

# 华云高精度导航探空仪在甘肃庆阳干旱气候夏季的温湿数据对比分析

杨加春<sup>1</sup> 钱媛<sup>2</sup> 徐洁<sup>1</sup> 李庆军<sup>1</sup>

(1 华云升达(北京)气象科技有限责任公司, 北京 100081; 2 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘要:** 以美国国家环境预报中心(NCEP)的FNL(Final)分析场为对比场, 分析评估甘肃庆阳地区2017年5—9月的探空温湿数据的质量。通过分析, 得出结论: 1) 探空的温度数据质量较高, 表现了很好的一致性, 细微结构清晰, 误差基本在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内; 2) 探空的湿度数据质量较好, 一致性相对温度略差, 误差基本在 $\pm 10\%$ 以内, 夜间偏湿, 下午偏干; 3) 无论是温度数据还是湿度数据, 它们的观测余差都随气压减小呈现先增加后减小的趋势; 4) 无论是温度还是湿度, 02时误差最小, 数据质量最佳, 08时和14时的质量相当。

**关键词:** 高精度探空仪, 温湿数据, 误差分析

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.06.007

## Analysis of Temperature and Humidity Data of Huayun High Accuracy Navigation Radiosonde in Arid Climate Summer in Qingyang, Gansu Province

Yang Jiachun<sup>1</sup>, Qian Yuan<sup>2</sup>, Xu Jie<sup>1</sup>, Li Qingjun<sup>1</sup>

(1 Huayun Shengda (Beijing) Meteorological Technology Co., Ltd., Beijing 100081; 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** In this paper, the quality of sounding data for the period from May to September 2017 in Gansu Qingyang region was analyzed and evaluated by comparing with the background of FNL analysis fields of NCEP in the United States. The conclusions are drawn as follows: (1) the temperature data of soundings are of high quality and show good consistency. The detailed structure is clear and the error is within  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ; (2) the humidity data of soundings are of good quality, their consistency is slightly worse than that of the temperature, and the error is basically within  $\pm 10\%$ , with wet at night, dry in the afternoon; (3) whether it is temperature data or humidity data, their observed residuals show a trend of increasing first and then decreasing with decreasing pressure; (4) no matter the temperature or humidity, the error is the smallest at the 2 o'clock and the data quality is the best. The quality is comparable at 08 o'clock and 14 o'clock.

**Keywords:** high-precision radiosonde, temperature and humidity data, error analysis

### 0 引言

高空气象观测作为综合气象观测的重要组成部分, 常用来表征大气物理状态的相对真值, 描述高空大气的天气和气候变化<sup>[1]</sup>, 其不仅要满足天气分析和数值预报的需要, 还要满足气候变化监测的需要<sup>[2-5]</sup>。探空观测资料对大气遥感真实性检验和校准的基准作用无可替代, 是风廓线、GNSS/MET水汽观测等高空遥感设备的相对比参考标准<sup>[6-9]</sup>。探空观测资料还可以作为评估卫星反演的大气温湿度廓线的基准应用于卫星资料的检验与评估<sup>[10-14]</sup>。

高空的温湿度观测在天气分析和资料同化预报中起着重要作用, 特别在强对流天气预报中是必不可少的参考资料之一<sup>[15-16]</sup>。近年来与气候相关的研究, 特别是对低温低湿的对流层上部和平流层下部的研究中, 温湿度探空数据的准确度起着举足轻重的作用<sup>[17]</sup>。

无线电探空仪是当前科研和气象领域中广泛使用的一种高空气象探测设备<sup>[18]</sup>。为了获得更精确的高空气象要素资料, 探空仪一直在不断地更新。20世纪初, 苏联研制出了世界上最早的可用在气象业务上的探空仪; 芬兰Vilho Vaisaia教授于1931年发明了无线电探空仪; Vaisaia公司在21世纪初研制出了采用GPS模式工作的数字化无线电探空仪RS92, 自此, 在

收稿日期: 2018年6月1日; 修回日期: 2018年10月19日  
第一作者: 杨加春(1982—), Email: yangjiachun@cnhyc.com

