

COSMIC 掩星反演的水汽廓线质量分析*

陈志平¹, 罗佳^{1,2}, 肖晓¹, 孙方方¹

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079;

2. 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘要:利用2006—2012年北半球冬季低纬度地区(30°S~30°N)无线电探空站数据及全球大气成分和气候监测再分析数据对1000 hPa~200 hPa高度层的气象、电离层与气候星座观测系统全球定位系统掩星反演的比湿廓线进行了精度和可靠性验证。结果表明,水汽对气象、电离层与气候星座观测系统掩星反演影响较大,尤其在中、低对流层及热带地区等水汽含量比较大的地区,且气象、电离层与气候星座观测系统掩星数据在850 hPa以下可能并不太适用于评估其他数据。

关键词:气象、电离层与气候星座观测系统;GPS掩星;比湿

中图分类号:P413 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)03-201-06

Assessment of COSMIC radio occultation water vapor profile

CHEN Zhiping¹, LUO Jia^{1,2}, XIAO Xiao¹, SUN Fangfang¹

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The specific humidity profiles derived from the GPS (global positioning system) RO (radio occultation) of the COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate) with those from low latitude (30°S~30°N) radiosonde and MACC (monitoring atmospheric composition and climate) reanalysis during the NH (north hemisphere) winters (December, January, and February) from 2006 to 2012 over the layers from 1000 hPa to 200 hPa were verified. Comparison results demonstrate that the impact of water vapor on the COSMIC GPS RO inversion is very large, especially over the tropical and low troposphere. And the COSMIC GPS RO observations below 850 hPa may not be suitable for the assessment of other observations.

Key words: constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate; GPS radio occultation; specific humidity

美国和中国台湾地区合作研究的气象、电离层与气候星座观测系统 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate, COSMIC) 计划是由6颗低轨卫星组成,于2006年4月15日01:40 UTC成功发射。COSMIC是一种全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 掩星观测系统,具有全球覆盖、全天候、自校准且长期稳定、高垂直分辨率、高精度等优点^[1-3],对气象预报、气候监测和电离层等领域的研究具有广泛的应用^[4]。每天约有2000个掩星廓线均匀分布在大气中。COSMIC使用了开环跟踪技术^[5],90%以上的大气廓线能够观测到离地面2 km高度以下的大气层^[6]。通过减少跟踪误差,COSMIC GPS反演误差显著减少^[7]。这为天气预

报和全球气候分析提供了一个前所未有的机遇。

关于COSMIC GPS掩星水汽廓线的精度和数据质量的可靠性已经有一系列的文章对其进行阐述^[6,8]。Ho等利用2006年7—11月的COSMIC反演的比湿数据和欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的比湿数据进行比较,发现两种数据之间几近零偏差^[6];2011年,Kishore等利用热带地区13个无线电探空站的比湿廓线对COSMIC反演的比湿数据进行了详细的验证,结果验证了在8 km高度层以下,COSMIC的比湿廓线是可靠的^[8]。然而,前人对COSMIC GPS掩星反演的比湿廓线进行验证时,COSMIC比湿廓线与ECMWF再分析数据或者与无线电探空站数

* 收稿日期:2016-01-31

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB733302);国家自然科学基金资助项目(41131067,41374036);武汉大学大学生创新创业训练资助项目(S2015777)

作者简介:陈志平(1988—),男,江西抚州人,博士研究生,E-mail: zhpchen@whu.edu.cn;
罗佳(通信作者),男,副教授,博士,博士生导师,E-mail: jl原因@sgg.whu.edu.cn

据的配对标准都不尽严格。另外,对 COSMIC 比湿廓线验证的时间周期和区域都具有明显的局限性。这将导致对 COSMIC GPS 掩星反演的水汽廓线的质量验证不够严谨。

