.05 显著性水平检验。

3.2. 高空资料

本研究选取了 ERA5、CRA40 和 CFSR 三种再分析资料 2020 年 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 的气温、风速、相对湿度和比湿与观测资料进行对比分析, 其中 CFSR 资料缺少 1000 hPa 的比湿及各层的相对湿度。

ERA5 在各层的气温与观测值相关性一般, CRA40 和 CFSR 明显优于 ERA5 (图 4), 各层的相关系数均高于 0.74 (表 2), 通过了 0.01 显著性水平检验, 均方根误差和平均偏差值也较低, 尤其是 CRA40, 其各层的平均偏差均在 0.1°C 以下, 优于 CFSR。CRA40 和 CFSR 在高层的相关性高于低层(1000 hPa), ERA5 各层则差别不大, 三种再分析资料的平均偏差均在 850 hPa 高度处最大。

CFSR 在各层的风速均明显高于观测值, 尤其是在 700 hPa 和 500 hPa, 平均偏差分达到了 4.94 m/s 和 16.52 m/s (图 5)。CRA40 在 850 hPa 高度的相关系数为 0.61, 其他三个高度的相关系数均超过了 0.9, 相关性显著优于 ERA5 和 CFSR, ERA5 在 1000 hPa 高度的相关系数为 0.37, 其他高度的相关系数均小于 0.1, CFSR 在各高度的相关系数均小于 0.1, 未通过 0.05 显著性水平检验。

同风速相似, CRA40 对于相对湿度和比湿的相关性也显著优于 ERA5 和 CFSR (图 6、图 7)。在 1000 hPa 高度处 CRA40 的相对湿度和比湿与观测值的相关系数分别为 0.41 和 0.44, 在其他高度均在 0.8~0.93 之间。CRA40 的相对湿度在 500 hPa 高度均方根误差和平均偏差偏高, 在其他高度均低于 ERA5, ERA5 的相对湿度在高层(700 hPa、500 hPa)的相关性优于低层(850 hPa、1000 hPa), 分别为 0.28 和 0.33, 相关性一般, 低于 CRA40, ERA5 均方根误差和平均误差也偏高。CFSR 的比湿在 850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 处均明显低于观测值, 均方根误差和平均误差高于 CRA40 和 ERA5, CRA40 和 ERA5 在各层的均方根误差和平均误差相近, 但 CRA40 的比湿与观测值相关性显著优于 ERA5。总体上 CRA40 高空资料在南海的适用性明显优于 ERA5 和 CFSR。

