

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[J]. 气象,2010,36(9):14-20.

COSMIC 掩星数据与 L 波段探空数据的对比分析^{*1}

王 洪¹ 曹云昌² 肖稳安¹

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: COSMIC (Constellation Observation System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 每天可以提供全球 2000~3000 条从 40 km 高空到近地面的大气温、压、湿的廓线资料, 有效地弥补了常规探空资料在时间和空间上分辨率的不足。通过对 2008 年 5 月 20 日至 2008 年 11 月 26 日 COSMIC 资料与 L 波段探空秒数据进行比对, 结果表明, 在 10 km 高度以下, COSMIC 反演的湿廓线资料与 L 波段探空数据偏差较小, 温度偏差为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 折射率偏差为 1.4N , 均方根误差为 5.9N ; 气压偏差为 2.0 hPa , 均方根误差为 4.7 hPa ; 水汽压偏差为 0.1 hPa , 均方根误差为 1.1 hPa 。COSMIC 干廓线资料与 L 波段探空相比, 在 $10\sim 30\text{ km}$ 高度内, 温度偏差为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 折射率偏差为 0.4N , 均方根误差为 0.9N ; 气压偏差为 1.4 hPa , 均方根误差为 2.6 hPa 。表明 COSMIC 资料既具有较高的时空分辨率, 又具有较好的精度, 在数值模式中具有重要的潜在应用。

关键词: COSMIC, 探空, 误差分析, 同化

Comparison Between the COSMIC and the L Band Radiosonde Data

WANG Hong¹ CAO Yunchang² XIAO Wenan¹

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: COSMIC (Constellation Observation System for Meteorology, Ionosphere and Climate), a space-based GPS constellation observing system of six low-earth-orbit satellites, provides approximately 2000 to 3000 profiles of atmospheric temperature, pressure, humidity from 40 km to the ground each day, and greatly enhances the atmospheric observation in spatial and temporal resolution. To evaluate the accuracy, the COSMIC observations were compared with the L band radiosonde from May 20 to November 26, 2008. The comparison of the wet profiles below 10 km showed that the deviation is $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ for temperature, 1.4N for refractivity index, 2.0 hPa for pressure, 0.1 hPa for vapor pressure; while their root mean square errors (RMS) are $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5.9N , 4.7 hPa , 1.1 hPa , respectively. As for the dry profiles, between 10 km and 30 km, the deviations are $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in temperature, 0.4N in refractivity index, 1.4 hPa in vapor pressure, while the RMSs are $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.9N and 2.6 hPa , respectively, which implies their potential applications in numerical weather prediction owing to the high spatial and temporal resolution and high accuracy.

Key words: COSMIC, L band radiosonde, error analysis, assimilation

* 国家气象中心“面向业务数值预报的重点资料关键应用技术研究(GYHY200806003)”,气象探测中心“地基遥感与雷达定量测量降水实验”资助

2008年5月20日收稿; 2010年3月18日收修定稿

第一作者:王洪,主要从事大气遥感方面的研究. Email: wanghong8094@live.cn

引言

近几十年,随着气象仪器自动化程度的提高,多种遥测与遥感技术得到应用,一个崭新的现代地球大气探测系统已形成^[1]。常规的高空气象探测系统主要包括地面探空雷达、探空气球、探空仪三个部分^[2],但目前常规探测手段在海洋及其他偏远地区(如沙漠)缺少数据,其时空分辨率限制了对地球大气的时变特性和空间分布的深入认识,利用高分辨率的非常规资料势在必行。GPS 掩星技术提供了一种新的大气探测手段,即对 GPS 无线电波信号进行处理,反演大气参数的垂直分布。由于无线电波经济低廉,探测精度高,不受降水和云层的影响,无系统长期漂移,具有长期的稳定性,可用于大气长期变化的监测^[3]。

2006年4月15日,美国和台湾地区合作发射了 COSMIC (Constellation Observation System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 气象、电离层和气候观测星座进行 GPS 掩星星座业务探测试验^[4]。COSMIC 星座由 6 颗 LEO 卫星组成,当 GPS 卫星信号穿过地球大气层时,电波射线因折射发生弯曲,LEO 卫星接收该信号,根据几何光学原理得到 GPS 信号在各大气路径上的弯曲角,处理得到大气各层折射率,进而反演出全球大气温、压、湿和电离层廓线资料^[7,11,15]。

