

GPS/MET 与气象卫星反演大气可降水量的比较

牟凤军, 官莉 (南京信息工程大学遥感学院, 江苏南京 210044)

摘要 介绍了 GPS/MET 与卫星红外遥感大气可降水量的基本原理以及 COSMIC 和 AIRS 的工作方式及反演原理, 并对 COSMIC 与 AIRS 反演的大气可降水量进行比较。结果表明, COSMIC 具有覆盖范围广、垂直分辨率高、全天候的观测特点, COSMIC 反演的大气可降水量比 AIRS 与无线电探空值更接近, 但受掩星事件发生时所能探测最低高度的限制, 不能得到该高度以下的大气信息。AIRS 在晴空时大气可降水量反演精度较高, 但受云天的限制, 在云层以下, 反演精度就大大降低。

关键词 大气可降水量; GPS/MET; COSMIC; AIRS

中图分类号 S127 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)01-00286-04

Comparison of Atmospheric Precipitation between GPS/MET and Meteorological Satellite

MU Fengjun et al (School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

Abstract This study aimed to introduce the basic retrieval principle of atmosphere precipitation from GPS/MET and meteorological satellite respectively and the working mechanism of COSMIC and AIRS. Then the retrieved atmosphere precipitation derived from COSMIC and AIRS was compared. The results showed that the retrievals derived from COSMIC with the features of broad coverage, vertical resolution, quasi-real time and all-weather measurement are closer to the results from radiosonde observations than AIRS retrievals, but the COSMIC shortcoming was that the detection height was limited by occultation observation, so it was not able to acquire the lower atmospheric information. Though AIRS has the better retrieval precision in clear sky, it couldn't be used to detect under cloudy conditions.

Key words Atmospheric precipitation; GPS/MET; COSMIC; AIRS

大气可降水量又称大气的积分水汽量, 表示单位面积气柱的水汽全部凝结并降落到地面的水的厚度。大气中的水汽含量并不仅仅是降水的水源, 而且是降水的动力因子。它决定着气流最大上升速度的强弱, 决定着中小尺度暴雨天气系统的发生发展, 它是和湿斜压强烈发展的特定区域相联系的。同时, 大气可降水量是一个重要的气象水文参数, 水汽的输送和相变将影响大气中的辐射传输过程, 改变大气的热力和大气环流^[1]。因此, 监测大气水汽的时空分布及其变化, 对于数值天气预报和气候变化等方面的研究极其重要。

1 GPS/MET 反演大气可降水量原理

1.1 全球定位系统(GPS)定位原理 GPS 的定位依据是“三边测量法”, 即通过测量未知点到已知点的距离, 从而求出该点的位置。设 GPS 接收机的位置为 (x, y, z) , 接收机时钟误差为 t , 则可以列出下列方程组:

$$\begin{aligned} & \left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} \\ & = C_0(t_i - t - t_i) \quad (i = 1 \sim 4) \end{aligned} \quad (1)$$

通过求解可得到 x, y, z 和 t 这 4 个未知量, 即为 GPS 定位基本原理^[2]。

1.2 GPS/MET 反演大气可降水量基本原理 当 GPS 卫星发送的电磁波信号穿过地球大气到达接收机时, 地球大气的各个部分都要与它发生相互作用。因此主要由于以下 3 个方面引起延迟: 电离层对电磁波的折射; 干空气对电磁波的折射; 对流层湿空气对电磁波的折射。把各个部分相互作用的延迟量引入到解算模型中, 考虑误差来源并予以消除后对高精度的大气延迟量与定位参数一起求解。然后, 通过双频技术订正电离层延迟到毫米量级, 通过地面气压观测订正干空气的延迟到毫米量级, 最后得到毫米量级的湿空气延迟, 由此提取大气总的水汽含量。

