

朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等. 2012. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 381–391, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10138. Zhu Yanliang, Ling Chao, Chen Hongbin, et al. 2012. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 381–391.

两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析

朱彦良^{1,2} 凌超^{1,2} 陈洪滨¹ 张金强^{1,2} 彭亮^{1,2} 余予³

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局气象信息中心, 北京 100081

摘 要 利用 2008 年 5~12 月在安徽寿县获得的逐 6 小时 RS92 探空资料, 与同期的 NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 两种再分析资料 (6 h) 进行比较分析, 计算分析了标准气压层上探空与再分析资料的温度、纬向风、经向风和相对湿度的相关系数、偏差和平均绝对差。结果表明: 在所有标准层高度, ERA-Interim 再分析资料与探空资料的相关优于 NCEP 再分析资料的与探空资料的相关, 温度和风速再分析资料与探空资料的相关优于相对湿度的相关; 温度再分析资料与探空资料的相关系数在 1000~250 hPa 接近 1, 在 250 hPa 以上随高度减小, ERA-Interim 与探空资料的偏差的绝对值基本小于 0.3 °C, 而 NCEP 与探空资料的偏差绝对值在 1000 hPa 上要大一倍; 纬向风再分析资料与探空资料的相关系数在对流层中高层大于对流层低层和平流层低层, 经向风的相关在对流层随高度增加, 在平流层低层迅速减小; 风速再分析资料与探空资料的偏差绝对值小于 1 m·s⁻¹; 相对湿度再分析资料与探空资料的相关随高度减小, 偏差在 400~100 hPa 层较大, 达 10%~20%, 在更高层小于 10%。

关键词 RS92 再分析资料 相关系数 偏差 平均绝对差

文章编号 1006-9585 (2012) 03-0381-11 **中图分类号** P412.23 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10138

Comparison of Two Reanalysis Data with the RS92 Radiosonde Data

ZHU Yanliang^{1,2}, LING Chao^{1,2}, CHEN Hongbin¹, ZHANG Jinqiang^{1,2},
PENG Liang^{1,2}, and YU Yu³

1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observations, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Center of Meteorological Information, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract An intercomparison by interpolation is made between two types of reanalysis data (NCEP/NCAR and ERA-Interim) and seven months (May 2008 to December 2008) measurements of high vertical resolution GPS radiosonde (RS92) at Shouxian station (32.56°N, 116.78°E), China. The correlation coefficient (R), bias (B_{bias}), and

收稿日期 2010-08-09 收到, 2011-11-25 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40830102, 中国科学院知识创新工程方向项目 KZCX2-YW-207, 国家自然科学基金面上项目 40975001, 国家重点基础研究发展计划资助项目 2010CB950804

作者简介 朱彦良, 男, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事大气探测数据质量分析研究。E-mail: offtsing@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈洪滨, E-mail: chb@mail.iap.ac.cn

mean absolute deviation (M_{ad}) of temperature (T), zonal wind (U), meridional wind (V), and relative humidity (RH) are presented at the standard pressure levels of two reanalysis data sets from 1000 hPa to 20 hPa. The results indicate better correlation of RS92 observations with the ERA-Interim data than that with the NCEP/NCAR data. T , U , and V have higher correlation coefficients than RH at all levels. R of T is close to 1.0 from 1000 hPa to 250 hPa and decreases gradually above 250 hPa. The absolute values of bias for T is mostly less than 0.3 °C between ERA-Interim and RS92, but about two times between NCEP and RS92 at all levels. R of U is larger in middle and upper troposphere than in lower troposphere and lower stratosphere. R of V increases with height in the troposphere and decreases dramatically in lower stratosphere. R of RH decreases with height. It is shown that B_{is} of RH ranges from 10% to 20% through 400 hPa to 100 hPa and becomes smaller than 10% in the upper layers, which is in part attributed to the limitation of measurement precision.

Key words RS92, reanalysis data, correlation coefficient, bias, mean absolute deviation

1 引言

大气再分析资料是一种利用资料同化方法把数值预报产品和多种观测资料融合起来而得到的综合资料,具有内容丰富、资料时间长和汇总了广泛观测资料等特点。再分析资料集的出现,弥补了观测资料时空分布不均匀的缺陷,为大气科学及相关领域的研究提供了重要的数据支持,在气象和气候的诸多领域得到了广泛的应用,帮助我们认识和理解大气环流运动规律、天气变化与气候变化的成因和机制。

从 20 世纪 90 年代中期开始,美国、欧洲和日本等先后组织和实施了一系列全球大气资料再分析计划及其后续升级计划。目前,全球大气再分析资料主要有:美国国家环境预报中心(NCEP)和大气研究中心(NCAR)的 60 多年(1948 年至今) NCEP/NCAR 全球大气再分析资料(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001), NCEP 与美国能源部(DOE)的 NCEP/DOE (1979~2009 年)全球大气再分析资料(Kanamitsu et al., 2002);欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 15 年(1978~1994 年)全球大气再分析资料 ERA-15 (Gibson et al., 1997) 和 45 年(1957~2002 年)全球大气再分析资料计划 ERA-40 (Simmons and Gibson, 2000; Uppala et al., 2005),以及欧洲为下一代再分析资料做准备的 ERA-Interim 再分析资料(1989 年至今)(Simmons et al., 2006);日本气象厅(JMA)和电力中央研究所(CRIEPI)联合组织实施的 25 年(1979~2004 年)全球大气再分析资料计划

