

龚伟伟, 师春香, 张涛, 等. 2015. 中国区域多种数值模式资料的地面气象要素评估 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 53–62, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13153. Gong Weiwei, Shi Chunxiang, Zhang Tao, et al. 2015. Evaluation of surface meteorological elements from several numerical models in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 53–62.

中国区域多种数值模式资料的地面气象要素评估

龚伟伟¹ 师春香² 张涛² 姜立鹏² 庄媛¹ 孟现勇³

¹ 南京信息工程大学, 南京 210044

² 国家气象信息中心, 北京 100081

³ 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘 要 利用中国气象局国家级自动站(2421 个站)的观测资料, 分别对 2010 年 7 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日的欧洲中期数值预报中心(ECMWF)、日本气象厅(JMA)和美国国家海洋大气局的全球预测系统(GFS)数值模式资料的地面气温、相对湿度和风速在中国区域的适用性进行了比较研究。结果表明, 3 种数值模式资料都能在一定程度上反映观测资料所具有的时间和空间分布特征, 东部地区的适用性要高于西部地区。不同的地面气象要素, 差异较大: 对于地面气温和地面相对湿度, ECMWF 比 JMA 和 GFS 更接近实际观测, ECMWF 和 JMA 的分析场数据质量要好于预报场; ECMWF 和 JMA 地面气温在冬季与观测差异最大, GFS 地面气温在夏季与观测差异最大; 3 种数值模式资料的地面相对湿度在秋季和冬季与观测差异最大; 对于地面风速, 在江淮流域和华南等东部区域 JMA 与实际观测差异最小, 在北部和西部区域 ECMWF 最好, JMA 和 GFS 地面风速在冬季与实际观测差异最大。

关键词 欧洲中期数值预报中心(ECMWF) 日本气象厅(JMA) 美国国家海洋大气局的全球预测系统(GFS) 地面气象要素 适用性评估

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0053-10

中图分类号 P42

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13153

Evaluation of Surface Meteorological Elements from Several Numerical Models in China

GONG Weiwei¹, SHI Chunxiang², ZHANG Tao², JIANG Lipeng², ZHUANG Yuan¹,
and MENG Xianyong³

¹ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² National Meteorological Information Center, China Meteorological Administrator, Beijing 100081

³ Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

Abstract The applicability of surface meteorological elements such as surface air temperature, relative humidity, and wind speed from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Japan Meteorological Agency (JMA), and Global Forecast System (GFS) is evaluated in China by comparison with automatic observations from 2421 stations reported by the Chinese Meteorological Administration from 1 July 2010 to 30 June 2013. The results indicate that the three numerical models can essentially display spatiotemporal consistence with observation and that their performance in East China is more reliable than that in the western area. The various surface meteorological variables of

收稿日期 2013-09-10; 网络预出版日期 2014-10-14

资助项目 国家国际科技合作项目 2011DFG23150, 国家公益性行业专项 GYHY201306045、GYHY 201206013、GYHY201306022

作者简介 龚伟伟, 女, 1987 年出生, 硕士, 从事陆面数据同化研究及多源数据融合。E-mail: nuist_gongweiwei@163.com

通讯作者 师春香, E-mail: shicx@cma.gov.cn

the numerical models are key to these differences. For example, the surface air temperature and relative humidity of ECMWF are closer to the observations than the JMA and GFS. Moreover, the qualities of surface air temperature and relative humidity from both ECMWF and JMA are better in the analysis field than those in prediction field. In addition, for surface air temperature, the largest differences with observation are noted with ECMWF and JMA in winter and GFS in summer. For surface relative humidity, the discrepancy of the three numerical models is the most significant in autumn and in winter. For the surface wind speed from these numerical models, JMA is the closest to the observation in eastern China, whereas ECMWF is the best in northern and western China. However, from the perspective of time, the differences among JMA, GFS, and the observations are the most obvious in winter.

Keywords European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Japan Meteorological Agency (JMA), Global Forecast System (GFS), Surface meteorological variable, Applicability evaluation

1 引言

随着气候学的发展, 各国学者普遍认识到全球气候变化不仅仅是由大气内部过程决定的, 同时也受与大气圈发生相互作用的水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈的影响(何杰, 2010)。在这其中, 陆气的相互作用是当前研究的一个热点, 国际上大量的敏感性试验表明陆面状况的变化对气候有重要影响(刘金婷, 2010), 尤其土壤湿度能够通过改变地表能量中的感热和潜热通量, 从而影响陆面和大气能量平衡(贾炳浩等, 2010; Tian et al., 2010; 师春香等, 2011)。使用陆面模式对地表的水文、生态等过程进行模拟是当前陆面过程研究的一个重要手段, 并由此产生了对陆面模式大气驱动场的需求(李新等, 2007; 何杰, 2010)。而且许多有关大气驱动数据的研究表明: 精确的、含有更多观测信息的大气驱动数据对于提高陆面模式的模拟很重要(Maurer et al., 2002; Berg et al., 2003; Fekete et al., 2004; Sheffield et al., 2004)。目前已有的可用于大气驱动场的数据有很多, 其中使用最普遍的是美国的 NCEP/NCAR、NCEP/DOE 再分析资料(Kalnay et al., 1996; Kanamitsu et al., 2002), 欧洲的 ERA-15、ERA-40、ERA-Interim 再分析资料(Uppala et al., 2005)、以及日本的 JRA-25 再分析资料(Onogi et al., 2007)。除此以外, 还有专门用于驱动陆面模式的 Princeton 驱动数据(Sheffield et al., 2006), 以及 Qian et al. (2006) 等建立的大气驱动数据等。这些数据除了可以用作驱动数据, 还可以应用于更广泛的科研领域, 如用其研究陆气之间的水和能量循环(Roads and Betts, 2000; Maurer et al., 2001; Wang and Zeng, 2012), 以及评估观测稀缺地区的气候资源分布, 还可用于数据集之间的对

