

余君,李庆祥,廖捷,等. 2016. 中国区域高空三种气温、湿度资料交叉对比. 气象,42(6):743-755.

# 中国区域高空三种气温、湿度资料交叉对比<sup>\*1</sup>

余 君<sup>1</sup> 李庆祥<sup>2</sup> 廖 捷<sup>2</sup> 牟 容<sup>3</sup> 李奇临<sup>1</sup>

1 重庆市气象信息与技术保障中心,重庆 401147

2 国家气象信息中心,北京 100081

3 重庆市气象台,重庆 401147

**提 要:** 本文对比分析了 2011—2013 年中国区域 L 波段探空气温、湿度廓线, COSMIC 掩星气温、湿度廓线和 ERA-Interim 再分析资料的气温、湿度廓线之间的差异。对比显示,从时间变化来看,三者之间有很好的正线性相关关系。除 10 hPa 以上的少数层次外,三种气温资料之间互相吻合较好,彼此偏差范围在  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  之间,偏差标准差在  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ , 对流层中高层, L 波段探空气温受太阳辐射影响较大,气温偏高,与 COSMIC 相比, L 波段探空偏高最高可达到  $0.64^{\circ}\text{C}$ 。而对于相对湿度,三种数据存在明显差异。对流层中低层到对流层顶 L 波段探空存在不同程度的偏干,且有较明显的昼夜、季节和区域差异:白天、春夏季和南方潮湿气候区域偏干更明显。一般来说,在对流层顶附近区域, L 波段探空相对湿度偏干较明显, 200 hPa 附近及以上 L 波段探空相对湿度转为偏湿。在对流层顶以下, L 波段探空与 COSMIC 掩星、ERA-Interim 再分析相对湿度具有明显的正相关, 对流层顶以上表现为负相关。

**关键词:** L 波段探空, COSMIC, ERA-Interim, 气温, 相对湿度

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.010

## Cross Comparison of Three Kinds of Upper Air Temperature and Humidity Data over China

YU Jun<sup>1</sup> LI Qingxiang<sup>2</sup> LIAO Jie<sup>2</sup> MU Rong<sup>3</sup> LI Qilin<sup>1</sup>

1 Chongqing Meteorological Information and Technical Support Centre, Chongqing 401147

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

**Abstract:** In this study, the differences of temperature and humidity profiles over China obtained from L band sounding system, COSMIC occultation observation system and ERA-Interim reanalysis data during the period 2011—2013 are compared. Time series comparisons show a good positive linear correlation among these three data sets. In addition to a few levels above 10 hPa, L band, COSMIC occultation and ERA-Interim reanalysis temperature data accord well with each other, with the temperature bias ranging within  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ , and the standard deviation between  $1^{\circ}\text{C}$  and  $2^{\circ}\text{C}$ . L band temperature is higher due to the great influence by solar radiation in the middle to upper troposphere, with the maximum bias of  $0.64^{\circ}\text{C}$  when compared with COSMIC occultation. As for relative humidity, things are strikingly different. L band relative humidity data exhibit a varying degree of dry bias between the lower troposphere and the upper troposphere. Moreover, there are obvious diurnal, seasonal and climate regional differences, and the differences become even more evident during daytime, spring/summer period, and over south moisture climate areas. Generally, the dry bias is more obvious in the region near the top of troposphere; L band rela-

\* 国家科技支撑项目(2012BAC22B05)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206028)共同资助

2015 年 8 月 14 日收稿; 2016 年 1 月 7 日收修定稿

第一作者:余君,主要从事气候资料及气候变化研究. Email:107103214@qq.com

tive humidity turns to wet bias at above 200 hPa atmospheric pressure layer. L band and COSMIC occultation sounding relative humidity, ERA-Interim relative humidity have positive correlations obviously below the top of troposphere. Nevertheless, there is a negative correlation above the tropopause.

**Key words:** L band sounding, COSMIC, ERA-Interim, temperature, relative humidity

## 引 言

天气和气候相关的研究需要高质量和高分辨率的天气观测要素,例如气温、气压、湿度和风(World Meteorological Organization, 2008)。当前,大气气温、气压、水汽数据的获取来自于各种各样的探测,包括无线电探空、飞机探测以及各种卫星探测。

无线电探空已经提供了固定地点长期和全天候大气气压、气温和湿度的测量,这些测量达数十年,已经成为数值天气预报和气候监测的支柱观测系统(Dabberdt et al, 2002; 郝民等, 2014)。然而,因为无线电探空传感器特性可能被不断变化的环境影响(Elliott et al, 1991; Luers et al, 1998),其测量精度随时间、地点以及传感器的类型变化很大(Wang et al, 2008),更为重要的是,高空气象条件千变万化,对仪器观测的准确性也带来相当大的挑战。同时,由于探空站需要选择合适的地理位置以及花费较高的操作和维护费用,因此探空仪探空覆盖范围有限、时空分辨率较低。目前在中国区域内,正在运行的探空站大约 120 个,一天仅观测 2 次,部分台站一天观测 4 次,这远不能满足气象业务和科研的需求。在偏僻区域,如沙漠、海岛等无人区,由于台站运行和维护的难度,该现状很难改变。

近年来,全球导航卫星系统(global navigation satellite systems, GNSS)的发展,如美国 GPS(global positioning system)、俄罗斯 Glonass、欧洲 Galileo 和中国北斗,为气象研究提供了令人激动的发展潜力(Fu et al, 2007; Yunck et al, 2000)。来自 GPS 的 CORS(continuously operating reference stations)网络能不间断自动监测并反演得到大气水汽信息(Rocken et al, 2005)。GPS 掩星技术(GPS radio occultation, GPS RO)是另一个基于 GPS 的技术,该技术利用近地轨道(low earth orbit, LEO)卫星上的 GPS 接收机探测地球大气和电离层。

随着探测技术的发展,虽然探测的精度和准确

性不断加强,但历史资料和现有资料存在明显的差异(李庆祥, 2011; 翟盘茂, 1997)。因此,加强各个阶段的探测资料对比分析,对于做好各类资料的质量控制,为研究与业务用户提供更高质量的资料具有重要的意义。L 波段探空资料已经业务实施,很多研究针对其使用需求进行了一定的分析(姚爽等, 2015; 苑跃等, 2014),但对 L 波段探空还没有开展系统的质量控制。本文利用 2011—2013 年中国地区 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料的气温和水汽数据,按照影响 L 波段探空气温、相对湿度探测的一些因素进行分类对比分析,力图寻找 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星和 ERA-Interim 资料的差异和一致性,以便于寻找利用这些数据对 L 波段探空资料进行质量评估和订正的理论依据,对于我国探空资料的业务应用、均一性研究以及 L 波段探空资料质量的进一步提高等都有重要的业务和科研价值。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

#### 1.1.1 L 波段探空资料

本文比较所用 2011 年 1 月至 2013 年 12 月期间中国 120 个业务运行探空站 00 和 12 时(世界时,下同)两个时次的 L 波段探空秒数据。资料来源于国家气象信息中心,开展统计对比前,对温度和相对湿度进行了极值检查,剔除了明显不合理的观测数据。此外,针对我国 L 波段探空秒数据较为常见的传感器失灵、业务软件自动将湿度赋值为 2% 的问题(李伟等, 2009),本文采用经验性做法,直接剔除了湿度在 300 hPa 以下长时间持续维持在 2% 的观测记录,以降低出云时探空湿度传感器失灵可能对统计结果导致的影响。我国从 2000 年开始推广使用最新一代的 L 波段探空系统,以替代原有的 59 型探空仪,到目前为止,已覆盖全国。对 L 波段探