无线电探空仪(radiosonde)是目前气象业务中实地探测地球水汽廓线最常用的工具。无线电探空数据是数值天气预报(Numeric Weather Prediction, NWP)系统的基本输入资料,长期以来作为标准观测值对各种气象卫星资料进行校正^[9-10]。在理想条件下,用无线电探空观测能够得到较高质量的气象参数数据,温度能够达到 ± 0.2 K,气压达到 ± 0.5 hPa,相对湿度达到 $\pm 2\%$ 以上^[3,11-12]。一般情况下,探空站一天早、晚各观测一次,并且全球分布极不均匀。同时,由于探空气球上传感器本身的局限,探空站观测的水汽廓线不可避免地引入了一定程度的误差。而且,探空站在不同区域采用的探空仪和传感器型号不尽相同,探空资料的误差在不同区域并不一致^[13-14]。并且探空站释放的探空气球在上升过程中是随风飘动的,因此探空资料还存在水平漂移误差。一般情况下,探空气球在低对流层的平均漂移距离在几千米左右,在对流层中部的平均漂移距离约为 5 km,在对流层上部的平均漂移距离约为 20 km^[15]。同时,高度在 1~10 km 高度范围内,COSMIC 掩星点的切点的漂移距离约为 102 km,在 1~20 km 高度范围内的掩星点切点的水平漂移距离约为 136 km^[14]。因此,本文在比较无线电探空站与 COSMIC 掩星反演的比湿廓线时采用两者之间的时间观测限值为 1 h,空间距离差限值采用 100 km 的配对标准。

1 数据和方法

为了消除数据的季节及年际变化对 COSMIC GPS 掩星反演比湿廓线的影响,本文只采用了 2006—2012 年北半球冬季(12 月、1 月、2 月)的 COSMIC GPS 掩星反演的比湿数据与低纬度地区的无线电探空数据及大气成分和气候监测(Monitoring Atmospheric Composition & Climate, MACC)再分析数据进行比较分析。

1.1 COSMIC GPS 掩星观测数据

在中性大气层内(包括对流层和平流层),大气折射率 N 可用多普勒频移和弯曲角反演得到^[2]。由弯曲角反演的大气折射率 N 与温度 T (K)、大气压 P (hPa) 及水汽压 e (hPa) 有关,公式如下:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,在中性大气层中,GPS 掩星观测资料包含了水汽和温度的信息。通过一维变分同化技术,可以反演出 e 和 T 的廓线。

文中所用的 COSMIC 水汽廓线是由 COSMIC 数据分析与处理中心(COSMIC Data Analysis and Archive Center, CDAAC)提供的“wetprf”数据^①。其中比湿 q 可由式(2)得出^[11]:

$$q = \varepsilon \cdot \frac{e}{p - (1 - \varepsilon)e} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon = R_d/R_v$ (≈ 0.622), R_d 、 R_v 分别为干空气及水汽的气体常数。

1.2 IGRA 无线电探空数据

本文利用美国国家气候数据中心(National Climatic Data Center, NCDC)提供的综合全球探空资料(Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA)探空站数据来对 COSMIC GPS 掩星数据进行可靠性验证。IGRA 数据是由分布在全球 1500 多个探空站和测风气球在各个年代观测的数据组成,许多测站的数据从 20 世纪 60 年代就开始记录。IGRA 探空站数据质量通过严格的检测,其可靠性也早已被验证^[16-17]。如引言分析,本文采用时间观测限值 1 h,空间距离观测限值 100 km 配对标准来比较 COSMIC GPS 掩星及 IGRA 探空站所得到的水汽廓线。

1.3 MACC 再分析数据

MACC 再分析数据是 ECMWF 提供的一种监测大气成分和气候的分析数据。MACC 再分析数据提供了 2003—2012 年的比湿数据。MACC 再分析数据的垂直分辨率为 23 层,气压值从 1000 hPa 到 1 hPa 分布,水平分辨率为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 。依据 COSMIC GPS 掩星廓线的时间和经纬度,将 MACC 再分析数据内插成与 COSMIC GPS 掩星廓线同时同地发生的廓线,这样可以基本上解决两者之间的配对问题。

2 结果和讨论

2.1 COSMIC GPS 掩星观测数据与无线电探空数据之间的比较分析

利用低纬度地区($30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$)384 个探空站来与 COSMIC 反演的比湿廓线进行比较。众所周

