

中国探空观测与第3代再分析大气湿度资料的对比研究*

张思齐^{1,2,3} 郭艳君² 王国复²
ZHANG Siqi^{1,2,3} GUO Yanjun² Wang Guofu²

1. 中国气象科学研究院,北京,100081

2. 国家气候中心,北京,100081

3. 中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

3. *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2017-03-11 收稿,2017-11-02 改回.

张思齐,郭艳君,王国复. 2018. 中国探空观测与第3代再分析大气湿度资料的对比研究. 气象学报, 76(2):289-303

Zhang Siqi, Guo Yanjun, Wang Guofu. 2018. A comparative study of atmospheric humidity over China between radiosonde and the third generation reanalysis datasets. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(2):289-303

Abstract Based on quality controlled (RAW) and homogenized (ADJ) radiosonde humidity collected at 118 stations in China and monthly mean specific humidity and relative humidity from four reanalysis datasets (REA) including ERA-Interim, JRA-55, MERRA and CFSR, a preliminary comparison of upper air specific humidity and relative humidity over China between radiosonde data and the 3rd generation reanalysis datasets is conducted. The relative differences, correlations, standard deviations and linear trends during 1979–2015 derived from RAW, ADJ and REA are analyzed. The results reveal significant discontinuities in the time series of RAW radiosonde humidity in China. Homogenization has improved the continuity of time series of humidity but introduced significant dry biases, which explains why ADJ is 5%–43% lower than RAW. The averaged specific humidity and relative humidity over China from REA are generally higher than those from radiosonde and the differences in relative humidity (7%–48%) are higher than that in specific humidity (4%–13%). Meanwhile, the differences in the upper troposphere are larger than those in the lower troposphere. The differences in spring and autumn are more significant than those in summer. The specific humidity and relative humidity from the four reanalysis datasets are highly consistent, whereas that from the JRA-55 are relatively more similar to radiosonde with lower humidity than other three reanalysis products. Correlations and standard deviation ratios of specific humidity and relative humidity demonstrate a higher consistency regarding annual variability and dispersion in the lower troposphere between REA and ADJ, and the dispersion in REA is obviously higher than that in ADJ in the middle and upper troposphere. The linear trends of specific humidity are consistent between REA and ADJ in the lower troposphere, where both show a wetting trend, but different in the middle troposphere, where a wetting trend is found in ADJ and a drying trend is found in REA. The linear trends of relative humidity in the troposphere are obviously different between REA and ADJ, i. e., a drying trend is found in REA in the troposphere while a wetting trend and an even more significant wetting trend in the middle and upper troposphere from ADJ.

Key words Radiosonde observation, Reanalysis, China, Specific humidity, Relative humidity, Inter-comparison

* 资助课题:公益性(气象)行业科研专项(GYHY201406017、GYHY201506002)、自然科学基金面上项目(41675094)、中国气象局气候变化专项(CCSF201701、CCSF201801)、国家气候中心开放课题青年基金(2017)。

作者简介:张思齐,主要从事气候资料分析。E-mail:zhangsq@cma.gov.cn

通讯作者:郭艳君,主要从事气候变化及高空气候资料分析。E-mail:gyj@cma.gov.cn

摘要 为评估中国探空观测与第3代再分析大气湿度资料的差异,基于 ERA-Interim、JRA-55、MERRA 和 CFSR 再分析和中国 118 探空站 1979—2015 年逐月 850—300 hPa 大气比湿和相对湿度的原始值及均一化序列,通过分析探空与再分析资料的相对偏差、相关系数、标准差比和变化趋势,研究了两者在多年平均值、年际变率、离散度及长期变化趋势等方面的差异。结果表明,中国探空原始湿度序列存在显著的非均一性问题,均一化提高了序列的连续性,但存在显著的低偏差,总体较原始湿度偏低 5%—43%。再分析中国平均对流层大气比湿和相对湿度较探空观测偏高,相对湿度的偏差幅度(7%—48%)较比湿大(4%—13%),对流层高层较低层大,春秋季节偏差较夏季显著。各再分析资料间的差别较小,JRA-55 在对流层高层较其他再分析资料偏低,与探空观测较接近。再分析与均一化后中国探空比湿和相对湿度年际变率和离散度在对流层低层较为一致,对流层中高层再分析资料的离散度明显高于探空。再分析与均一化探空中国平均比湿在对流层低层一致呈上升趋势;对流层中层探空为上升趋势,再分析资料为下降趋势。再分析与均一化探空相对湿度变化趋势差异较大,探空为上升趋势且对流层中高层上升显著,对流层再分析为下降趋势。

关键词 探空观测,再分析,中国,比湿,相对湿度,对比

中图法分类号 P468

1 引言

水汽是气候基本要素之一,也是降水的物质来源和重要的温室气体,在全球能量收支和水循环中起着至关重要的作用(Held, et al, 2000; Dai, 2006; Sherwood, et al, 2010)。因此,大气水汽变化一直是气候学家们关注的焦点问题。表征水汽变化的大气湿度资料通常源自探空、卫星遥感和再分析。探空观测资料始于 20 世纪 50 年代,具有历史序列长、垂直分辨率高等优点,通常用于评估卫星和再分析资料的准确性,缺点是对流层高层及以上大气水汽资料可信度较低(Elliott, et al, 1991),存在由仪器换型、系统升级和台站迁移导致的非均一性问题(Angell, et al, 1984; Gaffen, 1993, 1996; Elliott, et al, 1993, 1998; Zhai, et al, 1996; McCarthy, et al, 2009; Dai, et al, 2011; Guo, et al, 2009; Zhao, et al, 2012)。卫星遥感湿度资料始于 20 世纪 70 年代末,其优势是空间覆盖率较高(海洋和无测站地区尤为明显),缺点是时间序列偏短。20 世纪 90 年代中期以来,再分析大气湿度成为水汽另一资料来源,其兼具时间序列长和空间覆盖率高的优点,缺点是非独立观测资料来源,包含数值预报模式、同化方案和观测系统变更等因素引入的误差(Bengtsson, et al, 2004; Dai, et al, 2011; 赵天保等, 2010; Zhao, et al, 2015)。近 30 年来,随着观测系统和再分析数值同化技术的改进,再分析资料可分为 3 代(Dee, et al, 2011):第 1 代为美国国家环境预测中心和大气研究中心研制的 NCEP/NCAR 和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的 ERA-15;第 2 代包括 NCEP 和美国能源部研制的 NCEP/DOE、ECMWF 的 ERA-40 和日本气

象厅(JMA)与电力中央研究所(CRIEPI)的 JRA-25;第 3 代包括 NCEP 的 CFSR、ECMWF 的 ERA-Interim、美国国家航天局(NASA)的 MERRA 和 JMA 的 JRA-55。与第 1 和第 2 代再分析资料相比,ERA-Interim 提高了观测资料的质量控制和误差订正技术、模式和同化方法,增强了水循环和平流层大气环流的再现能力以及多尺度时间一致性(Dee, et al, 2011)。CFSR 提高了时、空分辨率和准确率,改进了海-气耦合模式,增加了卫星辐射资料的应用(Saha, et al, 2010)。MERRA 应用 NASA 的地球观测系统(EOS)卫星产品提高了全球能量和水循环的再现能力(Rienecker, et al, 2011)。JRA-55 提高了资料的完整性、准确性和气温时间一致性,消除或减弱了平流层低层的冷偏差和亚马逊地区的干偏差问题。研究表明,第 3 代再分析资料对水汽变化特征描述能力明显强于第 1、2 代(Trenberth, et al, 2011; Schneider, et al, 2014)。评估新一代再分析与观测湿度、不同再分析湿度资料的差异可为后续应用提供量化参考,亦有助于改进观测的均一化和再分析同化技术,从而提高气候变化研究基础资料的准确性。

近年来,中外已有不少全球或区域尺度观测与再分析大气湿度的对比研究。例如,Chen 等(2008)分析认为 NCEP/NCAR 和 ERA-40 资料 1973—2002 年比湿在热带地区变化存在明显差异。Daoud 等(2009)分析认为 1957—2002 年 NCEP/NCAR 和 ERA-40 相对湿度在对流层低层(15°—75°N, 60°W—60°E)区域最大偏差达 49.5%,且 ERA-40 与探空的相关较 NCEP/NCAR 低。Paltridge 等(2009)指出 NCEP/NCAR 1973—2007 年热带地区