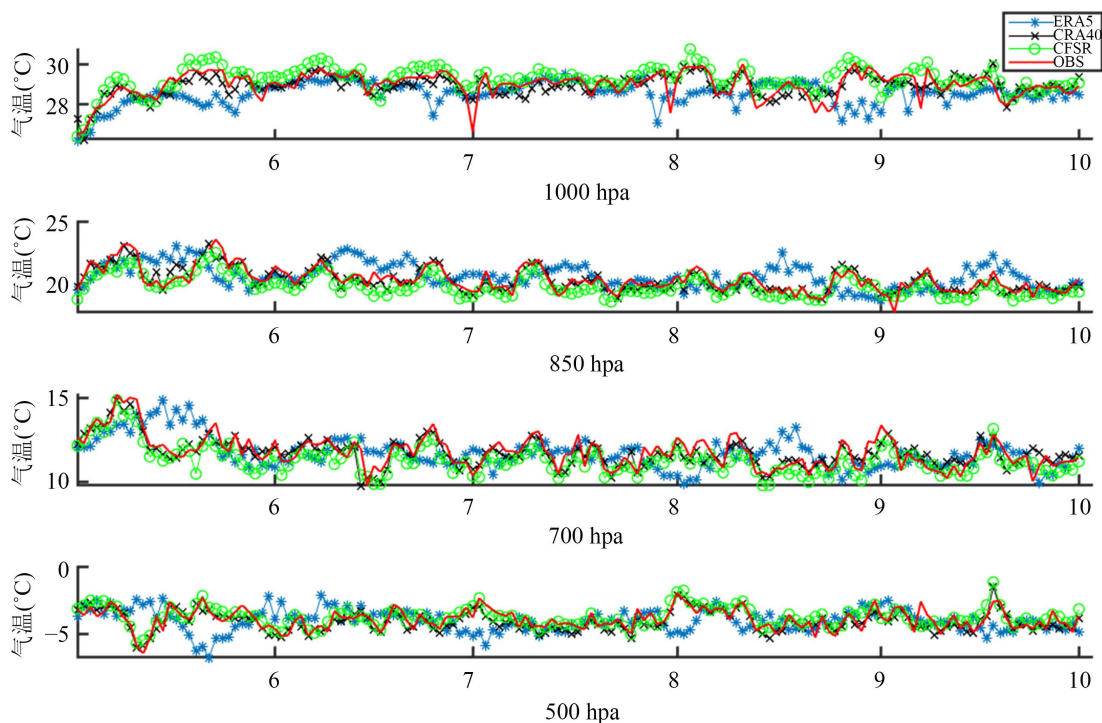


Figure 4. Observation and reanalysis data of air temperature at 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa and 500 hPa at Xisha site in 2020

图 4. 2020 年西沙站 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 气温的观测值和再分析资料

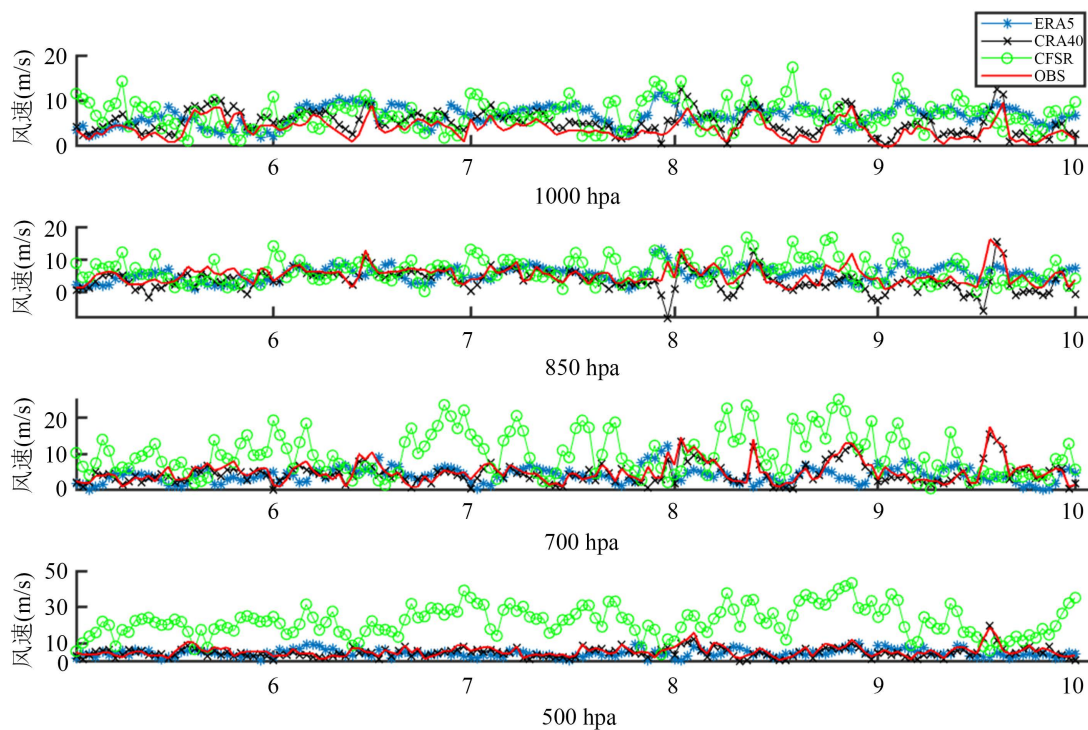


Figure 5. Observation and reanalysis data of wind speed at 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa and 500 hPa at Xisha site in 2020

图 5. 2020 年西沙站 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 风速的观测值和再分析资料