1.3 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 系统介绍

笔者以空基的 COSMIC 掩星系统为例, COSMIC 气象、电离层及气候卫星探测系统于 2006 年 4 月 14 日发射, 系统包括低地球轨道卫星(LEO)、地面数据接收与飞行器测控站、数据分析中心和数据通信网络等, 主要是为了进行气象与气候研究、气候监测、空间天气和大地测量等研究^[3]。COSMIC 星座由 6 颗近地轨道卫星构成, 采用 3 轴稳定系统, 轨道倾角为 72° , 轨道高度为 800 km, 卫星轨道升交点在赤道上平均分布。为进行气象、空间天气研究及预报、气候监测和地面测量, 每颗低轨卫星携带 3 种科学试验有效载荷: GPS 掩星接收机、小型电离层光度计和三频段信标发射机^[4]。这些低轨卫星和 GPS 卫星对地球进行临边掩星探测, 目前每天低轨卫星大约可反演获得电离层和大气参数的 1 800 个独立的垂直廓线数据, 预期能达到 2 500 个。这些剖面包括从地球表面到约 60 km 高度的全球大气折射率、气压、密度、温度和水汽压等气象参数, 以及 90 ~ 800 km 的电离层数据。COSMIC 卫星数据通过 L 波段传输到 2 个高纬度地面站, 地面接收站再将数据传送到 COSMIC 数据分析和存储中心(CDAAC), CDAAC 作为 COSMIC 中的关键部分, 将负责 COSMIC 的数据分析和存储, 其主要功能是监测和控制有效载荷、对输入数据进行质量控制、反演科学数据以及分配和存储数据。CDAAC 处理科学数据, 以 2 种方式输出: 一种是应用于天气和空间天气监测和预报的近实时数据; 另一种是应用于气候和大气研究的更精确、更有效的后处理数据^[5]。

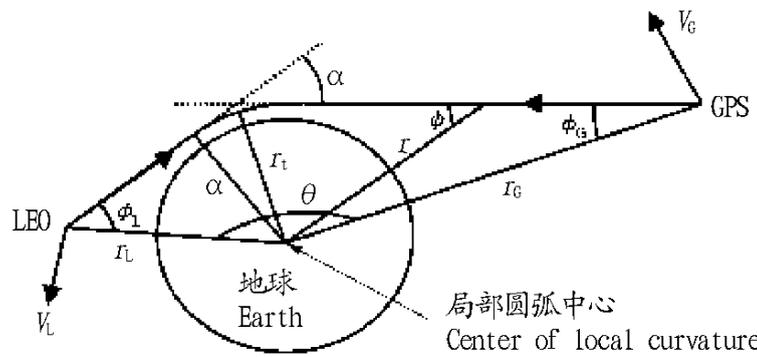
1.4 COSMIC 大气参数反演方法 大气 GPS 掩星观测是指在 LEO 上利用 GPS 接收机临边接收 GPS 卫星发射的电波信号, 当 GPS 卫星发射的电波信号穿过地球大气层时, 由于大气对电波产生的折射效应, 电波射线发生延迟; 地球大气折射率梯度的存在又使信号的路径产生弯曲, 用安装在 LEO 卫星上的高精度 GPS 接收机接收这些延迟信号, 就可观测到掩星事件。在掩星资料处理中, 由于 GPS 卫星的周期远远大于 LEO 卫星的周期, 可以假设 LEO 卫星相对一个“固定”的 GPS

基金项目 国家自然科学基金项目(40605009); 江苏省自然科学基金项目(BK2006575) 资助。

作者简介 牟凤军(1984-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向: 卫星遥感。

收稿日期 2008-10-27

运行,在LEO卫星相对GPS卫星向下或向上运行的过程中,从GPS卫星发出的无线电信号路径在大气中的切点将从大气层顶部向下或从地面向上变化,需要进行一次由上而下或由下而上的大气剖面扫描,完成一次上升或下降的掩星测量。一次掩星观测过程的持续时间约为80 s(若通过整个电离层,该时间会长些)。



注: α 为电波弯曲角; a 为碰撞参数; r_L 为电波与大气的正切半径; v 为射线离地的距离; θ 为2颗卫星矢径之间的夹角; V_L 和 V_G 分别为LEO卫星和GPS卫星的速度矢量; r_L 和 r_G 分别为LEO卫星和GPS卫星到圆心的距离, ϕ_L 为LEO卫星射线与 V_L 的夹角; ϕ_G 为GPS卫星射线与 V_G 的夹角。

Note: α is the bending angle of electric wave; a is the impact parameter; r_2 is the tangent semidiameter between atmosphere and electric wave; r is the distance between ray and earth core; θ is the included angle between the radius vectors of two satellites; V_L and V_G respectively is the speed vector of LEO satellite and GPS satellite; r_L and r_G is respectively the distance between centre and LEO satellite and GPS satellite; ϕ_L is the included angle between LEO satellite ray and V_L ; ϕ_G is the included angle between satellite ray and V_G .