对流层中高层比湿趋于下降,这与气候模式、卫星观测和温度水汽的正反馈理论矛盾。Dessler 等(2010)质疑 Paltridge 等(2009)的结论,指出 MER-RA、ERA-interim 和 JRA-25 等再分析资料热带对流层比湿均呈上升趋势,仅 NCEP/NCAR 比湿在年代际尺度上呈下降趋势。由于 NCEP/NCAR 未同化卫星观测资料,且存在与观测系统变化和模式缺陷相关的连续性及质量问题,因此热带地区比湿上升的结论更为可信。王雨等(2015)对比了 ERA-Interim、MERRA 和 CFSR 全球大气水汽含量 2000—2012 年气候态特征,指出三者主要模态特征相似且与卫星观测一致,但在全球空间分布、时间序列和变化趋势上仍存在一定差异。针对中国区域水汽资料对比有: Bao 等(2013)利用青藏高原 11 站 1998 年 5—9 月逐日探空观测评估了 NCEP/NCAR、CFSR、ERA-40 和 ERA-Interim 的气温、风场和相对湿度,指出相对湿度差异较气温和风场显著, CFSR 和 ERA-Interim 较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 更接近探空观测; 韦芬芬等(2015)利用中国 107 站 1989—2008 年探空观测评估了 NCEP/NCAR、NCEP/DOE、CFSR、JRA-25、ERA-Interim 和 MERRA 的位势高度、温度、风场和绝对湿度,指出绝对湿度和风场的偏差高于温度和位势高度, ERA-Interim、MERRA 和 JRA-25 较 CFSR、NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 与探空更接近。上述评估中多采用观测原始资料,未考虑仪器换型和辐射误差订正方法更新造成的非均一性问题。实际上,近 20 年来中国气候工作者对这一问题持续关注,并逐步开展观测资料的质量控制和均一化等工作(Zhai, et al, 1996; 翟盘茂, 1997; Guo, et al, 2008, 2009; 郭艳君等, 2009)。本研究应用的“中国高空规定等压面定时值数据集”(阮新等, 2015)和“中国高空月平均温度均一化数据集”(陈哲等, 2014)以及“中国均一化温度露点差序列”(Zhao, et al, 2012)的完整性较早期资料有明显提高,但不少研究指出,21 世纪初探空仪器换型后中国探空观测湿度存在显著的干偏差(Wang, et al, 2008; Bian, et al, 2011; 姚雯等, 2017)。郭艳君等(2016)比较了中国探空观测与再分析资料气温,指出原始探空气温在 2000 年存在由系统升级和仪器换型导致的非均一性问题,均一化探空与再分析资料间较原始值偏差减小,再分析气温与探空存在系统偏差,第 3 代再分析气温与

均一化探空观测更接近。与气温相比,探空观测湿度具有更大的不确定性,再分析湿度信度较低。因此,有必要对中国探空均一化和再分析的大气湿度资料开展评估。Zhao 等(2015)以整层大气为研究对象,利用 1979—2012 年均一化中国探空观测评估了 9 套再分析资料的对流层大气可降水量,指出其在气候态分布和年际变率与探空接近,但相对偏差及趋势差异较大,且第 3 代再分析与观测更接近(Kistler, et al, 2001; Bao, et al, 2013; 韦芬芬等, 2015)。比湿和相对湿度是反映大气水汽重要的湿度指标。为突出大气湿度各层垂直变化特征,揭示中国探空大气湿度的非均一性及其再分析资料的差异,以 850—300 hPa 标准等压面中国 118 站逐月探空观测与第 3 代再分析 1979—2015 年逐月比湿和相对湿度为研究对象,通过原始与均一化差值分析原始序列的非均一性,对比中国区域探空与再分析湿度相对偏差的气候态和季节以及年际变化,以相关、标准差比和长期趋势评估两者在年际变率、离散度和变化趋势上的一致性,并初步分析其产生原因。

2 资料与方法

中国探空观测始于 20 世纪 50 年代初,前期观测仪器和规范变动较大,60 年代全国各站探空仪陆续统一为 59 式,1966 年增加了辐射误差订正(翟盘茂, 1997),2000—2001 年先后两次进行了探空系统升级,2002 年全国陆续换为 L 波段雷达电子式探空仪(陈哲等, 2014),2010 年进行了传感器更新(郭启云等, 2012)。上述仪器换型、辐射订正和系统升级在提高探空观测准确性的同时,也造成了历史序列的不连续性。为了量化分析中国探空观测湿度资料中的非均一性,文中采用的中国探空观测资料(OBS)包含原始和均一化两部分,原始值来自中国气象局国家气象信息中心的“中国高空规定等压面定时值数据集”和“全球高空定时值基础数据集”,包含中国 142 站和全球 1520 站 1958—2015 年逐日 00 和 12 时(世界时,下同)850、700、500、400 和 300 hPa 气温和露点温度。选取有效率 70% 以上的 118 个站和中国香港站,空间分布见图 1。由 00 和 12 时气温和露点温度得到日平均值(任一时次缺测则日值缺测),由月内日值平均得到月平均值(缺测 10 d 以上则月值缺测),简称 RAW。均一化资料包括气温和露点温度差两部分。气温采用 Rhtests 和

PMTred 方法并结合台站历史沿革信息检测间断点,参照夜间和 ERA-Interim 月平均气温,用平均值订正法得到均一化气温(Wang, et al, 2007; 陈哲等, 2014)。温度露点差均一化采用 KS 和 Pmfred 进行间断点

检测以及干冷偏差修正(Dai, et al, 2011; Zhao, et al, 2015)。结合均一化气温和温度露点差得到均一化露点温度。通过式(1)–(4)将气温和露点温度转化为均一化比湿和相对湿度,简称 ADJ。

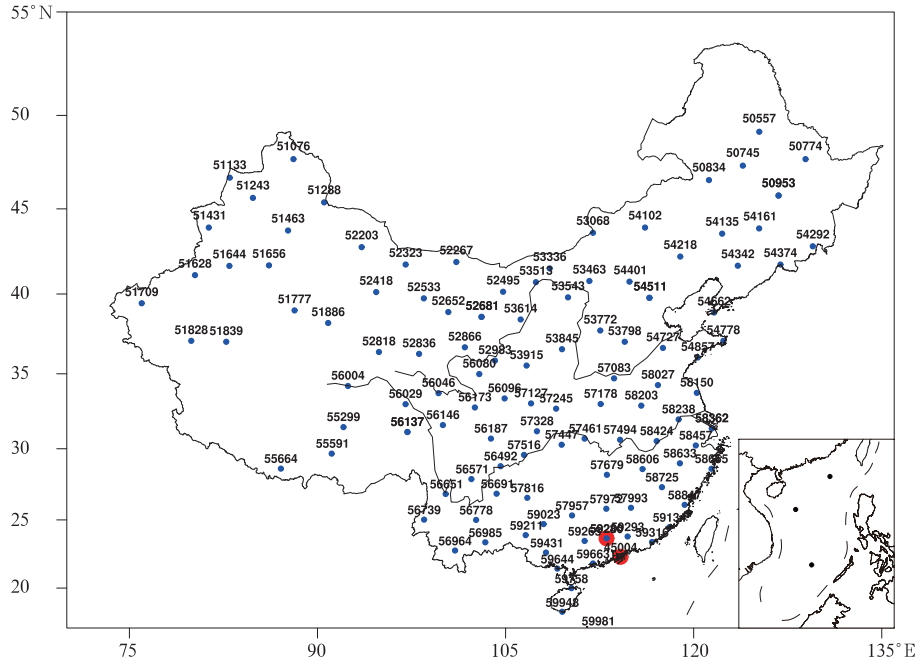


图1 中国探空观测台站空间分布

(红色点为香港站 45004 和清远站 59280)

Fig. 1 Distribution of radiosonde observation stations in China

(Red circles denote Hong Kong (ID# 45004) and Qingyuan (ID# 59280))

相对湿度(RH)计算公式由高空气象观测业务规范露点温度的反推得到

$$RH = 10^{\left(2 + \frac{7.65T_d}{243.12 + T_d} - \frac{7.65T}{243.12 + T}\right)} \quad (1)$$

根据式(2)–(4)得到比湿 q (郭艳君等, 2014; 翟盘茂, 1997)

当气温高于 -40°C 时,

$$\begin{cases} E_s = 1.000071e^{0.0000045p}E \\ E = 6.1094e^{\frac{17.625T}{243.04 + T}} \end{cases} \quad (2)$$

当气温低于 -40°C 时,

$$\begin{cases} E_s = 0.99882e^{0.000008p}E \\ E = 6.1121e^{\frac{22.587T}{273.86 + T}} \end{cases} \quad (3)$$

$$q = 0.622 \frac{E_s(T)RH}{p} \quad (4)$$

式中, T 为气温, p 为气压, E 为水汽压, E_s 为饱和水汽压, T_d 为露点温度。

再分析大气湿度资料为 ERA-Interim、CFSR、

MERRA 和 JRA-55 等 850、700、500、400 和 300 hPa 标准等压面 1979—2015 年逐月大气比湿和相对湿度(CFSR 至 2009 年)。选取台站与网格中心距离最近者即为探空观测与再分析的对比序列。以 1979—2015 年为研究时段,气候场为 1981—2010 年平均。

鉴于对流层大气湿度垂直分布差异显著,选用相对偏差、标准差比值和相关系数等指标表征探空与再分析湿度序列在数值、离散度和年际变化上的差异(式(5)–(7), H 表示湿度)。相对偏差(D)为再分析与探空的偏差和探空气候场的比值。标准差比(S)为再分析与探空 1981—2010 年标准差的比值。相关系数表征再分析与探空年际变率相似度。 D 越接近 0, S 和 R 越接近 1 表示相似程度越高。线性趋势值采用最小二乘法计算回归系数,表示时间序列的长期变化特征。

$$\bar{D} = \frac{(H_{\text{REA}} - H_{\text{OBS}})}{H_{\text{OBS}}} \quad (5)$$

$$S = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{\text{REA}i} - \overline{H_{\text{REA}}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{\text{OBS}i} - \overline{H_{\text{OBS}}})^2}} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{REA}i} - \overline{H_{\text{REA}}})(H_{\text{OBS}i} - \overline{H_{\text{OBS}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{REA}i} - \overline{H_{\text{REA}}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{OBS}i} - \overline{H_{\text{OBS}}})^2}} \quad (7)$$

