

# AIRS 与 COSMIC 反演大气温湿廓线比较

官 莉 牟凤军 赵凤环

(南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044)

**摘要** 将福卫三号星系计划(COSMIC)气象、电离层及气候卫星探测系统、大气红外探测器(AIRS)反演的大气温度和湿度廓线与时间、空间匹配的欧洲中心中期天气预报(ECMWF)、美国环境预报中心(NCEP)分析值和无线电探空观测值进行比较,结果表明,COSMIC具有垂直分辨率高、全天候的观测特点,反演的大气温度和湿度廓线相对于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,反演精度就大大降低。

**关键词** 大气光学;反演;福卫三号星系计划;大气红外探测器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0033

## Comparing the AIRS Temperature and Water Vapor Retrieval Profile with COSMIC

Guan Li Mu Fengjun Zhao Fenghuan

(KLME, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract** Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate (COSMIC) provides a new approach to remote sensing the atmospheric profile for areas difficult to periodically measure. Comparing the vertical profile of atmospheric temperature and water vapor derived from COSMIC and Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) retrievals with the collocated European Center of Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) and National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis values and radiosonde observations is described in detail in this paper. The results show that the retrievals derived from COSMIC with the feature of global covering, high precision and vertical resolution, low consuming, quasi-real time and all-weather measurement are more close to radiosonde observations relative to AIRS retrievals, at the same time COSMIC retrievals can provide the atmospheric profile structure more detail. The COSMIC shortcoming is the detect height be limited by occultation observation, so it cannot acquire the atmospheric information of low sky. Though AIRS has the better retrieval precision in clear sky it still cannot be used to detect cloudy conditions.

**Key words** atmospheric optics; retrieval; COSMIC; AIRS

### 1 COSMIC 系统介绍

福卫三号星系计划(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<sup>[1]</sup>。

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

轨卫星携带三种科学试验有效载荷:GPS掩星接收机;小型电离层光度计;三频段信标发射机<sup>[2]</sup>。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1800个独立的垂直廓线数据,预期能达到2500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波段传输到两个高纬度地面站,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,以两种方式输出: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<sup>[3]</sup>。

无线电探空仪是目前最精确的大气数据源之一,全球分布的约 900 个探空仪网络直接影响全球数值天气预报的精度。但是无线电探空仪在时间和空间上的分辨率较低,绝大多数站点每天只观测 2 次,图 1 给出了某天 COSMIC 掩星事件和全球探空站的位置分布图,其中圆圈为探空站位置,菱形为 COSMIC 掩星事件位置,可以看出,在广阔的海洋和荒漠上很少部署无线电探空仪,而 COSMIC 探测点在全球较均匀地分布。相对于其他观测系统, COSMIC 具有许多独特的特征,如数据的高精度、高垂直分辨率、受云和降水影响较小以及长期稳定、费用低等。所有这些特征使 COSMIC 数据能有效地补充其他观测系统,进行大量气象过程的研究。

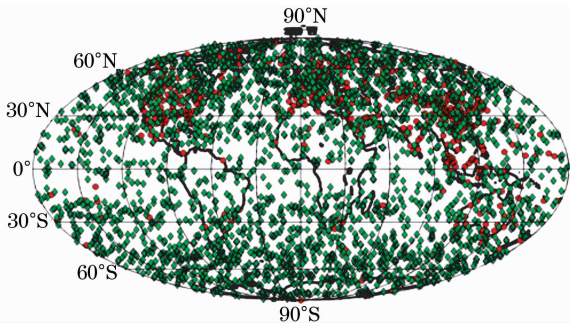


图 1 COSMIC 掩星事件和全球探空站的位置分布

Fig. 1 COSMIC occultation events and distribution of global radiosonde station

## 2 COSMIC 大气参数反演方法

大气 GPS 掩星观测是指在低轨卫星 (LEO) 上利用 GPS 接收机接收 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 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大约为 80s(若通过整个电离层,该时间会长些)。