图1 LEO-GPS 掩星观测示意

Fig.1 Sketch map of LEO-GPS occultation observation

图1示意了GPS和LEO卫星构成掩星观测的几何关系。装载在LEO卫星上的GPS双频接收机记录精确的双频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,可得到相位延迟率(或大气多普勒漂移)序列。用已知的精密GPS和LEO卫星轨道信息,即可从观测到的相位延迟率(或大气多普勒漂移)序列计算GPS信号的弯曲角剖面,在地球大气介质局部球对称的假设下,通常用Abel积分逆变换把弯曲角序列反演得到大气折射指数剖面;然后还可以利用理想气体状态方程、流体静力学方程和大气折射率的Smith-Waitraub方程从折射指数剖面反演得到温度、压力、密度和水汽剖面(假设温度剖面可以从模式中获取)^[6]。这种GPS掩星的几何光学标准算法没有合理考虑由折射率剖面同时反演温度和水汽剖面的模糊度困难,因此该掩星技术的标准反演算法不太适合中、低纬度带。COSMIC后处理业务大气产品则以欧洲中尺度天气预报分析欧洲中期天气预报中心(ECMWF)或国家环境预报中心(NECP)提供的全球和局地的较精确的大气参数分布作为背景场,合理考虑这些大气背景场和观测的误差特性,以COSMIC掩星观测得到的折射率廓线作为观测值,采用大气折射率一维变分同化方法同时反演得到大气层的压强、温度以及水汽垂直廓线^[7-8]。

2 星载AIRS(Airborne Infrared Sounder)红外遥感大气可降水量原理

笔者以星载大气红外探测器AIRS反演的大气可降水量

为例与时空匹配的COSMIC反演值进行比较。AIRS与AMSU-A(先进的微波探测器)及HSB(水汽探测器)载在2002年5月4日发射的EOS(地球观测系统)Aqua卫星平台上,从15.0 μm 到3.7 μm 的光谱范围内有2378个红外通道,高光谱分辨率平均为1200(cm^{-1})^[9]。AIRS跨轨迹横扫描宽度约为1650 km,星下点水平分辨率为13.5 km,垂直分辨率为1 km,能提供从地面到40 km高度的大气信息,具有高测量精度和高光谱分辨率的特性,第一次在卫星上实现了真正意义上的对大气海洋环境的高光谱分辨率大气红外探测,提供了一个可以监测全球温度、水汽、臭氧等分布及变化的全新机会。

AIRS大气湿度廓线反演算法采用美国威斯康星大学开发的IMAPP(International MODIS/AIRS Preprocessing Package)软件包中AIRS特征向量统计反演算法,该算法选取前30个特征向量进行经验正交分解,可保证提供足够的光谱信息,用特征向量统计法不仅可以减小回归计算的维数,还可以减小观测噪声的影响^[10]。反演时同时采用亮度温度分类(按窗区波长10 μm 时的亮温观测值分成6类)和扫描角分类(观测扫描角0°~49°分成11类),以提高大气湿度廓线反演精度。AIRS反演可提供从100~0.005 hPa 101层的垂直气压网格上的温度、水汽混合比和臭氧等廓线^[11]。

虽然EOS卫星系统是试验卫星,其有效载荷AIRS也处在试验研究阶段,但AIRS由于其较高的红外光谱分辨率,由其反演的大气温度、湿度廓线精度是目前星载仪器中所能做到较高的,因此该研究将卫星反演精度较高的AIRS仪器与COSMIC反演的大气湿度廓线进行比较。类似的欧洲气象卫星组织EUMETSAT 2006年发射的欧洲新一代极轨业务卫星METOP上装载的红外大气干涉仪IAS(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)已经投入业务使用,在红外波段上有8000多个通道^[12]。