3 研究结果

3.1 逐年序列对比

850、500 和 300 hPa 中国平均探空原始相对湿度

度和比湿(图 2 红实线)在 21 世纪最初 10 年均出现明显下降,2010 年后略有回升,这与中国探空观测仪器变化密切相关,前者与 21 世纪初 L 波段电子探空仪取代 59-701 探空仪有关,后者与湿度传感器由湿敏电阻升级为湿敏电容有关,500 和 300 hPa 回升幅度较 850 hPa 小是由于低温条件下湿度传感器滞后性较大(郭启云等,2012,2015)。中国探空观测系统在 20 世纪 60 年代和 21 世纪最初 10 年经历两次全国范围仪器换型,20 世纪 60 年代换型导致中国探空原始气温和湿度的显著非均一性已得到不少研究证实(Zhai, et al,1996;翟盘茂,1997;Guo, et al,2008,2009),陈哲等(2014)和郭艳君等(2016)指出,21 世纪初换型后中国探空原始温度明显下降。图 2 表明中国探空湿度序列亦存在与 21 世纪初探空仪器换型相关的显著的非均一性。均一化以换型

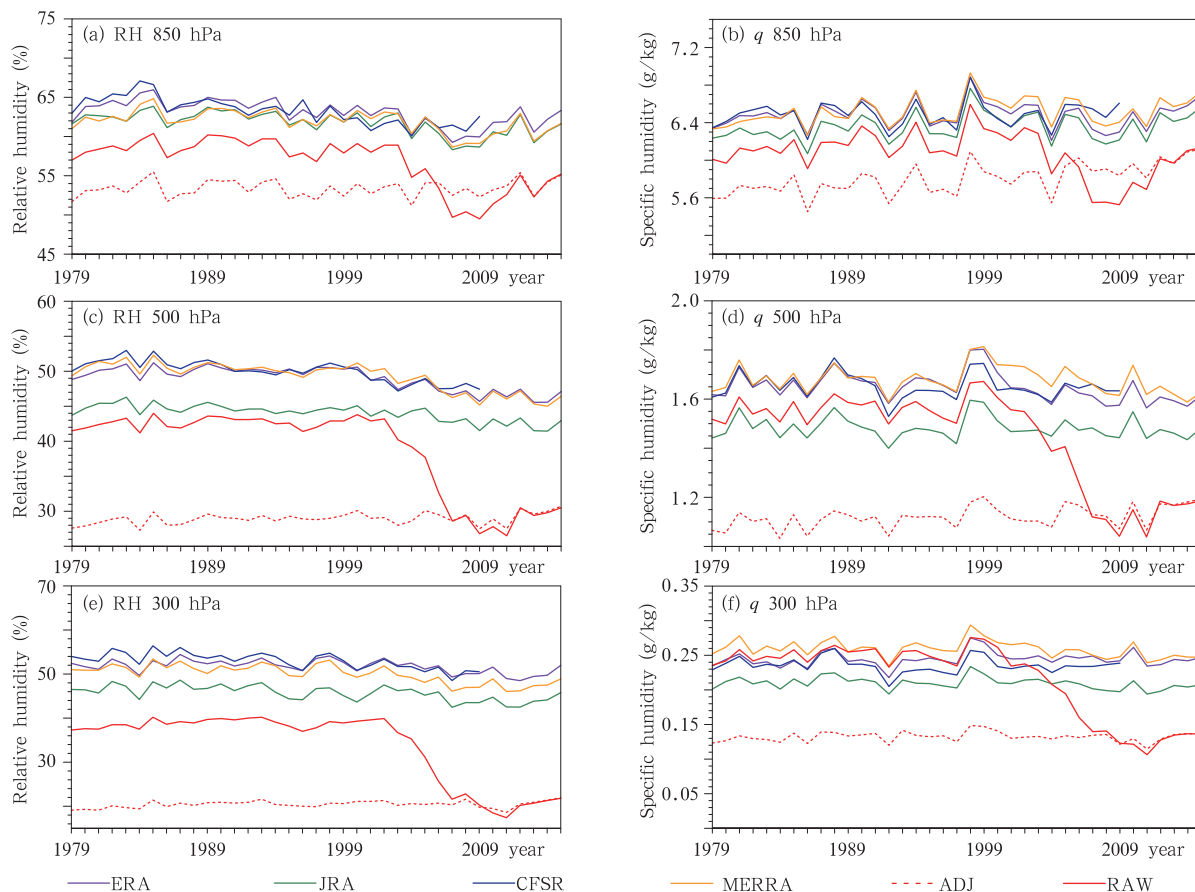


图 2 再分析、原始和均一化探空的 850、500 和 300 hPa 1979—2015 年中国平均相对湿度(%) and 比湿(g/kg) (a,b, 850 hPa,c,d, 500 hPa,e,f, 300 hPa; a,c,e, 相对湿度,b,d,f, 比湿)

Fig. 2 Annual relative humidity (a,c,e; %) and specific humidity (b,d,f; g/kg) averaged over China during 1979–2015 derived from original and homogenized radiosonde observations (RAW and ADJ) and from reanalysis datasets (REA) at 850 hPa (a, b), 500 hPa (c, d) and 300 hPa (e, f)

后序列为参照对换型前进行了较大幅度的负订正。再分析较原始和均一化探空中国平均相对湿度和比湿总体偏高(图2)。值得关注的是,再分析与原始湿度序列在21世纪最初10年之后偏差更为显著,与均一化的偏差总体较原始序列更显著,这一特征与中国探空气温与再分析偏差显著不同(郭艳君等, 2016);再分析与中国探空原始气温差值在换型后明显减小,与均一化气温的偏差明显小于与原始值,互相验证了探空均一化和再分析同化的可信度。与气温相比,水汽观测和再分析资料均具有更大的不确定性。21世纪初换型前中国探空采用肠衣观测湿度,滞后误差较大,在经过高水分含量气层后则无法准确测量后面较干燥气层的大气湿度(翟盘茂, 1997),造成测量结果偏高,换型后采用湿敏电阻,测量湿度范围扩大且时间常数减小,精度有所提高(王英等, 2015;郭启云等, 2012),但也有不少研究指出中国21世纪探空仪器换型后湿度明显偏低(Wang, et al, 2008; Bian, et al, 2011;姚雯等, 2017)。图2探空原始相对湿度和比湿在21世纪初大幅度下降证实了换型后湿度存在明显的干偏差,均一化用换型后序列作为参照实际上扩大了干偏差的时间范围。考虑到各站换型时间有所不同,结合台站元数

据能够准确检验换型前后的差异。以2007年4月完成探空仪器换型的广东省清远站(59280, 23.67°N, 113.05°E)为例,引入与清远站地理位置接近但不受换型影响的中国香港站(45004, 22.32°N, 114.17°E)作为参照(图1),对比两者在换型前后湿度的变化(2008与2006年差值)(表1,图3)得到,清远站原始相对湿度和比湿均显著下降,均一化序列变化幅度明显较原始序列小,中国香港站探空观测无明显变化,变化幅度与再分析接近。因此,中国探空观测原始湿度序列21初以后存在由仪器换型导致的数值偏低问题。均一化对换型前的负订正改善了序列整体连续性,但扩大了与再分析资料的干偏差。再分析资料较中国探空观测湿度偏高,不同再分析湿度序列的差别较小,ERA-55较其他再分析略偏低,与中国探空观测最为接近。

3.2 相对偏差特征

中国探空原始湿度序列存在显著的非均一性,均一化后又存在整体偏低的问题。为客观评估再分析对中国大气湿度的表现能力,从中国区域平均和相邻代表站(59280和45004)对比分析探空与再分析湿度的相对偏差。

中国平均比湿和相对湿度气候态(1981—2010

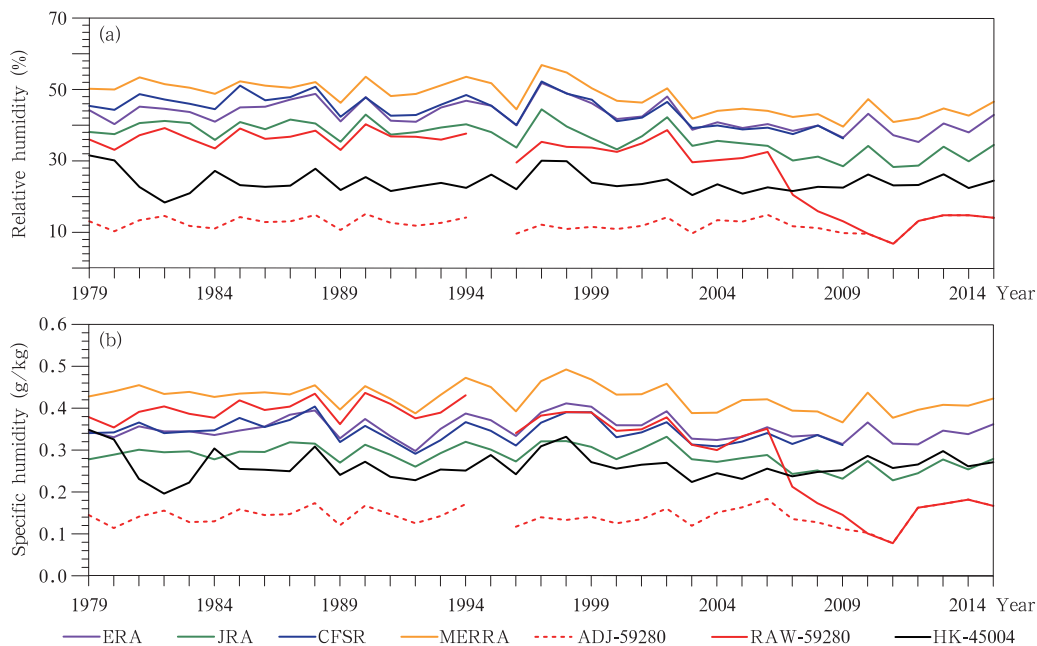


图3 再分析、原始和均一化探空清远站(59280)和中国香港站(45004) 1979—2015年300 hPa相对湿度(a, %)和比湿(b, g/kg)