JRA-25 (Onogi et al., 2007) 等。其中, NCEP/NCAR、NCEP/DOE、ERA-40 以及 JRA-25 目前应用相对较为广泛, NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 再分析资料在连续发布。

自从全球大气再分析资料问世以来,很多科学家利用不同的方法从不同的角度对不同参量进行了比较分析,对再分析资料的可信度进行了评价和检验。我国学者也研究了再分析资料在东亚和中国区域气候变化研究中的适用性问题,并对其在中国区域的可信度进行了检验和评价(苏志侠等, 1999; 徐影等, 2001; 黄刚, 2006; 施晓晖等, 2006; 赵天保等, 2004; 赵天保和符淙斌, 2006, 2009; Zhao and Fu, 2006; 周青等, 2008; 周连童, 2009; 周顺武和张人禾, 2009; 高庆九等, 2010), 这些研究结果指出:再分析资料在气候变化长期趋势变化研究中存在着较大的不确定性; 1979 年以后由于同化方案的改进和卫星资料的加入,再分析资料的可信度得到提高;再分析资料可信度总体上在我国东部和低纬的可信度比在我国西部和高纬的高,并且不同要素的可信度不一样,其中 ERA-40 再分析资料比 NCEP/NCAR 再分析资料可信度高。

这些研究所用资料绝大部分都集中在气候平均态以及地表参数上,缺少逐时(6 h)变化资料以及对流层中高层以及平流层低层的比较和分析。再分析资料逐 6 小时全球最终分析资料为研究天气尺度和中尺度系统变化过程提供了条件,并能为中尺度数值模式提供初始场和某些边界条件,并可代替实测资料应用于卫星遥感领域如云检测等(周青等, 2008)。但再分析资料由于受预报模式系统、同化系统和观测系统等方面的误差影响

而存在着一定的质量问题, 并不能完全取代观测资料来描述大气的真实三维演变状态, 而以前的研究都集中在气象要素的气候平均态上, 在我国大陆区域对逐时再分析资料随高度的质量变化还没有细致评估。

正确的认识和评价再分析逐时资料与高精度探空资料的差异, 对利用再分析资料进一步开展天气和气候变化研究有积极的意义, 也为再分析资料的进一步改进提供依据。为此, 本文采用 2008 年 5~12 月在安徽寿县获得的逐 6 小时高精度 RS92 探空资料, 与同时期 NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 再分析资料 (6 h) 在 1000~20 hPa 16 个标准气压层上的温度、纬向风、经向风以及相对湿度开展了比较分析, 了解再分析资料在某一站点上空的可信度及其代表性。

2 资料和处理方法

2.1 资料

2.1.1 探空资料

本文使用 2008 年 5~12 月在安徽省寿县 (纬度: 32.56°N, 经度: 116.78°E, 海拔: 21 m) 进行大气辐射综合观测试验期间获得的探空资料。该试验项目使用 Vaisala 公司生产的 RS92 型 GPS 探空仪测量温度、气压、风速和湿度的垂直分布, 每天施放 4 次 (00 时、06 时、12 时、18 时, 协调世界时, 下同), 从 2008 年 5 月 14 日至 2008 年 12 月 28 日共有 828 次有效探空资料, 其中有 73% 的探测高度大于 20 km。RS92 型探空仪为全数字调频式探空仪, 抗干扰能力强, 每 2 s 采集和发送一组气压、温度和湿度数据, 垂直分辨率高, 全数字技术也简化了地面接收设备; 采用 GPS 扩频技术使得测风精度高; 气压测量上使用了新型快速响应气压传感器; 探空仪内有两个温度传感器, 分别测量气温和舱内温度, 便于调整温度系数; 使用了两个湿度传感器, 可以在探空仪出云和入云时通过交替加热的方式防止传感器表面凝结露或霜; 有先进的地面定标设备, 可以模拟整个探空仪在高空中的实际环境。上述这些措施保证了风场、气压、温度和湿度等气象参数的高测量精度, 其中温度分辨率 0.1 °C, 测量精度 100 hPa 高度以下为 0.2 °C, 100~20 hPa 为 0.3 °C;