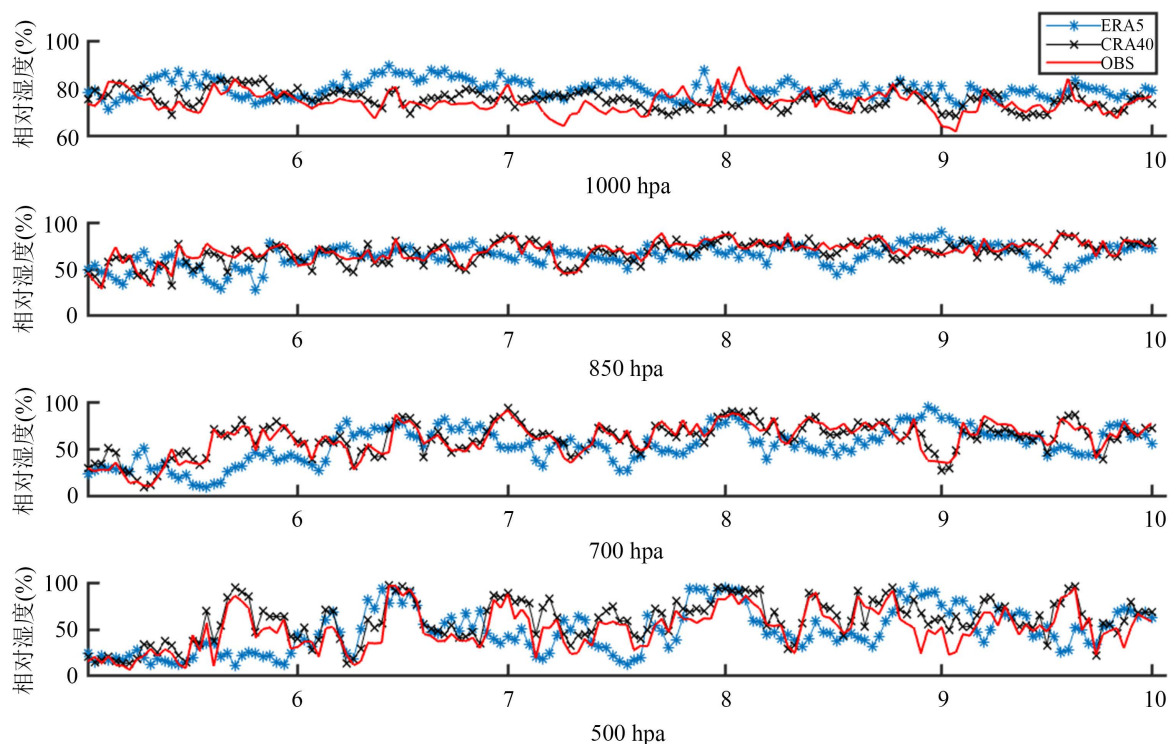


Figure 6. Observation and reanalysis data of relative humidity at 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa and 500 hPa at Xisha site in 2020

图 6. 2020 年西沙站 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 相对湿度的观测值和再分析资料

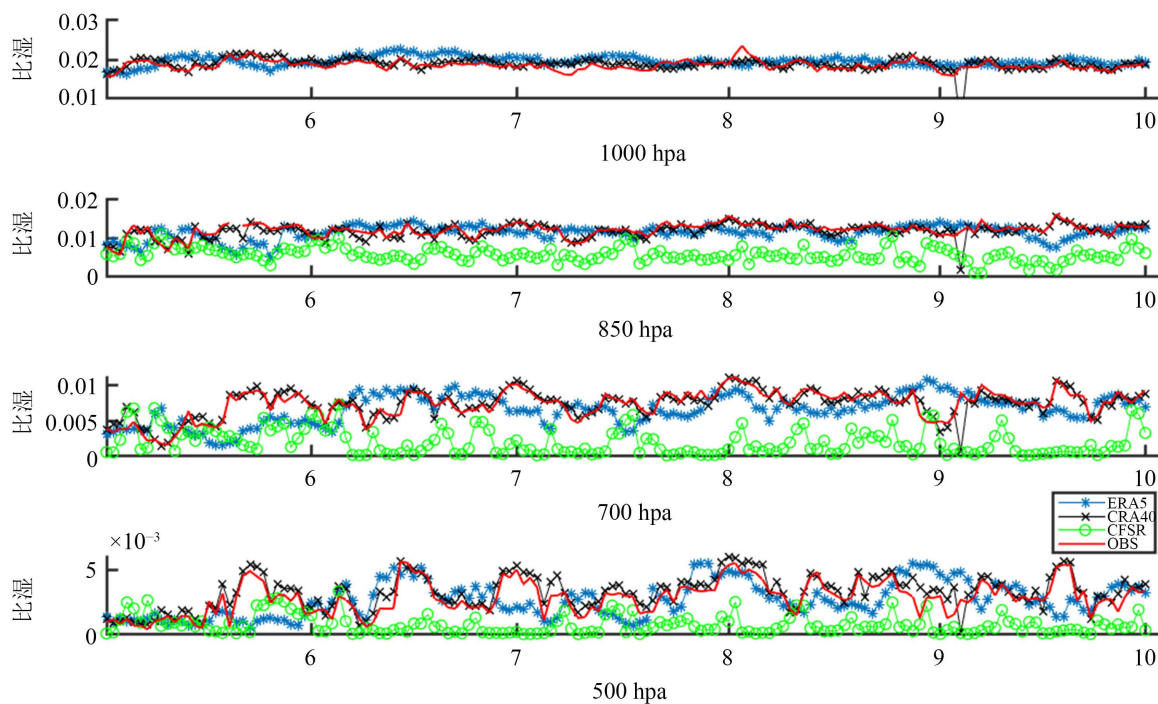


Figure 7. Observation and reanalysis data of specific humidity at 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa and 500 hPa at Xisha site in 2020