Fig. 3 Annual specific humidity (b, g/kg) and relative humidity (a, %) at stations Qingyuan, Guangzhou and Hong Kong, China during 1979 - 2015 derived from original and homogenized radiosonde observations (RAW and ADJ) and reanalysis datasets (REA) at 300 hPa

表1 中国香港站探空与再分析相对湿度(%/(10 a)) and 比湿(g/(kg · 10 a))与清远站仪器换型前后偏差
Table 1 Differences in relative humidity (%/(10 a)) and specific humidity (g/(kg · 10 a)) at Hong Kong, China and Qingyuan before and after the radiosonde mode change at station # 59280 derived from OBS and REA

	RAW(59280)	ADJ(59280)	香港	ERA	JRA	CFSR	MERRA	
相对湿度	850 hPa	-20.1	-4.8	0.8	-5.3	-3.8	-2.9	-5.3
	700 hPa	-20.0	-2.0	0.8	-5.7	-4.4	-4.1	-3.4
	500 hPa	-14.4	-4.3	1.2	-0.4	0.7	0.8	-0.1
	400 hPa	-16.1	-4.4	-0.1	-1.5	-1.4	-0.3	-1.5
	300 hPa	-16.6	-3.7	0.6	-0.4	-3.0	0.6	-0.9
比湿	850 hPa	-2.611	-0.694	-0.166	-0.876	-0.604	-0.586	-0.819
	700 hPa	-1.934	-0.238	-0.067	-0.705	-0.514	-0.500	-0.405
	500 hPa	-0.784	-0.291	0.000	-0.147	-0.052	-0.063	-0.109
	400 hPa	-0.472	-0.194	-0.005	-0.075	-0.071	-0.044	-0.072
	300 hPa	-0.178	-0.056	0.028	-0.018	-0.037	-0.005	-0.029

年)相对偏差廓线(图 4a、b)表明,均一化较原始相对湿度和比湿偏低 5%—43%,偏低幅度随高度上

升而增大。再分析总体较探空观测偏高,其中相对湿度较原始偏高 7%—48%,比湿偏高 4%—13%

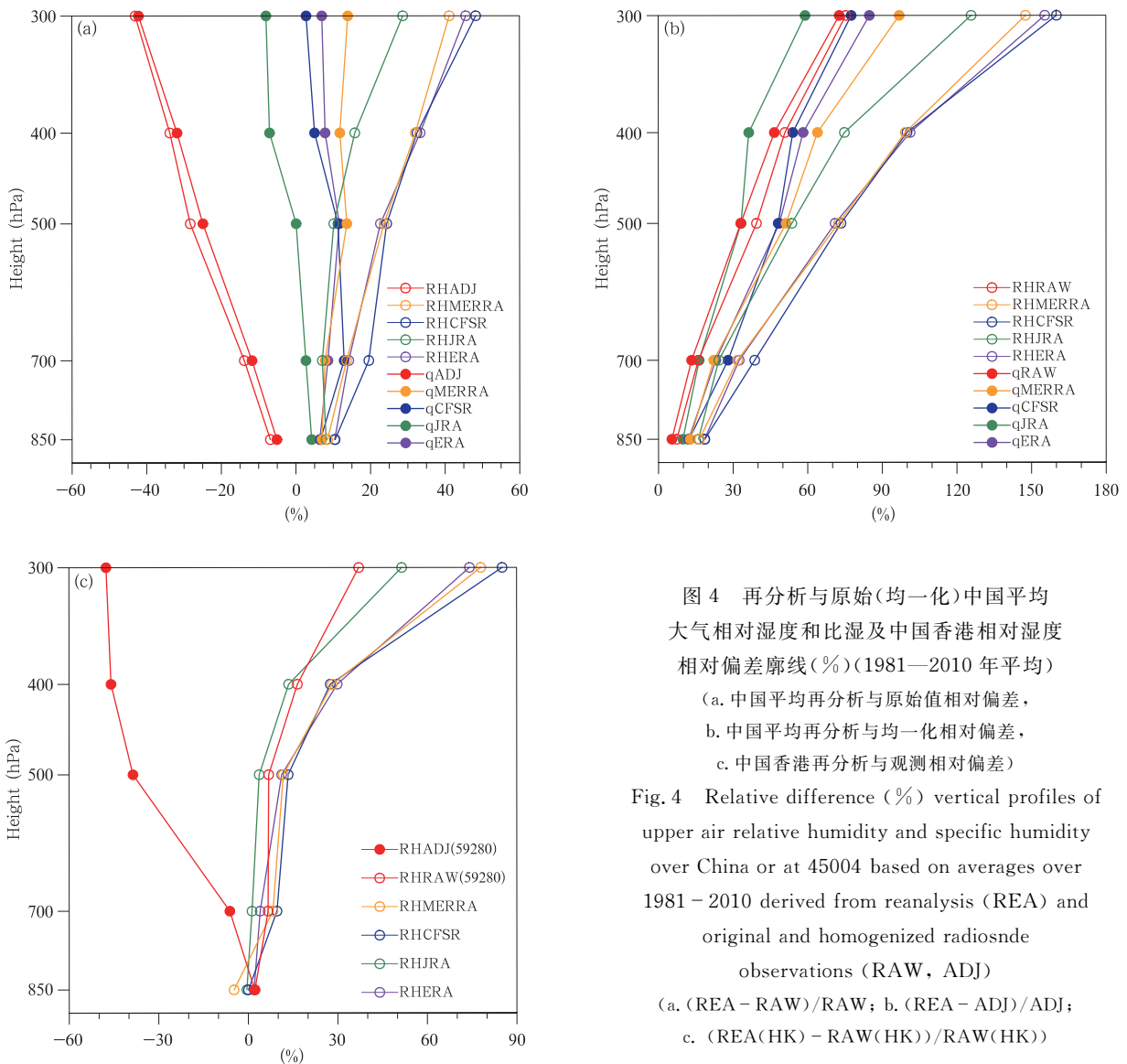


图 4 再分析与原始(均一化)中国平均大气相对湿度和比湿及中国香港相对湿度相对偏差廓线(%)(1981—2010 年平均)
(a. 中国平均再分析与原始值相对偏差,
b. 中国平均再分析与均一化相对偏差,
c. 中国香港再分析与观测相对偏差)

Fig. 4 Relative difference (%) vertical profiles of upper air relative humidity and specific humidity over China or at 45004 based on averages over 1981 – 2010 derived from reanalysis (REA) and original and homogenized radiosonde observations (RAW, ADJ)
(a. (REA - RAW)/RAW; b. (REA - ADJ)/ADJ; c. (REA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK))

(JRA 400 和 500 hPa 除外);相对湿度较均一化偏高 16%—160%,比湿偏高 10%—97%,偏高幅度均随高度上升而增大。为减小仪器换型引入的非均一性和均一化低偏差的影响,引入中国香港站探空和再分析相对湿度以及清远站探空相对湿度的对比(图 4c),清远站原始相对湿度较中国香港站观测偏高 2%—37%,均一化显著偏低 6%—48%(850 hPa 略偏湿),且偏差程度随高度升高而增大,证实了中国探空观测原始湿度序列中的两个问题,即 21 世纪最初 10 年换型前采用肠衣观测的湿度偏高(翟盘茂,1997)和换型后湿度显著偏低(Wang, et al, 2008,姚雯等,2017)。中国香港站再分析相对湿度

与探空观测相对偏差为 -4%—85%,除 MERRA 和 JRA 在 850 hPa 略偏低外,其余再分析总体偏高,偏差幅度与中国平均再分析及原始的偏差在对流层中低层接近,在高层略大。由此可得,再分析湿度总体较中国探空观测偏高,对流层中高层偏湿幅度较显著。各再分析间的差异明显小于再分析与探空的偏差,JRA-55 总体较 ERA-Interim、MERRA 和 CFSR 偏低,与中国探空观测更接近。

中国平均相对湿度气候态逐月相对偏差显示,均一化对原始相对湿度在对流层中上层冬半年(10—3月)的订正幅度高于夏半年(4—9月)(图 5g)。再分析较原始相对湿度在对流层中高层春季正偏差

