



# 利用FY-3C折射率对大气边界层高度的反演与分析

朱洲宗<sup>1</sup> 徐晓华<sup>1,2</sup> 罗佳<sup>1,3</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 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:**2013年中国发射了首颗进行全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)掩星观测的气象卫星风云3号C星(Fengyun-3C,FY-3C),且已发布自2014年6月以来的FY-3C掩星大气产品,但目前还未见将其应用于大气边界层的相关研究。首次尝试利用FY-3C折射率产品确定边界层高度并进一步进行空间分布分析。结果表明,在小波协方差变换法基础上,进行尖锐度约束,能够确定FY-3C掩星低层大气折射率廓线中可能存在的突变,反演边界层高度。所得到的2015—2018年各年边界层高度全球分布在不同纬度及海洋和陆地上的差异基本体现了边界层与地表气候及地形的关系,但FY-3C折射率产品在低层大气的精度和垂直分辨率相对较低。因此,反演成功率总体上较低,反演结果对边界层高度空间分布细节特征的呈现仍有待提升。

**关键词:**掩星;FY-3C;折射率;大气边界层高度;小波协方差变换法

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

大气边界层(atmospheric boundary layer, ABL)是对流层中高度最低且直接受地球表面影响的大气层,其包含的大量水汽和热量对全球能量和水汽循环均有一定影响<sup>[1]</sup>。大气边界层顶(atmospheric boundary layer top, ABLT)的高度为大气边界层高度(atmospheric boundary layer height, ABLH)。ABLH是地球大气中各种通量和物质上下交换的重要通道<sup>[2]</sup>,而ABLH是表征ABLH特征的一个重要参数,其精确确定对于对流层、大气化学、环境污染、自然灾害、数值天气预报和气候监测相关研究具有重大意义<sup>[1]</sup>。进行ABLH确定的传统手段如各种雷达探测、模式资料、系留气球分别在观测稳定性、垂直分辨率和探测高度上存在局限性,而无线电探空资料的地理分布相对有限<sup>[3-4]</sup>。近年来,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)掩星(radio occultation, RO)技术发展迅速,由于掩星资料具有高垂直分辨率、全球覆盖、高精度、全天候和无需定标等优点<sup>[5]</sup>,掩星资料对于ABL结构

研究的价值受到越来越多的关注。

早期 Von 等<sup>[6]</sup>基于 CHAMP (challenging minisatellite payload)掩星闭环模式的跟踪资料,提出了可根据全谱反演的振幅变化确定 ABLH。由于开环跟踪技术在 COSMIC (constellation observing system for meteorology ionosphere and climate)等掩星任务上的实施提高了对低层大气的探测能力,利用掩星资料确定 ABLH 的主要思路是利用掩星弯曲角、折射指数、温度、水汽等参数在低层大气的突变特征确定 ABLH。其中,利用弯曲角廓线反演 ABLH 的误差最小但最复杂<sup>[7]</sup>,而由湿度和温度廓线反演 ABLH 相对容易但误差较大<sup>[8]</sup>,因此,由掩星折射指数(在本文中称为折射率)资料反演 ABLH 最为实用。Sokolovskiy 等<sup>[9]</sup>由 SAC-C 卫星的掩星折射率廓线反演 ABLH,通过与由模式和探空资料得到的反演结果进行比较,验证了其可行性。其后,一些学者进一步基于 COSMIC 等任务的掩星折射率廓线进行了 ABLH 的反演、验证、相关机制分析和

收稿日期:2019-10-08

项目资助:国家自然科学基金(41774033, 41774032, 42074027);国家重点研发计划(2018YFC1503502)。

第一作者:朱洲宗,硕士,主要从事 GNSS 掩星大气研究。zhzzhu@whu.edu.cn

通讯作者:徐晓华,博士,教授。xhxu@sgg.whu.edu.cn

ABL气候研究的工作<sup>[10-14]</sup>。

2013年9月,中国成功发射了首颗可进行GNSS掩星观测的业务气象卫星风云3号C星(Fengyun-3C, FY-3C),且已正式发布FY-3C掩星中性大气产品。Liao等<sup>[15]</sup>和Xu等<sup>[16]</sup>等进行了FY-3C掩星各种中性大气参数廓线的验证工作,但目前还未见将其应用于ABLH研究的相关成果。首次尝试利用FY-3C折射率产品确定边界层高度并进一步进行全球边界层高度空间分布分析。首先,本文介绍了FY-3C折射率产品和反演及分析方法;然后,通过反演结果的代表性个例和统计比较情况验证了方法的可行性,在此基础上进一步对所反演ABLH的全球分布进行了分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据介绍

国家卫星气象中心发布了2014年6月以来的FY-3C掩星中性大气产品<sup>[17]</sup>,包括大气折射率、低层大气湿度和大气温度等廓线产品。折射率廓线产品给出了各掩星事件对应的大气折射率随高度变化的廓线,其高度范围为0~50 km,垂直分辨率为150~300 m。

为了验证利用FY-3C掩星折射率廓线反演ABLH的可行性,本文以COSMIC掩星资料作为参照数据,它的中性大气产品包含干模式大气廓线(atmPrf)和湿模式大气廓线(wetPrf)产品等<sup>[18]</sup>。本文采用wetPrf产品中的折射率廓线作为对比分析的参考资料,其高度范围为0~40 km,垂直分辨率为100 m。