Vaisaia公司的引领下,全球无线电探空仪行业进入了全数字化探测时代<sup>[19]</sup>;我国从20世纪中后期便开始了探空仪的引进和研发等相关工作<sup>[20]</sup>,与世界气象组织(WMO)其他成员国相比,我国在平流层以下区域气象探测的核心技术还比较落后<sup>[21]</sup>。目前,世界上各个国家都在积极投入到可用于探测平流层及以下海拔高度气象要素的无线电探空仪设备的研究工作中。华云公司自2000年开始,承担并完成了中国气象局第一套GPS探空系统的研制和试验;2008年开始参加中国气象局的多次考核测试,并在2010年代表中国气象局参加了WMO举办的第八屆全球高精度探空仪比对;2014年完成了北斗探空仪的研制和试验考核。

NCEP/NCAR再分析项目是美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)的合作项目,对于NCEP/NCAR再分析资料的可信度和质量问题,国内外许多学者用不同的方法,对不同地区,从不同角度对各种要素进行了分析和比较<sup>[22-26]</sup>。

FNL(Final)是NCEP的一种再分析资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间间隔为6 h。它充分同化了尽可能全面的观测资料,不仅可以为气象模式、气候模式提供初始场<sup>[27]</sup>,而且用于暴雨<sup>[28-29]</sup>、暴雪<sup>[30-31]</sup>和强寒潮<sup>[32]</sup>等天气过程及气候<sup>[33]</sup>的诊断分析研究。整体上,FNL非常可靠,且时空分辨率相对较高,可以作为约定真值评估观测数据。

新型探空仪的出现,是否代表着更准确的高空气象资料,需要对其探测数据的质量进行评估。本文采用模式验证法,利用NCEP的FNL分析场为对比场,对华云高精度导航探空仪的温湿数据质量进行比对分析。

## 1 高精度导航探空仪简介

### 1.1 导航探空仪组成

导航探空仪主要由导航定位模组、400 MHz无线电发射模组、TPU测量模组等几个主要部分组成,其结构框图如图1所示。

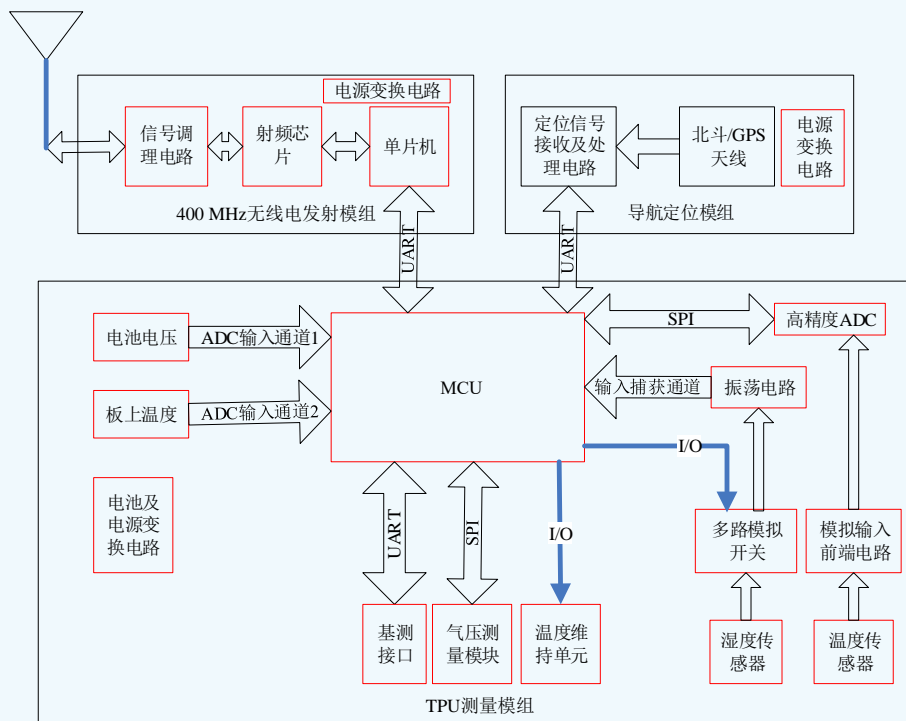


图1 导航探空仪组成框图

Fig. 1 Block diagram of the navigation radiosonde

利用导航定位模组进行空间实时定位,测定气球在高空大气中随时间漂移的速度与方向,从而计算出高空大气的风向、风速;利用气压、温度、湿度(PTU)传感器实时测量大气的气象要素;利用400 MHz无线电发射机将定位数据和PTU数据发送到地面接收系统。