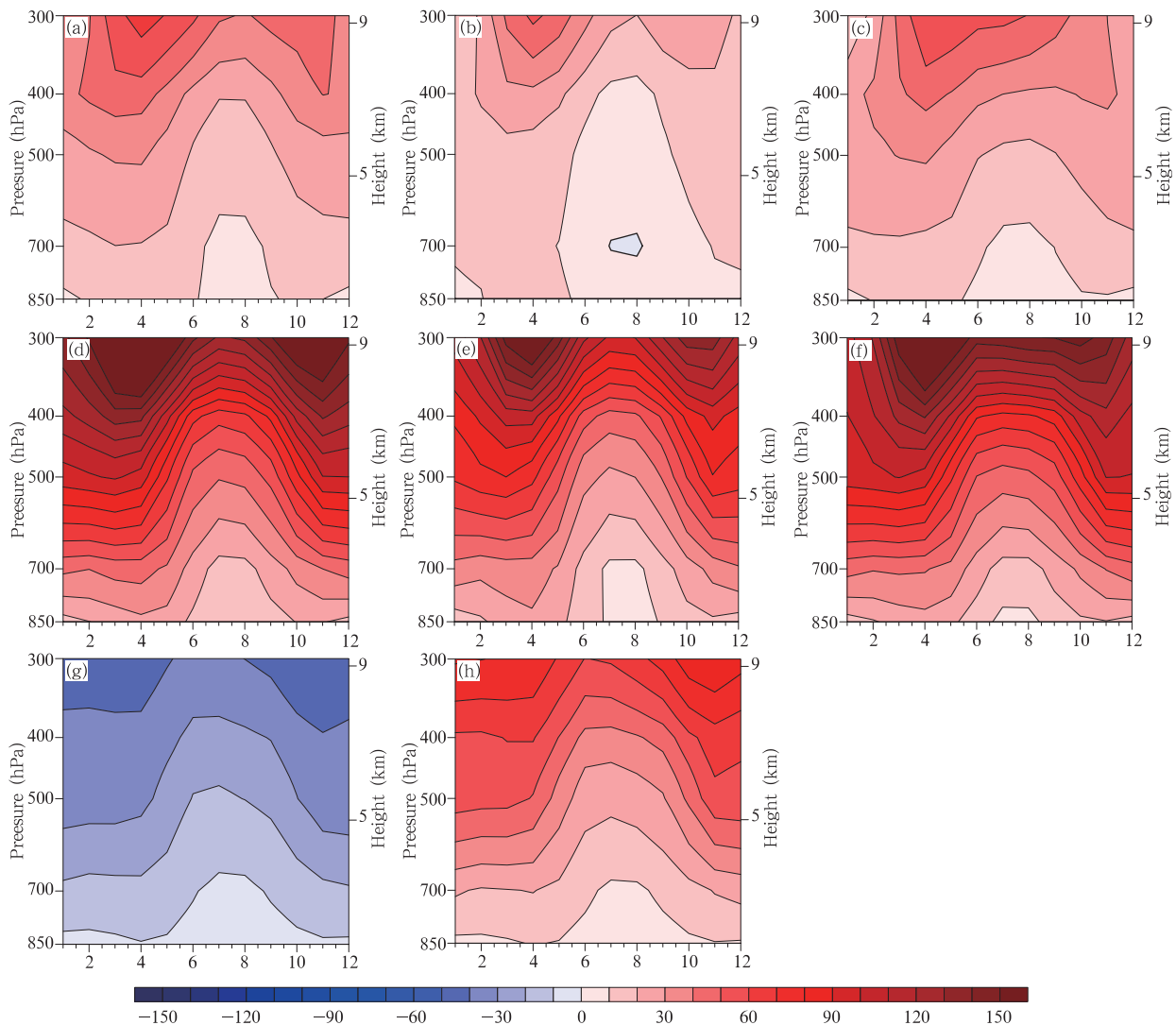


图 5 中国平均高空大气相对湿度再分析与原始(均一化)探空观测 1981—2010 年平均逐月相对偏差(%)

(a. $(ERA - RAW)/RAW$, b. $(JRA - RAW)/RAW$, c. $(MERRA - RAW)/RAW$, d. $(ERA - ADJ)/ADJ$, e. $(JRA - ADJ)/ADJ$, f. $(MERRA - ADJ)/ADJ$, g. $(ADJ - RAW)/RAW$, h. $(RAW - ADJ)/ADJ$)

Fig. 5 Monthly relative differences in upper air relative humidity over China between REA, RAW and ADJ based on averages of 1981–2010 (a. $(ERA - RAW)/RAW$, b. $(JRA - RAW)/RAW$, c. $(MERRA - RAW)/RAW$, d. $(ERA - ADJ)/ADJ$, e. $(JRA - ADJ)/ADJ$, f. $(MERRA - ADJ)/ADJ$, g. $(ADJ - RAW)/RAW$, h. $(RAW - ADJ)/ADJ$)

最大,低层夏季偏差最小(图 5a—c)。各再分析相对湿度与探空相对偏差的分布型接近,数值上 JRA 偏差较小。再分析比湿与原始探空偏差的特征与相对湿度类似(图略)。再分析与均一化相对湿度的偏差除数值增大外,季节和垂直特征与原始值偏差相近(图 5d—f)。再分析与探空中国平均比湿的偏差也呈现类似特征(图略)。中国香港站再分析与探空

相对湿度的逐月偏差与图 5 类似即对流层中高层冬半年较夏半年高,数值介于中国平均再分析与原始的偏差和再分析与均一化相对偏差之间(图 6)。因此,排除了换型导致的非均一性影响后,中国区域对流层中高层冬半年再分析较探空偏高幅度最大,对流层低层夏季再分析与探空最接近。

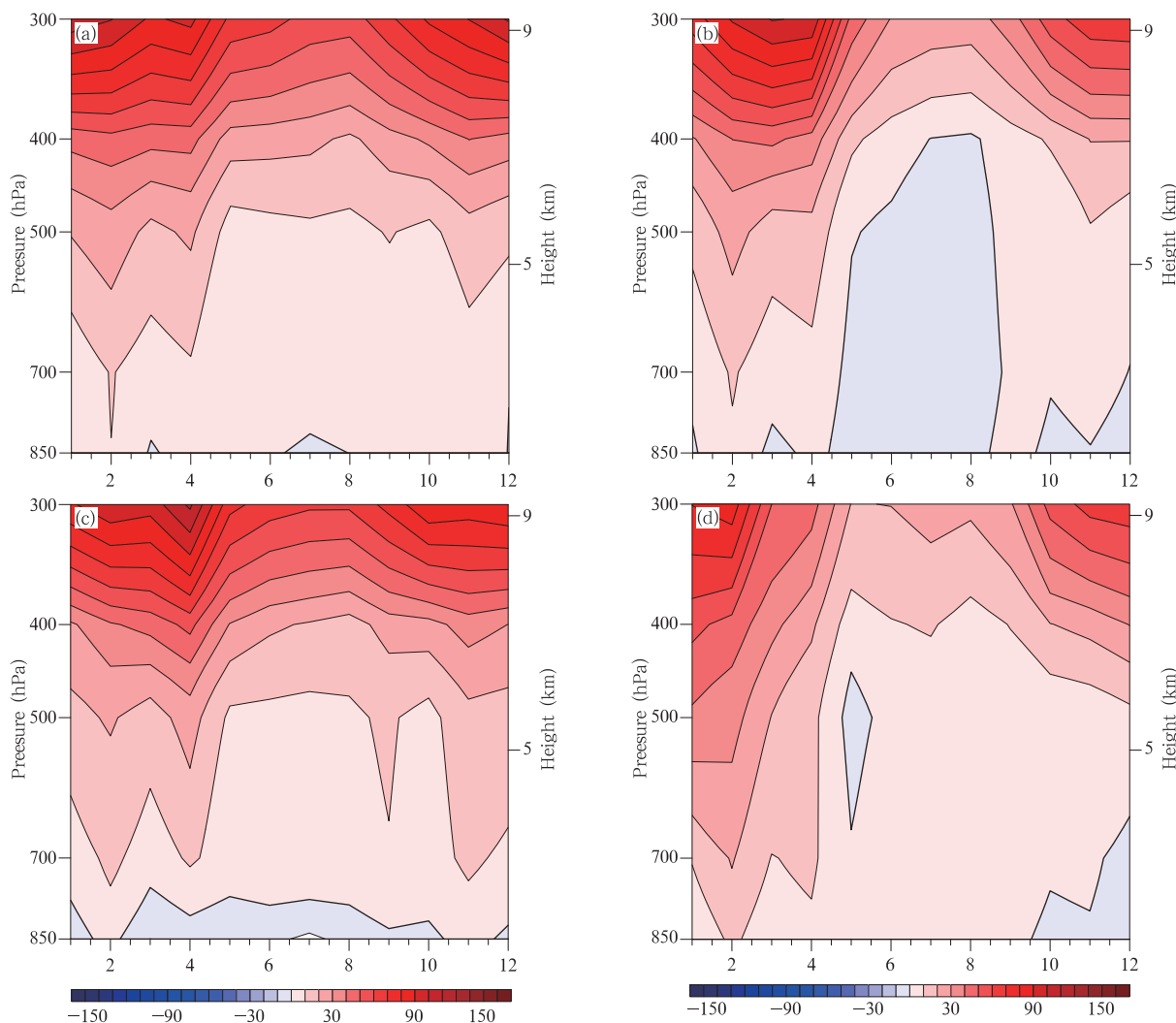


图 6 中国香港站再分析与探空观测相对湿度 1981—2010 平均逐月相对偏差(%)
 (a. $(\text{ERA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$, b. $(\text{JRA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$,
 c. $(\text{MERRA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$, d. $(\text{RAW}(59280) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$)
 Fig. 6 Monthly relative differences (%) in upper air relative humidity between REA and
 RAW at HongKong, China based on averages over 1981–2010
 (a. $(\text{ERA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$, b. $(\text{JRA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$,
 c. $(\text{MERRA}(\text{HK}) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$, d. $(\text{RAW}(59280) - \text{RAW}(\text{HK})) / \text{RAW}(\text{HK})$)

均一化与原始中国平均相对湿度偏差的时间高度剖面(图 7g)反映了中国探空湿度序列非均一性

的年际变化,可以看到 21 世纪最初 10 年中期差值变化幅度最大(负值急剧转为正值),表明均一化对

2000 年以前原始相对湿度进行了较大幅度负订正,这与探空仪换型时间吻合。再分析总体较中国平均原始相对湿度偏高,各再分析偏差接近,JRA 总体较其他再分析偏低(图 7a—c)。均一化增强序列的连续性的同时,增大了与再分析的偏差,即各再分析与均一化偏差大于与原始探空的偏差,但随时间和高度变化幅度明显减小(图 7d—f)。从中国香港与清远、中国香港再分析与探空的相对湿度偏差时间剖面图可推断出换型前后的急剧变化仅表现在中国