比验证(何杰, 2010)等。许多研究者对这些资料在中国区域的适用性进行了评估, 赵天保等(2004)、赵天保和符淙斌(2006, 2009)、赵天保和华丽娟(2009)对 ERA-40、JRA-25、NCEP/NCAR、NCEP/DOE 等几种再分析地表气温、地表气压在中国区域的适用性进行了评估, 研究发现, 几种再分析产品虽然能在一定程度上反映出观测资料所具有的时空分布特征, 但它们之间的差异却具有明显的区域和季节变化特征。此外, 施晓晖等(2006)使用多种客观分析方法对 NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域的可信度进行了研究, 发现风速距平的误差随着高度的增加而减小, 说明地形对 NCEP 再分析资料的可信度具有较大影响。徐影等(2001)对美国 NCEP/NCAR 近 50 年的再分析资料在中国气候变化研究中的可信度进行了初步分析, 结果表明 NCEP 资料在对气候变化长期趋势变化的研究中, 不确定性较大, 1979 年以后的 NCEP 资料的可信度高于前期。由此可以发现, 这些再分析数据虽然在中国存在一定的适用性, 但是由于同化系统的缺陷以及观测资料的不均匀分布, 使得这些数据出现区域性的系统偏差, 因此有必要制作一套面向中国区域真实的地面气象要素数据集。师春香等(2011)制备了一套具有较高时空分辨率的地面气象要素数据集, 对降水和辐射数据进行很大改进, 但是地面气温、相对湿度、地面气压、近地面风速等要素是在 NCEP 再分析资料的基础上采用空间和时间插值得到, 需要进一步改进。

本文利用中国气象局国家级自动站(2421 个站)的逐小时观测资料分别对 ECMWF(欧洲中期数值预报中心)和 JMA(日本气象厅)以及 GFS(美国国家海洋大气局的全球预测系统)资料的地面气温、地面相对湿度和地面风速在中国的适用性进行比较研究。为数值模式资料与观测资料的融合奠定

基础，并对数值模式算法的改进具有指导意义。

2 资料及处理

本文所用的数值模式资料为 2010 年 7 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日 ECMWF 确定性预报模式的地面气温、露点温度、风速资料以及 JMA 和 GFS 的地面气温、相对湿度及风速资料。这 3 种数值模式资料的详细介绍见表 1。由于李佰平和智协飞（2012）等对 ECMWF 确定性预报模式地面气温预报结果进行研究表明：对于短期预报，考虑最近的预报结果要优于考虑多个预报结果的多元集成预报订正方法，故本文预报场资料选用最近预报结果。

表 1 数值模式资料说明

Table1 Information of numerical model data

资料来源	空间分辨率	空间范围	时间分辨率	起报时次
ECMWF	0.25°×0.25°	(10°S~60°N, 60°E~150°E)	3 h	00:00 (协调世界时,下同)、12:00
JMA	0.25°×0.25°	(5°S~90°N, 60°E~150°E)	3 h	00:00、12:00
GFS	1°×1°	(10°N~60°N, 60°E~150°E)	3 h	00:00、06:00、12:00、18:00

本研究所用的台站资料是中国气象局国家级自动站（2421 个站）2010 年 7 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日逐小时地面气温、相对湿度和风速资料，且经过了包括气候学界限值、区域界限值、时间一致性及空间一致性检查等在内的严格质量控制，可用率达 98.9%（任芝花和熊安元，2007）。图 1 为台站的空间分布图，可发现台站分布较密集，尤其在中国东南部地区，但在青藏高原和新疆地区分布较为稀疏。

因为所获取的 ECMWF 资料没有地面相对湿度信息，所以本文采用马格拉斯公式（1）计算实际水汽压，采用戈夫—格雷奇公式（2）计算饱和水汽压，最后可以根据公式（3）计算得到地面相对湿度（盛裴轩等，2005）：

$$e = e_0 \times 10^{\frac{a \times T_d}{b + T_d}}, \quad (1)$$

其中， e 为实际水汽压（单位：hPa）； e_0 为 0 °C 的饱和水汽压，取 6.1078 hPa；系数 a 取 7.69，系数 b 取 243.92； T_d 为露点温度。

$$\lg e_s = 10.79574(1 - T_{00}/T) - 5.02800 \lg(T/T_{00}) + 1.50475 \times 10^{-4} [1 - 10^{-8.2969(T/T_{00}-1)}] + 0.42873 \times 10^{-3} [10^{4.76955(1-T_{00}/T)} - 1] + 0.78614, \quad (2)$$

其中， e_s 为温度 T 对应的液面饱和水汽压， $T_{00}=273.16$ K 是水的三相点温度。地面相对湿度

$$U_w = e/e_s. \quad (3)$$

3 结果与分析

为了分析数值模式资料与台站观测资料的具体差异，本文采用双线性插值法将数值模式格点资料插值到观测站点，将模式与观测同一时刻数据形成的匹配样本数据进行分析。对于地面气温在插值过程中由于地形的差异引起的误差进行了订正，即

$$T = t + \gamma \Delta Z, \quad (4)$$

其中， T 为订正后的地表气温， t 为内插后的温度， γ （取 -6.5 K km $^{-1}$ ）为气温直减率， ΔZ 为实际地形高度与数值模式资料插值后的高度之差。该订正方法可以消除地表气温资料在插值过程中地形差异所引起的误差，特别是地形复杂地区订正效果显著（Zhao et al., 2008）。

3.1 气温

3.1.1 空间分布的比较

本研究以地面观测为基准，评估数值模式地面气温的空间分布情况，3 种数值模式资料基本都能反映地面气温所具有的空间分布特征，图 2 给出了数值模式资料与观测地面气温的均方根误差在中国区域的空间分布特征。可以看出，它们基本呈现西部地区均方根误差大的差异，东部地区均方根误差小，具有明显的区域分布特征，ECMWF 地面气温与观测的均方根误差较 JMA 和 GFS 资料小。从 ECMWF 与观测地面气温均方根误差的空间分布（图 2a）可以看出，中国东部大部分地区的均方根