相对湿度测量分辨率 1%, 定标一致性 2%, 测量不确定性小于 5% (Miloshevich et al., 2009)。根据 2010 年 WMO 组织的对多种探空仪的对比较验证实验结果, RS92 型探空仪是当前国际上应用广泛、气象要素测量精度最高的一种探空仪 (见: <http://www.vaisala.com/en/products/sounding-systemsandradiosondes/radiosondes/Pages/RS92.aspx>[2010-12-20])。有分析指出, RS92 与目前中国业务探空所用的国产 GTS1 探空仪相比, 温度滞后误差小, 湿度测量结果明显优于后者, 测风精度高 (李伟等, 2009); GTS1 探空仪与 Vaisala 的探空仪及最新的低温霜点湿度计 (Cryogenic Frostpoint Hygrometer, CFH) 水汽测量技术相比, 在 500 hPa 以下有 10% 的干偏差, 500 hPa 以上干偏差达到 30%, 在 300 hPa 以上则上升到 55%, 温度测量在平流层上白天有小于 0.5 K 的暖偏差, 夜间则有相对较大的冷偏差 (Bian et al., 2011)。

2.1.2 NCEP/NCAR 再分析资料

NCEP/NCAR 再分析资料是美国国家环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) 提供的逐 6 小时 (00 时、06 时、12 时、18 时) 再分析资料 (以下简称 NCEP 再分析资料), 包括温度、纬向风、经向风和相对湿度。空间分辨率是 2.5° (纬度) × 2.5° (经度) 经纬网格, 垂直分层为 17 层, 分别为 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa。

2.1.3 ERA-Interim 再分析资料

ERA-Interim 资料是由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的为新一代欧洲中心再分析资料做准备的过渡期再分析资料, 在模式和资料同化系统上都比 ERA-40 有所改进。本次工作所用到的 ERA-Interim 再分析资料是每日 4 次 (00 时、06 时、12 时、18 时) 的资料, 包括温度、纬向风、经向风以及相对湿度, 空间分辨率是 1.5° (纬度) × 1.5° (经度) 经纬网格, 垂直分层为 37 层, 从 1000 到 1 hPa (见: <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>[2010-12-20])。资料时间长度与探空资料和 NCEP 再分析资料对应。

2.2 处理方法

本工作所用无线电探空资料覆盖了从 1000 hPa 至 20 hPa 的高度。NCEP/NCAR 再分析数据标准层次是从 1000 hPa 至 10 hPa (共 17 层), ERA-Interim 再分析数据从 1000 hPa 覆盖到 1 hPa (共 37 层)。为了实现两种再分析资料与探空资料的对比分析,采用 3 种资料共有的标准气压层 (1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20 hPa),对 1000~20 hPa 共 16 个层次上的气象要素数据进行比较分析。

探空数据垂直分辨率高,一般在 10~20 m 范围内,用线性插值得出各标准气压层的气象要素(温度、纬向风、经向风和相对湿度)数据。为了比较分析再分析资料与探空资料,本文采用双线性插值法(赵天保等, 2004; 赵天保和符淙斌, 2006)把再分析资料的规则网格点数据插值到寿县站点,即把站点最相邻 4 个网格点的再分析值进行加权线性内插,得到该站点气象要素的再分析值。寿县探空观测站四周 4 个格点范围内地形较为平坦,最大高度差小于 100 m,4 个格点上的气象数据在大多数情况下,有较好的一致性;自然地,最近格点上的数据与站点的探空数据最为

接近(图略)。

我们计算两种再分析资料与探空资料在每个相同气压层的相关系数(R)、偏差(B_{ias})以及平均绝对差(M_{ad}),然后进行比较分析。对应气压层两种资料某一要素的相关系数计算公式为:

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right], \quad (1)$$

偏差为:

$$B_{\text{ias}} = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \right] / n, \quad (2)$$

以及平均绝对差为:

$$M_{\text{ad}} = \left[\sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \right] / n, \quad (3)$$

其中, n 为有效样本数, x 和 y 分别代表再分析资料和探空资料。

3 比较分析

3.1 温度

表 1 给出了温度再分析资料与探空资料的相关系数、偏差以及平均绝对差。图 1 是温度再分

表 1 温度再分析资料 (NCEP、ERA-Interim) 与探空资料对比

Table 1 Intercomparison of temperature at different levels between the reanalysis data (NCEP, ERA-Interim) and RS92 observation data

层次/ hPa	样本数(时次数)	R		$B_{\text{ias}} / ^\circ\text{C}$		$M_{\text{ad}} / ^\circ\text{C}$	
		NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim
20	110	0.811	0.826	0.21	-0.21	0.96	0.88
30	326	0.588	0.703	-0.13	-0.13	1.08	0.93
50	593	0.700	0.792	0.02	0.16	1.08	0.92
70	686	0.849	0.892	-0.07	-0.08	1.16	1.00
100	761	0.937	0.965	-0.04	-0.22	1.11	0.83
150	796	0.924	0.968	0.33	-0.06	0.94	0.59
200	811	0.920	0.961	0.65	0.29	0.99	0.61
250	812	0.979	0.988	0.67	0.30	0.96	0.60
300	814	0.989	0.994	0.43	0.22	0.84	0.55
400	815	0.992	0.996	0.18	0.02	0.72	0.50
500	817	0.991	0.994	0.10	-0.05	0.69	0.55
600	818	0.989	0.993	-0.04	-0.22	0.73	0.59
700	818	0.989	0.994	-0.06	-0.15	0.73	0.58
850	820	0.990	0.994	0.28	-0.14	0.88	0.68
925	823	0.989	0.995	0.33	-0.39	0.96	0.71
1000	704	0.972	0.991	-0.56	-0.06	1.69	0.84