### 1.2 温湿传感器特点

高精度导航探空仪温度传感器采用 $\phi=0.6$  mm珠状热敏电阻,表面采用真空镀铝工艺涂覆防辐射层。而现行业务使用GTS1型探空仪采用棒状热敏电阻,表面涂覆白漆。传感器的响应时间、测量准确度、防辐射能力均比业务所用探空仪有了较大的提升。

高精度导航探空仪湿度传感器采用高分子薄膜湿敏电容，相比GTS1型探空仪采用的碳膜湿敏电阻，具有低温响应快、全程测量准确度高的特点。

## 2 数据与方法

本次试验针对的是甘肃庆阳地区2017年5—9月利用华云高精度导航探空仪探测所得温湿数据。试验3个月内共计施放天数为48 d，施放探空仪96个，分别是：2017年5月23—27日，共计5 d，施放10个探空仪，施放时次为每日02时、08时；2017年6月30日20时—7月31日14时，共计32 d，施放65个探空仪，施放时次为7月1—13日每日02时、08时，7月14—31日每日08时、14时；2017年8月31日20时—9月10日，共计11 d，施放21个探空仪，施放时次为每日08时、14时。

选取相同时间段FNL的02时、08时和14时温湿数据对探空数据进行误差分析。首先，将对比场的格点资料插值为站点资料，选择其甘肃庆阳位置的对比场数据；然后，根据对比场具有的等压面（FNL资料共有31层等压面，从1000 hPa至1 hPa）和庆阳站的实际情况（台站海拔：1240 m；地面气压：880 hPa左右；高层一般探空仪抵达10 hPa左右），选取850~10 hPa的等压面，提取探空资料中相应等压面的数据进行误差分析。即以FNL的温湿数据为约定真值，求出被评

估探空仪测量值和参考标准的差，称为观测余差，对观测余差按照规定等压面分层进行平均偏差和标准偏差（贝塞尔函数）统计分析。

## 3 试验结果分析

### 3.1 温度误差分析

#### 3.1.1 温度的观测余差分析

以FNL分析资料为对比场，对甘肃庆阳探空站2017年5—9月华云高精度导航探空仪的温度资料进行误差分析。图2a是2017年5月26日（以这个日期的02时为例进行分析，代表夜间情况）02时的模式和观测温度廓线（图2a左侧图）和观测余差廓线（图2a右侧图）。由图2a可知，探空观测温度和FNL温度的趋势一致，逆温结构和一些小细节都有很好的跟随性；850~350 hPa的探空温度和模式温度基本重合，50 hPa以上也基本重合，350~50 hPa，探空温度以模式温度为轴，有微小波动。观测余差基本集中在±1 °C以内，大部分集中在±0.5 °C之间，偶尔有超过2 °C的观测余差存在。

由2017年7月10日（以这个日期的08时为例进行分析，代表上午情况）08时的模式和观测温度廓线和观测余差廓线（图2b）可以发现，与5月26日02时相同，探空观测温度和FNL温度一致性较好，逆温结构