空基 GPS 提供了大量的三维观测资料,如何把这些资料同化应用到气象业务中,是空基 GPS 气象学研究的重点之一^[5],因此对 COSMIC 数据进行误差分析和质量控制是十分必要的,Rocken 等利用 2001 年 12 月 CHAMP 和 SAC-C 掩星数据进行分析,得出冬季 CHAMP 和 SAC-C 掩星数据的偏差,在 5~25 km 高度范围内,与 ECWFM 模式和 NCEP/AVN 模式相比,折射率标准差小于 1%^[6]。Syndergaard^[8-9,12]对 GEOS 卫星反演大气参数误差的分析中发现,忽略地球的非球形导致 40 km 以下的高度反演的温度出现偏差,并且向下逐渐增大,极端情况下 10 km 可达 3 °C,到达地面可达 6 °C。MicroLab1 的观测数据与欧洲中尺度天气预报中心 ECMWF 的分析结果和临近的探空气球站的观测资料相比,在 5~30 km,温度精度好于 1.5 °C。为了考察 COSMIC 掩星数据的误差特点,本文在对比时运用了不同的参考资料 L 波段精密探空数据。

由于常规探空的特性层和规定层(100 hPa 以下 12 层)数据会遗漏大气中细微的变化特征,为克服常规探空垂直层数的局限性,采用 L 波段精密探空数据(垂直层数达到几千层)与 COSMIC 比对分析,将 2008 年 5 月 20 日至 2008 年 11 月 26 日 COSMIC 数据的干廓线资料(atmprf)和湿廓线资料(wetprf)进行分析,研究 COSMIC 反演资料在温度、气压、折射率等方面与探空秒数据对比的偏差和均方根误差^[10],探讨干湿反演资料的误差特点。为气象工作者使用 COSMIC 数据提供参考,为我国数值天气预报模式同化提供误差分析等依据。

1 COSMIC 数据反演方法和资料来源

LEO 卫星上的 GPS 双频接收机能够记录精确的双频 GPS 信号相位延迟量和信噪比。从相位延迟序列,通过简单的时间差分,可得到大气多普勒漂移序列。用已知的精密 GPS 和 LEO 卫星轨道信息,可利用大气多普勒漂移序列计算出 GPS 信号的弯曲角碰撞参数的变化函数。假设地球大气介质局部球对称,用 Abel 积分逆变换把弯曲角序列反演得到大气折射率剖面。然后利用理想气体状态方程、流体静力学方程和 Smith-Weintraub 大气折射率方程,从折射率剖面反演得到气象参数:对于理想大气而言,折射率 N 、气压 p 、温度 T 及水汽压 e 存在关系式

$$N = 77.6 \times \left(\frac{p}{T}\right) + 22.0 \times \left(\frac{e}{T}\right) + 3.739 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中右边第一项是干空气对折射率的贡献,第二、三项是水汽的贡献。

当水汽可以忽略的情况下,则有

$$N = 77.6 \frac{p}{T} \quad (2)$$

根据大气状态方程和静力方程等,可以得到以下反演大气参数的方程:

$$\rho = 0.003484 \frac{p}{T} = 4.4897 \times 10^{-5} N \quad (3)$$

$$\frac{\delta p}{\delta z} = -\rho g \quad (4)$$

$$T = 77.6 \frac{p}{N} \quad (5)$$

其中 ρ 为大气密度, g 为局部重力加速度。由折射率廓线根据公式(3)可以得到大气密度分布, 进而通过公式(4)积分得到气压廓线, 为干空气气压(hPa), 在水汽忽略的情况下, 由理想气体状态方程(5)可得到温度廓线, 这样反演的温度为干空气温度(K)。

当水汽的贡献不可忽略时, 会出现 GPS 掩星技术的水汽模糊问题。一般温度 T 通过其他独立的途径获得(如可从模式中获温度剖面), 湿空气的状态方程为

$$p = \rho R_d (T + 0.378 \frac{e}{p} T) \quad (6)$$

表 1 COSMIC 大气廓线资料

Table 1 List of COSMIC atmospheric profile data

资料名称	探测高度/km	垂直分辨率/m	分层数	内容
1 级 atmPrf	0~40	4	3000~5000 层	干温、干压、折射率、弯曲角、碰撞系数
2 级 wetPrf	0~40	100	400 层	温度、气压、水汽压、折射率
3 级 bfrPrf	0~40	197	300 层	atmPrf 中温度、气压、折射率, wetPrf 中水汽压
ionPrf	1.5~800	约 2800	300 层	电离层电子密度廓线