① <http://cosmic.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>

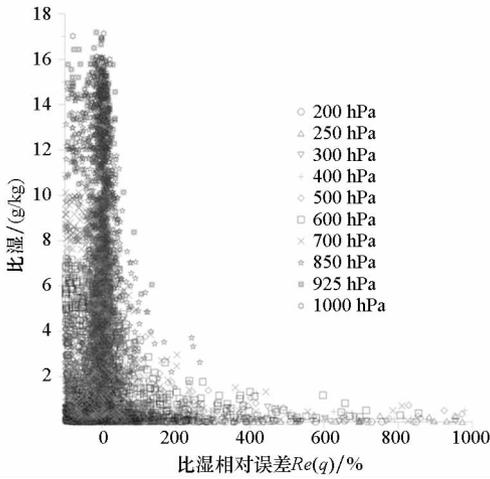
知,在对流层,随着高度的增加,比湿值逐渐减小。且在对流层上层,比湿值很小。另外,在对流层上层,无线电探空站所观测到的比湿值的精度会降低^[18-19]。本文采用比湿的相对误差 $Re(q)$ 来进行统计比较,如式(3)所示。式(3)中 q_{RS} 、 q_{COSMIC} 分别为探空站及 COSMIC 反演的比湿值。为了避免比湿相对偏差 $Re(q)$ 的极端误差影响比较结果,分析了 $Re(q)$ 的分布情况,由图 1 可知, $Re(q)$ 绝大部分都分布在 $-100\% < Re(q) < 1000\%$ 范围内,且主要分布在 $-100\% < Re(q) < 100\%$ 范围内(见图 1(a)), COSMIC 反演的比湿值比较

知,在 600 hPa 高度层,出现极端值的概率较大,负极端值个数为 63,正极端值个数为 135。在统计的对流层不同高度层范围内,只有很少比湿廓线被排除。故而,本文采用 $Re(q) \geq +1000\%$ 及 $Re(q) \leq -100\%$ 来排除极端比湿廓线是可靠的,此结果与王伯睿等的研究结果类似^[14]。

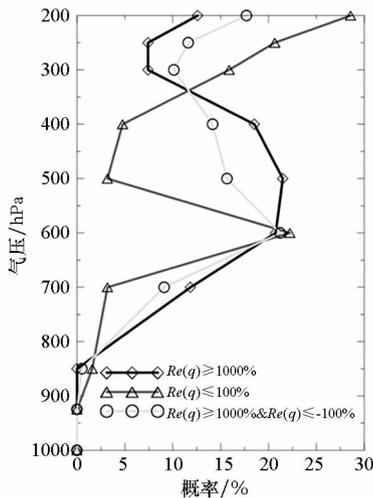
$$Re(q) = \frac{q_{RS} - q_{COSMIC}}{q_{COSMIC}} \times 100\% \quad (3)$$

由前文分析可知,本文采用时间差限值 1 h,空间距离差限值 100 km 来对 COSMIC 反演的比湿廓线及探空站观测的比湿廓线进行配对。总共约有 1120 对廓线,且在 1000 hPa ~ 200 hPa 高度层中,约有 8252 对配对的比湿点值。其中有 8054 (97.6%) 个比湿点值分布在 $-100\% < Re(q) < 1000\%$ 区间上。

图 2 描述了配对好的探空数据与 COSMIC 反演的比湿廓线之间的统计结果比较。由图 2 可知,平均比湿相对误差在统计的各高度层上都小于 20%,比湿相对误差的标准差也小于 20%。在热带地区,探空比湿廓线值要普遍大于 COSMIC 反演的比湿值。统计的所有高度层的平均比湿相对误差为 8%,平均比湿相对误差的标准差为 16%。探空比湿数据相对于 COSMIC 反演的比湿数据的平均相对误差在不同高度是不一样的。在 700 hPa 到 400 hPa 高度层,相对误差呈现正值 (<20%),600 hPa ~ 500 hPa 高度层出现最大的正向相对误差,这主要是因为这段高度层中水汽含量对 COSMIC 反演有很大的影响。在 850 hPa 以下高度层及对流层上层,无线电探空站的值比 COSMIC 反演的比湿值小,两者之间的负相对误