空系统观测数据的质量,已经有了不少研究。2004年WMO公布的探空仪测量精度则表明,L波段探空仪的整体精度比59型探空仪有显著的提高(Li, 2006)。此后一些研究人员认为:L波段探空仪与芬兰Vaisala公司的RS80探空仪的精度相当(姚雯等,2009),在综合性能上还略低于Vaisala公司的RS92探空仪(李伟等,2009)。张聪娥等(2010)分析了探空站换型前后的观测数据则表明:59型探空仪和L波段探空仪的相对湿度和露点温度观测值有比较大的差异,并且L波段探空仪的湿度数据误差更大。王英等(2015)也通过分析L波段探空仪器换型前后的资料发现,换型后,相对湿度探测值较换型前显著降低,表现为明显的干偏差。陶士伟等(2006)从数据应用角度分析表明,L波段探空的气

温观测误差是59型探空仪的四分之一,更对L波段探空仪的资料做出了肯定。但一些研究者也注意到L波段探空相对湿度观测在对流层中低层常出现深厚的相对湿度极度低值区(唐南军,2013)。图1给出了三亚站(59948站)2012年2月27日00时和2013年10月8日00时的相对湿度廓线分布。2月27日00时湿度廓线在600 hPa高度后相对湿度迅速下降到一个极低的值(2%),并在该高度以上相当长的时间内保持不变,甚至到探空观测结束;而10月8日00时湿度廓线于600 hPa湿度变得异常低值后在接近500 hPa后又有所恢复,但到400 hPa以后又再次变为异常低值,这种情形,显然和我们对于高空湿度分布的认识是不一致的,和唐南军(2013)的结论较为类似。

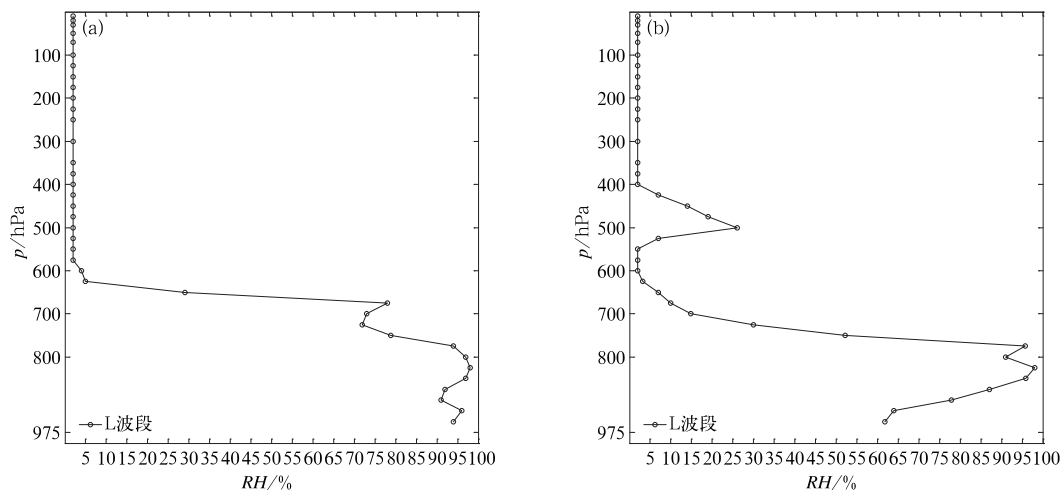


图1 59948站相对湿度探测出现异常的个例

(a)2012年2月27日00时,(b)2013年10月8日00时

Fig. 1 An abnormal example of relative humidity at the Station 59948

(a) 00:00 UTC 27 February 2012, (b) 00:00 UTC 8 October 2013

### 1.1.2 COSMIC 掩星资料

本文所使用的COSMIC掩星观测资料,取自COSMIC数据分析和存储中心CDAAC(the COSMIC Data Analysis and Archival Center)。与常规探空相比,掩星探测在时间和空间上有更好的采样分布(Zhang et al, 2011),并具有长期稳定、无需定标、全天候不受天气影响的特点。该资料已经广泛应用于气候变化监测及改进数值预报(文伟俊, 2008;赵德显等, 2011)。GPS/MET和CHAMP掩

星反演结果与无线电探空结果对比表明,5~40 km范围内温度相差通常在2 K以内(Anthes et al, 2000)。Ho等(2009)通过研究掩星点距离小于10 km的COSMIC掩星观测反射率差异指出在0~30 km COSMIC气温廓线的精度在0.05℃以内,3~25 km范围内,甚至达到0.02℃。Sun等(2010)通过比较全球的COSMIC大气廓线与探空廓线发现,对于大多数探空仪器来说,在500 hPa以下,探空气温稍高;而从上对流层到50 hPa左右,COS

MIC 气温稍高约  $0.15^{\circ}\text{C}$ 。王洪等(2010)通过对比 2008 年 5 月 20 日至 11 月 26 日的 COSMIC 掩星和 L 波段探空数据认为,在 10 km 高度以下,温度偏差为  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ,水汽压平均偏差为 0.1 hPa;10 km 高度以上,温度偏差为  $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。CDAAC 的数据产品可分为原始数据、反演的大气廓线和与掩星观测对应的再分析数据等。本文选取 COSMIC 掩星反演的湿廓线 wetPrf 数据产品用于对比研究。

### 1.1.3 ERA-Interim 再分析资料

随着大气再分析技术的发展,通过对高空资料的同化、分析技术,再现了近几十年甚至上百年的大气环流的变化特征,为科学研究、业务服务等提供了很好的基础,相比较而言,ERA-Interim 资料在高空大气状态的描述方面明显优于其他再分析资料,在较高层,ERA-Interim 比湿与 COSMIC 比湿最接近;一直到 2 hPa 高度层,ERA-Interim 再分析气温与 COSMIC 均非常接近,其差值近似为 0 (Das et al, 2014; Kishore et al, 2011)。朱彦良等(2012)通过比较 RS92 探空资料与再分析资料发现 ERA-Interim 气温再分析资料与探空资料的相关系数在 1000~250 hPa 接近 1, 250 hPa 以上随高度减小,与探空资料的偏差绝对值基本小于  $0.3^{\circ}\text{C}$ ;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%。ERA-Interim 是由 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 制作的最新的全球大气再分析资料,是 ECMWF 中尺度天气预报全球同化计划的产品,其预测全球大气的

精度仅仅低于理论值 (Simmons et al, 2002)。本文使用的 ERA-Interim 资料是由 CDAAC 提供的经过插值后与 COSMIC 掩星 wetPrf 产品一一对应的 eraPrf 数据产品。

为了进行相对湿度的对比,利用掩星和再分析数据中的气温和水汽压按如下公式计算得到相对湿度数据。根据马格纳斯 (Magnus) 计算饱和水汽压经验式:

$$E_s = E_0 \times 10^{\frac{at}{b-t}} \quad (1)$$

式中,  $E_s$  为温度  $t$  时的饱和水汽压 (单位: hPa);  $E_0$  为温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时的饱和水汽压,通常取  $E_0 = 6.11$  hPa;  $a$  和  $b$  为常数,由于在探空仪测定和计算相对湿度时都是相对水面的,因此常数  $a$ 、 $b$  选取 (对于水面)  $a = 7.63$ ,  $b = 241.9$ 。根据相对湿度式 (2) 即可计算得到掩星和再分析资料的相对湿度廓线:

$$f \approx \frac{e}{E_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $f$  为相对湿度 (单位: %),  $e$  和  $E_s$  分别为空气块实际水汽压和饱和水汽压 (单位: hPa)。