为了分析水汽压和折射率廓线, 利用 L 波段探空探测到的温度、气压、相对湿度数据按如下方法计算得到水汽压、折射率数据。

根据马格纳斯(Magnus)计算饱和水汽压经验式:

$$E_s = E_0 \times 10^{\frac{at}{b-t}} \quad (7)$$

式中 E_s 为温度 t 时饱和水汽压(hPa); E_0 是温度为 0°C 时的饱和水汽压, 通常取 $E_0 = 6.11$ hPa; a, b 为常数, 由于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 $a = 7.63, b = 241.9$ 。

根据相对湿度公式

$$f \approx \frac{e}{E_s} \times 100\% \quad (8)$$

式中 e, E_s 为空气块实有水汽压和饱和水汽压。进而得到空气块的水汽压 e 。由公式(1)、(7)、(8)即可计算出折射率廓线。

由公式(8)可得空气实际水汽压,

$$e \approx f \times E_s \quad (9)$$

式中 f 为相对湿度, E_s 为饱和水汽压(hPa)。根据 L 波段探测的相对湿度和温度廓线即可计算得到 L 波段探空的水汽压廓线。

资料中干廓线资料垂直层数 3000~5000 层, 湿廓线资料垂直层数 400 层, 因此干湿廓线资料能反映大气细微的变化特征。

其中 R_d 为干空气的比气体常数, $R_d = 287.05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 利用公式(1)、(4)、(6), 计算可获得气压 p 和水汽压 e 。

本文使用 2008 年 5 月 20 日至 2008 年 11 月 26 日的 COSMIC 数据。COSMIC 数据为 nc 文件(即 netcdf 文件, 网络通用数据格式), 数据来源于 <http://www.cosmic.ucar.edu/>, 网站可提供近实时 COSMICRT(cosmic real time)产品和 COSMIC 后处理产品, 后处理产品大约 6 星期后可得到。COSMIC 大气廓线产品分为 4 级, 采用前 2 级数据, 如表 1 所示。

2 对比分析方法

计算偏差和均方根误差, 分别有如下公式:

$$d = \frac{1}{n} (x_i - y_i) \quad (10)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - y_i) - \overline{(x_i - y_i)}]^2}{n - 1}} \quad (11)$$

式中 x_i 为临近的 COSMIC 掩星点的反演数据, y_i 为探空站的观测资料。

以中国区域 L 波段探空资料为基准, 选取与探空记录在时间和空间范围内匹配的 COSMIC 资料进行对比分析。由于掩星点的变化在百千米的量级, 时间间隔几分钟, L 波段探空点的空间间隔在几十千米, 时间间隔约 1.5 小时, 而地球上 1 纬度约为实际距离 110 km, 1 经度代表的距离小于 110 km, 为了选取掩星点临近的 L 波段探空数据, 试验选取的时空条件是经度、纬度分别小于 1 度, 时间小于 3 小时。L 波段探空数据垂直可达到几千层, 干温度廓线资料垂直层数最多可达 5000 层, 为使两种数据在相同的高度层上进行比较, 在高度的处理上采用线性插值的方法, 在从地面到 30 km 的高度范围内干廓线资料平均插值到 6000 层上, 湿廓线资料插值到 300 层上。在 2008 年 5 月 20 日至 2008 年 11 月

26 日的时间范围内共匹配出符合条件的 120 对干湿廓线。

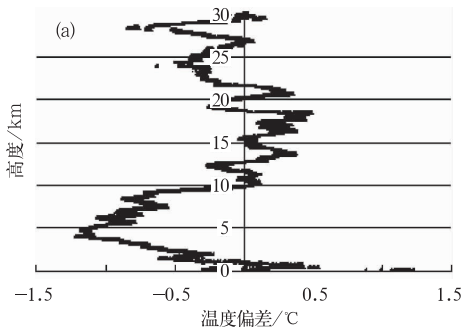
3 COSMIC 数据的误差检验

COSMIC 大气廓线产品包括干湿廓线资料, 区别在于是否考虑水汽的存在, 同时干廓线资料的垂直分辨率远大于湿廓线资料。

3.1 湿廓线的误差检验

3.1.1 温度误差

图 1 是 COSMIC 资料的温度廓线与 L 波段探



空资料的温度廓线在各层的偏差值和均方根误差值, 10 km 以下温度的平均偏差为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 整层平均偏差为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 km 以上温度的偏差为 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.2 气压误差