(a) COSMIC 水汽廓线相对误差的分布情况
(a) Distribution of the relative deviation of specific humidity profiles



(b) COSMIC 水汽廓线极端值的概率分布图
(b) Distribution of extreme error of COSMIC specific humidity profiles

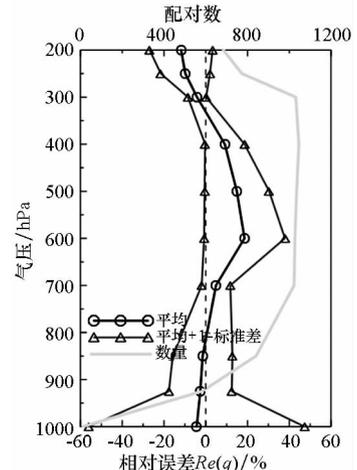


图 2 无线电探空站与 COSMIC 掩星反演的比湿廓线之间的比较统计结果

Fig. 2 Comparison of specific humidity profiles between collocated COSMIC and radiosonde soundings

图 1 COSMIC 反演的水汽廓线相对于无线电探空数据的相对误差的分布

Fig. 1 Distribution of the relative error of COSMIC specific humidity relative to radiosonde dataset

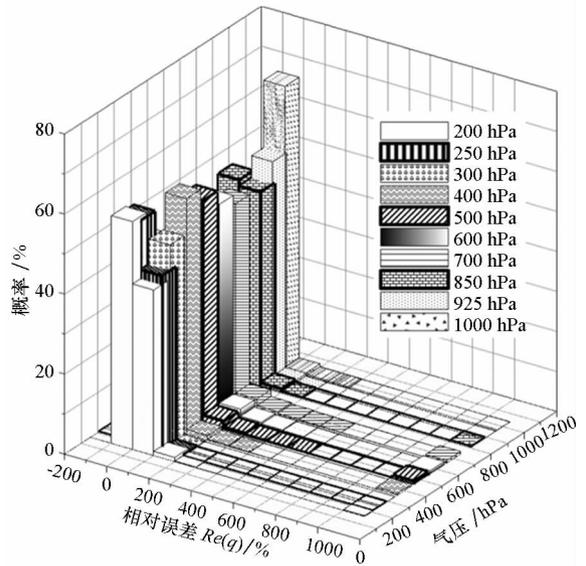
小,则 $Re(q)$ 出现极端值概率更大。由图 1(b)可

差分别小于 5.5% 及 12%。这主要是由于在低对流层, COSMIC 掩星廓线能达到地球表面的廓线数量较少。在对流层上层, 无线电探空站的比湿值出现缺失, 这在图 2 中探空站及 COSMIC 掩星廓线的配对数量中也能反映出来。

2.2 COSMIC GPS 掩星观测数据与 MACC 再分析数据之间的比较分析

为了更好地分析水汽对 COSMIC GPS 掩星的影响, 本文给出了 COSMIC 反演的水汽廓线与 MACC 再分析数据之间的统计结果比较。与 2.1 部分一样, 这里采用了相同的统计方法。不过鉴于低纬度地区水汽含量过高, 这里不仅对低纬度地区(30°S ~ 30°N)进行了统计分析, 同时对全球范围内的 COSMIC GPS 掩星比湿廓线也做了统计分析。尽管 MACC 比湿数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿廓线的相对误差分布与图 1 类似, 但由于数据量过大, 再用图 1(a) 这种形式并不能很好地描述 MACC 再分析数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿廓线的相对误差分布, 其分布如图 3 所示。图 3 中, 横轴 $-200% < Re(q) < -100%$ 表示 $Re(q) < -100%$ 的分布, 横轴 $1000% < Re(q) < 1100%$ 代表 $Re(q) > 1000%$ 的分布。