本文中所用资料的相关信息见表 1。在 0~40 km, L 波段探空数据垂直可达几千层, COSMIC 掩星的湿温廓线资料垂直层也可达 400 层, ERA-Interim 再分析数据从 1000 hPa 覆盖到 1 hPa (共 37 层)。为了实现 L 波段探空数据同时和 COSMIC 掩星、ERA-Interim 再分析数据做对比,将 L 波段探空和 COSMIC 掩星气温、湿度廓线用三次样条插值方法插值到 ERA-Interim 再分析资料的标准等压面上。

表 1 研究中所用资料相关信息

Table 1 The information of data used in the study

数据产品	描述	分层数	内容
L 波段探空	探空秒数据	插值到与 eraPrf 层次一样, 37 层	时间、温度、气压、相对湿度等
wetPrf	包含水汽的大气廓线	插值到与 eraPrf 层次一样, 37 层	气温、气压、水汽压、高度等
eraPrf	ERA-Interim 再分析廓线	37 层	气温、气压、水汽压、高度等

## 1.2 对比方法

本文拟按不同条件分别对比 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星和 ERA-Interim 再分析资料的气温、相对湿度数据之间的差异,全面评估他们的偏差情况。COSMIC 掩星探测的水平分辨率大约为

200 km, 在每一条廓线的切向点高度上其水平漂移小于 100 km, 时间间隔几分钟; L 波段探空在气球发射以后, 依赖于风速, 也能漂移数十千米, 时间约 1.5 h。为了更好地对比研究, 选择时间差小于 1.5 h、距离差小于 150 km 范围内的数据进行配对, 分别计算 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和

ERA-Interim 再分析资料之间温度与相对湿度数据的偏差、偏差标准差和相关系数。

本文对三类数据在相同气压层的偏差、偏差标准差以及相关系数进行了对比分析。在对应气压层上,其偏差平均值、偏差标准差以及相关系数分别如式(3)~式(5)所示:

$$\Delta\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Li} - X_{Oi}) \quad (3)$$

$$Std_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((X_{Li} - X_{Oi}) - \Delta\bar{X})^2} \quad (4)$$

$$R_{LO} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{Li} - \bar{X}_L)(X_{Oi} - \bar{X}_O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Li} - \bar{X}_L)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Oi} - \bar{X}_O)^2}} \quad (5)$$

式中, $\Delta\bar{X}$ 、 $Std_{\Delta X}$ 和 $R_{LO}$ 分别为气温或相对湿度的偏差平均值、偏差标准差和相关系数, $X_L$ 为L波段探空气温或相对湿度, $X_O$ 为COSMIC掩星或ERA-Interim再分析气温或相对湿度, $\bar{X}_L$ 为L波段探空气温或相对湿度平均值, $\bar{X}_O$ 为COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温或相对湿度的平均值, $n$ 为参与计算的样本数。

## 2 结果分析

### 2.1 气温

#### 2.1.1 气温偏差的多年平均

研究选取2011—2013年,时间差小于1.5 h、空间差小于150 km的气温廓线,中国区域内匹配的气温廓线一共有5339组。图2分别为L波段探空和COSMIC掩星、Era-Interim再分析气温之间多年的偏差平均值、偏差标准差、相关系数以及参与计算的样本数。从图2a和2b可知,在950 hPa以上,10 hPa以下,L波段探空和COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温之间吻合得非常好,L波段探空和COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温之间的偏差均在 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 之间,而在10 hPa以上,这种偏差迅速增大,在3 hPa时分别达到 $-2.79$ 和 $-3.44^\circ\text{C}$ 。在825~20 hPa,与COSMIC掩星相比,L波段探空气温较高,平均约 $0.19^\circ\text{C}$ ;对于ERA-Interim再分析,在925~100 hPa,L波段探空气温较高,平均也在 $0.19^\circ\text{C}$ 左右。对比L波段探空与

COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温偏差曲线的趋势,两者非常一致,这或许与从2006年12月起,ERA-Interim再分析资料中同化了COSMIC掩星廓线有关。

在整个对流层和平流层,L波段探空和COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温之间的偏差标准差在 $1.0\sim 3.0^\circ\text{C}$ 。L波段探空与COSMIC掩星气温之间的偏差标准差几乎在所有层次更大,在各个层次上相对稳定,而与ERA-Interim再分析气温之间的偏差标准差在650~100 hPa,波动略大。在所有层次上,L波段探空与COSMIC掩星、ERA-Interim再分析气温之间的相关系数都非常大,接近1,最小值也分别达到0.73和0.83(图2c和2d)。

#### 2.1.2 太阳辐射对气温偏差的影响

受太阳辐射的影响,探空气温在不同太阳辐射条件下有不同的表现(He et al, 2009),为了分析这种差异,我们对比不同太阳辐射条件下L波段探空资料与COSMIC掩星资料和ERA-Interim再分析资料气温数据之间的偏差情况。由于太阳高度角与太阳辐射加热有着直接的联系,太阳高度角越大,太阳辐射越大。在此将匹配的L波段探空资料、COSMIC掩星资料、ERA-Interim再分析资料气温数据分成3组,太阳高度角 $<0^\circ$ 、 $0^\circ\sim 10^\circ$ 和 $10^\circ\sim 20^\circ$ ,对比结果见图3。

从图3中可知,10 hPa气压层以下,L波段探空与COSMIC掩星气温之间的偏差非常小,在太阳高度角 $<0^\circ$ 的情况下,偏差在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内,在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 条件下,偏差在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间, $10^\circ\sim 20^\circ$ 时,偏差在 $\pm 0.7^\circ\text{C}$ 以内;在800~20 hPa, $0^\circ\sim 10^\circ$ 、 $10^\circ\sim 20^\circ$ 高度角条件下,相对于COSMIC掩星,L波段探空气温偏高, $<0^\circ$ 高度角条件下,L波段探空气温大多数层次偏高。对比图3a~3c可知,在20 hPa气压层下,太阳高度角越大,气温偏差越大,L波段探空偏高越明显,500 hPa附近达到最大,在三种太阳高度角条件下,分别为 $0.21$ 、 $0.33$ 和 $0.64^\circ\text{C}$ 。L波段探空与ERA-Interim再分析气温的对比也有类似情况,但两者的差值稍小。虽然该对比没有排除探空偏差的热滞后效应,但由于其不依赖于太阳高度角,这说明太阳辐射是造成气温偏差较大的重要原因之一。气温偏差标准差受太阳辐射差异影响不大,20 hPa以下,均在 $1\sim 2.5^\circ\text{C}$ 。