大陆台站,中国香港站再分析与探空相对湿度的偏差随时间变化较小,除 850 hPa 再分析较探空略偏低外,对流层中高层各再分析均较探空偏高,偏差随高度升高而增大,数值介于中国平均原始和均一化相对偏差之间(图 8)。比湿亦表现出类似特征(图略)。因此,排除了换型导致的非均一性影响后,再分析与中国探空湿度总体呈系统性正偏差,即对流层中高层再分析湿度较中国探空观测偏高,均一化加大了再分析与中国探空观测的偏差。

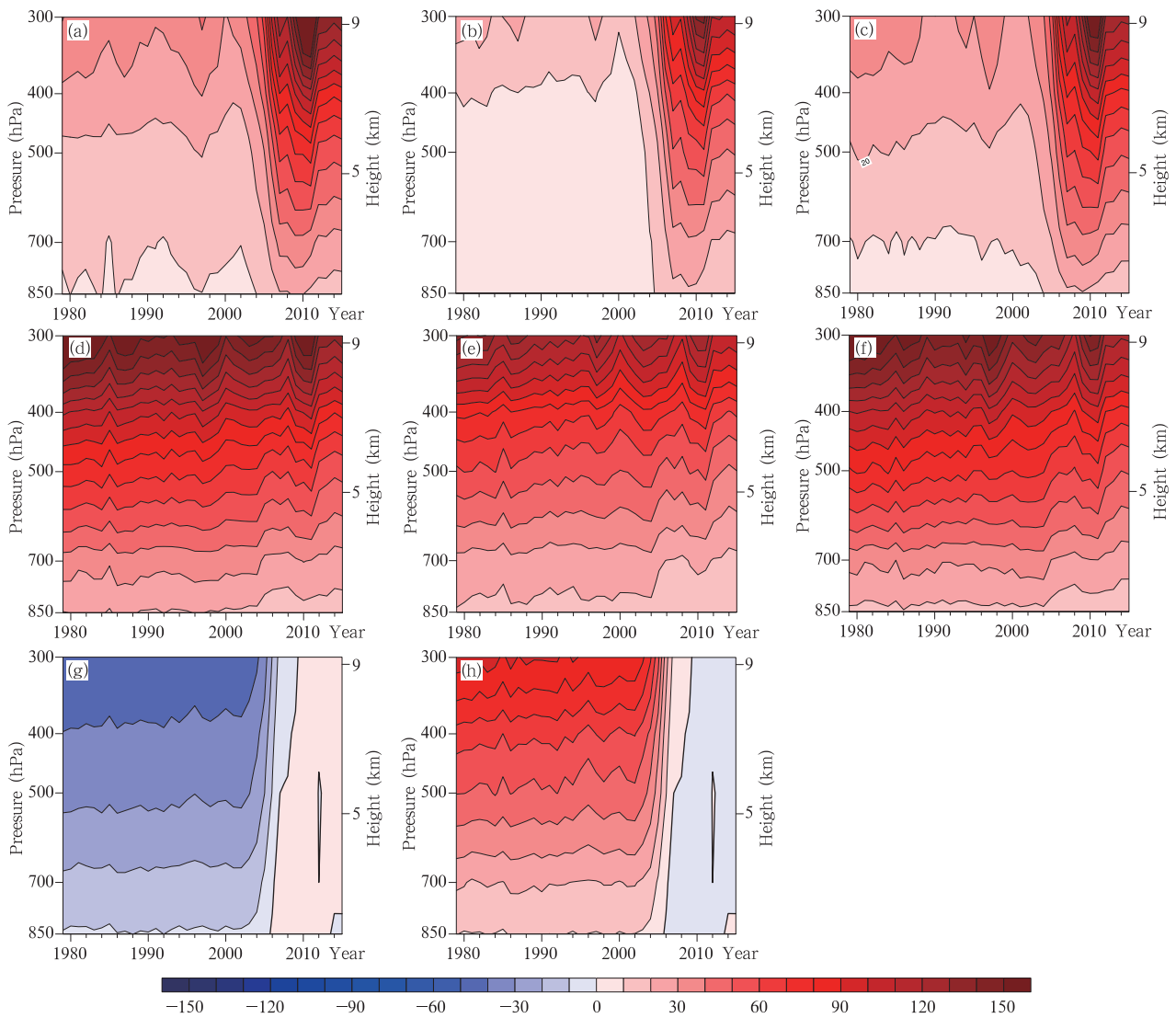


图 7 中国平均高空大气相对湿度再分析与原始、均一化探空观测 1979—2015 逐年相对偏差(%)
 (a. $(ERA - RAW)/RAW$, b. $(JRA - RAW)/RAW$, c. $(MERRA - RAW)/RAW$, d. $(ERA - ADJ)/ADJ$,
 e. $(JRA - ADJ)/ADJ$, f. $(MERRA - ADJ)/ADJ$, g. $(ADJ - RAW)/RAW$, h. $(RAW - ADJ)/ADJ$)

Fig. 7 Annual relative differences in the upper air relative humidity during 1979–2015 between REA, RAW and ADJ
 (a. $(ERA - RAW)/RAW$, b. $(JRA - RAW)/RAW$, c. $(MERRA - RAW)/RAW$, d. $(ERA - ADJ)/ADJ$,
 e. $(JRA - ADJ)/ADJ$, f. $(MERRA - ADJ)/ADJ$, g. $(ADJ - RAW)/RAW$, h. $(RAW - ADJ)/ADJ$)

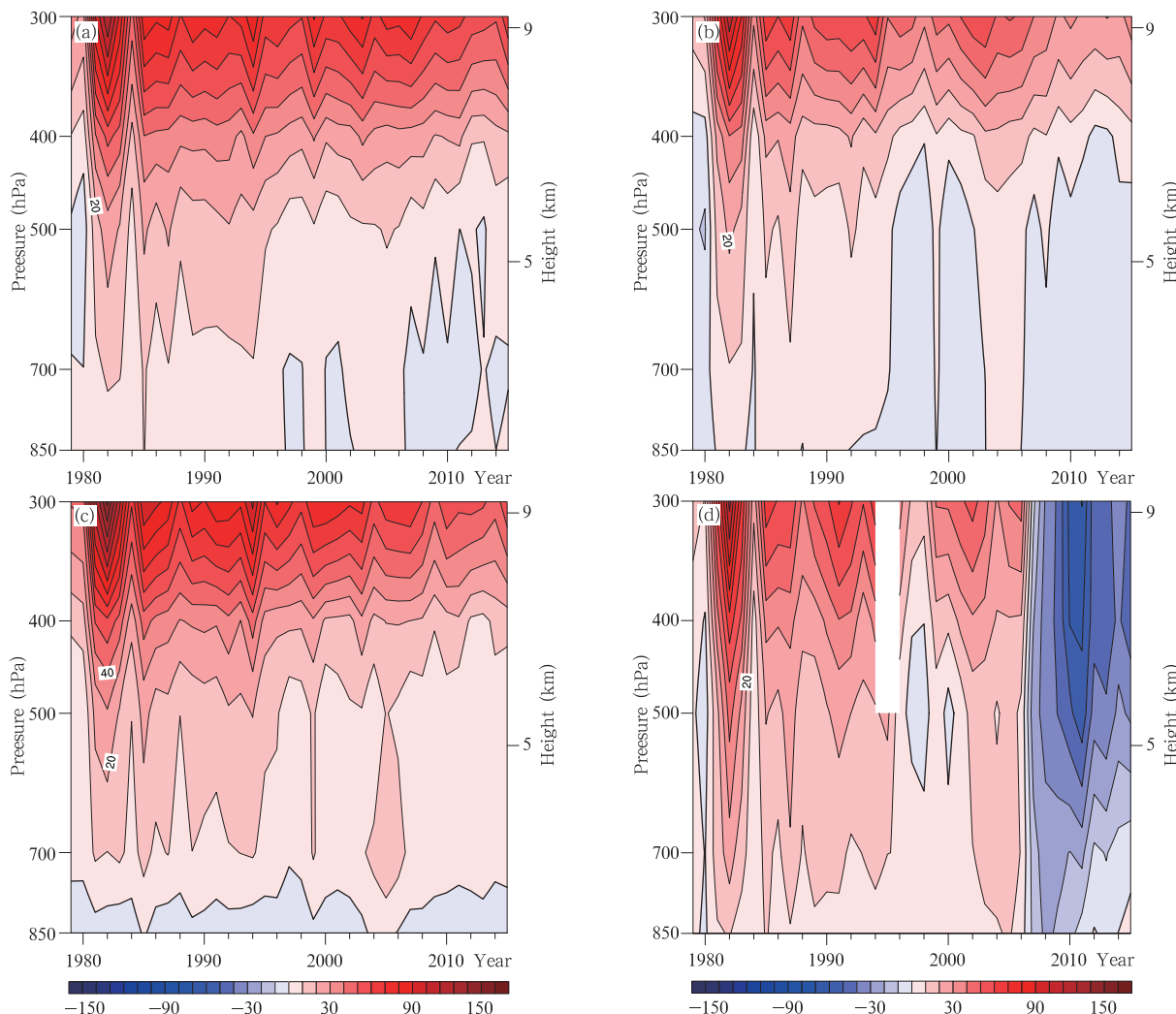


图8 再分析与探空观测香港站1979—2015相对湿度逐年相对偏差(%)

(a. $(ERA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$, b. $(JRA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$,
c. $(MERRA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$, d. $(RAW(59280) - RAW(HK))/RAW(HK)$)