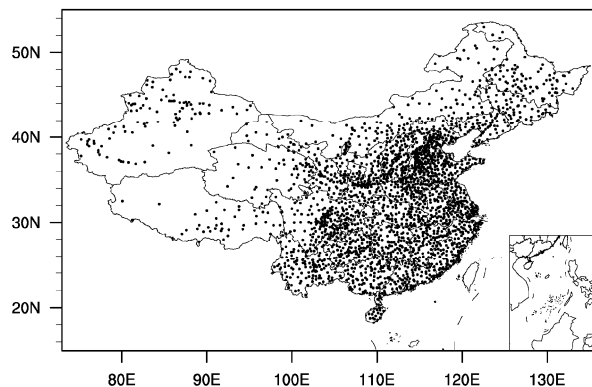


图 1 中国气象局国家级自动站（2421 个站）的分布

Fig. 1 Distribution of automatic observation stations (2421 stations) in China

误差在 1.0~2.5 K 之间,其中江淮流域均方根误差最小,在 1.0~1.5 K 之间;西部地区均方根误差稍大,尤其在青藏高原,误差大于 3.0 K。相比较而言,JMA 资料与观测地面气温的均方根误差较大(图 2b),东部大部分区域的均方根误差比 ECMWF 偏高 0.5 K,达到 1.5~3.0 K,其中误差较小的江淮流域均方根误差在 1.5~2.0 K 之间;东北区域的北部,均方根误差大于 5.0 K,与 ECMWF 的均方根误差相比,误差偏高 1.5 K 以上;在新疆大部分地区,ECMWF 的均方根误差在 1.5~3.0 K 之间,而 JMA 资料与观测的均方根误差在 3.5 K 以上。GFS 与观测地面气温的均方根误差空间分布(图 2c)与 JMA 资料相近,除了在东北区域,GFS 资料比 JMA 资料均方根误差偏低 1 K 左右;在华南的东南沿海地带,GFS 资料比 JMA 资料均方根误差偏高 1.0 K 左右。

同理也计算了数值模式与观测地面气温的偏差,图 3 是其在我国区域的空间分布特征。可以看到,其偏差亦具有明显的区域分布特征,西部地区偏差大于东部地区,ECMWF 地面气温与观测的偏差比 JMA 和 GFS 资料小。从 ECMWF 与观测地面气温偏差的空间分布(图 3a)可以看出,中国东部大部分区域的偏差在 -0.5~0.5 K 之间,与赵天保和符淙斌(2006)的研究 ERA-40 比观测值在东部大部分地区平均偏低 0.5 K 的结果较一致;西部地区偏差稍大,在青藏高原主要成负偏差,其结果在 -3.0~-0.5 K 之间,而新疆等地偏差为正,在 0.5~3.0 K 之间。相比较而言,JMA 资料与观测地面气温的偏差稍大(图 3b),东部大部分地区偏差比 ECMWF 偏高 0.5 K 左右,而在河北和河南比 ECMWF 偏高 1.0 K。GFS 资料与观测地面气温的偏差(图 3c)比 JMA 资料和 ECMWF 都大,GFS 在云南省主要成负偏差,而 ECMWF 和 JMA 资料偏差均为正,在四川的东部地区偏差比 ECMWF 和

JMA 资料大 1.0 K 左右,而在新疆 GFS 资料比 ECMWF 和 JMA 资料大 2.0 K 左右。

3.1.2 日变化特征

为了能进一步比较 3 种数值模式与地面观测气温的差异,给出了其日变化时间序列图(如图 4 所示),可以看出 ECMWF 地面气温与观测的差异比 JMA 资料和 GFS 资料小。从图 4a 可以发现,ECMWF 与观测地面气温差异在冬季上午最大,比实际观测大 1.0~1.5 K。在春季上午和冬季夜晚,JMA 资料与实际观测地面气温差异最大,其中在春季上午 JMA 资料比实际小 1.5 K 左右,在冬季夜晚 JMA 资料比实际观测大 1.5 K 左右(图 4b)。GFS 在晚上比观测地面气温小,尤其在夏季晚上比实际观测小 1.5 K 左右,而 GFS 地面气温在白天比实际观测偏大(图 4c)。

分析数值模式与观测地面气温的均方根误差、偏差和相关系数在不同时次的统计值(表 2),发现 ECMWF 与观测地面气温的均方根误差在大部分时次均小于 JMA 和 GFS 资料,JMA 资料的误差在所有时次都小于 GFS 资料,对于 ECMWF 和 JMA 资料,00:00 和 12:00 的均方根误差最小,因为 00:00 和 12:00 所用的数值模式资料是分析场数据,说明这两种数值模式资料地面气温的分析场数据优于预报场数据。而 GFS 资料地面气温的分析场数据质量也优于预报场。从偏差来看,ECMWF 在所有时次的偏差均比实际观测小,JMA 资料在 00:00、03:00 以及 06:00 成负偏差,其它时次成正偏差,而 GFS 资料的结果则与 JMA 资料相反。3 种数值模式资料与观测地面气温的相关系数都较高(大于 0.9),这说明 3 种数据模式资料与观测地面气温的变化趋势较一致。

3.2 相对湿度

3.2.1 空间分布

ECMWF 资料没有地面相对湿度信息,需根据地面露点温度将其转换为地面相对湿度,再与其它

表 2 数值模式资料与观测地面气温在 8 个时次的统计值

Table 2 Statistical analysis of hourly surface air temperature between numerical model data and observations

时次	均方根误差/K			偏差/K			相关系数		
	ECMWF	JMA	GFS	ECMWF	JMA	GFS	ECMWF	JMA	GFS
00:00	2.024	2.474	2.778	-0.166	-0.109	1.032	0.964	0.954	0.955
03:00	2.448	2.552	2.779	-0.351	-0.832	1.066	0.959	0.960	0.957
06:00	2.952	2.597	2.790	-0.757	-0.316	0.648	0.947	0.954	0.949
09:00	3.153	2.573	2.887	-1.084	0.147	-0.135	0.949	0.955	0.949
12:00	2.261	2.494	2.936	-0.344	0.829	-1.164	0.955	0.951	0.948
15:00	2.667	2.677	2.762	-1.142	0.808	-0.523	0.961	0.957	0.956
18:00	2.651	2.735	2.751	-1.052	0.629	-0.251	0.952	0.947	0.943
21:00	2.655	2.773	2.786	-0.957	0.454	-0.073	0.950	0.944	0.940

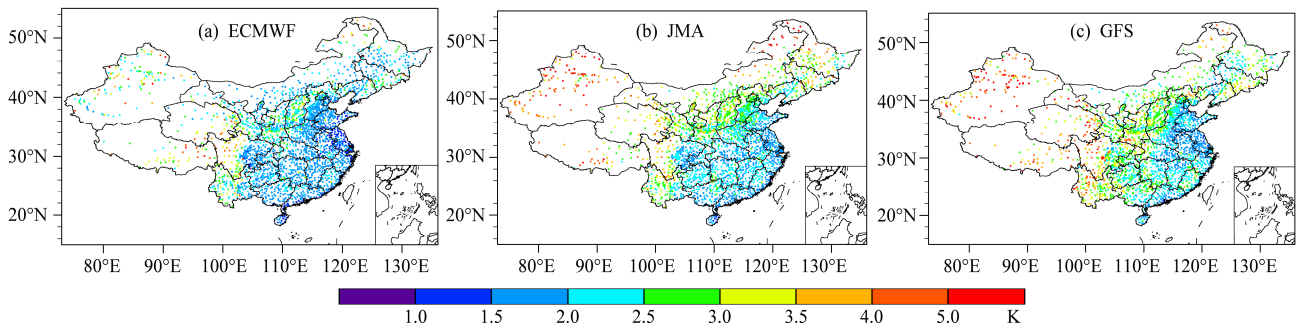


图 2 数值模式资料与观测地面气温均方根误差的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of RMSE of surface air temperature between numerical model data and observations