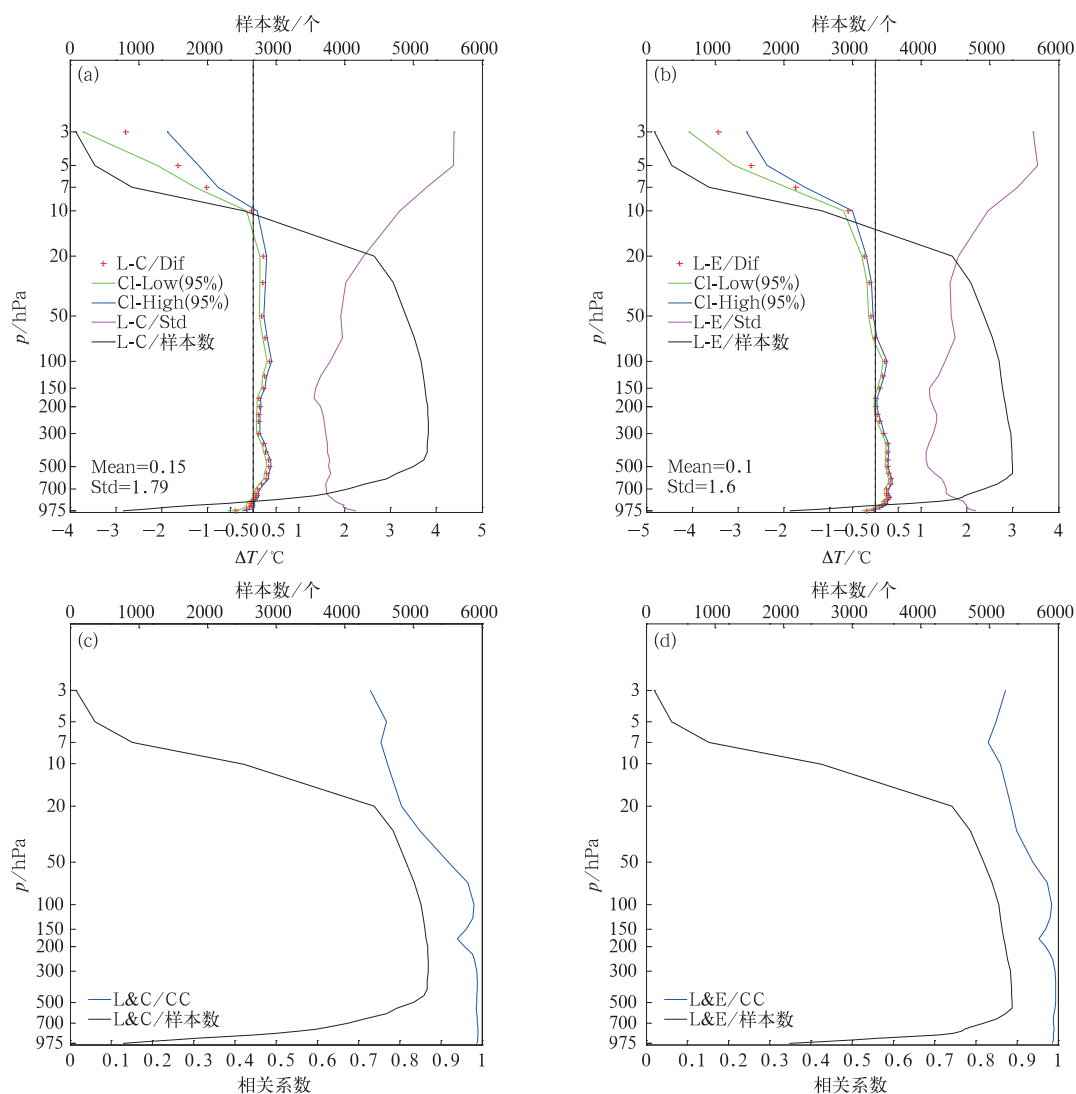


图 2 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料气温数据对比  
 (a) L 波段探空与 COSMIC 掩星偏差, (b) L 波段探空与 ERA-Interim 再分析偏差,  
 (c) L 波段探空与 COSMIC 掩星相关系数, (d) L 波段探空与 ERA-Interim 再分析相关系数

[L-C/Dif, L-C/Std, L-C/样本数, L&C/CC, L&C/样本数分别为 L 波段探空

与 COSMIC 掩星气温的偏差平均值、偏差标准差、对比样本数、相关系数、

对比样本数; L-E/Dif, L-E/Std, L-E/样本数, L&E/CC, L&E/样本数分别

为 L 波段探空与 ERA-Interim 再分析气温的偏差平均值、偏差标准差、对比样本数、

相关系数、对比样本数; CI-High(95%), CI-Low(95%) 分别为置信区间的上、下限]

Fig. 2 Temperature comparison of L band, COSMIC, and ERA-Interim reanalysis data

(a) L band and COSMIC bias, (b) L band and ERA-Interim bias,

(c) L band and COSMIC correlation coefficient,

(d) L band and ERA-Interim reanalysis correlation coefficient

[L-C/Dif, L-C/Std, L-C/sample number, L&C/CC, L&C/sample number refer to bias,

standard deviation, sample number, correlation coefficient and sample number between L band

and COSMIC temperature; L-E/Dif, L-E/Std, L-E/sample number, L&E/CC,

L&E/sample number refer to bias, standard deviation, sample number,

correlation coefficient and sample number between L band and ERA-Interim temperature;

CI-High(95%), CI-Low(95%) refer to upper bound and low bound of 95% confident levels]

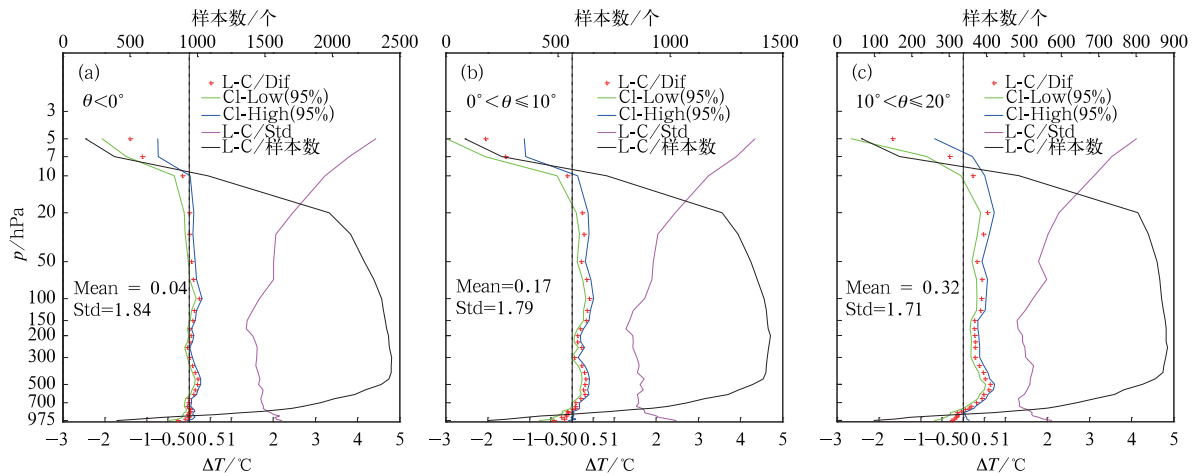


图 3 不同太阳高度角下,L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料气温数据对比

(a)  $\theta < 0^\circ$ , (b)  $0^\circ < \theta \le 10^\circ$ , (c)  $10^\circ < \theta \le 20^\circ$

(说明同图 2,  $\theta$ : 太阳高度角)

Fig. 3 Temperature comparison between L band and COSMIC data in different solar elevation angle

(a)  $\theta < 0^\circ$ , (b)  $0^\circ < \theta \le 10^\circ$ , (c)  $10^\circ < \theta \le 20^\circ$

(Illustration is the same as Fig. 2,  $\theta$ : solar elevation angle)

### 2.1.3 不同气候区域对气温偏差的影响

为了研究 L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料气温数据在不同气候区域的偏差情况,按照郑景云等(2010)的气候区划方案,同时为了保证每个区域有足够多的样本量,在本文中,将中国区域划分成 3 个区域:以温带为主的北方 I 区、以热带为主的南方 II 区和青藏高原 III (图 4)。

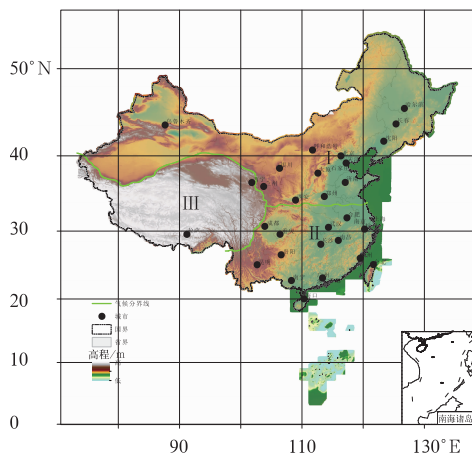


图 4 本研究所采用的气候分区

(绿色线为分界线)