3 GPS/MET与气象卫星资料反演大气可降水量的分析比较

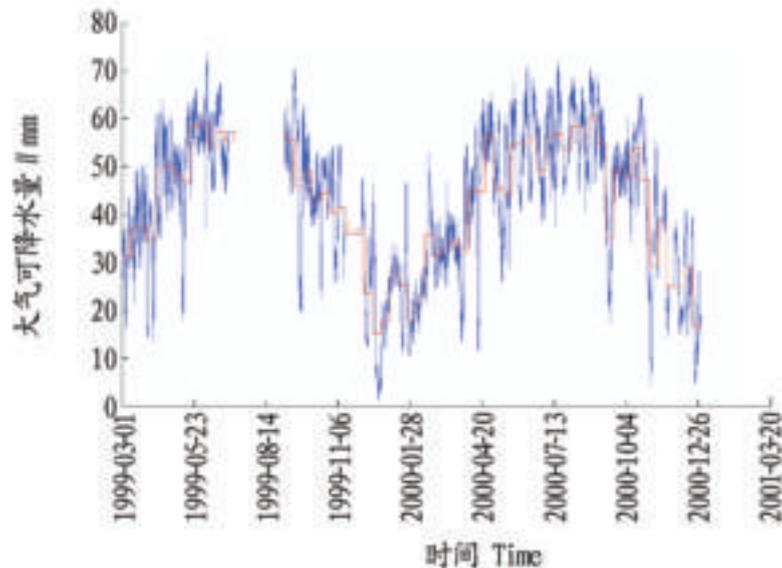
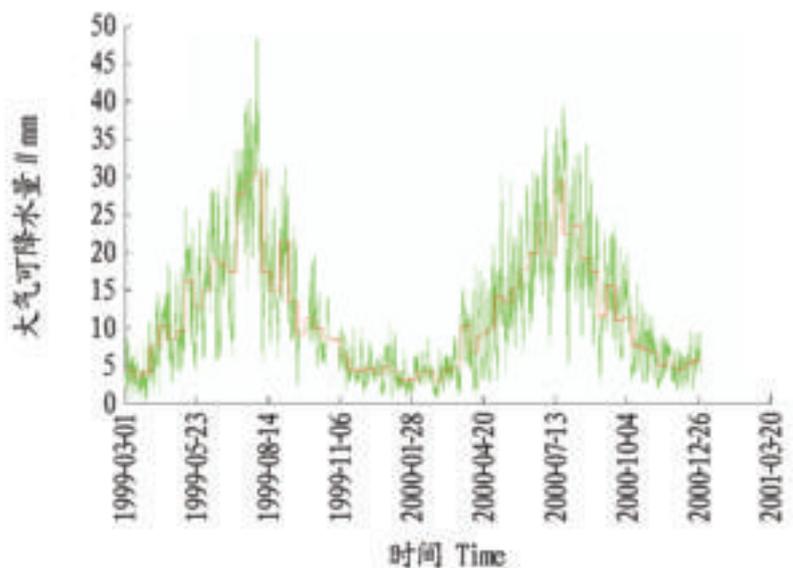
3.1 GPS/MET反演大气可降水量的个例分析

用GPS/MET高时间分辨率的水汽反演产品可分析GPS观测站上空水汽含量随时间的变化,笔者选取乌鲁木齐和广州GPS站点GPS/MET反演的大气可降水量资料为例。乌鲁木齐位于我国的西北部,由于距离海洋较远,加上南有青藏高原,西有帕米尔高原,分别阻止了南来和西来的湿润气流,北冰洋气流很难翻过天山,东亚季风和西南季风到达新疆已很微弱,而且西风急流只给高山带来降水。由此可知,地理位置和大气环流的共同影响,形成了新疆半干旱的气候特征。由图2可知,乌鲁木齐水汽含量比较少,年水汽含量的最大值在40~50 mm,且持续时间很短,大部分时间在30 mm以下。大气可降水量以年为周期呈周期性变化,每年的1~7月,水汽含量呈上升趋势;8~12月,水汽含量逐渐降低。从图形上看,水汽含量大值区持续时间很短,基本处在7月中旬到8月上旬,在这个时间段前后,水汽含量变化得很快。

广州是广东省的省会,位于华南地区。华南地区毗邻热带海洋,水汽来源充分,从环流角度看,4~6月,西太平洋反气旋环流逐渐加强北移,反气旋西北部的西南气流和孟加拉湾西风槽前的西南气流,控制着华南大陆上空,另外,青藏高原

和云贵高原常形成气旋性涡旋东移。此时,当西南槽与华南沿海的反气旋相靠近而造成较大的气压梯度时,华南地区上空常会出现急流,从而给华南地区带来丰富水汽。8~9月,台风登陆,维持了华南的高水汽含量。由图2可知,广州的水汽含量在一年中大部分时间维持在20 mm以上,在5~9月水汽含量都在45 mm以上,其余时间水汽含量维持在20~