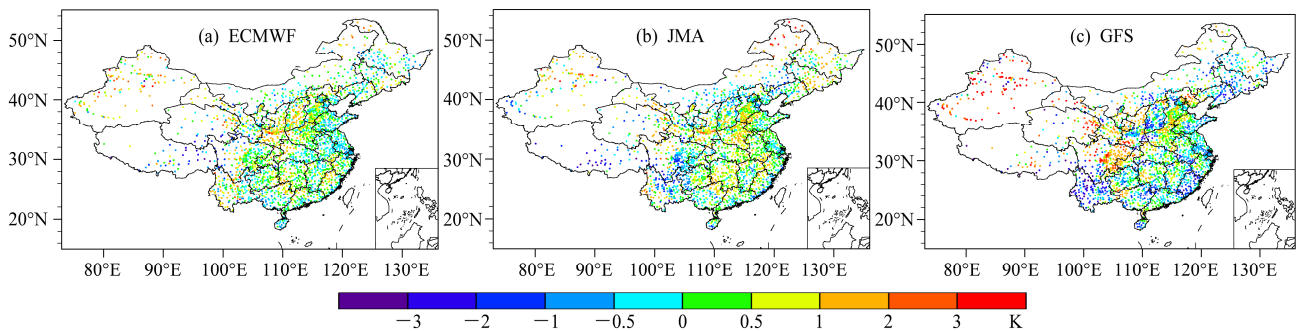


图 3 同图 2，但为气温偏差的空间分布

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the bias of surface air temperature

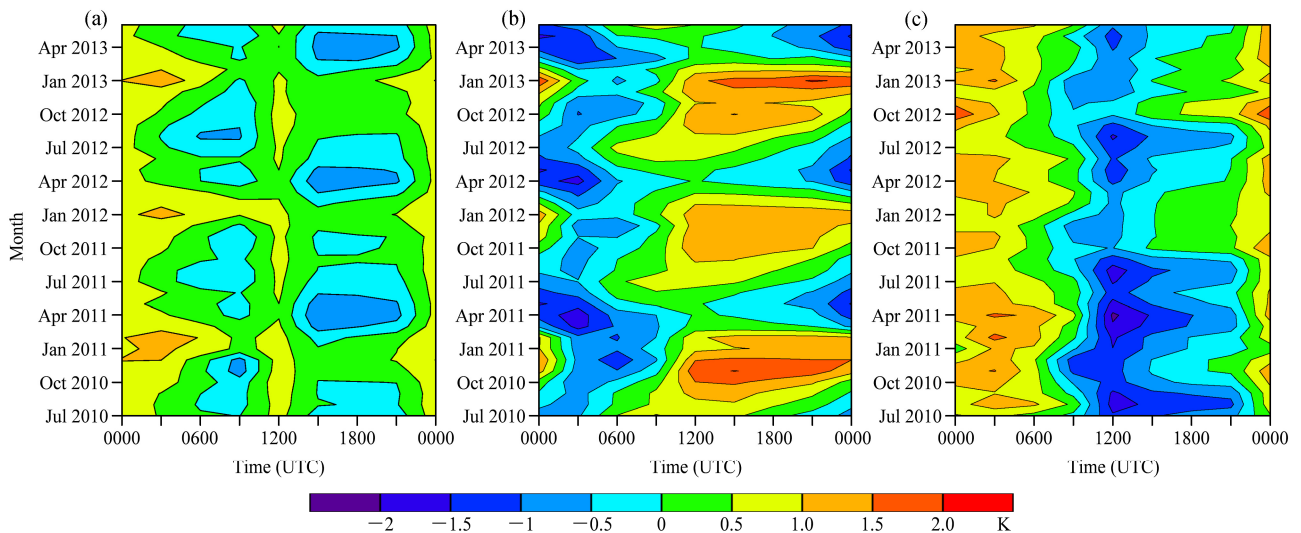


图 4 地面气温日变化时间序列：(a) ECMWF 与观测之差；(b) JMA 资料与观测之差；(c) GFS 资料与观测之差

Fig. 4 Time series of diurnal cycle of surface air temperature: (a) Differences between ECMWF and observations; (b) differences between JMA model data and observations; (c) differences between GFS model data and observations

两种数值模式资料进行比较。具体计算见文章第 2 节的资料处理部分。从图 5 可以看出，它们的差异亦呈现出西部地区均方根误差大于东部地区，ECMWF 地面相对湿度与观测的均方根误差比 JMA 资料和 GFS 资料小。ECMWF 与观测地面相对湿度

均方根误差的空间分布如图 5a 所示，研究发现，在江淮流域和华南大部分地区的均方根误差小于 12%；华北、东北区域的均方根误差稍大，但小于 16%。相比较而言，JMA 资料与观测地面相对湿度的均方根误差比 ECMWF 大（图 5b），尤其在西北

和青藏高原地区均方根误差大于 20%，比 ECMWF 资料大 5% 左右；在华北区域 JMA 资料的地面相对湿度均方根误差大于 16%，而 ECMWF 小于 16%；JMA 资料的地面相对湿度均方根误差在西南区域大于 14%，而 ECMWF 小于 14%。GFS 地面相对湿度在东部大部分地区和西北东部区域的均方根误差比 JMA 资料大 4% 左右；在华北北部和西部地区，GFS 的均方根误差比 JMA 资料小 2% 左右，其它地区 GFS 与观测地面相对湿度的均方根误差空间分布与 JMA 资料相近（图 5c）。

图 6 是数值模式与观测地面相对湿度的偏差在中国区域的空间分布特征。研究发现，它们的差异区域分布特征明显，ECMWF 地面相对湿度与观测的偏差比 JMA 资料和 GFS 小。从 ECMWF 与观测地面相对湿度偏差的空间分布（图 6a）可以看出，东部大部分地区偏差在 -6%~6% 之间；西北区域偏差较大，主要成负偏差，小于 -6%；青藏高原偏差大于 10%。相比较而言，JMA 资料与观测地面相对湿度偏差大于 ECMWF（图 6b），尤其在华北北部 JMA 资料偏差大于 10%，而 ECMWF 的偏差在 0~6% 之间；在江淮流正偏差，大于 6%，而 JMA 资料成负偏差在 -6%~0 之间；在西北东部 GFS 的偏差小于 -10%，而 JMA 资料的偏差在 -6%~0 之间；在华北北部 GFS 偏差在 -2%~0 之间，而 JMA 资料的偏差大于 8%。