由图 3 可以看出, 在 2006 年 12 月至 2012 年 12 月这段时期的冬季, 约有 288 663 (883 041) 对 MACC&COSMIC 比湿廓线分布于低纬度地区(全球范围)。在低纬度地区(全球范围), 有 95.6% (97.6%) 的比湿相对误差在 $-100% < Re(q) <$



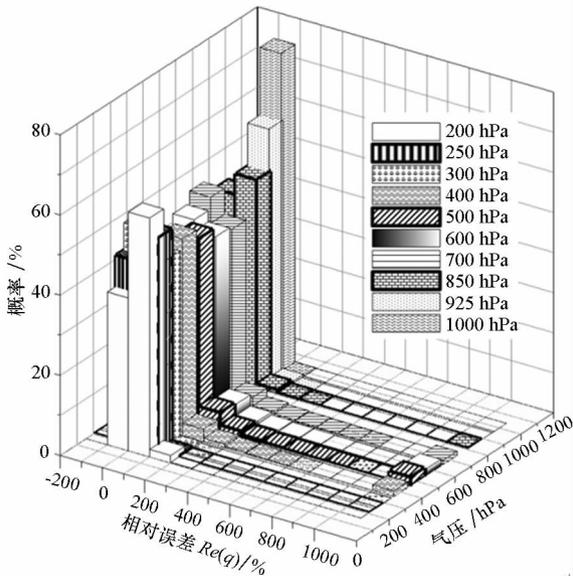
(b) 全球比湿廓线的相对误差的概率分布
(b) Distribution of relative deviations of specific humidity for globe

图 3 MACC 再分析数据相对于 COSMIC 比湿廓线的相对误差的概率分布

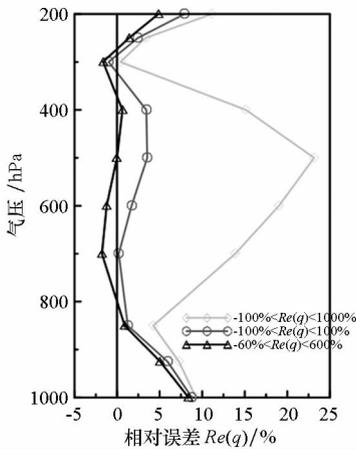
Fig. 3 Probability distribution of relative deviation between MACC-reanalysis and COSMIC specific humidity profiles

100% 范围内。在 $Re(q) \leq -100%$ 范围内, 在统计的高度层, 几乎没有比湿廓线。全球范围内, 99% 以上的比湿相对误差在 $-100% < Re(q) < 1000%$ 范围内。为了使水汽对 COSMIC 反演的结果能够更好地量化, 采用比湿相对误差位于不同区间内的取值, 来分析 MACC 再分析比湿数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿数据的质量变化。

图 4 描述了 $Re(q)$ 不同范围内, MACC 再分析比湿数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿数据的平均相对误差随高度的变化。在全球范围内 $-100% < Re(q) < 1000%$, 除了在 250 hPa 高度层(平均相对误差为 $-0.645%$) 以外, MACC 再分析数据比 COSMIC GPS 掩星比湿值小。在 700 hPa 到 400 hPa 高度层范围, MACC 再分析数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿数据的正平均相对误差随着 $Re(q)$ 范围的减小急剧减小。在低纬度地区也有相似的情况。在低纬度地区, 相比于全球范围, MACC 再分析数据显示一个更大的平均相对误差, 这可能是因为 700 hPa 到 400 hPa 高度范围, 低纬度地区的水汽含量更加充沛, 这对 GPS 掩星获取大气廓线有很大的影响。在 850 hPa 以下高度层, 由于大气水汽含量的影响以及 COSMIC 掩星廓线很少能到达 850 hPa 以

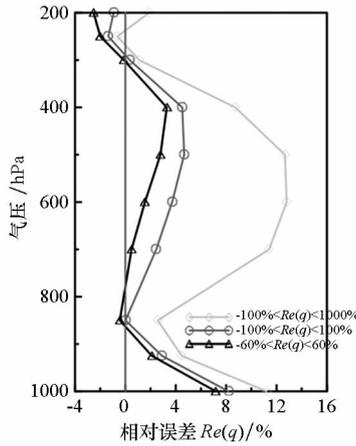


(a) 低纬度地区比湿廓线的相对误差的概率分布
(a) Distribution of relative deviations of specific humidity for low latitude