图 7. 2020 年西沙站 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 比湿的观测值和再分析资料

Table 2. Correlation coefficient, root mean square error and mean deviation of three reanalysis data for each upper air data
表 2. 三种再分析资料对于各高空资料的相关系数、均方根误差和平均偏差

		CRA40			ERA5			CFSR		
		R	RMSE	Bias	R	RMSE	Bias	R	RMSE	Bias
气温 (°C)	1000 hPa	0.75*	0.43	-0.04	0.22**	0.89	-0.43	0.74*	0.55	0.32
	850 hPa	0.89*	0.47	-0.1	0.18**	1.3	0.28	0.87*	0.74	-0.55
	700 hPa	0.84*	0.52	-0.07	0.27**	1.15	-0.06	0.87*	0.69	-0.50
	500 hPa	0.81*	0.48	-0.16	-0.23**	1.22	-0.1	0.80*	0.49	0.16
风速 (m/s)	1000 hPa	0.90*	1.88	1.52	-0.1	4.27	2.91	-0.10	5.13	3.3
	850 hPa	0.61*	3.14	-1.7	0.37*	3.43	0.30	0.04	4.73	1.45
	700 hPa	0.92*	1.30	-0.54	-0.04	3.88	-0.94	0.007	8.24	4.94
	500 hPa	0.90*	1.45	-0.73	0.02	3.60	-1.05	0.001	18.67	16.52
相对湿度 (%)	1000 hPa	0.41*	4.55	1.16	-0.12	8.18	5.46	/	/	/
	850 hPa	0.89*	5.55	-1.51	0.1	16.34	-5.33	/	/	/
	700 hPa	0.93*	6.61	0.86	0.28*	22.58	-6.25	/	/	/
	500 hPa	0.91*	12.82	8.94	0.33*	26.43	-2.32	/	/	/
比湿 (10 ⁻³)	1000 hPa	0.44*	1.6	0.34	-0.06	2.0	1.0	/	/	/
	850 hPa	0.80*	1.1	-0.34	-0.05	2.6	-0.68	-0.25*	6.9	-6.3
	700 hPa	0.88*	1.0	0.05	0.24*	2.6	-0.77	-0.19**	6.1	-5.3
	500 hPa	0.91	0.7	0.43	0.3	1.6	-0.18	-0.01	2.6	-2.1

注：*通过 0.01 显著性水平检验；**通过 0.05 显著性水平检验。

4. 结论

利用三种再分析资料与 2008 年南海西沙永兴站(16°50'N, 112°20'E)的地面观测资料和 2020 年的高空观测资料进行对比, 分析了三种再分析资料在西沙海域的适用性, 结果表明:

1) 对于地面资料三种再分析在西沙站的适用性较好, 整体上均能够反映出海气要素的变化趋势及南海季风爆发时的变化。CRA40 对于 2 m 气温、风速和相对湿度都表现出了较高的相关性, 但是对于海表温度 CRA40 的相关性一般且显著低于观测值; ERA5 的 10 m 风速和观测值相关性较差且明显偏低, 对于海表温度的相关性则较好, 优于其他两种再分析资料; CFSR 对于 2 m 气温和风速效果较好, 而 CFSR 的相对湿度与观测呈负相关且明显偏低, CFSR 的海表温度与 CRA40 相近, 也表现出偏低。

2) 三种再分析对于潜热通量的可靠性好于感热通量, CRA40 的感热通量与观测数据相关性一般, 其主要原因可能是 CRA40 的海温偏低, ERA5 的相关性略好于 CFSR, 但其均方根误差和平均偏差偏高。三种再分析资料对潜热通量均表现出了较高的相关性, 南海季风爆发时三种再分析资料也能够很好反映潜热通量的显著增加趋势, 相关系数均达到了 0.90 以上, 尤其是 CRA40 的相关系数达到了 0.92, 但三种再分析资料的潜热通量均偏高。总体上 CFSR 的海气通量在西沙海域的适用性优于其他两种再分析资料。