3.2.2 日变化特征分析

从日变化时间序列角度进一步比较 3 种数值模式资料的地面相对湿度与观测的差异，研究发现 ECMWF 地面相对湿度与观测的差异较 JMA 资料和 GFS 资料小（图 7）。从图 7a 可以看出，00:00 和 12:00 ECMWF 与观测的差异最小，在 ±2% 之间，在夏季和秋季下午 ECMWF 比观测的地面相对湿度偏大 2%~6%，在秋季夜晚和冬季上午 ECMWF 与观测的地面相对湿度的差异最大，比实际观测小

6%~8%。JMA 资料在秋季比实际观测的相对湿度偏小，尤其在夜晚差异最大，小于 -8%，而其他季节 JMA 资料比实际观测偏大，在冬季中午差异最大，偏差大于 8%。GFS 在下午和夜晚比观测的地面相对湿度偏大，尤其在冬季的 20:00，差异最大，大于 6%，然而 GFS 在上午比实际观测偏小，而且在秋季和夏季的 08:00 差异最大，小于 -8%。

从数值模式资料与观测地面相对湿度的均方根误差、偏差和相关系数在不同时次的统计（表 3）可以看出 ECMWF 与观测地面相对湿度的均方根误差在所有时次都小于 JMA 和 GFS 资料，06:00 之前 JMA 资料的均方根误差误差小于 GFS 资料，06:00 后则相反；对于 ECMWF 地面相对湿度，00:00 和 12:00 的均方根误差最小，JMA 资料在 00:00 和 12:00 的偏差最小，说明 ECMWF 和 JMA 资料地面相对湿度的分析场数据好于预报场。3 种数值模式资料与观测资料地面相对湿度的相关系数均较高，除了 JMA 资料在 15:00、18:00、21:00 的相关系数小于 0.6。

3.3 风速

3.3.1 空间分布的比较

本研究将所有资料的纬向风速和经向风速处理成全风速进行比较分析，3 种数值模式资料均能反映地面风速所具有的空间分布特征，从图 8 可以看到，西部地区均方根误差大，东部地区均方根误差小。ECMWF 数值模式与观测地面风速均方根误差的空间分布图（图 8a）可以看出：江淮流域和华南大部分地区的均方根误差小于 1.5 m/s；西部、北部区域的均方根误差稍大，但也小于 2.0 m/s。相比较而言，在江淮流域和华南大部分区域 JMA 资料与观测地面风速的均方根误差比 ECMWF 要小，均方根误差小于 1.0 m/s；但是在西部、北部区域，JMA 资料均方根误差大于 ECMWF 资料，其结果大于 2.5 m/s（图 8b）。GFS 资料地面风速均方根误差的空间

表 3 数值模式资料与观测资料地面相对湿度在 8 个时次的统计值

Table 3 Statistical analysis of hourly surface relative humidity between numerical model data and observations

时次	均方根误差			偏差			相关系数		
	ECMWF	JMA	GFS	ECMWF	JMA	GFS	ECMWF	JMA	GFS
00:00	10.683%	15.821%	17.439%	-1.489%	-1.335%	-6.234%	0.818	0.607	0.650
03:00	11.676%	15.054%	15.904%	-2.440%	2.169%	-4.296%	0.834	0.711	0.730
06:00	12.016%	15.226%	15.170%	0.242%	2.988%	-0.851%	0.832	0.740	0.751
09:00	13.097%	15.967%	16.022%	2.067%	2.155%	2.565%	0.821	0.734	0.752
12:00	10.966%	17.419%	16.598%	0.067%	-0.589%	3.174%	0.848	0.648	0.727
15:00	12.788%	18.513%	16.351%	-0.979%	-1.116%	-0.361%	0.801	0.565	0.709
18:00	13.131%	18.288%	16.434%	-2.019%	-1.376%	-2.001%	0.776	0.531	0.669
21:00	13.456%	17.864%	16.496%	-2.874%	-1.592%	-3.053%	0.761	0.515	0.648

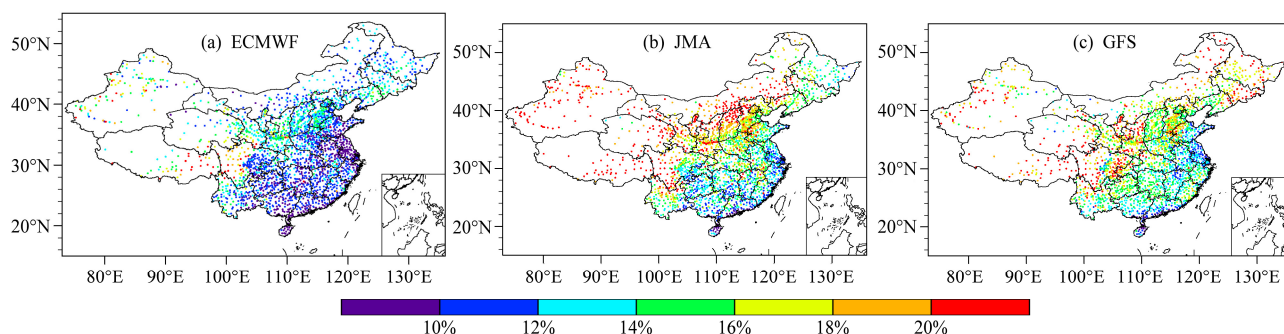


图 5 同图 2，但为相对湿度均方根误差的空间分布

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for RMSE of surface relative humidity