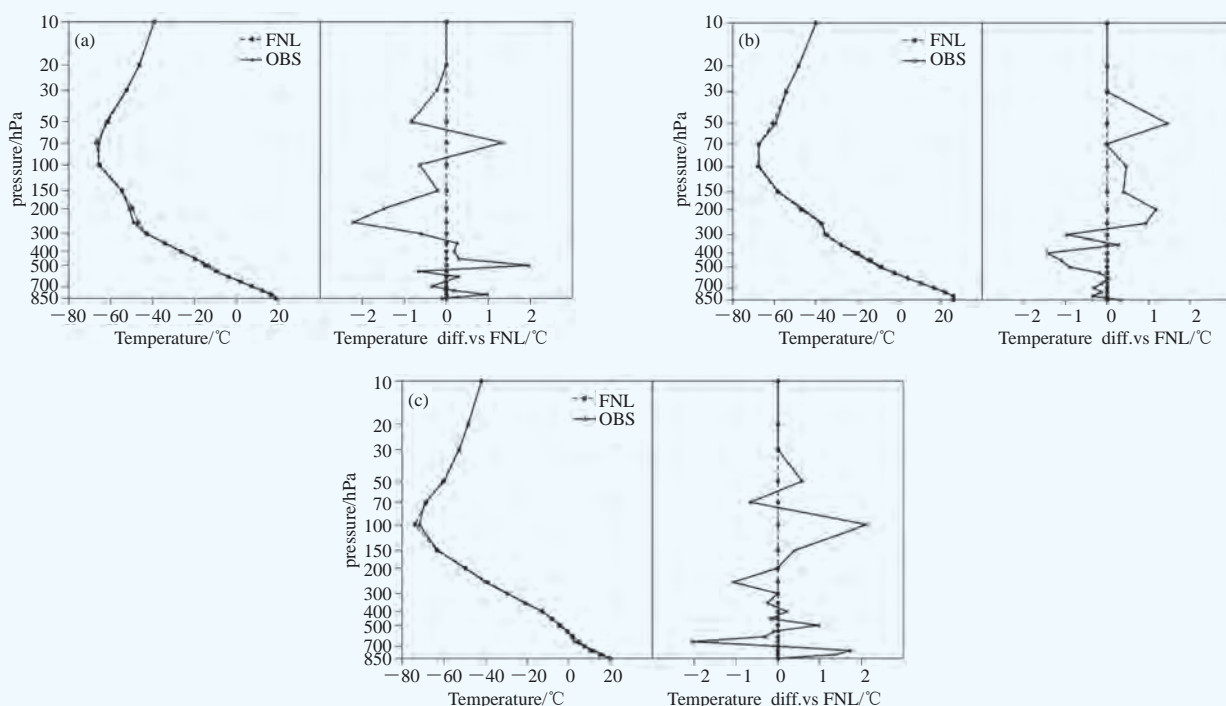


图2 模式和观测的温度廓线和观测余差廓线

(a) 2017年5月26日02时 (UTC)，(b) 2017年7月10日08时 (UTC)，(c) 2017年9月8日14时 (UTC)

Fig. 2 The temperature profiles of the model and observation and observed residual error profiles on (a) 26 May, 2017 02 UTC, (b) 08 UTC 10 Jul 2017, and (c) 14 UTC 8 Sep, 2017

和一些小细节都有很好的跟随性；与5月26日02时不同的是，7月10日08时所有等压面的模式温度和观测温度基本重合。相同地，观测余差基本集中在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内，大部分集中在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间，但此时 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间的观测余差相对较多。

图2c是2017年9月8日（以这个日期的14时为例进行分析，代表下午情况）14时的模式和观测温度廓线和观测余差廓线，可以发现，与图2a和2b相似，探空观测温度和FNL温度的趋势一致，逆温结构和一些小细节都有很好的跟随性；800~700 hPa和150 hPa以上的观测温度相比模式温度有微小波动，其余等压面两者基本重合。观测余差基本集中在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内，大部分集中在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间，偶尔有超过 $2^\circ\text{C}$ 的观测余差存在。

### 3.1.2 温度的整体误差分析

按照02时、08时、14时将数据分段，分别对以FNL资料为对比场的温度观测余差的平均偏差和标准偏差进行分析。图3是三个时刻温度的平均偏差廓线和标准偏差廓线，可以发现，三个时刻平均偏差大部分在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内，以正偏差为主，负偏差较少；300~30 hPa的平均偏差主要集中在 $0.5\sim 1.5^\circ\text{C}$ 之间；平均偏差呈现随气压减小先增加后减小的趋势。三个时刻相比，02时的平均偏差最小，整个高度层都基本在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内；其次是08时的平均偏差较小。三个时刻的标准偏差基本集中在 $0.4\sim 1.6^\circ\text{C}$ ；整体上，三个时刻的标准偏差基本一致，除70~30 hPa 08时的标准偏差突变，变得异常大。结合平均偏差一起分析可以得出结论，三个时刻中，02时的温度误差最小，即夜间的温度数据质量最高；08时和14时的质量相当，在太阳辐射的防护和修正方法上可以具有进一步提高的空间。