图 2 简单示意了 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,通常用阿贝 (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-Weintraub 方程,还可以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得)<sup>[4]</sup>。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 ECMWF 或 NCEP 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量的误差特性,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<sup>[5,6]</sup>

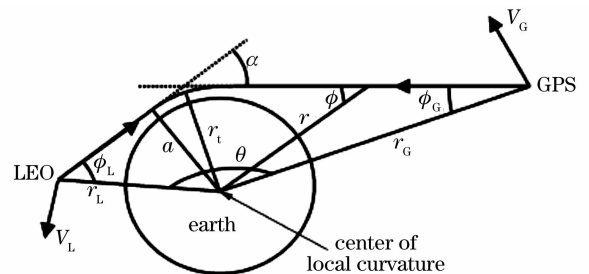


图 2 LEO-GPS 掩星观测示意图

Fig. 2 Geometry of the LEO-GPS occultation

CDAAC 网址为 <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/>,在线提供近实时的 COSMICRT 产品(几小时后可得到)和 COSMIC 后处理反演产品(一般 6 星期后可得到)。Level 2 的大气产品主要为 wetPrf,提供大气折射指数、温度和水汽等垂直廓线。

## 3 AIRS 反演大气温湿垂直廓线

大气红外探测器 (AIRS) 与进的微波探测器

(AMSU-A)及水汽探测器(HSB)载在2002年5月4日发射的地球观测系统(EOS)Aqua卫星平台上,从 $650\text{ cm}^{-1}$  ( $15\mu\text{m}$ )到 $2700\text{ cm}^{-1}$  ( $3.7\mu\text{m}$ )的光谱范围内有2378个红外通道,高光谱分辨率平均为 $1200(\lambda/\Delta\lambda)^{[7,8]}$ 。AIRS跨轨迹横扫扫描宽度约为 $1650\text{ km}$ ,星下点水平分辨率为 $13.5\text{ km}$ ,垂直分辨率为 $1\text{ km}$ ,能提供从地面到 $40\text{ km}$ 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,为我们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的机会。

AIRS大气温湿廓线反演算法采用美国威斯康星大学开发的国际MODIS/AIRS预处理软件包(International MODIS/AIRS Preprocessing Package, IMAPP)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,可以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<sup>[9]</sup>。反演时同时采用亮度温度分类(按窗区波数 $1000\text{ cm}^{-1}$ 时的亮温观测值分成六类)和扫描角分类(观测扫描角 $0^\circ\sim 49^\circ$ 分成11类),以提高大气温湿廓线反演精度。AIRS反演可提供从 $110000\text{ Pa}$ 到 $0.5\text{ Pa}$  101层的垂直气压网格上的温度、水汽混合比和臭氧等廓线<sup>[10]</sup>。

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、湿度垂直廓线精度是目前星载仪器中所能做到较高的,因此本研究将卫星反演大气参数精度较高的AIRS仪器与COSMIC反演的大气温湿廓线进行比较,相互验证。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上装载的高光谱红外大气干涉仪(IASI)已经投入业务使用,在红外波段上有八千多个通道<sup>[11]</sup>。

#### 4 反演个例比较

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。就以这两次掩星事件为例将COSMIC, AIRS反演的大气温度和湿度廓线与时间、空间匹配的欧洲中心中期天气预报(ECMWF)、美国环境预报中心(NCEP)分析场资料和无线电探空观测值进行比较。

COSMIC G12掩星事件观测时间为 $07:36$  (UTC),切点经纬度为 $37.4^\circ\text{N}, 96.9^\circ\text{E}$ ,该次掩星过程所能探测的最低气压高度为 $593.3\text{ hPa}$ 。与该掩星事件发生点最近的探空站经纬度为 $36.3^\circ\text{N}, 98.1^\circ\text{E}$ ,与掩星切点位置相距 $157.8\text{ km}$ 。