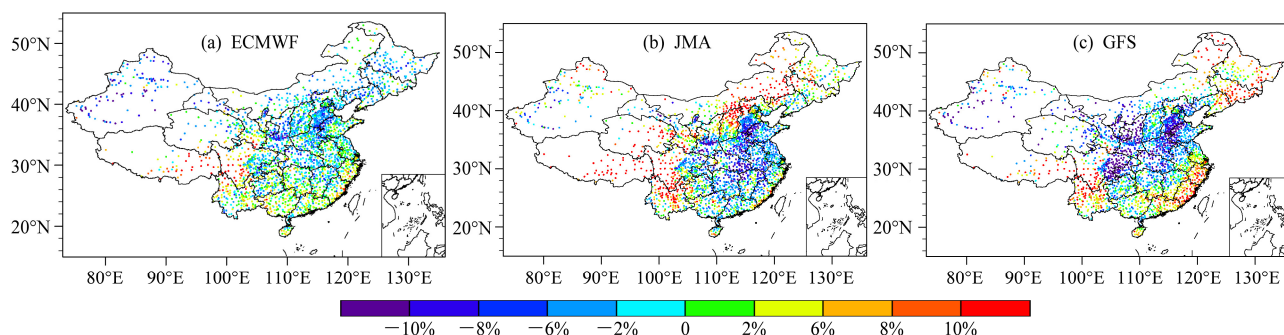


图 6 同图 5，但为相对湿度偏差的空间分布

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the bias of surface relative humidity

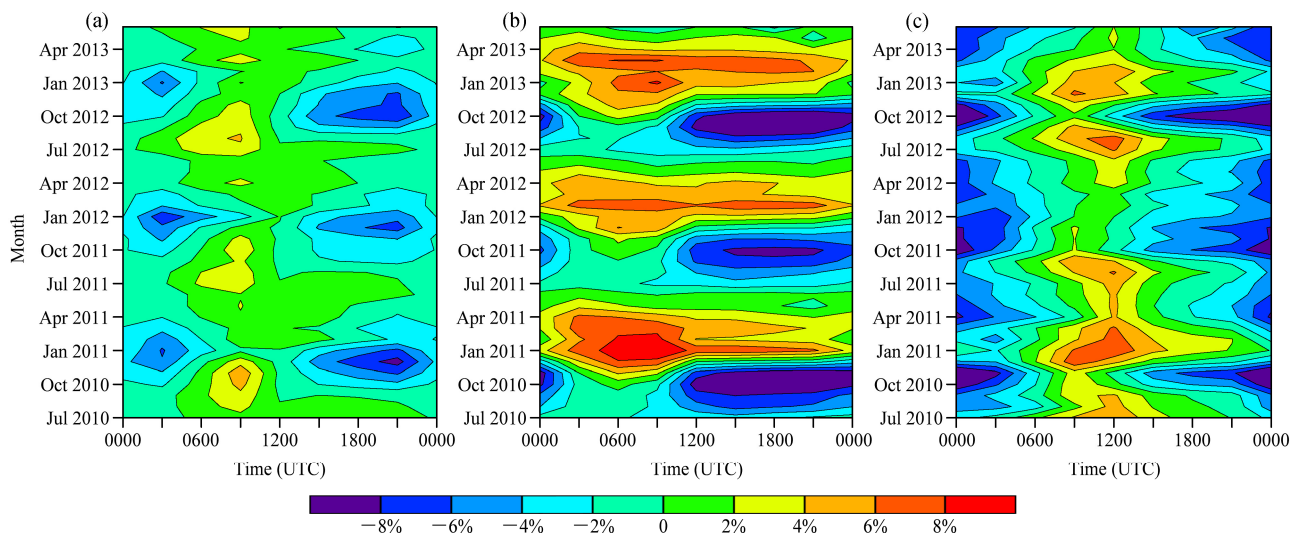


图 7 同图 4，但为地面相对湿度

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for surface relative humidity

分布与 ECMWF 数值模式资料相近，除了在东北、华南和西南区域，GFS 的地面风速均方根误差比 ECMWF 小 0.5 m/s (图 8c)。因此，对于地面风速

的描述，在江淮流域和华南等东南部地区，JMA 资料最优，在中国的北部和西部区域，ECMWF 资料最好。

图 9 是数值模式资料与观测地面风速的偏差在中国区域的空间分布特征, 它们的差异同样具有非常明显的区域分布特征。从 ECMWF 与观测地面风速偏差的空间分布图 (图 8a) 可以看出: 华南区域偏差在 $-0.5 \sim 1.0$ m/s 之间; 江淮流域偏差稍大, 在 $0 \sim 1.5$ m/s 之间; 华北和东北区域偏差更大, 在

$0 \sim 2.0$ m/s 之间; 西部大部分区域偏差较小, 在 $-1.0 \sim 1.0$ m/s 之间, 除了西北局部地区偏差大于 2.0 m/s。相比较而言, JMA 资料的地面风速在华南和江淮流域等地偏差比 ECMWF 小 0.5 m/s, 在 $-0.5 \sim 0.5$ m/s 之间; 在东北和西南区域 JMA 资料成负偏差, 在 $-1.0 \sim 0$ m/s 之间, 而 ECMWF 成正