(a) 低纬度地区 COSMIC 比湿廓线的相对误差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化

(a) Relative deviation between the specific humidity profiles from the COSMIC observations over low latitude areas under different relative deviation ranges



(b) 全球范围 COSMIC 比湿廓线的相对误差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化

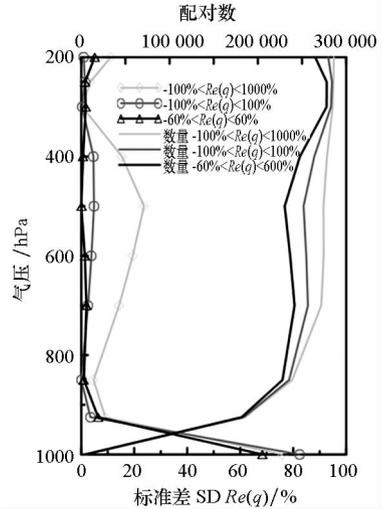
(b) Relative deviation between the specific humidity profiles from the COSMIC observations over globe under different $Re(q)$ ranges

图 4 MACC 数据相对于 COSMIC 比湿廓线的相对误差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化图

Fig.4 Relative deviation between the specific humidity profiles from the COSMIC observations and MACC - Reanalysis under different $Re(q)$ ranges

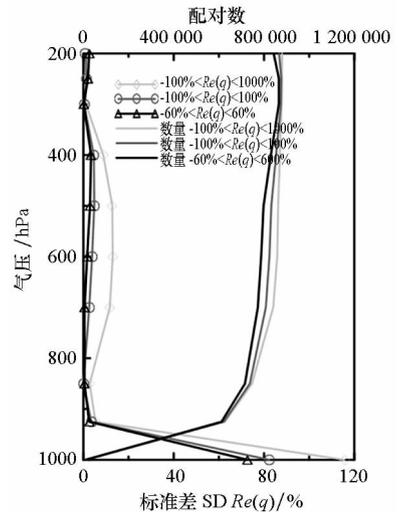
下,故而导致 MACC 再分析比湿数据相对于 COSMIC 比湿的相对误差随着高度的降低而逐渐增大。

图 5 描述了 $Re(q)$ 不同区间范围内,MACC 再分析数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿观测值的标准差随高度的变化。由图 5 可以看出,随着 $Re(q)$ 区间范围的急剧缩小,掩星点值的数量变化却很小。但 MACC 再分析数据相对于 COSMIC GPS 掩星反演的比湿平均相对误差及标



(a) 低纬度地区 COSMIC 比湿廓线的标准偏差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化图

(a) Standard deviation between the specific humidity profiles from COSMIC observations over low latitude under different $Re(q)$ ranges



(b) 全球范围内 COSMIC 比湿廓线的标准偏差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化

(b) Standard deviation between the specific humidity profiles from COSMIC observations over globe under different $Re(q)$ ranges

图 5 MACC 再分析比湿数据相对于 COSMIC 比湿廓线的标准偏差随 $Re(q)$ 值不同区间的变化

Fig.5 Standard deviation between the specific humidity profiles from COSMIC observations and MACC - Reanalysis under different $Re(q)$ ranges. And curves without symbols show the number of data points

准差在统计的高度层区间变化很大,尤其是当排除极端相对误差范围区间由 $Re(q) \geq 1000\% & Re(q) \leq -100\%$ 缩小至 $Re(q) \geq 100\% & Re(q) \leq -100\%$ 时,在 700 hPa 到 400 hPa 高度范围内变化尤其明显。针对全球范围, $Re(q)$ 限制范围为