COSMIC G05掩星事件观测时间为 $07:37$  (UTC),切点经纬度为 $38.8^\circ\text{N}, 93.9^\circ\text{E}$ ,该次掩星过程所能探测的最低气压高度为 $674.1\text{ hPa}$ 。与该掩星事件发生点最近的探空站经纬度为 $40.1^\circ\text{N}, 94.8^\circ\text{E}$ ,与掩星切点位置相距 $168.5\text{ km}$ 。

与这两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 $06:35\sim 06:47$  (UTC),图3显示了COSMIC掩星事件落在AIRS观测轨迹中的位置,‘+’为G05事件,‘\*’为G12事件,底图为AIRS景G066在窗区(波数 $1000\text{ cm}^{-1}$ )观测的亮度温度,比较暖的亮温值意味着中低云或地表,而冷的亮温值则代表高云。

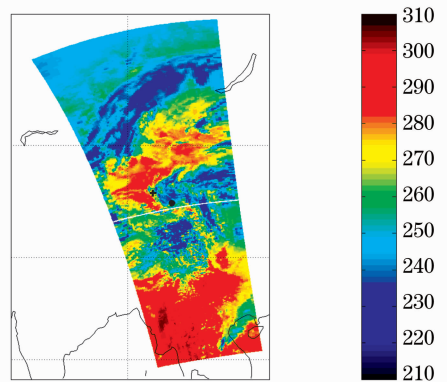


图3 COSMIC掩星事件落在AIRS观测轨迹中的位置  
Fig. 3 Location of COSMIC occultation events collocated in AIRS observation granules

图4给出了COSMIC G12反演的大气温度廓线与AIRS反演值及NECP, ECMWF数值模式客观分析场和无线电探空观测值的比较, (a)显示的是从地面 $1000\text{ hPa}$ 到高空 $1\text{ hPa}$ 的整层廓线,而(b)则是截取 $10\sim 300\text{ hPa}$ 高度的结果放大显示。整体来说COSMIC与AIRS反演值都较接近,都能反演出很细微的温度垂直变化特征。在低于 $500\text{ hPa}$ 的高度上AIRS温度反演值开始比COSMIC和其他模式分析值明显偏低,由于该次掩星过程所能探测的最低气压高度为 $593.3\text{ hPa}$ ,所以没办法具体再比较COSMIC在低层的反演情况。由于COSMIC后处理产品是以ECMWF客观分析场为初始值,采用大气折射率一维变分同化方法反演大气温湿廓线的,

因此 COSMIC 反演曲线与 ECMWF 分析曲线相对 NECP 而言要更接近。在 10 hPa 以上高度, COSMIC 与 AIRS 和模式的分析值相差较大。在放大的 10~300 hPa 高度段, 相对于 AIRS COSMIC 反演的温度更接近无线电观测值, 除了 50~80 hPa COSMIC 反演温度与无线电观测值相差较大。

图 5 给出了 COSMIC G12 反演的水汽压与 AIRS 反演值及 NECP, ECMWF 数值模式客观分析场和无线电探空观测值的比较, 图 5(b) 为截取放大图, 同样 COSMIC 反演值与 ECMWF 值较接近, 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明显偏小。从图 3 可看出 G12 处 AIRS 观测的亮度温度较低, 是云覆盖区域, 由于红外对云没有穿透性和 IMAPP 统计反演算法的局限性, AIRS 反演的大气参数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, 因此云顶以下高度温度和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。