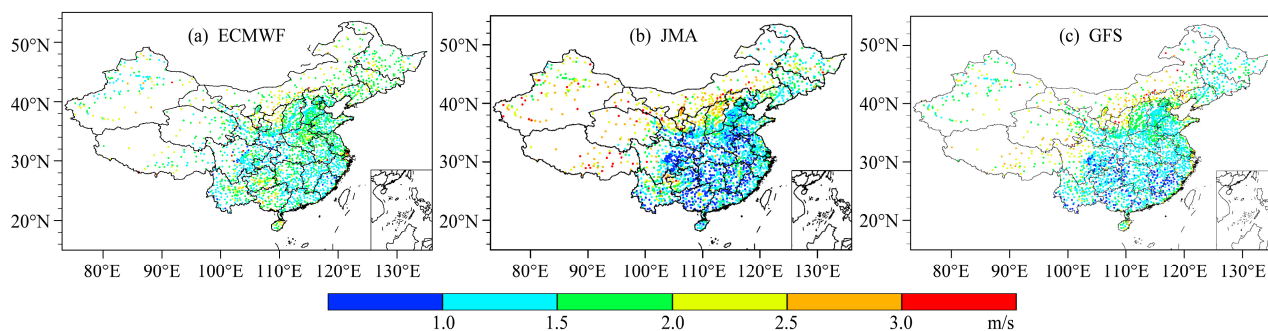


图 8 同图 2, 但为风速均方根误差的空间分布

Fig. 8 Same as Fig. 2, but for the RMSE of surface wind speed

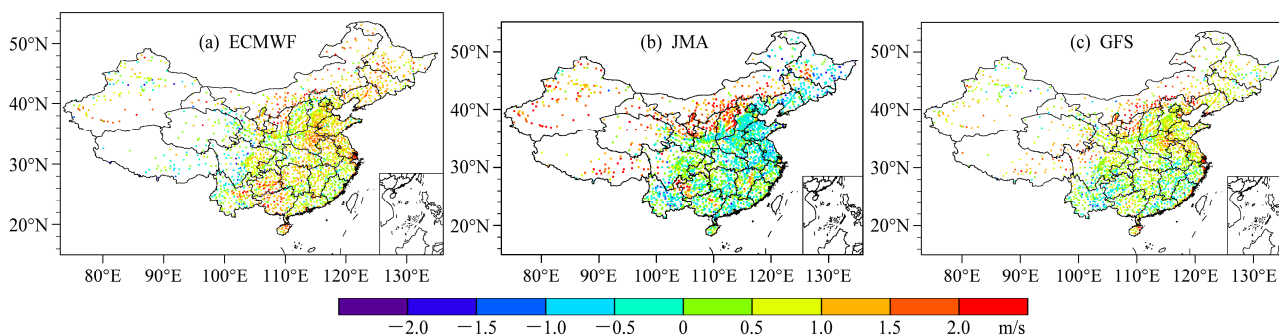


图 9 同图 2, 但为风速偏差的空间分布

Fig. 9 Same as Fig. 2, but for the bias of surface wind speed

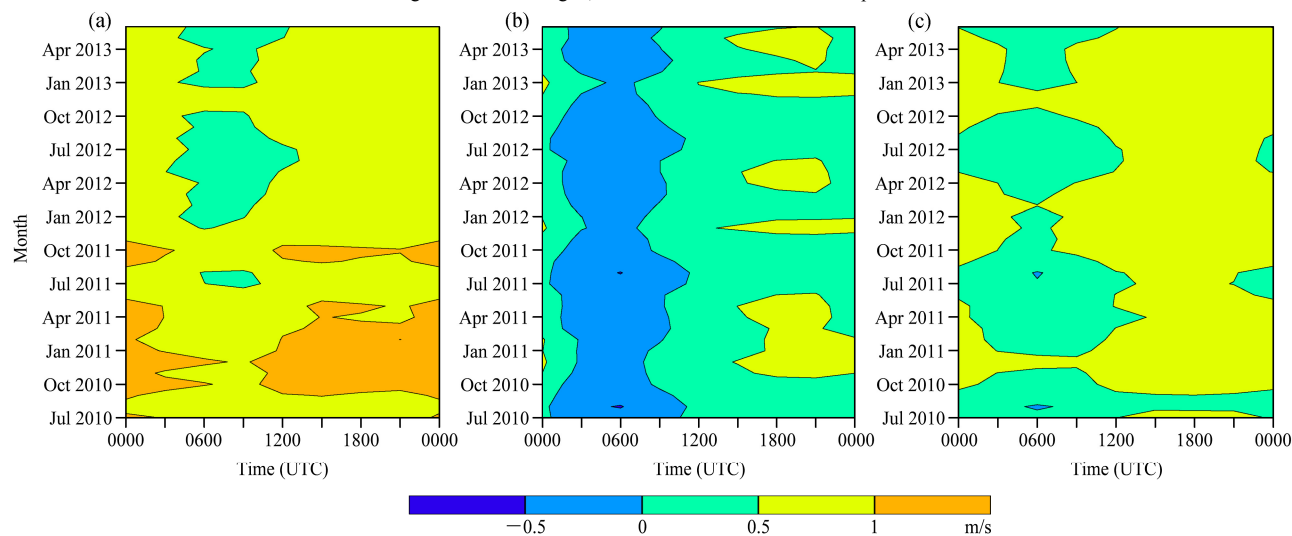


图 10 同图 4, 但为风速日变化时间序列

Fig. 10 Same as Fig. 4, but for the surface wind speed

偏差, 在 0~2.0 m/s 之间; 华北和西部大部分区域 JMA 资料的偏差比 ECMWF 大 1.0 m/s (图 8b)。GFS 地面风速偏差空间分布与 ECMWF 相近, 除了在东北、华南和西南区域, GFS 的地面风速偏差比 ECMWF 小 1.0 m/s 左右 (图 8c)。

3.3.2 日变化特征分析

为了能进一步比较 3 种数值模式资料的地面风速与观测的差异, 图 10 给出了数值模式资料地面风速与观测差异的日变化时间序列图, 可以看出 JMA 资料的地面风速与实际观测差别最小, GFS 次之, ECMWF 与实际观测差别最大。从图 10a 可以看出, 2011 年的地面风速比实际观测大 1.0 m/s, 与其它几种资料相比差异最大, 所以 2011 年的 ECMWF 的风速资料需慎用。JMA 资料在中午和下午比实际观测小, 在其它时次比实际观测大, 尤其在冬季和春季夜晚 JMA 资料与实际风速差别最大, 偏大 0.5~1.0 m/s (图 10b)。GFS 与观测的差异夜晚比白天大 0.5 m/s, 秋末初冬与观测的差异最大 (图 10c)。

4 结论与讨论

本文利用中国气象局国家级自动站 (2421 个) 的观测资料分别对 2010 年 7 月 1 日至 2013 年 6 月 30 日的 ECMWF、JMA 以及 GFS 资料的地面气象要素在中国的适用性进行了比较研究, 得到如下主要结论:

(1) 3 种数值模式资料都能在一定程度上反映观测资料所具有的时间和空间分布特征, 东部地区的适用性要高于西部地区, 可能是在西部地区, 模式地形与实际地形相差较大, 而在东部地区, 模式地形与实际地形相差较小。

(2) 对于地面气温的描述, 从空间分布来看, 东部地区比西部地区更接近实际观测, ECMWF 在东部大部分区域的偏差在 ± 0.5 K 之间, 与赵天保和符淙斌 (2006) 的研究 ERA-40 比观测值在东部大部分地区平均偏低 0.5 K 的结果较一致, ECWMF 资料优于 JMA 和 GFS 资料, 东北区域 GFS 比 JMA 资料好, 华南区域的东南沿海地带, JMA 比 GFS 资料好; 从日变化时间序列看, ECWMF 资料优于 JMA 和 GFS 资料, 对于 ECMWF 和 JMA 资料, 00:00 和 12:00 的结果最优, 说明 ECMWF 和 JMA 地面气温的分析场数据质量要好于预报场数据。ECMWF 和 JMA 地面气温都在冬季与观测的差异最大, 而 GFS 资料在夏季与观测的差异最大。