图 2 是 COSMIC 数据的气压与 L 波段探空资料的气压数据在各层的偏差值和均方根误差值, 在 10 km 以下, 气压偏差为 2.0 hPa , 均方根误差为 4.7 hPa ; 整层偏差为 1.5 hPa , 均方根误差为 3.3 hPa , 在 10 km 以上, 气压偏差为 1.3 hPa , 均方根误差为 2.6 hPa 。

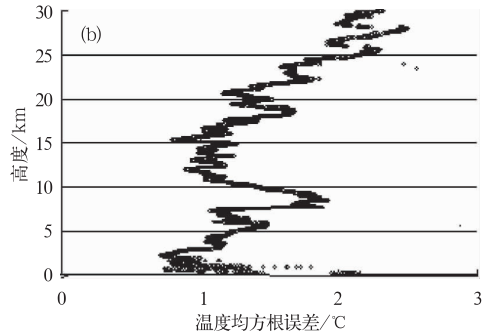


图 1 COSMIC 湿廓线的温度与 L 波段探空匹配后的误差特点

(a) COSMIC 温度与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 温度与探空匹配后的各层均方根误差

Fig. 1 Temperature error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings

(a) Temperature bias in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings;

(b) Temperature RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

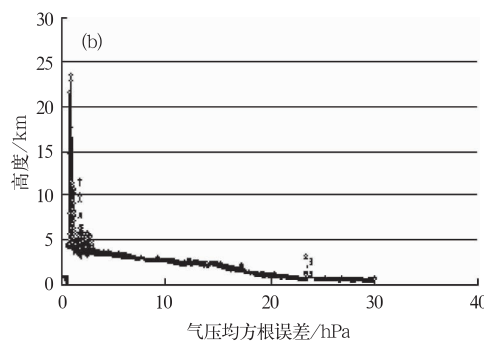
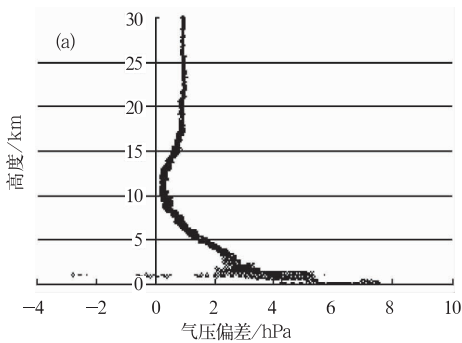


图 2 COSMIC 湿廓线的气压与 L 波段探空匹配后的误差特点

(a) COSMIC 气压与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 气压与探空匹配后的各层均方根误差

Fig. 2 Pressure error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings

(a) Pressure bias in the different altitude between COSMIC soundings and radiosonde;

(b) Pressure RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

3.1.3 折射率误差

图 3 是探空计算的折射率与 COSMIC 数据反演的折射率在各层的偏差值和均方根误差值, 从图 3 可以看出, 在 10 km 以下平均偏差 1.4 N , 均方根

误差为 5.9 N ; 在 10 km 以上折射率偏差较小, 平均偏差为 0.4 N , 均方根误差为 0.9 N ; 折射率整层的平均偏差为 0.8 N , 均方根误差 2.6 N 。可见, COSMIC 折射率的误差较小。

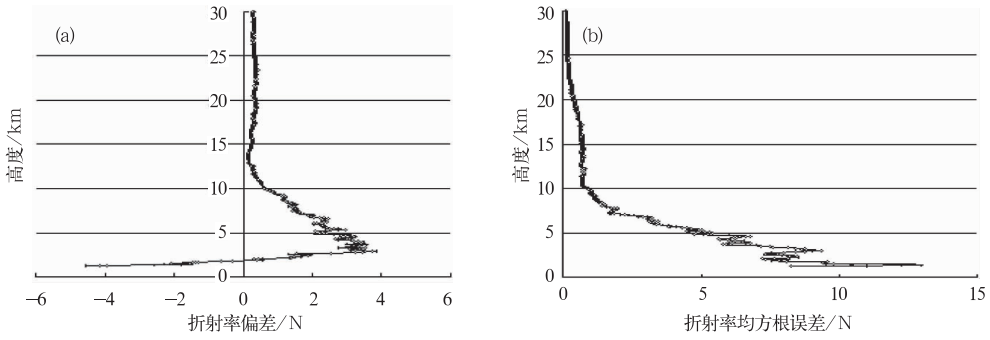


图 3 COSMIC 湿廓线的折射率与 L 波段探空匹配后的误差特点
 (a) COSMIC 折射率与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 折射率与探空匹配后的各层均方根误差
 Fig. 3 Refractivity error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings
 (a) Refractivity bias in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings;
 (b) Refractivity RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