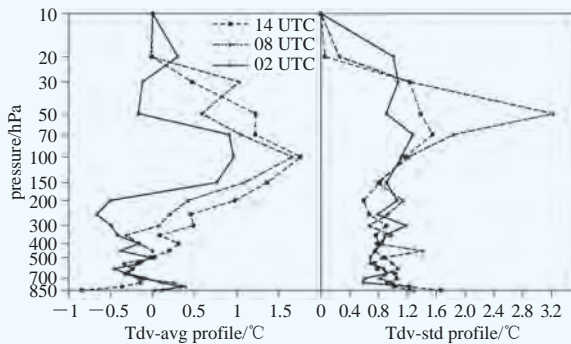


图3 基于FNL的温度平均偏差廓线和标准偏差廓线  
Fig. 3 The average deviation profile and the standard deviation profile of temperature based on FNL

结合单个时刻的温度一致性，观测余差、平均偏差和标准偏差分析，发现华云高精度导航探空仪探

测所得的温度数据质量较高，误差基本在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内，且随气压减小呈现先增加后减小的趋势。02时、08时和14时相比，02时的温度数据质量最高，剩下两个时刻质量相当。

## 3.2 湿度误差分析

### 3.2.1 湿度的观测余差分析

以FNL分析资料为对比场，对甘肃庆阳探空站2017年5—9月华云高精度导航探空仪的湿度资料进行误差分析。图4a是2017年5月27日（以这个日期的02时为例进行分析，代表夜间情况）02时的模式和观测湿度廓线（图4a左侧图）和观测余差廓线（图4a右侧图）。由图4a可知，相比温度数据，探空观测湿度和FNL湿度一致性略差；整体上，观测湿度呈现偏湿的

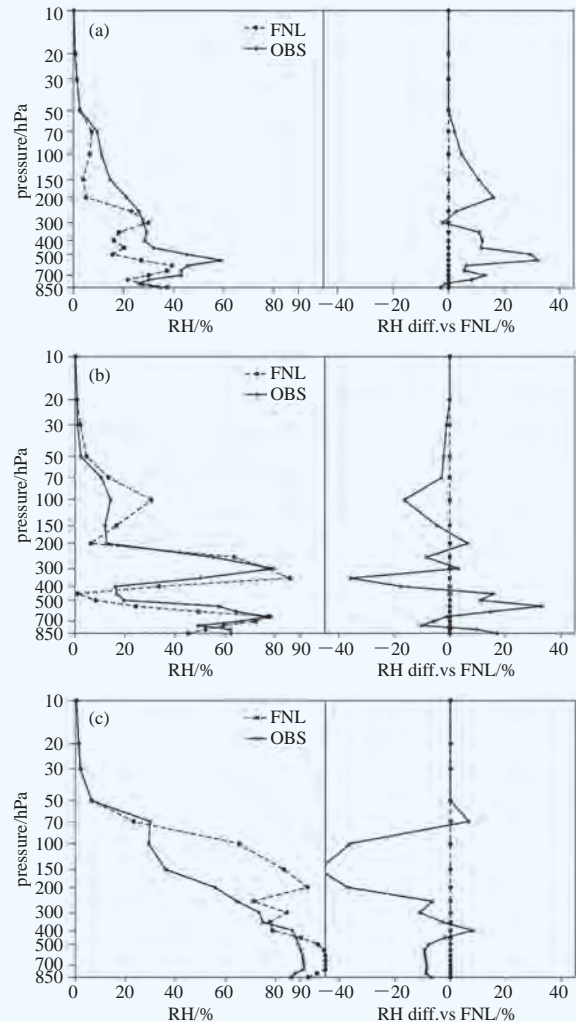


图4 模式和观测的相对湿度廓线和观测余差廓线  
(a) 2017年5月27日02时 (UTC)，(b) 2017年7月3日08时 (UTC)，(c) 2017年9月4日14时 (UTC)  
Fig. 4 Profiles of relative humidity from the model and observation and observed residual error on (a) 02 UTC 27 May, 2017, (b) 08 UTC 3 Jul, 2017, and (c) 14 UTC 4 Sep, 2017