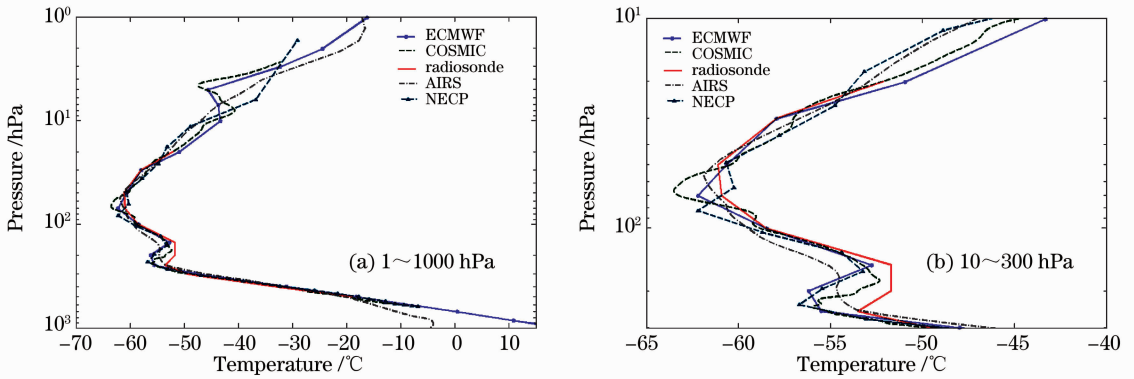


图 4 G12 反演的温度廓线的比较  
Fig. 4 Retrieved temperature profile of G12

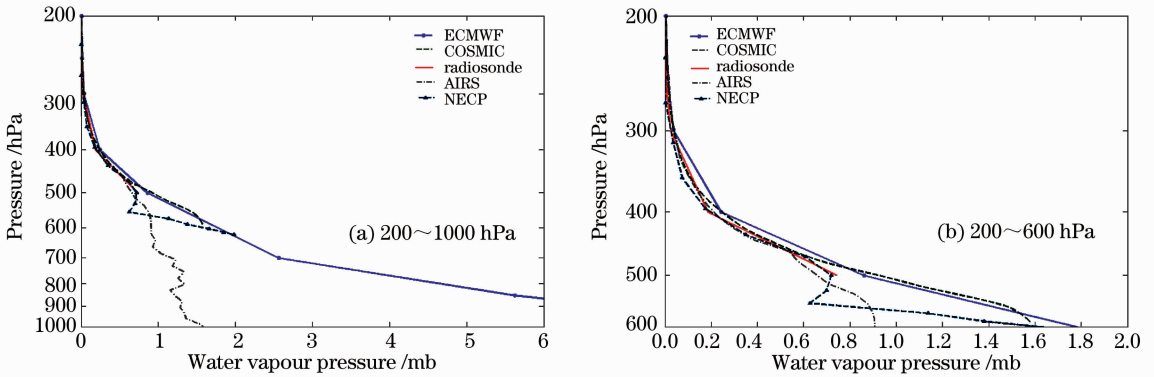


图 5 G12 反演的水汽压廓线的比较  
Fig. 5 Retrieved water vapor pressure profile of G12

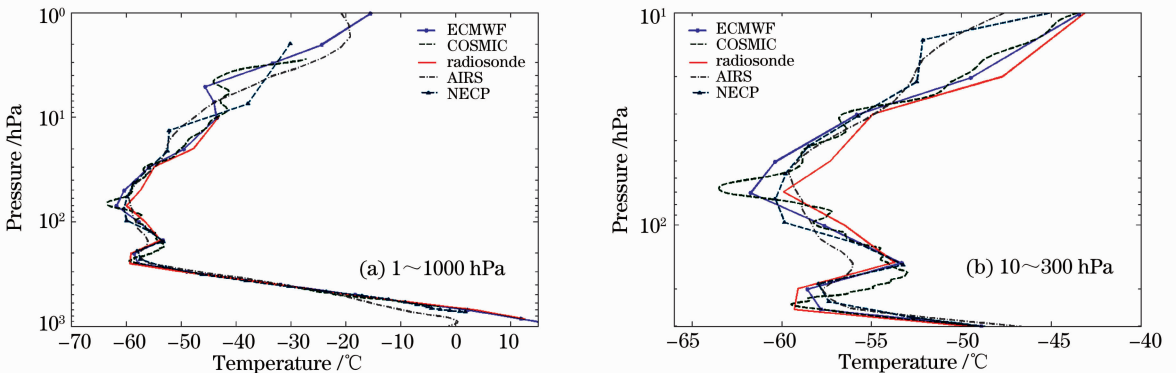


图 6 G05 反演的温度廓线的比较  
Fig. 6 Retrieved temperature profile of G05



图6和图7分别显示的则是G05的温度和水汽压反演结果。同样COSMIC和AIRS都能显示出温度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3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反演的温度相比AIRS要与无线电探空观测值吻合的更好,从图6(b)的截取放大图中看得很清楚,但60~80 hPa上COSMIC反演的温度依旧与无线电观测值相差较大,需要进一步探讨原因,而在该高度上AIRS反演值与无线电探空测值接近。由于该次掩星过程所能探测的最低气压高度为674.1 hPa,COSMIC不能得到其下的温度、水汽压分布。

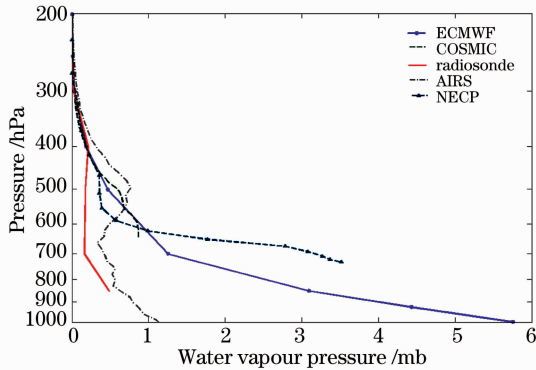


图7 G05反演的水汽压廓线的比较

Fig. 7 Retrieved water vapor pressure profile of G05

## 5 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,反演精度就大大降低,仅能得到云顶以上高度的有效信息。

COSMIC反演的大气温度和湿度廓线相对于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。

本文仅以一天中发生在中国的两次掩星事件为例子,目前COSMIC每天可观测到约1800个掩星事件,需要进一步做长期、大范围的比对。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Baichun, Peng Hongmiao, Gu Daquan *et al.*. COSMIC and its application to meteorology [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2002, **22**(2):247~252  
王柏春,彭洪淼,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
- 2 Zhang Dahai, Guo Peng, Zhang GuiXia *et al.*. Recent proceeding on GPS based LEO satellite project [J]. *Progress in Astronomy*, 2002, **20**(2):114~121  
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
- 3 Guo Peng, Hong Zhenjie, Zhang Dahai. COSMIC project [J]. *Progress in Astronomy*, 2002, **20**(4):324~334  
郭鹏,洪振杰,张大海. COSMIC计划[J]. *天文学进展*, 2002, **20**(4):324~334