Fig. 8 Annual relative differences in upper air relative humidity during 1979 - 2015 between REA and RAW at 45004

(a. $(ERA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$, b. $(JRA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$,
c. $(MERRA(HK) - RAW(HK))/RAW(HK)$, d. $(RAW(59280) - RAW(HK))/RAW(HK)$)

3.3 相关系数与标准差比值

鉴于中国平均原始湿度序列存在显著非均一性,不适用于年际变率和离散度的比较。基于均一化和再分析中国平均相对湿度和比湿、中国香港站原始和再分析相对湿度的泰勒统计图显示(图9),均一化与再分析中国平均大气比湿各层均为显著正相关(0.32和0.41为显著性95%和99%阈值)。再分析比湿标准差较均一化在对流层低层偏小,高层偏大(图9a)。中国平均再分析与均一化相对湿度在对流层低层正相关达到显著,对流层中高层不显著,再分析相对湿度标准差较均一化明显高,且层次越高偏差越大,与之对照的中国香港站探空与再

分析相对湿度各层相关均显著,标准差也接近。因此,再分析与探空中国平均相对湿度低相关和标准差偏大是受到均一化的影响,有待于改进均一化方案后进一步验证。

3.4 变化趋势对比

中国平均大气以及中国香港站相对湿度和比湿变化趋势对比(表2)表明,1979—2015年中国平均原始相对湿度和比湿序列受仪器换型影响呈现虚假的显著下降趋势,均一化相对湿度和比湿均呈上升趋势,其中相对湿度在对流层中高层(500—300 hPa)上升显著,比湿在对流层中低层(850—500 hPa)上升显著,中国香港站对流层下层相对湿度和

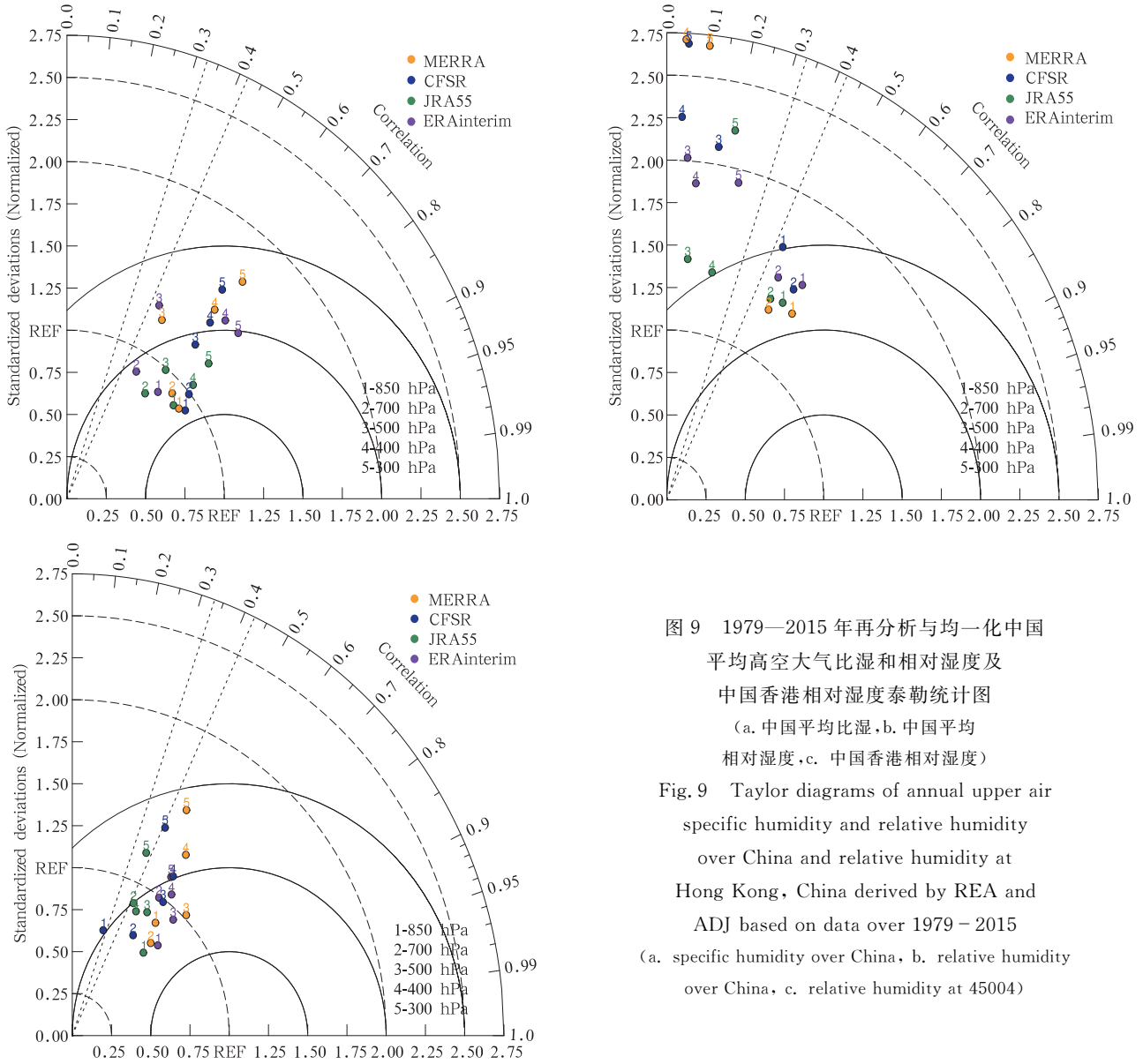


图9 1979—2015年再分析与均一化中国平均高空大气比湿和相对湿度及中国香港相对湿度泰勒统计图
(a. 中国平均比湿, b. 中国平均相对湿度, c. 中国香港相对湿度)

Fig. 9 Taylor diagrams of annual upper air specific humidity and relative humidity over China and relative humidity at Hong Kong, China derived by REA and ADJ based on data over 1979 – 2015
(a. specific humidity over China, b. relative humidity over China, c. relative humidity at 45004)

表2 中国平均和中国香港高空再分析与探空观测相对湿度(%/(10 a))和比湿(g/(kg · 10 a))1979—2015变化趋势
(下划线表示趋势通过95%统计显著)

Table 2 Trends of upper air relative humidity (%/(10 a)) and specific humidity (g/(kg · 10 a)) over China and Hong Kong during 1979 – 2015 derived from OBS and REA
(underlines denote the values are significant at the 95% confidence level)

	高度	ERA	JRA	CFSR	MERRA	ADJ	RAW	HK
相对湿度	850 hPa	-0.92	-0.80	-1.54	-0.69	0.12	-2.03	0.88
	700 hPa	-0.83	-0.77	-0.99	-0.55	0.10	-3.13	0.36
	500 hPa	-1.18	-0.83	-1.33	-1.52	0.31	-4.42	-0.19
	400 hPa	-1.06	-0.67	-1.35	-1.66	0.24	-5.01	-0.26
	300 hPa	-0.68	-1.00	-1.37	-1.40	0.24	-5.85	-0.39
比湿	850 hPa	0.009	0.038	0.017	<u>0.047</u>	<u>0.100</u>	-0.076	<u>0.180</u>
	700 hPa	-0.015	0.000	0.014	<u>0.046</u>	<u>0.065</u>	-0.150	0.074
	500 hPa	<u>-0.019</u>	-0.005	-0.009	-0.008	<u>0.020</u>	-0.135	0.003
	400 hPa	-0.009	-0.001	-0.006	-0.009	0.004	-0.091	0.001
	300 hPa	0.001	-0.002	-0.002	-0.004	0.000	-0.040	0.003

各层比湿与中国区域呈一致的上升趋势。再分析相对湿度变化趋势与探空差异较大,各层均为显著下降趋势,再分析比湿在对流层低层呈弱的上升趋势(仅MERRA达到显著),对流层中高层呈弱的下降趋势(仅ERA达到显著)。

4 结论与讨论

基于中国探空观测资料和1979—2015年850—300 hPa 4套第3代再分析资料逐月大气比湿和相对湿度的对比,得到:

(1)中国探空观测比湿和相对湿度原始序列在21世纪初存在与仪器换型相关的非均一性问题,均一化对21世纪初以前的原始序列进行了较大幅度负订正,订正后序列连续性明显提高,但数值显著偏低,偏低幅度随高度升高而增大,冬半年偏差高于夏半年,与再分析偏差增大,因此,中国探空湿度均一化的参照序列和订正方案有待改进。

(2)再分析与探空观测中国平均高空大气比湿和相对湿度存在系统正偏差,且相对湿度偏差幅度较比湿大,对流层中高层偏差幅度较为显著。各再分析比湿和相对湿度的差别较小,JRA-55较其他再分析偏干,与中国探空观测较接近。

(3)再分析与均一化中国平均对流层大气比湿和对流层低层相对湿度的年际变率一致度较高,两者离散度在对流层低层较接近,对流层高层再分析离散度明显高于均一化序列。

(4)再分析与均一化中国平均大气比湿在对流层低层一致为上升趋势;对流层中层均一化比湿趋于上升而再分析趋于下降。再分析与均一化中国平均相对湿度变化趋势差异较大,再分析趋于显著下降,均一化趋于上升且在对流层中高层显著。

鉴于中国探空观测原始湿度存在显著的非均一性,均一化湿度又显著偏低,中国探空水汽资料应用于气候研究时可能得到虚假的结论,需要特别注意。选取适当的参照序列和均一化方案,有效去除探空观测湿度资料的非均一性是高空大气水汽变化研究的基础,需要继续开展不同来源的湿度资料的对比和不确定性分析等工作。此外,再分析湿度资料受到观测资料和模式的共同影响,其信度值低于仅受观测资料直接影响的高空气温和风场(Kistler, et al, 2001)也是造成再分析与探空湿度偏差较大的原因之一。未来在改进模式参数化方案,进而降低对