情况较多，偏干情况极少；50 hPa以上，由于湿度较小，探测误差也很小，两者基本重合。观测余差基本集中在±20%以内，大部分集中在±10%之间，偶尔有超过20%的观测余差存在。

分析2017年7月3日（以这个日期的08时为例进行分析，代表上午情况）08时的模式和观测湿度廓线和观测余差廓线（图4b），可以得出，与上个时次相比，探空观测湿度和FNL湿度一致性相对较好，但仍然弱于温度一致性；相比模式湿度，观测湿度时而偏干，时而偏湿，对应的等压面在不同时刻有不同的表现。相同地，观测余差基本集中在±20%以内，大部分集中在±10%之间，但此时±10%之间的观测余差相对较多。

图4c是2017年9月4日（以这个日期的14时为例进行分析，代表下午情况）14时的模式和观测湿度廓线和观测余差廓线。由图可知，探空观测湿度和FNL湿度的一致性相比08时差，与02时相当；整体上，观测湿度呈现偏干的情况较多，偏湿情况极少，与02时刚好相反；其余特征基本和02时的湿度误差特征相同，除正负相反以外。

### 3.2.2 湿度的整体误差分析

使用与温度误差分析相同的方法分析湿度的平均偏差和标准偏差。图5是三个时刻湿度的平均偏差廓线和标准偏差廓线。由图可知，三个时刻平均偏差大部分在±10%以内，大部分为正偏差，300~50 hPa 08时和14时为较大的负偏差；平均偏差呈现随气压减小先增加后减小的趋势。三个时刻相比，02时的平均偏差相对较小，整个高度层都基本在±10%以内；其次是08时的平均偏差较小。三个时刻的标准偏差基本集中在0~30%；整体上，三个时刻的标准偏差基本一致，02时相对较小。结合平均偏差一起分析可以得出结论，三个时刻中，02时的湿度误差最小，即夜间的湿度数据质量最高；08时和14时的质量相当。但在对

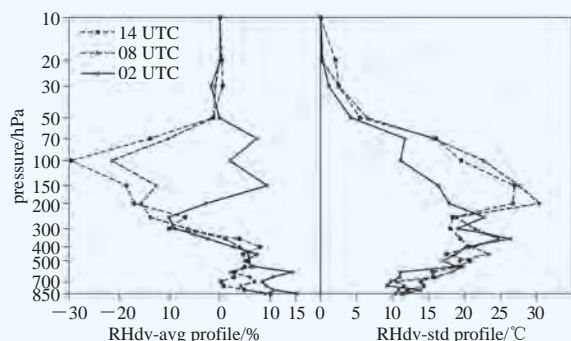


图5 基于FNL的湿度平均偏差廓线和标准偏差廓线  
Fig. 5 The average deviation profile and the standard deviation profile of relative humidity based on FNL

流层顶的湿度测量偏差较整体而言有变大的趋势，在此范围内的探测性能还有进一步提高的空间。

结合单个时刻的湿度一致性，观测余差，平均偏差和标准偏差分析，华云高精度导航探空仪探测所得的湿度数据质量相对较好，误差基本在±10%范围内，且随气压减小呈现先增加后减小的趋势。02时、08时和14时相比，02时的湿度数据质量最高，剩下两个时刻质量相当。三个时刻中，夜间偏湿，下午偏干，早晨偏干和偏湿的等压面相当。

## 4 小结

本文以NCEP的FNL分析资料为对比场，对甘肃庆阳探空站使用华云高精度导航探空仪探测的温湿度数据从观测余差、平均偏差、标准偏差进行误差分析，得出以下结论：

1) 从观测余差（实时）角度分析：华云高精度导航探空仪探测所得的湿度数据质量较高，误差基本在±0.5 °C以内；湿度数据质量相对较好，误差基本在±10%之间；无论是温度数据还是湿度数据，它们的观测余差都呈现随气压减小呈现先增加后减小的趋势；湿度数据在夜间偏湿，下午偏干。