- 4 Wang Xin, Lü Daren. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with GPS occultation measurements [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, **50**(2):346~353  
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
- 5 Liu Min, Guo Peng. Assimilation technique of GPS/LEO occultation data [J]. *Progress in Astronomy*, 2006, **24**(1):27~41  
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
- 6 Hong Zhenjie, Guo Peng, Liu Min *et al.*. 1DVAR retrieval of refractivity profiles by GPS occultation [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2006, **47**(1):100~110  
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
- 7 H. H. Aumann, M. T. Chahine, C. Gautier *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
- 8 Guan Li, Huang Hung-Lung. AIRS measurement artifact due to array detector co-registration error [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(2):153~156  
官莉, Huang Hung-Lung. 大气红外探测仪AIRS的探测器阵列定位误差[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2):153~156
- 9 H. L. Hunag, P. Antonelli. Application of principal component analysis to high-resolution infrared measurement compression and retrieval [J]. *J. Appl. Meteor.*, 2002, **40**:365~388
- 10 W. Elisabeth, L. H. Huang, J. Li *et al.*. International MODIS and AIRS processing package: AIRS products and applications [J]. *J. Appl. Remote Sensing*, 2007, **1**:013519
- 11 Wu Xuebao, Zhang Fengying, Zhu Yuanjing. Retrieval of thermodynamic parameters using high spectral resolution infrared measurements from satellites and aircraft [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2003, **31**(4):201~205  
吴雪宝,张凤英,朱元竞. 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