Fig. 4 The climate division used in the study

(Green line is the dividing line)

在三个区域中(图略),除了 7 hPa 以上层次外, I 区和 II 区气温相差不大, I 区大多数层次在  $\pm 0.3^\circ C$  以内, II 区大多数层次在  $\pm 0.4^\circ C$  以内, III 区偏差最大,在 600 hPa 达到  $0.67^\circ C$ 。650 hPa 以下, II 区偏差大多在  $0.1^\circ C$  以内, I 区比 II 区稍大约  $0.1^\circ C$ , 650~350 hPa, II 区偏差比 I 区域  $0.1^\circ C$  左右, 350 hPa 以上层次, I 区比 II 区偏大,在所有层次上, III 区比 I 区和 II 区均偏大,在 600~650 hPa, 最大分别相差 0.46 和  $0.4^\circ C$ 。这与中国区域太阳辐射分布基本一致, II 区由于大多数处于湿润地区,大气中水汽含量普遍较多,对太阳辐射的削弱较大,太阳辐射总量较小, I 区次之, III 区太阳辐射总量最大。L 波段探空资料和 ERA-Interim 再分析资料气温数据之间的对比有类似的情形,只是在 III 区,两者之间的偏差更大,在 650 hPa 气压层上,最大达到  $1.04^\circ C$ ,与 I 区和 II 区相差达到 0.74 和  $0.93^\circ C$ 。在同一个气候区里, L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料气温数据偏差标准差与 L 波段探空、ERA-Interim 再分析气温偏差标准差具有相似的分布。

### 2.2 相对湿度

#### 2.2.1 相对湿度偏差的多年平均

由于在 100 hPa 以上,大气中水汽含量很少,文中只分析 100 hPa 以下层次的相对湿度对比结果。

图 5 分别为 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 Era-Interim 再分析资料相对湿度数据之间多年的偏差平均值、偏差标准差、相关系数以及参与计算的样本数。从图 5a 可知,在对流层中下层,L 波段探空与 COSMIC 掩星相对湿度的偏差均在  $\pm 4\%$  以内,从 850 hPa 开始,偏差逐渐为负,L 波段探空开始偏干,随着层次升高,偏干越严重,300 hPa 附近达最大值  $-8.62\%$ ,之后差值逐渐减小,200 hPa 以后,偏差由负转正,150 hPa 附近达到最大值  $3.91\%$ ,随之逐渐减小。偏差标准差在各个气压层,差别不大,均在  $15.46\% \sim 18.89\%$ 。L 波段探空与 COSMIC 掩星相对湿度的相关系数在 300 hPa 以下时也相差不大,均在 0.66 以上,之后逐渐减小,在 100 hPa 时,相关系数为负,L 波段探空与 COSMIC 掩星相对湿度表现为负相关(图 5c)。这可能是由于在相对湿度较大的对流层中,L 波段探空仪湿度

存在性能问题,过饱和不能及时恢复,造成偏差为负值;对流层以上,相对湿度迅速降低,L 波段探空仪湿度下降较慢,而 COSMIC 掩星的探测由于水汽较少,测量更为精确,因此在对流层以上 L 波段探空大于 COSMIC 掩星。同时在中高层较大,可能还与两种相对湿度廓线之间存在不确定的时空差有关。

L 波段探空资料与 ERA-Interim 再分析资料的相对湿度数据对比情况与 L 波段探空资料和 COSMIC 掩星资料的相对湿度数据的对比有相似的变化规律,只是相对于 L 波段探空与 COSMIC 掩星相对湿度,两者之间的偏差稍大,L 波段探空偏干的层次更多,整体偏干更明显,如图 5b 和 5d 所示。

### 2.2.2 相对湿度昼夜偏差对比

L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料的相对湿度数据白天和夜间(昼夜按照太阳高度角划分, $<0$ 为夜间, $>0$ 为白天)的对比情况如图 6 所示,在

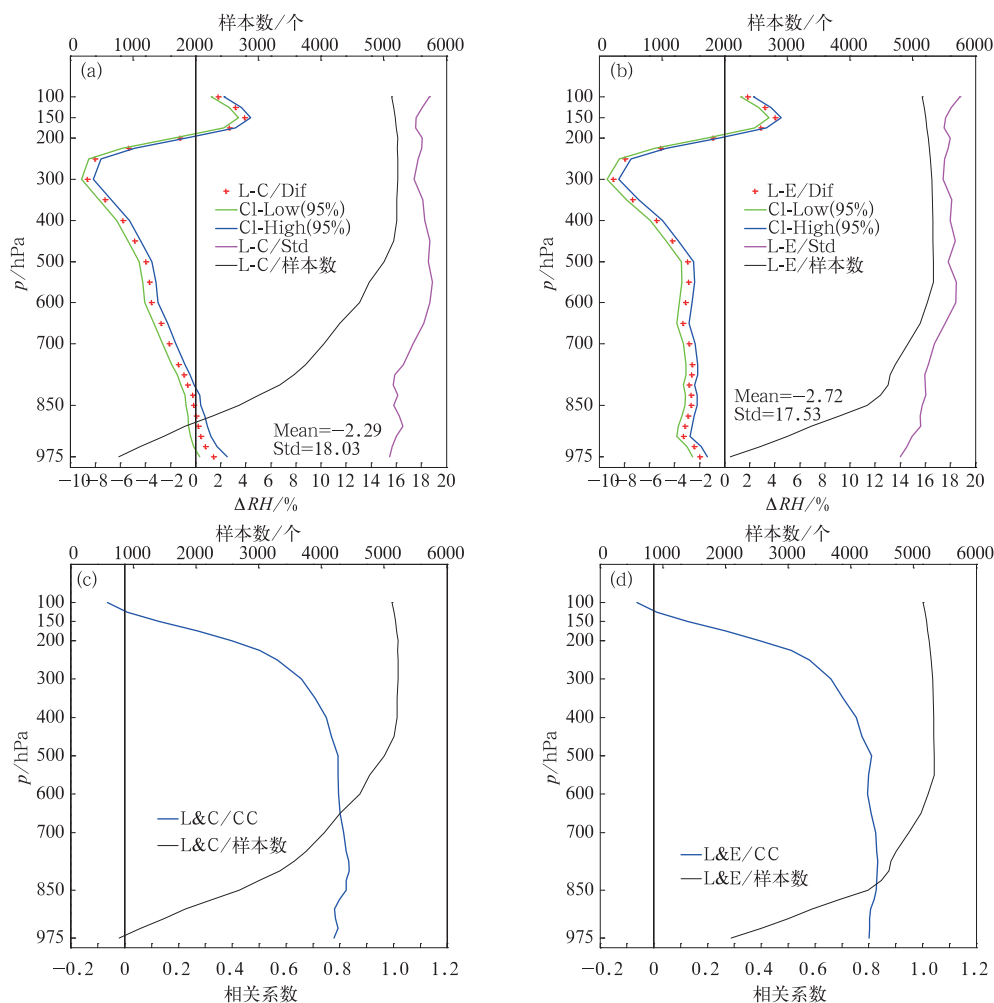


图 5 同图 2,但为相对湿度数据

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the analysis of relative humidity