2) 季度参数（非实时）角度分析：从平均偏差、标准偏差两个角度对误差的特点和分布特征进行分析评估，整体上，温度数据质量较高，平均偏差大部分在±0.5 °C内，以正偏差为主，负偏差较少，且平均偏差呈现随气压减小先增加后减小的趋势；探空湿度的平均偏差大部分在±10%内，大部分为正偏差。三个时刻相比，无论是温度还是湿度，02时误差最小，数据质量最佳，08时和14时的质量相当，需要更详细的分析来确定。

### 参考文献

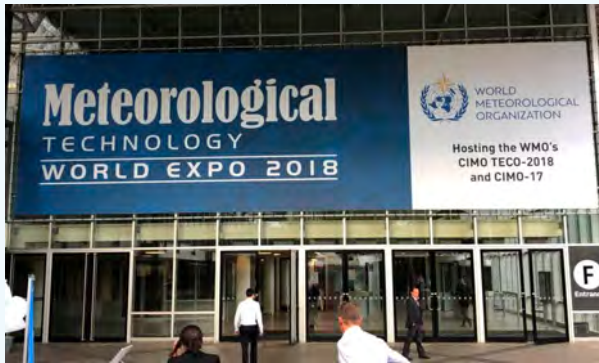
- [1] 王英,熊安元. L波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响. 应用气象学报, 2015, 26(1): 76-86.
- [2] 李伟,张春晖,孟昭林,等. L波段气象探测网运行监控系统设计. 应用气象学报, 2010, 21(1): 115-120.
- [3] 李伟,赵培涛,郭启云,等. 国产GPS探空仪国际比对试验结果. 应用气象学报, 2011, 22(4): 453-462.
- [4] 郭启云,李伟. L波段雷达探空系统气压测量值与气压反算气压值的误差分析. 气象水文海洋仪器, 2013, 3(1): 9-13.
- [5] 刘超,花丛,张恒德,等. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用. 气象, 2017, 43(5): 591-597.
- [6] 蔡兆男,王永, Liu Xiong等. 利用探空资料验证COMET卫星臭氧数据. 应用气象学报, 2009, 20(3): 337-345.
- [7] 彭艳秋,王卫国,刘煜,等. 利用不同资料研究我国大陆上空柱水汽含量. 应用气象学报, 2012, 23(1): 59-68.
- [8] 吴蕾,陈洪滨,康雪. 风廓线雷达与L波段雷达探空测风对比分析. 气象科技, 2014, 42(2): 225-230.
- [9] 赵静,曹晓钟,代桃高,等. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析. 气象, 2017, 43(1): 101-107.
- [10] 朱元亮,李万彪,陈勇. GMS-5估计可降水量的研究. 应用气象学报, 1998, 9(1): 8-14.
- [11] 孙学金,赵世军,余鹏. GPS掩星切点水平漂移规律的数值研究.