观测系统的敏感性,最终提高再分析资料精度方面仍有待于进一步工作(王雨等, 2015; Bengtsson, et al, 2004; Rienecker, et al, 2011)。中国探空观测与再分析湿度资料的对比仅是初步工作,未来还需改进统计方法和参照序列,提高均一化湿度序列的可信度,并引入卫星遥感资料,继续开展多源水汽资料的对比。

致谢:感谢美国纽约州立大学Albany分校戴爱国教授、中国气象局国家气象信息中心陈哲博士、中国科学院大气物理研究所赵天保研究员和郑辉博士帮助完成中国高空均一化水汽资料集。

参考文献

- 陈哲, 杨溯. 2014. 1979—2012年中国探空温度资料中非均一性问题的检验与分析. 气象学报, 72(4): 794-804. Chen Z, Yang S. 2014. Homogenization and analysis of China radiosonde temperature data from 1979 to 2012. Acta Meteor Sinica, 72(4): 794-804 (in Chinese)
- 郭启云, 李伟, 张玉存等. 2012. GTS1型、GTS1-1型、GTS1-2型探空仪性能试验与对比分析. 气象水文海洋仪器, 29(1): 5-10. Guo Q Y, Li F, Zhang Y C, et al. 2012. Performance test and comparative analysis of GTS1, GTS1-1 and GTS1-2 radiosondes. Meteor, Hydrol Mar Instrum, 29(1): 5-10 (in Chinese)
- 郭启云, 李峰, 郭凯等. 2015. 新型GPS探空仪与业务GTS1-2探空仪对比分析. 气象科技, 43(1): 59-64, 75. Guo Q Y, Li F, Guo K, et al. 2015. Comparative analysis of new GPS and GTS1-2 radiosondes. Meteor Sci Technol, 43(1): 59-64, 75 (in Chinese)
- 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 2009. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响. 大气科学, 33(6): 1309-1318. Guo Y J, Li Q X, Ding Y H. 2009. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China. Chinese J Atmos Sci, 33(6): 1309-1318, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.16 (in Chinese)
- 郭艳君, 丁一汇. 2014. 1958~2005年中国高空大气比湿变化. 大气科学, 38(1): 1-12. Guo Y J, Ding Y H. 2014. Upper-air specific humidity change over China during 1958-2005. Chinese J Atmos Sci, 38(1): 1-12, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12212 (in Chinese)
- 郭艳君, 张思齐, 颜京辉等. 2016. 中国探空观测与多套再分析资料气温序列的对比研究. 气象学报, 74(2): 271-284. Guo Y J, Zhang S Q, Yan J H, et al. 2016. A comparison of atmospheric temperature over China between radiosonde observations and multiple reanalysis datasets. Acta Meteor Sinica, 74(2): 271-284 (in Chinese)
- 阮新, 熊安元, 胡开喜等. 2015. 中国历史探空资料部分等压面位势高度订正. 应用气象学报, 26(3): 257-267. Ruan X, Xiong

- A Y, Hu K X, et al. 2015. Correcting geopotential height errors of some mandatory levels of Chinese historic radiosonde observations. *J Appl Meteor Sci*, 26(3): 257-267 (in Chinese)
- 王雨, 张颖, 傅云飞等. 2015. 第三代再分析水汽资料的气候态比较. *中国科学: 地球科学*, 45(12): 1895-1906. Wang Y, Zhang Y, Fu Y F, et al. 2016. A climatological comparison of column-integrated water vapor for the third-generation reanalysis datasets. *Sci China Earth Sci*, 59(2): 296-306
- 王英, 熊安元. 2015. L波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响. *应用气象学报*, 26(1): 76-86. Wang Y, Xiong A Y. 2015. Effects of radiosonde system changing to L-band radar digital radiosonde on humidity measurements in China. *J Appl Meteor Sci*, 26(1): 76-86 (in Chinese)
- 韦芬芬, 汤剑平, 王淑瑜. 2015. 中国区域夏季再分析资料高空变量可信度的检验. *地球物理学报*, 58(2): 383-397. Wei F F, Tang J P, Wang S Y. 2015. A reliability assessment of upper-level reanalysis datasets over China. *Chinese J Geophys*, 58(2): 383-397 (in Chinese)
- 姚雯, 马颖, 高丽娜. 2017. L波段与59-701探空系统相对湿度对比分析. *应用气象学报*, 28(2): 218-226. Yao W, Ma Y, Gao L N. 2017. Comparison of relative humidity data between L-band and 59-701 sounding system. *J Appl Meteor Sci*, 28(2): 218-226 (in Chinese)
- 翟盘茂. 1997. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题. *气象学报*, 55(5): 563-572. Zhai P M. 1997. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data. *Acta Meteor Sinica*, 55(5): 563-572 (in Chinese)
- 赵天保, 符淙斌, 柯宗建等. 2010. 全球大气再分析资料的研究现状与进展. *地球科学进展*, 25(3): 242-254. Zhao T B, Fu C B, Ke Z J, et al. 2010. Global atmosphere reanalysis datasets: Current status and recent advances. *Adv Earth Sci*, 25(3): 242-254 (in Chinese)
- Angell J K, Elliott W P, Smith M E. 1984. Tropospheric humidity variations at Brownsville, Texas and Great Falls, Montana, 1958-80. *J Climate Appl Meteor*, 23(9): 1286-1295
- Bao X H, Zhang F Q. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *J Climate*, 26(1): 206-214
- Bengtsson L, Hagemann S, Hodges K I. 2004. Can climate trends be calculated from reanalysis data?. *J Geophys Res*, 109(D11): D1111, doi: 10.1029/2004JD004536
- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH. *Adv Atmos Sci*, 28(1): 139-146
- Chen J Y, Del Genio A D, Carlson B E, et al. 2008. The spatiotemporal structure of twentieth-century climate variations in observations and reanalyses. Part II: Pacific pan-decadal variability. *J Climate*, 21(11): 2634-2650
- Dai A G. 2006. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *J Climate*, 19(15): 3589-3606
- Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al. 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J Climate*, 24(4): 965-991
- Daoud B A, Sauquet E, Lang M, et al. 2009. Comparison of 850-hPa relative humidity between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses: Detection of suspicious data in ERA-40. *Atmos Sci Lett*, 10(1): 43-47
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656): 553-597
- Dessler A E, Davis S M. 2010. Trends in tropospheric humidity from reanalysis systems. *J Geophys Res*, 115(D19): D19127, doi: 10.1029/2010JD014192
- Elliott W P, Gaffen D J. 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull Amer Meteor Soc*, 72(10): 1507-1520
- Elliott W P, Gaffen D J. 1993. Effects of conversion algorithms on reported upper-air dewpoint depressions. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(7): 1323-1325
- Elliott W P, Ross R J, Schwartz B. 1998. Effects on climate records of changes in National Weather Service humidity processing procedures. *J Climate*, 11(9): 2424-2436
- Gaffen D J. 1993. Historical changes in radiosonde instruments and practices // WMO Technical document 541, Instruments and Observing Methods Republic 50. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 123pp
- Gaffen D J. 1996. A digitized metadata set of global upper-air station histories // NOAA Technical Memorandum ERL-ARL 211. Silver Spring, MD: 37pp
- Guo Y J, Thorne P W, McCarthy M P, et al. 2008. Radiosonde temperature trends and their uncertainties over eastern China. *Int J Climatol*, 28(10): 1269-1281
- Guo Y J, Ding Y H. 2009. Long-term free-atmosphere temperature trends in China derived from homogenized in situ radiosonde temperature series. *J Climate*, 22(4): 1037-1051
- Held I M, Soden B J. 2000. Water vapor feedback and global warming. *Annu Rev Energy Environ*, 25(1): 441-475
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(2): 247-267
- McCarthy M P, Thorne P W, Titchner H A. 2009. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes. *J Climate*, 22(22): 5820-5838
- Paltridge G, Arking A, Pook M. 2009. Trends in middle-and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data. *Theor Appl Climatol*, 98(3-4): 351-359, doi: 10.1007/s00704-009-0117-x
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era retrospective analysis for research and ap-

- plications. *J Climate*, 24(14): 3624-3648, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(8): 1015-1057
- Schneider U, Becker A, Finger P, et al. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor Appl Climatol*, 115(1-2): 15-40, doi: 10.1007/s00704-013-0860-x
- Sherwood S C, Ingram W, Tsushima Y. 2010. Relative humidity changes in a warmer climate. *J Geophys Res*, 115 (D9): D09104
- Trenberth K E, Fasullo J T, Mackaro J. 2011. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. *J Climate*, 24(18): 4907-4924
- Wang J H, Zhang L Y. 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. *J Climate*, 21(10): 2218-2238
- Wang X L, Wen Q H, Wu Y H. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *J Appl Meteor Climatol*, 46(6): 916-931
- Zhai P M, Eskridge R E. 1996. Analyses of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series. *J Climate*, 9(4): 884-894
- Zhao T B, Dai A G, Wang J H. 2012. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset. *J Climate*, 25(13): 4549-4567
- Zhao T B, Wang J H, Dai A G. 2015. Evaluation of atmospheric precipitable water from reanalysis products using homogenized radiosonde observations over China. *J Geophys Res*, 120(20): 10703-10727, doi: 10.1002/2015JD023906