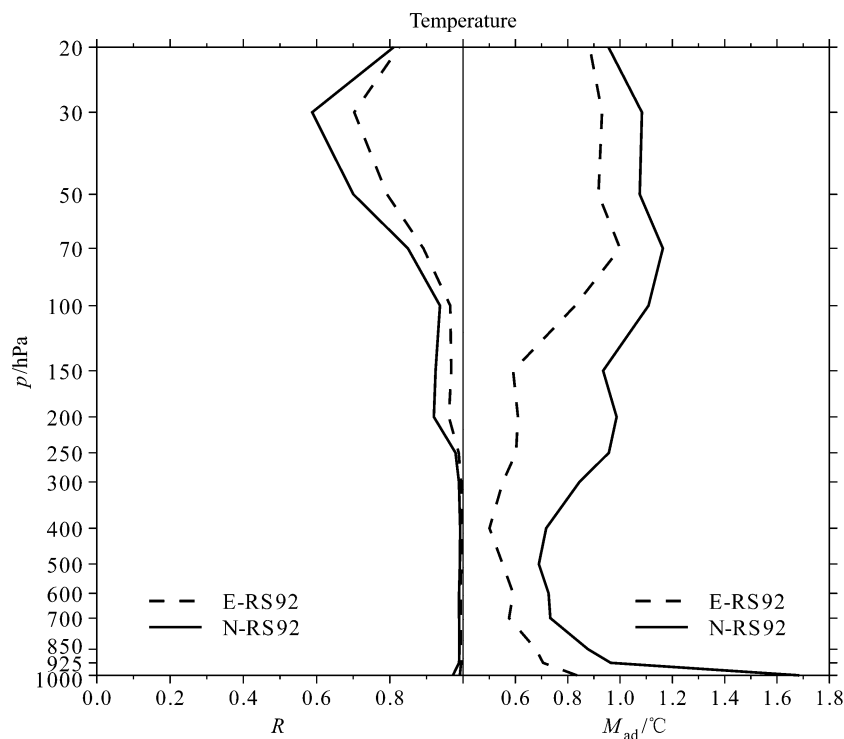


图1 温度的相关系数 R (左) 和平均绝对差 M_{ad} (右) 随气压 (高度) 的变化。实线 (N-RS92) 和虚线 (E-RS92) 分别为 NCEP 再分析资料和 ERA-Interim 再分析资料与探空资料的对比

Fig. 1 Variation of R (left panel) and M_{ad} (right panel) for temperature as the function of pressure. Solid and dashed lines represent the comparisons of RS92 data with NCEP (N-RS92) and ERA-Interim reanalysis data (E-RS92), respectively

析资料与探空资料相关系数和平均绝对差随高度 (气压) 的变化, 实线为 NCEP 再分析资料与探空资料的比较, 点虚线为 ERA-Interim 再分析资料与探空资料的比较。从表 1 可以看出, 温度再分析资料与探空资料在 1000~100 hPa 各气压层的相关系数都大于 0.9, 在 100 hPa 以上随高度减小, 在 30 hPa 最小, 到 20 hPa 又有所增大。对比所有标准气压层上与探空资料的相关系数, ERA-Interim 再分析资料都优于 NCEP 再分析资料的。另外, ERA-Interim 温度再分析资料与探空资料的偏差的绝对值基本上小于 0.3°C , NCEP 与探空的偏差的绝对值小于 0.7°C 。并且可以看出, 只在 400~200 hPa 和 50 hPa 这 5 层 ERA-Interim 再分析资料与探空资料的偏差为正值, 而 NCEP 再分析温度资料与探空资料的偏差有超过一半的气压层是正值。比较平均绝对差可见, ERA-Interim 再分析资料与探空资料的平均绝对差都小于等于 1°C , NCEP 与探空资料的平均绝对差除了在 1000 hPa 大于 1.5°C 外, 其余接近 1°C 。

从图 1 中可见, 1000~20 hPa 的相关系数基本和平均绝对差呈反相关, 即相关系数越大, 平均绝对差越小。再分析资料与探空资料的相关系数在 1000~250 hPa 的气层接近 1, 在 200 hPa 及以上的气层, 相关系数减小。总体上, ERA-Interim 温度再分析资料与探空资料的相关性要优于 NCEP 温度再分析资料与探空资料的, 前者平均绝对差总体水平也小于后者。