3.1.4 水汽压误差

图 4 是探空计算得到的水汽压与 COSMIC 数据反

演的水汽压匹配后在各层的平均偏差值,在 10 km 以下水汽压平均偏差为 0.1 hPa,均方根误差为 1.1 hPa。

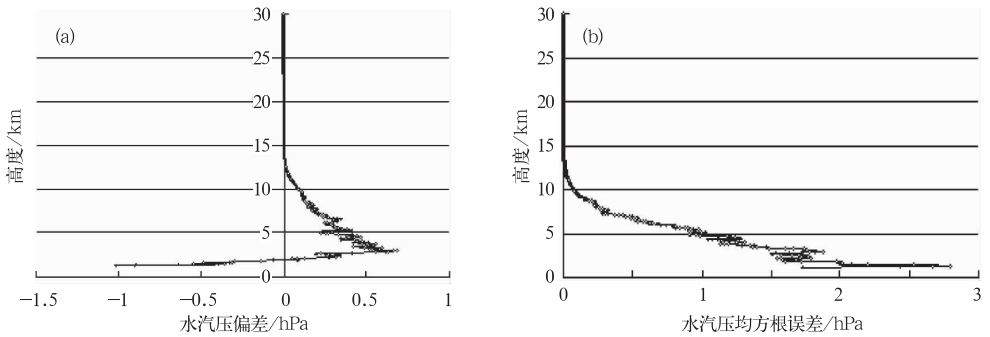


图 4 COSMIC 湿廓线的水汽压与 L 波段探空匹配后的误差特点
 (a) COSMIC 水汽压与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 水汽压与探空匹配后的各层均方根误差
 Fig. 4 Vapor pressure error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings
 (a) Vapor pressure bias in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings;
 (b) Vapor pressure RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

3.2 干廓线的误差检验

3.2.1 温度误差

图 5 是 COSMIC 的干温度与探空资料的温度数据在各层的偏差值和均方根误差值,从图 5 可以

看出,在 10~30 km 温度的平均偏差为 -0.3 °C,均方根误差为 1.9 °C,在 10 km 以下,由于大气中水汽的影响,出现较大的偏差,平均偏差为 -19.8 °C,均方根误差为 10.1 °C,整层温度平均偏差为 -6.8 °C,均方根误差为 4.6 °C。

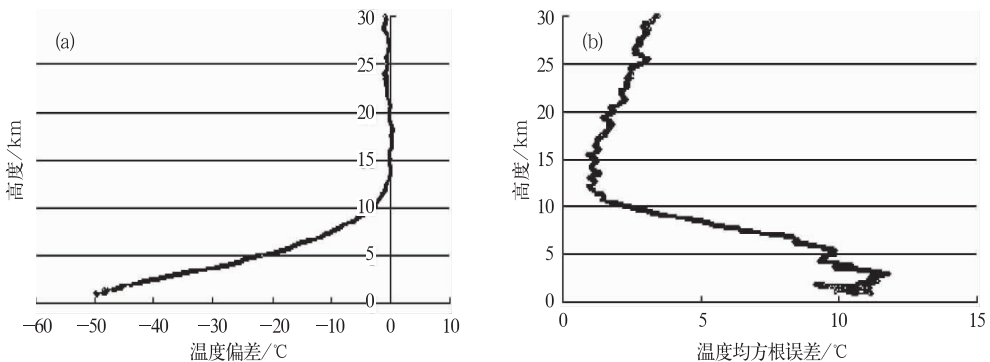


图 5 COSMIC 干廓线的温度与 L 波段探空匹配后的误差特点
 (a) COSMIC 温度与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 温度与探空匹配后的各层均方根误差
 Fig. 5 Temperature error characteristic between COSMIC and radiosonde soundings
 (a) Temperature bias in the different altitude between COSMIC soundings and radiosonde;
 (b) Temperature RMS in the different altitude between COSMIC and Soundings