- 应用气象学报, 2004, 15(2): 174-180.
- [12] 杜明斌, 杨引明, 丁金. COSMIC反演精度和有关特性的检验. 应用气象学报, 2009, 29(5): 586-593.
- [13] 王洪, 曹云昌, 肖稳安. COSMIC掩星数据与L波段探空数据的对比分析. 气象, 2010, 36(9): 14-20.
- [14] 徐桂荣, 乐新安, 张文刚, 等. COSMIC掩星资料反演青藏高原大气廓线与探空观测的对比分析. 暴雨灾害, 2016, 35(4): 315-325.
- [15] 李佳英. 利用高分辨率中尺度模式和地基GPS资料构造高时空分辨率的大气湿度廓线. 北京: 中国气象科学研究院硕士学位论文, 2006.
- [16] 郝氏, 龚建东, 王瑞文, 等. 中国L波段探空湿度观测的质量评估及偏差订正. 气象学报, 2015, 73(1): 187-199.
- [17] 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁. PMFT方法对我国年平均风速的均一性检验. 气象, 2010, 36(10): 52-56.
- [18] 袁媛, 唐慧强. 微型气象探空仪的系统设计. 仪表技术与传感器, 2009(1): 35-37.
- [19] 李伟, 邢毅, 马舒庆. 国产GTS1探空仪与Vaisala公司RS92探空仪对比分析. 气象, 2009, 32(10): 97-102.
- [20] 孙凯. 探空式气象检测微系统的应用与研究. 南京: 东南大学硕士学位论文, 2006.
- [21] 李伟, 房岩松, 王珺, 等. 芬兰Vaisala公司RS92探空仪测量结果不确定度分析. 中国仪器仪表与测控技术大会, 2009.
- [22] 苏志侠, 吕世华, 罗四维. 美国NCEP/NCAR全球再分析资料及其初步分析. 高原气象, 1999, 18(2): 209-218.
- [23] 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. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337-347.
- [24] 秦育婧, 王盘兴, 管兆勇, 等. 两种再分析资料的Hadley环流比较. 科学通报, 2006, 51(12): 1469-1473.
- [25] 赵天保, 符淙斌. 几种再分析地表气温资料在中国区域的适用性评估. 高原气象, 2009, 28(3): 594-606.
- [26] 田笑, 智协飞, 徐海明. NCEP和JRA再分析资料与探空资料的位势高度比较分析. 干旱气象, 2013, 31(2): 254-262.
- [27] 王金兰, 寿绍文, 刘泽军, 等. 河南省一次大雾的数值模拟及生消机制分析. 气象与环境科学, 2008, 31(1): 39-44.
- [28] 王君, 康雯琪, 张霞, 等. 一次台风倒槽暴雨过程的螺旋度分析. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 25-30.
- [29] 张广周, 李戈, 白家惠, 等. 不同高度急流耦合在2007年7月中旬河南省区域暴雨中的作用. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 7-12.
- [30] 鲁坦, 乔春贵, 谷秀杰, 等. 河南省一次区域暴雪和雾凇天气分析. 气象与环境科学, 2007, 30(增刊): 86-89.
- [31] 闫淑莲, 周淑玲, 刘澈. 山东半岛一次区域性暴雪天气过程分析. 气象与环境科学, 2007, 30(增刊): 102-106.
- [32] 闫小利, 余锦华, 刘谦, 等. 河南省一次强寒潮天气诊断分析. 气象与环境科学, 2008, 31(1): 60-65.
- [33] 郑永光, 张春喜, 陈炯, 等. 用NCEP资料分析华北暖季对流性天气的气候背景. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(5): 600-608.

## 2018世界气象科技博览会在荷兰举办

■ 于 晋

2018年10月9—11日, “2018世界气象科技博览会 (Meteorological Technology World Expo 2018)” 在荷兰阿姆斯特丹RAI国际展览中心举办。



世界气象科技博览会是目前最大的国际商业气象交流平台, 并已成功举办了八届, 此次包括九家中国企业在内共有来自全球200余家气象行业企业参展。展会同期, 世界气象组织 (WMO) 的仪器和观测方法委员会 (CIMO) 技术会议在同场地会议室召开, 并举行了多场专业论坛, 全球气象仪器和观测方法研究专家、气象设备供应商、WMO官员等齐聚一堂, 共同交流探讨气象观测新方法、新技术的发展和变化。

世界气象科技博览会由英国 UKi Media & Events 公司下属的气象技术出版社主办, 每年一届, 也是迄今举办

的最成功的商业气象交流平台。参展商领域涉及气象设备供应、航空业、运输业、航海/港口设备、飞机场、军事运营商、离岸勘探公司、农业运营商等。



华云集团作为中国气象科技的领军企业, 继2017年首次参加并取得不错反响和收获后, 2018年再次携带观测系统整体解决方案参展, 同国际一流气象装备厂商交流技术创新成果, 探讨气象观测科技发展趋势。

2019年世界气象科技博览会将于2019年6月5—7日在瑞士日内瓦举办, 届时将会再次带来气象科技的最新信息。

(作者单位: 中国华云气象科技集团公司)