3.2 风速

表 2 和表 3 给出了风速再分析资料与探空资料的相关系数、偏差以及平均绝对差, 其中表 2 为纬向风, 表 3 为经向风。图 2 是风速再分析资料与探空资料相关系数和平均绝对差随高度的变化。从表 2 纬向风的对比来看, NCEP 纬向风再分析资料与探空资料的相关系数在 1000~700 hPa 这 4 个标准气压层小于 0.9, 而 ERA-Interim 纬向风再分析资料与探空资料之间的相关系数只有 1000 hPa 这一个气压层小于 0.9。表 2 经向风相关系数显示, NCEP 再分析资料与探空资料的

表 2 纬向风再分析资料与探空资料对比

Table 2 Intercomparison of zonal wind at different levels between the reanalysis data and RS92 observation data

层次/ hPa	样本数(时次数)	R		$B_{\text{ias}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		$M_{\text{ad}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
		NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim
20	107	0.907	0.939	0.36	0.20	2.07	1.62
30	317	0.952	0.962	0.28	0.34	2.04	1.82
50	571	0.954	0.964	0.68	0.09	2.46	2.10
70	667	0.966	0.976	0.88	0.04	2.76	2.26
100	737	0.980	0.984	0.76	-0.06	2.78	2.37
150	780	0.986	0.991	0.25	0.03	2.71	2.15
200	803	0.986	0.993	-0.53	-0.53	2.94	2.06
250	808	0.984	0.992	-0.49	-0.67	2.99	2.06
300	811	0.972	0.988	-0.25	-0.39	3.27	2.16
400	811	0.955	0.978	-0.10	-0.37	2.89	2.09
500	813	0.938	0.968	-0.01	-0.26	2.53	1.85
600	815	0.907	0.954	-0.22	-0.04	2.53	1.80
700	815	0.879	0.941	-0.39	-0.01	2.53	1.77
850	814	0.851	0.930	-0.53	-0.03	2.41	1.66
925	818	0.858	0.929	-0.43	0.07	2.21	1.61
1000	701	0.768	0.855	-0.27	0.18	1.79	1.41

表 3 经向风再分析资料与探空资料对比

Table 3 Intercomparison of meridional wind at different levels between the reanalysis data and RS92 observation data

层次/ hPa	样本数(时次数)	R		$B_{\text{ias}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		$M_{\text{ad}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
		NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim
20	107	0.577	0.656	0.04	-0.12	2.08	1.87
30	317	0.613	0.690	0.26	0.06	2.38	2.15
50	571	0.586	0.637	0.01	-0.06	2.39	2.26
70	667	0.619	0.714	0.19	0.18	2.95	2.59
100	737	0.828	0.865	-0.20	-0.26	3.01	2.75
150	780	0.920	0.948	0.76	0.16	2.95	2.31
200	803	0.940	0.964	-0.002	-0.25	2.92	2.24
250	808	0.928	0.964	0.36	0.13	3.10	2.16
300	811	0.913	0.958	0.08	-0.09	3.00	2.19
400	811	0.869	0.930	0.20	0.08	2.66	1.99
500	813	0.869	0.930	0.22	0.20	2.35	1.75
600	815	0.874	0.926	0.27	0.06	2.22	1.70
700	815	0.872	0.931	0.32	0.11	2.12	1.59
850	814	0.819	0.894	0.19	0.30	2.09	1.63
925	818	0.820	0.887	0.26	-0.03	2.05	1.55
1000	701	0.785	0.868	0.20	0.03	1.62	1.26

相关系数只在 300~150 hPa 这 4 个标准气压层大于 0.9，ERA-Interim 再分析资料与探空资料之间的相关系数在 700 hPa 至 150 hPa 这 8 层大于 0.9。从 100 hPa 开始，经向风相关系数急剧减小，都小于 0.7，两种再分析资料与探空资料的相关性在平流层低层要远比在对流层差。

从表 2 和表 3 的偏差值可见，风速再分析资料与探空资料的偏差绝对值都小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。纬向风的偏差正负值几乎各占一半，经向风的偏差大部分气压层为正，少数为负。对于平均绝对差，NCEP 风速再分析资料与探空资料的平均绝对差都基本都在 $2\sim3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间，ERA-Interim 风速再分析资料与探空资料的平均绝对差的范围是 $1\sim3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

从图 2 可见，相关系数与平均绝对差之间呈现出一个正相对应关系，即相关系数越大，平均绝对差也越大。总体上，纬向风再分析资料与探空资料的相关性要高于经向风，ERA-Interim 资料要优于 NCEP 再分析资料。纬向风相关性在各标准气压层都较好，对流层中上层好于对流层低层和平流层低层，这应该是由于对流层自由大气中的风场由天气尺度系统控制，比较恒定，模式

再现和预报的精确度较高；经向风的相关系数在平流层低层要比在对流层小得多。

3.3 相对湿度

NCEP 相对湿度再分析资料只提供 1000 hPa 到 300 hPa 这 8 个标准气压层次，而 ERA-Interim 再分析资料可以到 20 hPa。表 4 给出了相对湿度再分析资料与探空资料的相关系数、偏差以及平均绝对差。图 3 是相对湿度再分析资料与探空资料相关系数和平均绝对差随高度的变化。再分析产品一般可归为 A、B、C、D 4 类，A 类产品质量主要受观测资料的影响，可靠性最高，如高空温度和风速等；B 类产品质量受到观测资料和模式的共同影响，可信度要比 A 类产品低，如湿度等；C 和 D 类产品的质量几乎完全是由模式决定的 (Kalnay et al., 1996)。从表 4 与表 1 和表 2 及表 3 的对比看出，相对湿度的相关系数远不如温度和风速的，这与再分析不同产品的可靠性是一致的。