40 mm。与乌鲁木齐相似,广州的水汽含量同样呈周期性变化。每年的1~5月,水汽含量呈上升趋势;5~9月,水汽含量很大,虽有起伏,但变化不大;9~12月,水汽含量逐渐降低。同乌鲁木齐相比,水汽含量大值区持续时间比较长,基本上处在5~9月。



注:为1999年3月1日8:00至2000年12月30日6:00曲线;绿线、蓝线为2 h水汽变化曲线;红线为水汽旬分布曲线。

Note: The curve time is 8:00, March 1, 1999 - 6:00, Dec. 30, 2000. Green line and blue line are the curves of vapor distribution every two hours; red line is the curve of vapor distribution every ten days.

图2 乌鲁木齐站点(左)和广州站点(右)GPS反演大气可降水量曲线

Fig 2 The curve of atmospheric precipitation from GPS site in Urumqi (Left) and in Guangzhou (Right).

3.2 COSMIC与AIRS反演大气水汽分布的个例比较 2007年2月27日COSMIC在中国地区发生的掩星事件与AIRS过境观测时间接近的有2次,分别是5号掩星观测的第5次掩星事件G05和第12次掩星事件G12。笔者以这2次掩星事件为例,将COSMIC、AIRS反演的大气湿度廓线与时间、空间匹配的ECMWF、NCEP分析值和无线电探空观测值进行比较,从而得出2种资料对反演大气可降水量的质量比较结果。

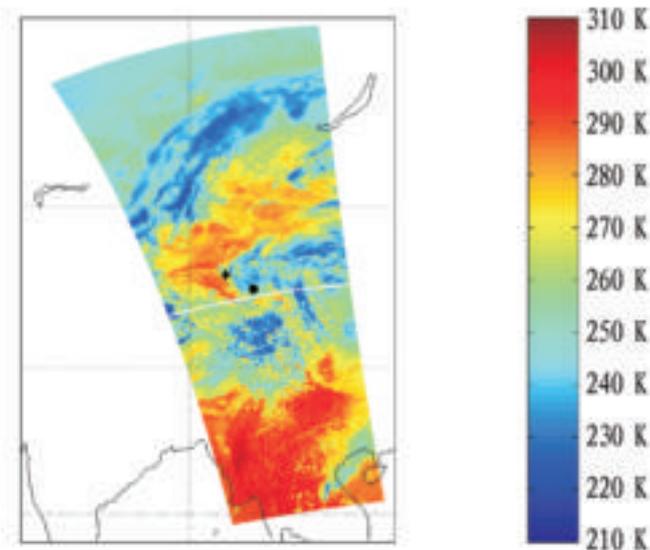
COSMIC G12掩星事件观测时间为7:36(UTC),切点经纬度为96.9°E,37.4°N,该次掩星过程所能探测的最低气压高度为593.3 hPa。与该掩星事件发生点最近的探空站经纬度为98.1°E,36.3°N,与掩星切点位置相距157.8 km。

COSMIC G05掩星事件观测时间为7:37(UTC),切点经纬度为93.9°E,38.8°N,该次掩星过程所能探测的最低气压高度为674.1 hPa。与该掩星事件发生点最近的探空站经纬度为94.8°E,40.1°N,与掩星切点位置相距168.5 km。

与这2次掩星事件发生位置时间和空间都匹配的是AIRS景G066,AIRS景G066观测时间为2007年2月27日6:35~6:47(UTC)。图3显示了COSMIC掩星事件落在AIRS观测轨迹中的位置。

图4给出了COSMIC G12反演的水汽压与AIRS反演值及NCEP、ECMWF数值模式客观分析场和无线电探空观测值的比较,图4b为截取放大图,比较明显的是AIRS在500 hPa以下高度反演的水汽压要比其他方式偏小。由图4a可看出,G12处AIRS观测亮温较低,该处有云覆盖,由于红外对云没有穿透性和IMAPP统计反演算法的局限性,AIRS反演的湿度只有在云层以上高度时较精确,云以下高度的反演结果以云顶处的温、湿值来取代,因此云顶以下高度水汽压反演值都明显偏小,借助上述分析可知此次掩星事件时云顶高度约在400~500 hPa

附近。在云顶以上高度AIRS与COSMIC反演的水汽压很吻合。



注:“+”为G05事件;“*”为G12事件;底图为AIRS景G066在窗区(波长10 μm)观测的亮度温度;较暖的亮温值代表中低云或地表;冷亮温值则代表高云。

Note: “+” is G05 event, “*” is G12 event, background chart is the light and temperature observed by AIRS visual G066 in the window region (wave length 10 μm); the warmer light and temperature represents mid and low clouds or ground; warmer light and temperature represents high clouds.