$-100\% < Re(q) < 1000\%$ ($-100\% < Re(q) < 100\%$; $-60\% < Re(q) < 60\%$) 时, 统计高度层的平均相对误差为 6.62% (2.45%; 1.23%) (见图 4(b)), 平均标准差为 17.37% (10.44%; 8.90%) (见图 5(b))。对于低纬度地区, 统计高度层的平均相对误差为 10.69%, 3.43%, 1.66% (见图 4(a)); 平均标准差依次为 17.73%, 10.11%, 8.79% (见图 5(a))。这些都充分说明了水汽对 COSMIC GPS 掩星反演的影响很大。

3 结论

1) 无论是与低纬度地区的探空站还是 ECMWF 提供的 MACC 再分析比湿数据比较, 总体上, COSMIC GPS 掩星反演的比湿廓线与它们之间的差异性并不大, 有很好的一致性。

2) 水汽对 COSMIC GPS 掩星反演有很大的影响。在对流层中部(700 hPa ~ 400 hPa) 以及对流层低层(850 hPa 以下) 影响尤其明显, 在 850 hPa 高度以下, COSMIC GPS 掩星反演的比湿廓线质量与精度随着高度的减小明显下降。在对流层中部及上层, 出现极端误差值的概率明显变大。

3) 无线电探空站比湿数据在对流层上层的质量及精度明显不足, 同时 COSMIC GPS 掩星反演的比湿数据在低对流层(850 hPa 高度以下) 的精度也存在着问题。

参考文献 (References)

[1] Anthes R A, Rocken C, Kuo Y H. Applications of COSMIC to meteorology and climate[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, 11(1): 115 - 156.

[2] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D19): 23429 - 23465.

[3] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: preliminary results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(1): 19 - 40.

[4] Rocken C, Ying-Hwa K, Schreiner W S, et al. COSMIC system description[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, 11(1): 21 - 52.

[5] Anthes R A, Ector D, Hunt D C, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 313 - 333.

[6] Ho S P, Zhou X J, Kuo Y H, et al. Global evaluation of

radiosonde water vapor systematic biases using GPS radio occultation from COSMIC and ECMWF analysis[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(5): 1320 - 1330.

[7] Sokolovskiy S V, Rocken C, Lenschow D H, et al. Observing the moist troposphere with radio occultation signals from COSMIC[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): 266 - 278.

[8] Kishore P, Ratnam M V, Namboothiri S P, et al. 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]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(13): 1849 - 1860.

[9] 徐晓华, 张克非, 罗佳. GPS 掩星与探空观测统计比较中配对标准的比较研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(11): 1332 - 1335.

XU Xiaohua, ZHANG Kefei, LUO Jia. Research on the collocation criteria in the statistical comparisons of GPS radio occultation and radiosonde observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1332 - 1335. (in Chinese)

[10] Xu X, Luo J, Shi C. Comparison of COSMIC radio occultation refractivity profiles with radiosonde measurements[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(6): 1137 - 1145.

[11] Peixoto J P, Oort A H. The climatology of relative humidity in the atmosphere [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(12): 3443 - 3463.

[12] Wickert J. Comparison of vertical refractivity and temperature profiles from CHAMP with radiosonde measurements [M]. *Geoforschungszentrum Potsdam*, 2005.

[13] Sun B, Reale A, Seidel D J, et al. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D23): 6696 - 6705.

[14] Wang B R, Liu X Y, Wang J K. Assessment of COSMIC radio occultation retrieval product using global radiosonde data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 5(6): 8405 - 8434.

[15] Seidel D J, Sun B, Petty M, et al. Global radiosonde balloon drift statistics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D7): D07102.

[16] Eskridge R E, Alduchov O A, Chernykh I V, et al. A comprehensive aerological reference data set (CARDS): rough and systematic errors[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(10): 1759 - 1775.

[17] Durre I, Vose R S, Wuertz D B. Overview of the integrated global radiosonde archive [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(1): 53 - 68.

[18] Elliott W P, Gaffen D J. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72(10): 1507 - 1520.

[19] Soden B J, Lanzante J R. An assessment of satellite and radiosonde climatologies of upper-tropospheric water vapor[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(6): 1235 - 1250.