3.2.2 气压误差

图 6 是 COSMIC 的干气压廓线与探空资料的气压数据在各层的偏差值和均方根误差值, 从图 6 可以看出, 在 10 km 以上气压偏差较小, 10~30 km

气压的偏差的为 1.4 hPa, 均方根误差为 2.6 hPa; 在 10 km 以下, 气压偏差为 25.8 hPa, 均方根误差为 16.0 hPa。整层气压平均偏差为 9.5 hPa, 均方根误差为 7.1 hPa。

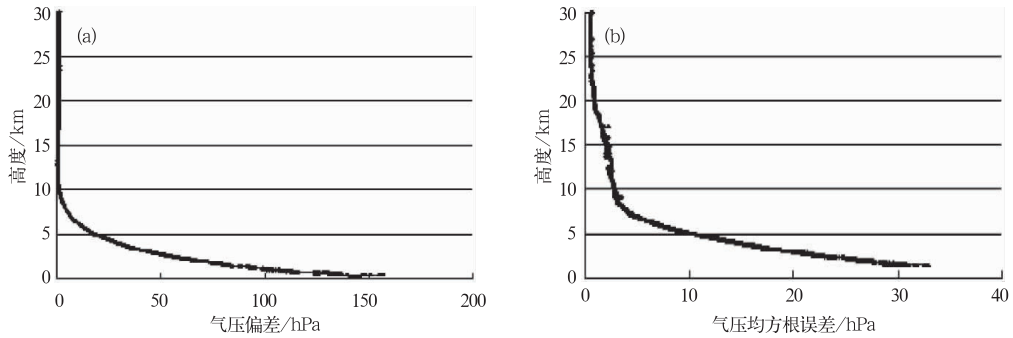


图 6 COSMIC 干廓线气压与 L 波段探空匹配后的误差特点

(a) COSMIC 气压与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 气压与探空匹配后的各层均方根误差

Fig. 6 Pressure error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings

(a) Pressure bias in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings;

(b) Pressure RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

3.2.3 折射率误差

图 7 是 COSMIC 的折射率廓线与探空资料计算的折射率数据在各层的偏差值和均方根误差值, 从图 7 可以看出, 平流层折射率偏差较小, 经计算,

10 km 高度以上, 折射率偏差为 0.4N, 均方根误差为 0.9N; 而在 10 km 高度以下, 折射率偏差为 1.6N, 均方根误差为 6.2N。整层折射率平均偏差为 0.8N, 均方根误差为 2.7N。

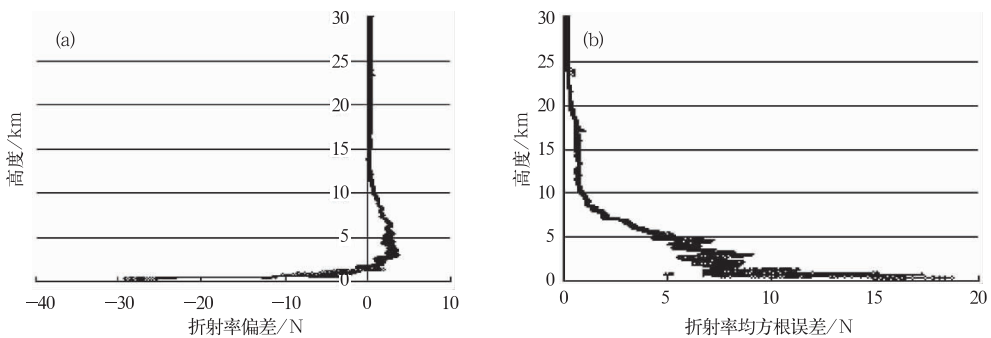


图 7 COSMIC 干廓线折射率与 L 波段探空匹配后的误差特点

(a) COSMIC 折射率与探空匹配后的各层偏差; (b) COSMIC 折射率与探空匹配后的各层均方根误差

Fig. 7 Refractivity error characteristics between COSMIC and radiosonde soundings

(a) Refractivity bias in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings;

(b) Refractivity RMS in the different altitude between COSMIC and radiosonde soundings