对流层中下层,两者的偏差均不大,白天 600 hPa 以下、夜间 400 hPa 以下,偏差均在±4%以内。白天从 875 hPa 开始,偏差为负,L 波段探空偏干,层次越高,偏干越严重,250 hPa 附近达到最大值-10.23%,之后逐渐减小,200 hPa 以后,偏差由负转正;夜间偏差为负的层次相对较少,从 800 hPa 开

始,层次越高,L 波段探空偏干越严重,300 hPa 附近达到最大值-7.24%,之后逐渐减小,225 hPa 以后,偏差由负转正,在偏干的气压层里,白天比夜间偏干更严重。偏差标准差昼夜相差不大,均在 15.23%~19.6%,900 hPa 以下、600 hPa 以上,白天稍大于夜间。

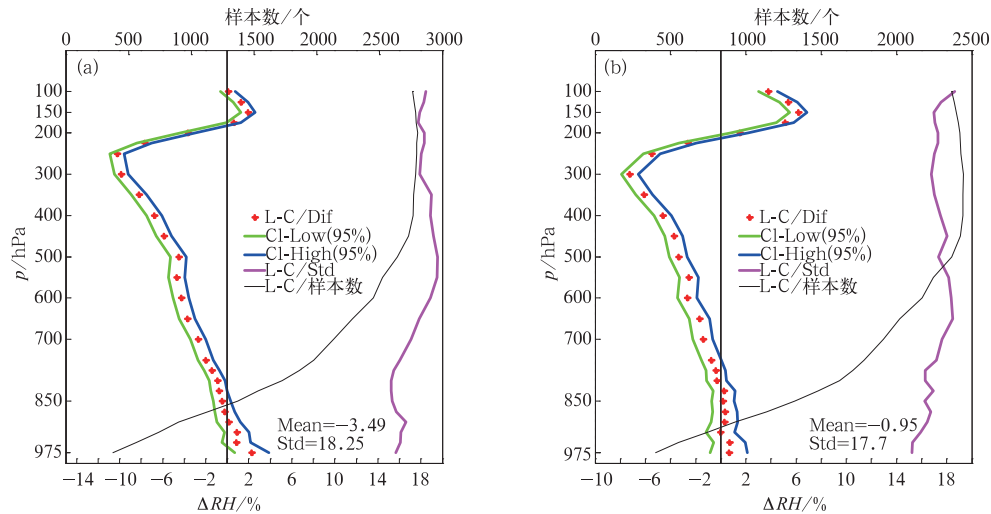


图 6 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料相对湿度昼夜对比

(a) 白天偏差, (b) 夜间偏差

(说明同图 2, 但分析要素为相对湿度)

Fig. 6 Comparison of day and night relative humidity between L band and COSMIC data

(a) day bias, (b) night bias

(Illustration is the same as Fig. 2, but for the analysis of relative humidity)

L 波段探空资料与 ERA-Interim 再分析资料的相对湿度数据白天和夜间的对比情况相对于 L 波段探空与 COSMIC 掩星相对湿度对比,两者之间的偏差稍大,偏干层次更多,L 波段探空偏干更明显,白天 975~200 hPa、夜间 975~225 hPa,L 波段探空均偏干,300 hPa 气压层均达到最大值分别为-10.1%和-7.53%。

2.2.3 相对湿度偏差的季节变化特征

图 7 为 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料的相对湿度在各个季节的对比情况。从图可知,春季从近地面到 200 hPa 气压层,L 波段探空一直偏干,随着气压层的升高,偏干越严重,300 hPa 气压层上达到最大值-10.28%,随后逐渐减小。夏季开始偏干的气压层稍高,但偏干截止的气压层也较高,为 825~100 hPa,250 hPa 达到最大值-11.13%。秋季偏干的气压区间稍低,为 825~200 hPa;冬季偏干的气压区间最低,除近地面的个别气压层外,700 hPa 标准层才开始偏干,250 hPa 结束,均在

300 hPa 达到最大值,分别为-8.66%和-6.4%。四个季节中,春、夏季 L 波段探空偏干较严重,在对流层中层平均约 6.6%、7.5%,秋、冬季平均约 4.7%和 3.8%,这说明 L 波段探空偏干的情况与各个季节的水汽分布有一定的关系,水汽越丰富的季节,偏差越大。各个季节在结束偏干以后,L 波段探空迅速转为偏湿,平均值在 7.5%左右,这与 L 波段探空仪的测湿性能相一致。两者之间偏差标准差夏季最大,在不同层次间,变动最剧烈,春、秋季次之,冬季最小。

L 波段探空资料与 ERA-Interim 再分析资料的相对湿度的对比,各个季节从 975 hPa 开始均为负,结束偏干的层次与 L 波段探空、COSMIC 掩星对比的偏差结果一致,在同一个季节,两种偏差在不同层次的曲线趋势非常相似,尤其是 750 hPa 高度以上,两种偏差几乎一致,在各个层次上 L 波段探空与 ERA-Interim 再分析相对湿度的偏差偏大,说明与 ERA-Interim 再分析相比,L 波段探空偏干更明显。

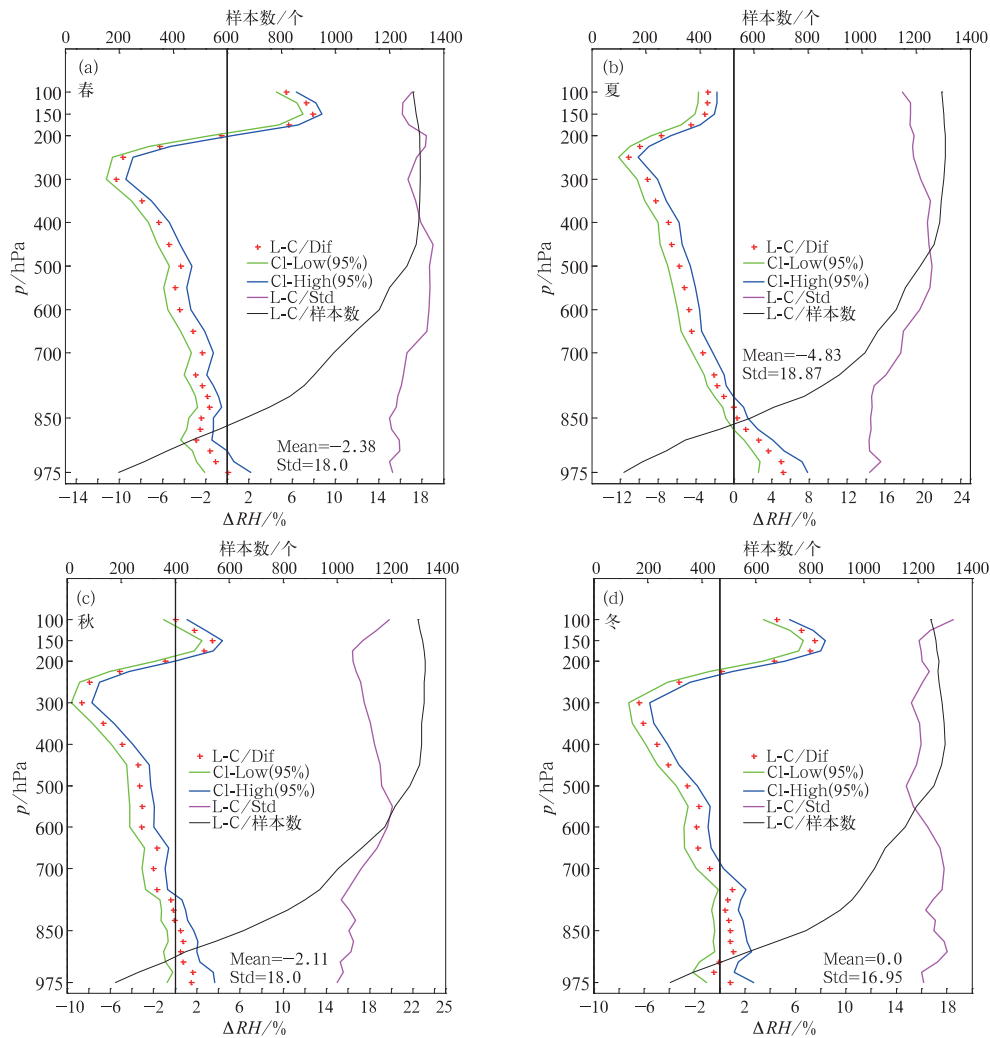


图 7 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料的相对湿度数据在不同季节的对比

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

(说明同图 2, 但分析要素为相对湿度)