NCEP 再分析资料与探空资料的相对湿度偏差绝对值在 1000~300 hPa 这 8 个标准气压层都不超过 8%，在 300 hPa 高度增大很明显。ERA-Interim 再分析资料与探空资料的偏差绝对值在

表 4 再分析相对湿度资料与探空资料对比 (NCEP/ERA-Interim)
Table 4 Intercomparison of relative humidity at different levels between the reanalysis data and RS92 observation data

层次/ hPa	样本数(时次数)	R		B_{ias}		M_{ad}	
		NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim	NCEP	ERA-Interim
20	70		0.419		-0.90%		0.90%
30	256		0.219		-0.55%		0.55%
50	507		0.459		1.15%		1.17%
70	609		0.747		5.65%		5.66%
100	705		0.650		17.01%		17.18%
150	753		0.725		17.03%		17.72%
200	781		0.808		23.46%		24.25%
250	786		0.827		24.64%		25.55%
300	793	0.672	0.812	7.30%	19.37%	17.08%	21.52%
400	799	0.786	0.846	-3.45%	9.01%	14.61%	14.60%
500	808	0.802	0.863	-2.95%	2.84%	14.65%	12.34%
600	807	0.834	0.893	-3.60%	-0.33%	14.22%	10.78%
700	811	0.856	0.895	-4.41%	-2.15%	13.16%	10.64%
850	817	0.841	0.887	-4.41%	-1.30%	12.50%	9.85%
925	815	0.850	0.904	-4.40%	0.07%	11.46%	8.16%
1000	698	0.859	0.939	3.25%	-2.11%	10.41%	6.08%