3) 对于高空资料, CRA40 在西沙站各高度表现均出了很好的适用性, 整体上明显优于其他两种再分析资料。CRA40 和 CFSR 的气温在各层表现出了较高的相关性, 相关系数均高于 0.74, 尤其是 CRA40,

其各层的平均偏差均在 0.1℃ 以下, 优于 CFSR, ERA5 在各层的气温与观测值相关性一般。对于风速、相对湿度和比湿 CFSR 和 ERA5 适用性较差, 在各层的相关性均较低, 均方根误差和平均偏差也偏大, CRA40 则表现出了较好的相关性, 在各层的相关性均较高, 均方根误差和平均偏差也显著低于 CFSR 和 ERA5, 在南海的适用性优于 CFSR 和 ERA5。

基金项目

海南省气象局青年基金(hnqxSJ202105); 国家自然科学基金(41775011); 海南省自然科学基金创新研究团队项目(2017CXTD014); 海南省自然科学基金(419QN330)。

参考文献

- [1] 李瑞青, 吕世华, 韩博, 高艳红. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1488-1502.
- [2] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [3] 杨显玉, 吕雅琼, 文军, 马耀明, 黄安宁, 田辉, 等. 不同参数化方案和再分析资料在典型高原湖泊地区的适用效果评估分析[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1195-1206.
- [4] 朱智, 师春香, 张涛, 朱晨, 孟现勇. 多种再分析地表温度资料在中国区域的适用性分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 614-624.
- [5] Yu, X., Zhang, L., Zhou, T. and Liu, J. (2021) The Asian Subtropical Westerly Jet Stream in CRA-40, ERA5, and CFSR Reanalysis Data: Comparative Assessment. *Journal of Meteorological Research*, **35**, 46-63. <https://doi.org/10.1007/s13351-021-0107-1>
- [6] Li, C., Zhao, T., Shi, C. and Liu, Z. (2021) Assessment of Precipitation from the CRA40 Dataset and New Generation Reanalysis Datasets in the Global Domain. *International Journal of Climatology*, **41**, 5243-5263. <https://doi.org/10.1002/joc.7127>
- [7] Kistler, R., Kalny, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., et al. (2001) The NCEP-NCAR50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological*, **82**, 247-268. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082%3C0247:TNNYRM%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082%3C0247:TNNYRM%3E2.3.CO;2)
- [8] 陈艳春, 王娜, 顾伟宗, 汤子东, 刘焕彬, 孟祥新, 等. 环渤海区域再分析资料地面风速场的适用性对比分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 67-72.
- [9] 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析[J]. 气象学报, 2006, 64(6): 709-722.
- [10] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 张强弓, 李茂善, 刘景时. NCEP/NCAR 再分析资料在纳木错流域湖泊/冰川区适用性分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 66-73.
- [11] 支星, 徐海明. 三种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的季节平均特征对比分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 97-109.
- [12] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337-347.
- [13] 刘甜甜, 盛立芳, 毕雪岩, 李文帅, 王菲. 一次春季冷空气过程中东海海域海气通量与界面热交换分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 28-37.
- [14] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 14-32.
- [15] 陈炜, 陈礼斌. 南海海气相互作用特点的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10759-10761.
- [16] 陈奕德, 蒋国荣, 张韧, 闫俊岳, 姚华栋, 唐志毅. 2002 年南海夏季风爆发期间南海北部海气通量分析与比较[J]. 大气科学, 2005, 29(5): 761-770.
- [17] 马耀明, 王介民, 张庆荣, 麦波强. 南沙海域大气湍流通量输送特征分析[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 46-52.
- [18] 孙启振, 陈锦年, 闫俊岳, 张秀芝, 黄磊, 王长科, 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(中文版), 2010, 32(4): 12-23.

-
- [19] 闫俊岳, 姚华栋, 李江龙, 唐志毅, 沙文钰, 蒋国荣, 等. 2000 年南海季风爆发前后西沙海域海-气热量交换特征[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 18-28.
- [20] 封宝鑫, 刘海龙, 林鹏飞, 王启. 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. 2018, 23(3): 332-340.
- [21] 向华, 张峰, 江静, 彭杰, 张喜亮, 张春艳. 利用 CFSR 资料分析近 30 年全球云量分布及变化[J]. 气象. 2014, 40(5): 555-561.