Fig. 7 Comparison of seasonal relative humidity between L band and COSMIC data

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

(Illustration is the same as Fig. 2, but for the analysis of relative humidity)

#### 2.2.4 不同气候区域对相对湿度偏差的影响

按照 2.1.3 的气候区划方案对比研究 L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料相对湿度在不同气候区域的偏差情况(图略)。I 区从 950 hPa 开始,一直到 225 hPa, L 波段探空偏干, 300 hPa 气压层, 达到最大值  $-10.49\%$ , II 区 L 波段探空偏干的气压层较高, 结束偏干的气压层也较高, 为 750~70 hPa, 最大值出现在 100 hPa 为  $-14.52\%$ , III 区偏干的层次最少, 仅 600~225 hPa, 最大值也仅为 300 hPa 的  $-5.33\%$ 。三个不同的气候区域里, II 区最大、I 区

次之, III 区最小, 这与 2.2.3 节的分析结果偏差分布与大气中水汽分布有一定关系是一致的, II 区大气中水汽含量丰富, L 波段探空偏干也最严重, I 区居中, III 区最小。相对湿度偏差标准差在各个区域比较一致, 大多气压层上在  $14\% \sim 18\%$ , I 区和 II 区各个气压层间比较平缓, III 区在较低层变动剧烈。与 ERA-Interim 再分析资料相比, 各个气候区域从近地面开始均为负, 结束偏干的层次与相应气候区域 L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料对比的偏差结果一致, 说明 L 波段探空资料相对湿度偏干更明显。在同一气候区域, 同一高度层上, L 波段探空资

料、ERA-Interim 再分析资料相对湿度偏差比 L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料相对湿度偏差稍大。

2.2.5 不同气温条件下的对比

为了进一步了解 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料的相对湿度数据的差异,对比在不同气温条件下相对湿度对比差值情况,由于 L 波段探空设备在低温条件下,其测湿性能下降,在本论文中,只关注 0℃ 条件下的对比差值情况,从 -80~0℃,5℃ 为一间隔,分别计算所有气压层和单一气压层各个气温区间 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料相对湿度的偏差,结果如图 8 所示。从图中可知,在气温较低的条件,偏差值一般为负,随着气温的逐渐升高,两种偏差均逐渐减小,到 -40℃ 以后,偏差几乎保持不变,-15℃ 以后,L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料相对湿度的偏差比 L 波段探空资料与 ERA-Interim 再分析资料的偏差稍大。

进一步分析在不同气温条件下各个气压层的相对湿度偏差情况,在此以 L 波段探空资料与 COSMIC 掩

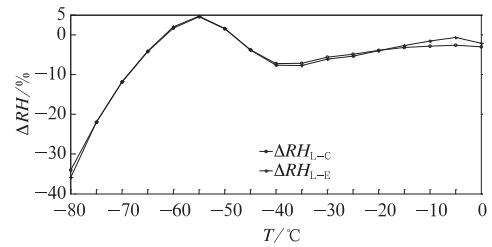


图 8 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料的相对湿度在不同气温条件下的对比 (ΔRH<sub>L-C</sub>和 ΔRH<sub>L-E</sub>分别为 L 波段探空与 COSMIC 掩星、ERA-Interim 再分析相对湿度的差值)

Fig. 8 The relative humidity bias of L band and COSMIC data, ERA-Interim reanalysis data in different temperature conditions (ΔRH<sub>L-C</sub> and ΔRH<sub>L-E</sub> are the difference values of relative humidity)

表 2 不同气温条件下各个气压层上 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料的相对湿度偏差 (单位: %)

Table 2 The relative humidity bias between L band and COSMIC in different pressure levels with different temperatures (unit: %)

p/hPa	-85℃	-80℃	-75℃	-70℃	-65℃	-60℃	-55℃	-50℃	-45℃	-40℃	-35℃	-30℃	-25℃	-20℃	-15℃	-10℃	-5℃	0℃				
975															5.91	-3.33	-2.51	-0.75				
950															0.38	0.24	-3.46	-2.31				
925														1.14	0.4	1.59	-2.4	-1.62				
900														0.33	1.82	2.82	-0.8	-2.33				
875														-0.89	0.69	0.27	-0.09	-2.32				
850														0.78	0.85	-0.84	-1.09	-1.46				
825													4.93	1.08	-0.53	-0.8	-0.65	-1.06				
800													7.89	-0.6	0.95	-3.69	-0.23	-1.91				
775													6.48	-1.8	0.2	-3.7	0.76	-1.66				
750													1.88	-0.64	-2.84	-0.72	0.09	-1.98				
700													-2.53	-0.34	-3.18	-0.33	-1.52	-0.97				
650													-2.6	-3.04	-3.69	-0.58	-0.13	-0.77	-2.23			
600													-1.99	-3.32	-1.85	-2.8	-2.16	-2.97	-3.38			
550													-3.22	-3.17	-1.76	-2.66	-2.19	-2.62	-4.06	-4.05		
500													-4.04	-3.17	-3.58	-3.51	-3.7	-2.65	-4.6	-3.48	-5.44	
450													-3.65	-5.76	-4.35	-4.61	-4.91	-3.91	-5.72	-4.49	-5.23	-8.3
400													-7.28	-7.55	-6.72	-6.83	-5.5	-6.27	-6.57	-4.32	-4.94	-7.33
350													-7.35	-7.77	-8.56	-8.74	-7.87	-8.6	-5.94	-5.5	-6.33	
300													-11.83	-8.78	-10.56	-11.05	-8.51	-5.7	-7.58	-4.87		
250													-14.61	-9.38	-7.88	-5.9	-6.54	-8.31	-7.25			
225													-17.85	-11.8	-5.33	0.48	-5	-7.13	-3.97			
200													-16.48	-4.75	4.29	-2.03	-2.23	5.38				
175													-4.46	-3.06	0.2	6.94	10.03					
150													-17.54	-1.73	12.21	12.08	10.43					
125													-31.16	-18.91	-0.08	10.53	14.08	11.24	9.61	13.51		
100													-34.03	-20.64	-2.89	5.89	12.38	13.34	10.29	9.78		

注:空白为没有满足该条件的样本  
note: blank for no sample

星资料相对湿度的偏差为例,见表 2 所示。从表中可知,在较低气温条件下,200 hPa 以下的气压层相对湿度偏差一般为负,700~225 hPa,各种气温条件下的相对湿度偏差均为负。200 hPa 高度层后,根据不同的气温条件,在不同气压层,偏差逐渐转为正,气温越低,转正的气压层越高。这与前文的分析,对流层中低层,L 波段探空资料相对湿度偏干,逐渐转为偏湿是相吻合的。这说明,L 波段探空资料相对湿度探测仪器在低温条件下低效的测湿性能是造成上述偏差分布的原因之一。