注：NCEP 再分析资料在 250 hPa 高度以上没有相对湿度数据。

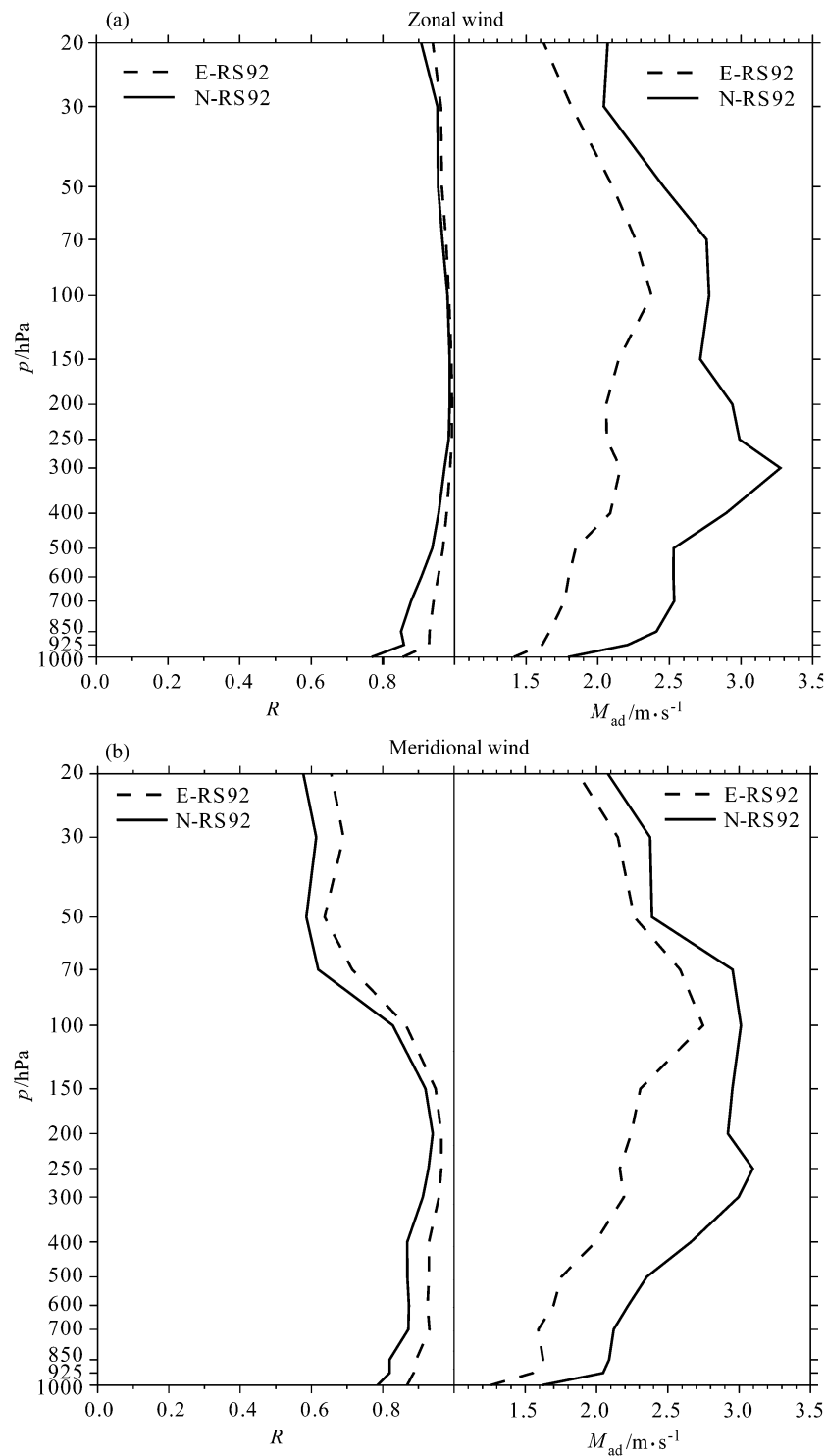
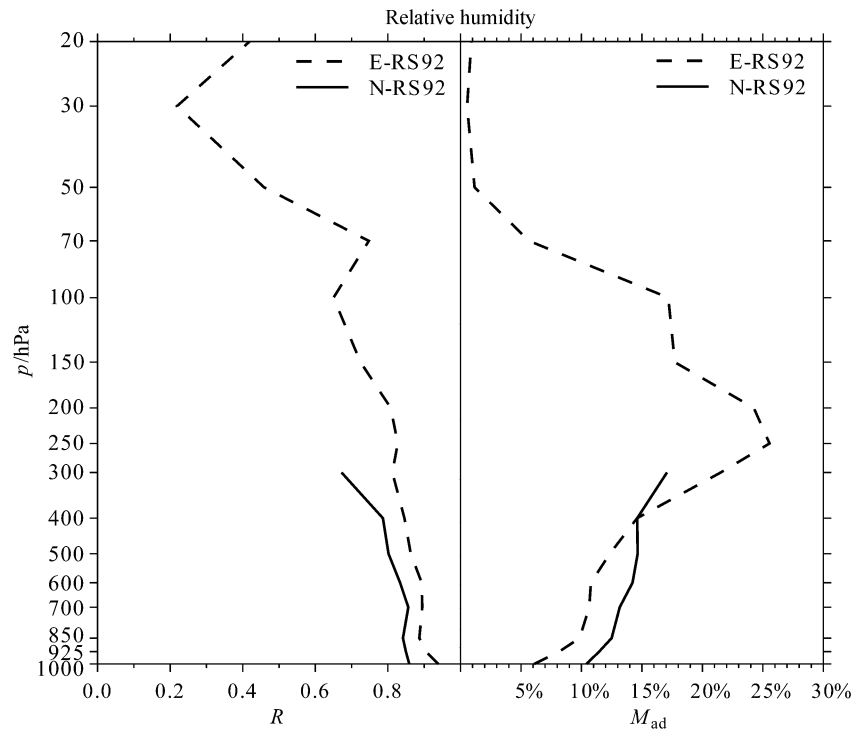


图2 风速的相关系数 R (左) 和平均绝对差 M_{ad} (右) 随高度的变化: (a) 纬向风; (b) 经向风

Fig. 2 Variation of R (left panel) and M_{ad} (right panel) for (a) zonal and (b) meridional winds as the function of pressure

400 hPa 以下高度都明显小于 NCEP 再分析资料的, 从 400 hPa 高度开始急剧增大, 最大接近 25%, 而从 70 hPa 开始又降到一个很低的水平。比较平均绝对差, ERA-Interim 资料与探空资料

的在 400~100 hPa 都很大, 在 15%~20%, 远高于其他层次。此外, 相对湿度偏差的绝对值与平均绝对差之间呈现出明显的正相关, 且随高度先增大后减小, 这种现象在温度和风速中不明显。

图3 相对湿度的相关系数 R (左) 和平均绝对差 M_{ad} (右) 随高度的变化Fig. 3 Variation of R (left panel) and M_{ad} (right panel) for relative humidity as the function of pressure

造成这个结果的原因可能是对流层中高层大气中水汽含量的测量精度下降, 模式也难以准确地模拟再现。

在图3中可见, 在1000~300 hPa高度范围相关系数和平均绝对差反相对应, 而300 hPa以上, ERA-Interim再分析资料和探空资料的相关系数与平均绝对差呈现出正相对应的关系。比较相关系数可见, 在300 hPa以及下气压层, ERA-Interim资料与探空资料的相关要优于NCEP资料。总之, 与温度和风的相比, 再分析与探空资料的相对湿度的相关相对较低, 相关系数随高度增加减小, 偏差的绝对值在对流层高层较大, 达到10%~20%。

4 结论

本文采用2008年5~12月在安徽寿县获取的一天4次的RS92探空资料与该站点对应的两种再分析值(NCEP/NCAR、ERA-Interim)进行了对比分析, 主要结果有:

(1) 温度的两种再分析资料与探空资料的相

关系数, 在1000~250 hPa标准气压层接近于1, 在200 hPa及以上高度有所减小; 再分析资料与探空资料的温度平均绝对差在0.5~1 °C范围内, 在1000~20 hPa相关系数与平均绝对差基本呈反相对应关系。

(2) 风速再分析资料与探空资料的偏差绝对值在所有高度层都小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。NCEP再分析资料与探空资料的平均绝对差在 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围, ERA-Interim再分析资料与探空资料的平均绝对差在 $1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围。在各标准气压层纬向风的相关都比较好, 在对流层中上层高于对流层低层和平流层低层。经向风的相关总体上低于纬向风的, 在对流层随高度增大, 在平流层低层迅速减小。风速相关系数与平均绝对差之间呈现出一个较好的正相对应关系。

(3) 相对湿度再分析资料与探空资料的相关系数随高度增加减小, 偏差的绝对值在对流层上层很大; 与平均绝对差在1000~300 hPa呈反相对应关系。在300 hPa以上, ERA-Interim再分析资料与探空资料的相关系数与平均绝对差呈现出正相对应的关系。

(4) 总体上, ERA-Interim 再分析资料与探空资料的相关优于 NCEP 再分析资料与探空资料的, 温度、风速再分析资料与探空资料的相关系数大于相对湿度的相关系数。

致谢 感谢安徽省气象局寿县气候观象台在施放探空时给予的帮助。寿县 2008 年 RS92 探空资料由 DOE/ARM 项目处理和提供, NCEP/NCAR 和 ECMWF 再分析资料从其网站下载。

参考文献 (References)

- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (1): 139 - 146.
- 高庆九, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 两种再分析资料中夏季地表气温与中国测站资料的差异 [J]. *大气科学*, 34 (3): 471 - 482. Gao Qingjiu, Guan Zhaoyong, Cai Jiayi, et al. 2010. Differences in 1958 - 2001 summertime surface air temperatures between two reanalysis data and observations in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 471 - 482.
- Gibson J K, Källberg P, Uppala S, et al. 1997. ERA Description. ECMWF Re-Analysis Project Report Series No. 1 [R]. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- 黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 310 - 320. Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 310 - 320.
- 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-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11): 1631 - 1643.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247 - 267.
- 李伟, 邢毅, 马舒庆. 2009. 国产 GTS1 探空仪与 Vaisala 公司 RS92 探空仪对比分析 [J]. *气象*, 35 (10): 97 - 102. Li Wei, Xing Yi, Ma Shuqing. 2009. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of Vaisala Company [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35 (10): 97 - 102.
- Miloshevich L M, Vömel H, Whiteman D N, et al. 2009. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D11305, doi: 10.1029/2008JD011565.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369 - 432.
- 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 - 721. 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 - 721.
- Simmons A J, Gibson J K. 2000. The ERA-40 Project Plan [R]. ECMWF Re-Analysis Project Report Series No. 1.
- Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2006. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [N]. ECMWF Newsletter, 110: 25 - 35.
- 苏志侠, 吕世华, 罗四维. 1999. 美国 NCEP/NCAR 全球再分析资料及其初步分析 [J]. *高原气象*, 18 (2): 209 - 218. Su Zhixia, Lü Shihua, Luo Siwei. 1999. The examinations and analysis of NCEP/NCAR 40 years global reanalysis data in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (2): 209 - 218.
- Uppala S M, Källberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (612): 2961 - 3012.
- 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, 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): 14 - 32. 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): 14 - 32.
- 赵天保, 符淙斌. 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性 [J]. *大气科学*, 33 (3): 634 - 648. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 634 - 648.
- Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2006. Comparison of products from ERA-40, NCEP-2, and CRU with station data for summer precipitation over China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23 (4): 593 - 604.
- 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 intercomparison between NCEP reanalysis and observed data over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 278 - 294.
- 周连童. 2009. 比较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料与观测资料计算得到的感热资料的差异 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 9 - 20.
- Zhou Liantong. 2009. A comparison of NCEP/NCAR, ERA-40 reanalysis and observational data of sensible heat in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 9 - 20.
- 周青, 赵凤生, 高文华. 2008. NCEP/NCAR 逐时分析与中国实测地表温度和地面气温对比分析 [J]. 气象, 34 (2): 83 - 91.
- Zhou Qing, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua. 2008. Comparison and analysis between NCEP/NCAR every-6-hours analysis land surface and air temperature and 753 Chinese stations' observation in 2005 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (2): 83 - 91.
- 周顺武, 张人禾. 2009. 青藏高原地区上空 NCEP/NCAR 再分析温度和位势高度资料与观测资料的比较分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (3): 284 - 292.
- Zhou Shunwu, Zhang Renhe. 2009. Comparison of NCEP/NCAR reanalysis data and radiosonde data about temperature and geopotential height of upper air over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 284 - 292.