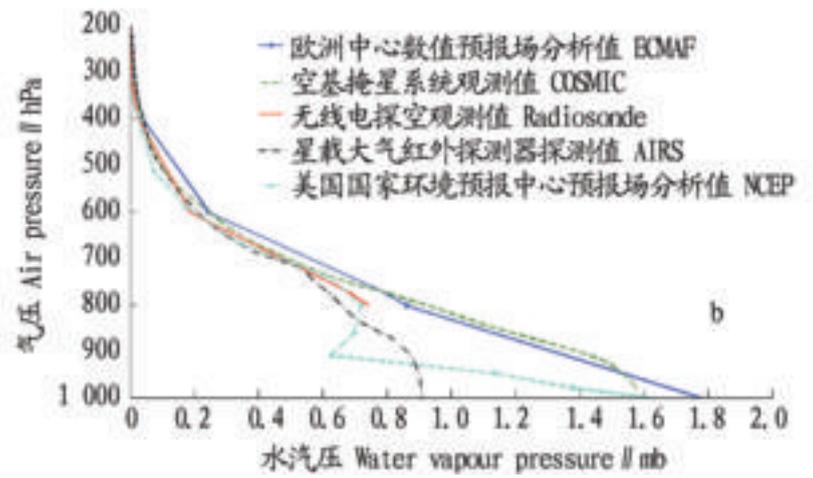
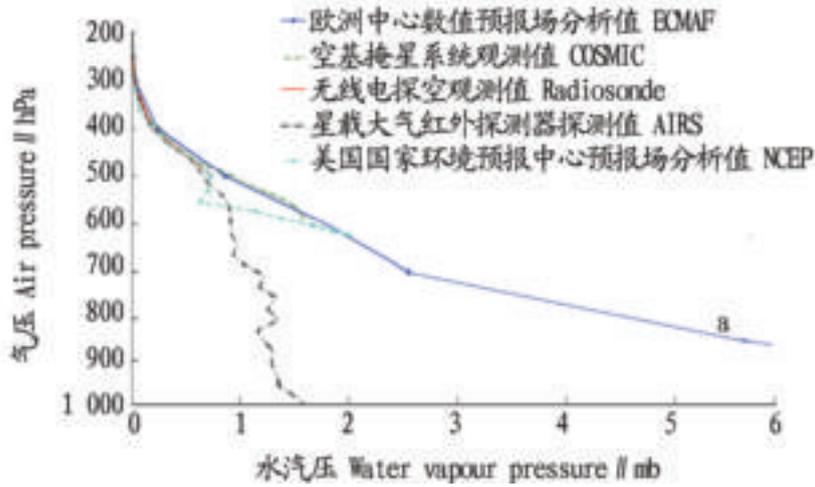
图3 COSMIC掩星事件落在AIRS观测轨迹中的位置

Fig 3 The location of COSMIC occultation events in the observation track of AIRS

图5显示的则是G05的水汽压反演结果,同样COSMIC和AIRS都能显示出水汽变化较精细的垂直结构,但COSMIC由于其高垂直分辨率能提供大气廓线更精细的垂直变化。图5中G05掩星位置处AIRS观测的窗区亮度温度值较高,基本是晴空区,相对上述有云影响视野,AIRS反演的水汽压廓线与无线

电探空测值很接近。总的来说,COSMIC 反演的湿度相比 AIRS 要与无线电探空观测值吻合得更好,由于该次掩星过程所能探

测的最低气压为 674.1 hPa,COSMIC 不能得到其下的水汽压分布。



注:a 为 200 ~1 000 hPa ;b 为 200 ~600 hPa。

Nte :ais 200 - 1 000 hPa ; b is 200 - 600 hPa.