### 3 结论和讨论

通过选取 2011—2013 年中国地区 L 波段探空资料、COSMIC 掩星资料以及 ERA-Interim 再分析气温资料的温度和相对湿度数据,按照不同分类条件对匹配的气温、相对湿度数据进行对比分析,主要得到如下结论:

(1)除 10 hPa 以上的少数层次外,L 波段探空气温资料和 COSMIC 掩星气温资料、ERA-Interim 再分析气温资料之间吻合得非常好,偏差均在  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  之间,偏差标准差在  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ,对流层中高层,L 波段探空气温受太阳辐射影响较大,气温偏高,其造成的偏差最大可达到  $0.64^{\circ}\text{C}$ ,L 波段探空气温资料与 COSMIC 掩星气温资料和 ERA-Interim 再分析气温资料之间有良好的正线性相关关系。

(2)气温的偏差具有较明显的气候区域特征,650~350 hPa,南方区域偏差比北方区域大,其他层次,北方区域比南方区域偏大,在所有层次上,青藏高原区域比北方区域和南方区域均偏大,在各个气候区域偏差标准差具有相似的分布特征,相关系数受此影响不大。

(3)与 COSMIC 掩星资料、ERA-Interim 再分析资料的相对湿度相比,从对流层中低层到对流层顶,L 波段探空资料存在不同程度的偏干,在对流层中上层达到最大值,白天比夜间明显。L 波段探空资料与 COSMIC 掩星、ERA-Interim 再分析资料的相对湿度在对流层顶部以下存在明显的正相关,平流层底部为负相关。

(4)L 波段探空资料和 COSMIC 掩星资料、ERA-Interim 再分析资料的相对湿度的偏差有较明显的季节性差异,夏季最大,春、秋季次之,冬季最小,在对流层中层分别平均约 7.5%、6.6%、4.7%

和 3.8%。与 ERA-Interim 再分析相比,L 波段探空相对湿度偏干更明显。

(5)在不同气候区域,相对湿度的偏差有明显不同,南方区域最大,北方区域次之,青藏高原区域最小。从对流层中低层到对流层顶,南方区域 L 波段探空偏干,最大值出现在 100 hPa 为 14.52%,北方区域从近地面到对流层中高层,L 波段探空偏干,300 hPa 气压层,达到最大值 10.49%,青藏高原区域偏干的层次最少,最大值也仅为 300 hPa 的 5.33%。相对而言 L 波段探空与 ERA-Interim 再分析相对湿度的偏差稍大。

上述研究表明 L 波段探空资料与 COSMIC 掩星资料和 ERA-Interim 再分析资料气温之间的一致性非常好,当在气象预报分析时,L 波段探空气温出现缺测、错误等情况时,可以粗略地使用相应的 COSMIC 掩星气温替代,同时在使用 L 波段探空气温时,应考虑进行辐射订正。而 L 波段探空相对湿度在对流层顶以下,不同高度层存在着不同程度的偏干现象,在对流层中高层偏干最明显,对流层顶到平流层逐渐转为偏湿,主要由湿度传感器的测湿性能以及大气中的水汽分布造成,尤其是低温高湿状态下的探测有关,综合利用 COSMIC 相对湿度、ERA-Interim 再分析相对湿度等对此进行识别并订正。此外,影响偏差对比的其他因素如探空气温的热滞后效应、每个气压层上精确的时空匹配等因素在文章中没有被涉及到,尚需进一步研究。

### 参考文献

- 郝民,田伟红,龚建东. 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究. 气象,40(2):158-165.
- 李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论. 北京:气象出版社,11-13.
- 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. 气象,35(10):97-102.
- 唐南军. 2013. L 波段探空系统相对湿度的观测误差特征. 南京:南京信息工程大学,12-20.
- 陶士伟,陈晓红,龚建东. 2006. L 波段探空仪温度资料误差分析. 气象,32(10):46-51.
- 王洪,曹云昌,肖稳安. 2010. COSMIC 掩星数据与 L 波段探空数据的对比分析. 气象,36(9):14-20.
- 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.
- 文伟俊. 2008. GPS 掩星资料三维变分同化及对台风预报的改进试验. 南京:南京信息工程大学,81.
- 姚爽,陈敏,王建捷. 2015. L 波段分钟数据在 WRF 模式中的变分同化应用试验. 气象,41(6):695-706.
- 姚雯,马颖,黄炳勋. 2009. 利用 GPS 定位资料分析 L 波段雷达测风

- 性能. 应用气象学报, 20(2):195-202.
- 苑跃, 陈中钰, 赵晓莉, 等. 2014. L波段与59\_701探空系统观测资料差异评估. 气象, 40(2):238-246.
- 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.
- 张聪娥, 陈建基. 2010. 59型探空仪与L波段电子探空仪探测数据对比分析. 陕西气象, 1:29-31.
- 赵德显, 郁红弟, 沈桐立. 2011. GPS折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用. 气象, 37(12):1511-1518.
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案. 地理学报, 1(65):3-13.
- 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. 气候与环境研究, 17(3):381-391.
- Anthes R, Rocken C. 2000. Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terr Atmos Ocea Sci*, 11(1):115-156.
- Dabberdt W F, Cole H, Paukkunen A, et al. 2002. Radiosondes. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*// Elsevier Science Press, 6:1900-1913.
- Das U, Pan C J. 2014. Validation of FORMOSAT-3/COSMIC level 2 "atmPrf" global temperature data in the stratosphere. *Atmos Meas Tech*, 7(3):731-742.
- Elliott W P, Gaffen D J. 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull Amer Meteorol Soc*, 72(10):1507-1520.
- Fu E, Zhang K, Wu F, et al. 2007. An evaluation of GNSS radio occultation technology for Australian meteorology. *J Global Positioning Sys*, 6(1):74-79.
- He W, Ho S P, Chen H, et al. 2009. Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data. *Geophys Res Lett*, 36(7):1-7.
- Ho S P, Goldberg M, Kuo Y H, et al. 2009. Calibration of temperature in the lower stratosphere from microwave measurements using COSMIC radio occultation data: Preliminary results. *Terre Atmos Ocea Sci*, 20(1):87-100.
- Kishore P, Ratnam M V, Namboothiri S P, et al. 2011. Global (50°S–50°N) distribution of water vapor observed by COSMIC GPS RO: Comparison with GPS radiosonde, NCEP, ERA-Interim, and JRA-25 reanalysis data sets. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 73(13):1849-1860.
- Li F. 2006. New Developments with Upper Air Sounding in China, Instruments and Observing Methods Report No. 94. Geneva: WMO, WMO/TD No. 1354.
- Luers J K, Eskridge R E. 1998. Use of radiosonde temperature data in climate studies. *J Climate*, 11(5):1002-1019.
- Rocken C, Johnson J M, Hove T V, et al. 2005. Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS. *Geophys Res Lett*, 32(12):L12813.
- Simmons A J, Hollingsworth A. 2002. Some aspects of the improvement in skill of numerical prediction. *Q J R Meteorol Soc*, 128(128):647-677.
- Sun B, Reale A, Seidel D J, et al. 2010. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *J Geophys Res*, 115(D23):6696-6705.
- Wang J, Zhang L. 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. *J Climate*, 21(10):2218-2238.
- World Meteorological Organization. 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation (7th Edition). Geneva: Publications Board, 681.
- Yunck T P, Liu C H, Ware R H. 2000. A history of GPS sounding. *Terres Atmos Ocean Sci*, 11(1):1-20.
- Zhang K, Fu E, Silcock D, et al. 2011. An investigation of atmospheric temperature profiles in Australia region using collocated GPS radio occultation and radiosonde data. *Atmos Meas Tech*, 4(10):2087-2092.