(3) 对于地面相对湿度, 3 种数值模式资料都在东部地区的适用性高于西部地区, 从全国来看 ECWMF 资料优于 JMA 和 GFS 资料, 华北北部区域 GFS 比 JMA 资料好, 而西北东部区域 JMA 比 GFS 资料好; 从日变化时间序列看, ECWMF 资料结果最好, ECWMF 和 JMA 资料在 00:00 和 12:00 的结果最优, 说明这两种资料的地面相对湿度的分析场数据质量优于预报场数据。3 种数值模式资料的地面相对湿度在秋季和冬季与观测的差异最大。

(4) 对于地面风速, 3 种数值模式资料均在东部地区比西部地区更接近实际观测, 在江淮流域和华南等东南部区域, JMA 资料最优, 在北部和西部区域, ECMWF 资料最好。从日变化时间序列看, JMA 的地面风速与实际观测差别最小, GFS 次之, 2011 年 ECMWF 的风速资料比实际观测大 1 m/s, 这导致 ECMWF 整体结果最差。JMA 和 GFS 地面风速均在冬季与实际观测差异最大。

通过本文的分析研究, 可以发现数值模式资料在一定程度上能够反映观测资料所具有的时空分布特征, 在中国区域具有一定的适用性, 但在具体数值上与观测资料存在差异, 其原因可能是数值模式的模拟能力有限, 进而可能造成对气象要素描述的误差; 此外由于观测资料分布是离散的, 在中国东西部分布不均匀, 因此有必要综合利用这些种数据将数值模式资料与观测资料进行融合, 取长补短, 从而提供较真实的地面气象要素数据。

参考文献 (References)

- Berg A A, Famiglietti J S, Walker J P, et al. 2003. Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D16): 4490, doi: 10.1029/2002JD003334.
- Fekete B M, Vorosmaety C J, Roads J O, et al. 2004. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates [J]. *J. Climate*, 17 (2): 294–304.
- 何杰. 2010. 中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集的建立 [D]. 中国科学院青藏高原研究所硕士学位论文. He Jie. 2010. Development of a surface meteorological dataset of China with high temporal and spatial resolution [D]. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences.
- 贾炳浩, 谢正辉, 田向军, 等. 2010. 基于微波亮温及集合 Kalman 滤波的土壤湿度同化方案 [J]. *中国科学*, 40 (2): 239–251. Jia Binghao, Xie Zhenghui, Tian Xiangjun, et al. 2010. A soil moisture assimilation scheme based on the ensemble Kalman filter using microwave temperature [J]. *Science China Earth Science*, 52 (11): 1835–1848.

- 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.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11): 1631–1643.
- 李新, 黄春林, 车涛, 等. 2007. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻 [J]. *自然科学进展*, 17 (2): 163–173. Li Xin, Huang Chunlin, Che Tao, et al. 2007. Progress and prospect on Chinese land data assimilation system [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17 (2): 163–173.
- 李佰平, 智协飞. 2012. ECMWF 模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究 [J]. *气象*, 38 (8): 897–902. Li Baiping, Zhi Xiefei. 2012. Comparative study of four correction schemes of the ECMWF surface temperature forecasts [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (8): 897–902.
- 刘金婷. 2010. 多陆面模式、多驱动场对新疆地区陆面过程模拟研究及结果集成 [D]. 中国海洋大学博士学位论文. Liu Jinting. 2010. Study of multiple forcing driving multiple land surface model over Xinjiang and result integration [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Ocean University of China.
- Maurer E P, O'Donnell G M, Lettenmaier D P, et al. 2001. Evaluation of the land surface water budget in NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalysis using an off-line hydrologic model [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D16), 17, 841–17, 862, doi: 10.1029/2000JD900828.
- Maurer E P, Wood A W, Adam J C, et al. 2002. A long-term hydrological based dataset of land surface flux and states for conterminous United States [J]. *J. Climate*, 15 (22): 3237–3251.
- Onogi K, T susui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 Reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369–432.
- Qian T T, Dai A G, Trenberth K E, et al. 2006. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I forcing data and evaluation [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7 (5): 953–975.
- 任芝花, 熊安元. 2007. 地面自动站观测资料三级质量控制业务系统的研制 [J]. *气象*, 33 (1): 19–24. Ren Zhihua, Xiong Anyuan. 2007. Operational system development on three-step quality control of observations from AWS [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (1): 19–24.
- Roads J, Betts A K. 2000. NCEP-NCAR and ECMWF reanalysis surface water and energy budgets for the Mississippi River basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 1 (1): 88–94, doi: 10.1175/1525–7541.
- Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, et al. 2004. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling [J]. *J. Climate*, 17 (19): 3814–3828.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F, et al. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3088–3111.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2005. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 21–22. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2005. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peiking University Press, 21–22.
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2006. 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*, 64 (6): 709–722. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Xie Li'an. 2006. Reliability analyses of anomalies of NCEP/NCAR reanalysis wind speed and surface temperature in climate change research in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (6): 709–722.
- 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 2011. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化 [J]. *中国科学*, 41 (3): 375–385. Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *Science China Earth Science*, 54 (9): 1430–1440.
- Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Dai Aiguo, et al. 2010. A microwave land data assimilation system: Scheme and preliminary evaluation over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D21113, doi: 10.1029/2010JD014370.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (612): 2961–3012.
- Wang Aihui, Zeng Xubin. 2012. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D05102, doi: 10.1029/2011JD016553.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2001. 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*, 12 (3): 337–347. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2001. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12 (3): 337–347.
- 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. 2004. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较 [J]. *气候与环境研究*, 9 (2): 278–294. Zhao Tianbao, Ai Likun, Feng Jinming. 2004. An inter-comparison between NCEP reanalysis and observed data over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (2): 278–294.
- 赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、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*, 11 (1): 15–33. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (1): 15–33.
- Zhao Tianbao, Guo Weidong, Fu Congbin. 2008. Calibrating and evaluating reanalysis surface temperature error by topographic correction [J]. *J. Climate*, 21 (6): 1442–1448.
- 赵天保, 华丽娟. 2009. 几种再分析地表气压资料在中国区域的适用性评估 [J]. *应用气象学报*, 20 (1): 70–79. Zhao Tianbao, Hua Lijuan. 2009. Applicability evaluation of surface pressure for several reanalysis datasets over China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (1): 70–79.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 几种再分析地表气温资料在中国区域的适用性评估 [J]. *高原气象*, 28 (3): 594–606. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation of surface air temperature from several reanalysis datasets in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 594–606.