4 结论和探讨

(1) COSMIC 湿廓线资料与 L 波段探空相比, 在 10 km 高度以下, 比较一致, 温度偏差为 -0.5°C , 均方根误差为 1.5°C ; 气压偏差为 2.0 hPa, 均

方根误差为 4.7 hPa; 水汽压偏差为 0.1 hPa, 均方根误差为 1.1 hPa; 折射率偏差为 1.4N, 均方根误差为 5.9N。表现了较小的偏差和均方根误差。

(2) 在 10~30 km 高度内, 水汽含量很小, COSMIC 干廓线资料的温度、气压偏差较小, 温度偏差为 -0.3°C , 均方根误差为 1.9°C ; 气压偏差为

1.4 hPa,均方根误差为 2.6 hPa;折射率偏差为 0.4N,均方根误差为 0.9N。

(3) 本文的分析结果与其他的分析基本一致^[13],与 Kuo 等^[14]的结果存在一些差异,特别是在对流层顶处。

(4) COSMIC 高垂直分辨率的干湿廓线资料,为研究对流层和平流层的大气细微的变化提供了新的数据来源。

本工作主要是对中国境内 30 km 高度以下的的数据误差分析,资料匹配的原则是选择与 COSMIC 掩星事件临近的探空点进行对比分析,时间间隔 3 小时,COSMIC 时间为一次掩星事件的中间时刻,而 L 波段时间为一次探空的起始时间,在误差的统计中包括了这种对比点的时间和空间上的差异,存在一定的算法误差。同时没有区分不同纬度的资料,这还需要进一步的研究,为质量控制提供更详细的空间分布的误差信息,将质量控制后 COSMIC 掩星观测得到的弯曲角或折射率信号同化到数值模式中,为数值天气预报服务,也是今后研究的方向。

致谢:感谢 UCAR 的 COSMIC CDAAC 为本文提供相关的掩星观测数据,中国气象局气象探测中心郭启云为本文提供 L 波段探空数据,王海深提供有关文献资料。

参考文献

- [1] 宋连春,李伟.综合气象观测系统的发展[J].气象,2008,34(3):3-9.
- [2] 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[J].气象,2009,35(10):97-102.
- [3] 杜晓勇,毛节秦.GPS-LEO 掩星探测现状和展望[J].高原气象,2008,27(4):918-931.
- [4] Zou X, Zhen Zeng. A quality control procedure for GPS radio calculation data[J]. Journal of Geophysical Research, 111, D02112, doi:10.1029/2005JD005846, 2006.
- [5] 曹云昌,方宗义,夏青.地空基 GPS 探测应用研究进展[J].南京气象学院学报,2004,27(4):565-572.
- [6] Christian Rocken, Ying-Hwa Kuo, Sergey Sokolovskiy, et al. The ROCSAT-3/COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate Remote Sensing Applications of the Global Positioning System, 2004, 5661: 1-12.
- [7] Kuo Y-H, Sokolovskiy S, Anthes R A, et al. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction [J]. Special issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 11(1): 157-186, March 2000.
- [8] Syndergaard S. Retrieval Analysis and Methodologies in Atmospheric Limb Sounding Using the GNSS Occultation Technique[R]. DMI Scientific Report, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark, 1996(6):49-52.
- [9] Syndergaard S. Modeling of the effect of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profile from limb sounding [J]. J Atmos Solar-Terr Phys, 1998, 60: 171-180.
- [10] 陶士伟,郝民,薛纪善,等.数值预报同化系统中观测资料误差分析[J].气象,2008,34(7):34-40.
- [11] 岳迎春,胡友健,赵雪莲.利用 GPS 无线电掩星技术探测大气的探讨[J].地理空间信息,2007,5(6):36-38.
- [12] Lei J, S Syndergaard, A G Burns. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results [J]. Journal of Geophysical Research, 112: A07308, doi:10.1029/2006JA012240, 2007.
- [13] 郭鹏,严豪健,黄斌,等.上海天文台 CHAMP 掩星资料处理结果的统计分析[J].天文学报,2006,47(2):192-201.
- [14] Kuo Y H, W S Schreiner, J Wang, et al. Comparison of GPS radio occultation sounding with radiosondes [J]. Geophysical Research Letters, 32, L05817, doi:10.1029/2004GL021443, 2005.
- [15] 曹云昌,方宗义,夏青,等.中国地基 GPS 气象应用站网建设展望[J].气象,2006,32(11):42-47.