图4 G12 反演的水汽压廓线的比较

Fig.4 The comparison of vapor pressure profile inverted by G12

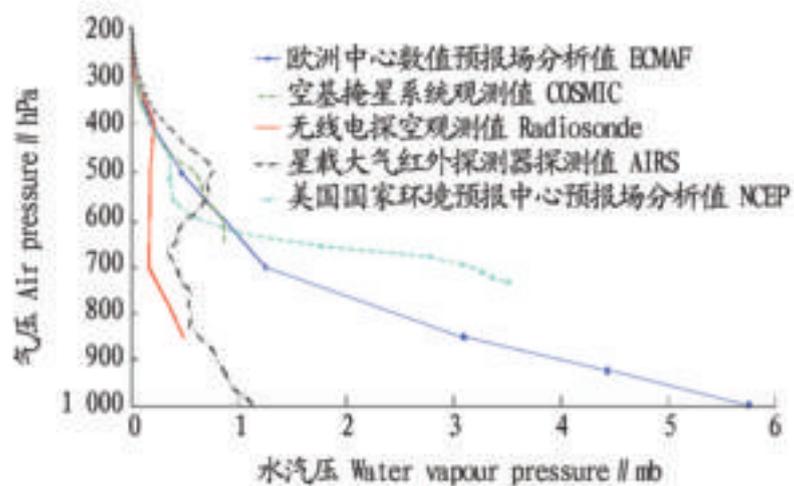


图5 G05 反演的水汽压廓线的比较

Fig.5 The comparison of vapor pressure profile inverted by G05

4 结论

COSMIC 具有全球覆盖、精度高、垂直分辨率高、长期稳定、费用低、全天候和几乎准实时的观测特点,可以提供高垂直分辨率的温度、折射率、压力和水汽信息、重力位势高度,进行各种大气过程的研究,提高数值天气预报的精度。能在各种气象条件下监测地球大气,其长期稳定性、分辨率、覆盖范围和精度都是前所未有的。它为地球表面上难于进行定期测量的地区提供了一个全新的测定大气剖面的方法,这对广阔的海洋、沙漠和近极地等荒漠地区上空的大气研究具有特定的意义。但受掩星事件时所能探测高度的限制,不能得到该高度以下的大气信息。

AIRS 在晴空时大气温湿廓线反演精度较高,但受云天的限制,在云层以下,反演精度大大降低,仅能得到云顶以上高度的有效信息。

COSMIC 反演的大气湿度廓线相对于 AIRS 而言与无线电探空观测值更接近,能提供大气廓线的更精细结构,但 AIRS 拥有比 COSMIC 大得多的覆盖范围,可覆盖全球。

笔者仅以一天中发生在中国的 2 次掩星事件为例,目前 COSMIC 每天可观测到约 1 800 个掩星事件,需要进一步进行长期、大范围的比对研究。

参考文献

- [1] 李延兴,徐宝祥,胡新康,等.应用地基 GPS 技术遥感大气柱水汽量的试验研究[J].应用气象学报,2001,12(1):61-68.
- [2] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:477-482.
- [3] 王柏春,彭洪森,顾大权,等.COSMIC 及其在气象领域的应用[J].气象科学,2002,22(2):247-252.
- [4] 张大海,郭鹏,张贵霞,等.GPS 掩星技术低轨卫星计划的现状及进展[J].天文学进展,2002,20(2):114-121.
- [5] 郭鹏,洪振杰,张大海.COSMIC 计划[J].天文学进展,2002,20(4):324-334.
- [6] 王鑫,吕达仁.GPS 无线电掩星技术反演大气参数方法对比[J].地球物理学报,2007,50(2):346-353.
- [7] 刘敏,郭鹏.GPS/LEO 掩星观测的变分同化技术[J].天文学进展,2006,24(1):27-41.
- [8] 洪振杰,郭鹏,刘敏,等.GPS 掩星折射率剖面一维变分同化[J].天文学报,2006,47(1):100-110.
- [9] AUMANN H H, CHAHNE M T, GAUIER C, et al. AIRS/ AMSU HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41: 253-264.
- [10] HUNAG H L, ANTONELLI P. Application of principal component analysis to high-resolution infrared measurement compression and retrieval [J]. J Appl Meteor, 2002, 40: 365-388.
- [11] HUANG H L, GUMLEY L E, KATHY STRABALA, et al. International MODIS and AIRS processing package: AIRS products and applications [J]. J Appl Remote Sensing, 2003, 41(2): 379-389.
- [12] 吴雪宝,张凤英,朱元竟.利用高光谱红外探测资料反演大气参数[J].气象科技,2003,31(4):201-205.