以全球IGRA(integrated global radiosonde archive)探空资料和COSMIC掩星产品为参考,对FY-3C中性大气产品的质量分析表明,于2017年后,廓线质量在整体上有所提高<sup>[16]</sup>。因此,本文使用2017年的FY-3C掩星和COSMIC掩星的大气折射率廓线产品验证其反演ABLH的可行性。在分析全球ABLH的地理分布特征时,为确保数据的长周期性,本文采用了2015—2018年FY-3C掩星折射率资料反演的ABLH。

### 1.2 数据预处理

FY-3C和COSMIC掩星折射率产品的垂直分辨率不一致,故采用3次样条插值法将FY-3C掩星折射率廓线插值为100 m等间隔数据。ABLH一般在离地表高度1~2 km,会因为时间、地点的差异在几百米到几千米之间变化<sup>[14]</sup>。本

文选用了有效数据最低高度小于等于0.5 km、最高高度大于等于5.0 km的折射率廓线。

### 1.3 大气边界层高度反演方法

利用掩星折射率廓线确定大气边界层的方法主要有最小梯度法<sup>[7,10-12]</sup>和小波协方差变换(wavelet covariance transform, WCT)法<sup>[8,13-14]</sup>。梯度法根据掩星折射指数一阶导数的最大负梯度值对应的高度确定ABLH。当折射指数梯度廓线变化剧烈时,梯度法有效;当折射指数梯度变化平缓时,该方法可能失效。因此,本文采用WCT方法确定ABLH。该方法由Gamage等<sup>[19]</sup>提出,在掩星相关应用研究中,最初被应用于从掩星弯曲角廓线确定对流层顶高度<sup>[20]</sup>。Ratnam等<sup>[8]</sup>提出了利用该方法从掩星折射率廓线反演ABLH,发现该方法在折射指数梯度变化相对平缓时比梯度法更有利于确定ABLH。该方法的基本原理是对折射率廓线进行小波协方差变换得到其WCT廓线,将该廓线发生最大阶跃的高度确定为ABLH。其具体变换过程为<sup>[8,13]</sup>:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_0}^{z_1} h\left(\frac{z-b}{a}\right) N(z) dz \quad (1)$$

式中, $N(z)$ 为折射率廓线; $z$ 为廓线上某高度; $z_0$ 和 $z_1$ 分别为参与积分的廓线下边界和上边界高度; $W_f(a, b)$ 为折射率廓线的小波协方差变换值; $a$ 是小波变换的尺度因子(窗口宽度); $b$ 是小波变换窗口的平滑中心; $h((z-b)/a)$ 为小波变换母函数,即Haar基函数,且:

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} 1, & b - a/2 \leq z < b \\ -1, & b \leq z < b + a/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)表明,折射率廓线 $N(z)$ 的WCT变换廓线给出了以高度 $b$ 为中心、 $\pm a/2$ 高度范围内的局部折射率廓线与Haar基函数的相似程度。

在特定高度 $b$ 上, $W_f(a, b)$ 值越大,则该局部折射率廓线与Haar基函数的相似程度就越大,该高度上折射率廓线的阶跃越明显。给定小波变换窗口宽度 $a$ 的值,在折射率廓线上滑动该窗口,WCT值取得最大值时所对应的高度即为由该折射率廓线反演得到的ABLH。Ratnam等<sup>[8]</sup>发现: $a$ 值过大,会影响到可反演的最低ABLH; $a$ 值过小,则会增大折射率廓线中噪声带来的反演误差。因此,本文采用文献[8]推荐的 $a=200$  m。

此外,由于FY-3C掩星折射率廓线在近地表处存在数据缺失,将折射率廓线有效数据的最低

层高度确定为 ABLH 时定义为反演结果无效。考虑到 ABLH 的实际可能范围<sup>[1]</sup>,舍弃超过 3.5 km 的 ABLH 反演值。

### 1.4 相对尖锐度分析

在上述基础上,为确保 ABLH 所表征的大气边界层顶结构的显著性,本文还对 WCT 法反演的 ABLH 进行了相对尖锐度(relative sharpness, RS)约束<sup>[11]</sup>,定义为:

$$RS = \left| \frac{X_m}{X_{RMS}} \right| \quad (3)$$

式中,  $X_m$  和  $X_{RMS}$  分别表示 ABLH 所对应的 WCT 值和 WCT 序列的均方根 (root mean square, RMS)。RS 越大,说明 WCT 法反演的大气边界层顶的结构就越明显。为确保 ABLH 反演结果的有效性,并尽可能保留足够多的反演结果,本文经过多次试验后,对 WCT 法反演 ABLH 采用的相对尖锐度约束为  $RS \geq 1.15$ 。

### 1.5 全球 ABLH 分布分析方法

在分析 ABLH 的全球分布特征时,按照  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  (纬度  $\times$  经度) 的格网大小将全球分为  $72 \times 144$  个单元网格,由每个单元网格内 ABLH 的年均值给出 ABLH 的全球分布。各格网内年均值  $\bar{H}^{p,q}$  的计算公式如下:

$$\begin{cases} \bar{H}^{p,q} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i^{p,q}}{n} \\ \lambda^{p,q} = d_\lambda \times \left( p - \frac{1}{2} \right) - 90^\circ \\ \phi^{p,q} = d_\phi \times \left( q - \frac{1}{2} \right) - 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H_i^{p,q}$  为第  $(p, q)$  个单元网格内第  $i$  条折射率廓线反演的大气边界层高度;  $n$  为该网格内折射率廓线反演的大气边界层高度总数量;  $(\lambda^{p,q}, \phi^{p,q})$  为该网格中心地理坐标;  $d_\lambda$  和  $d_\phi$  分别为全球网格化的纬度分辨率和经度分辨率,取值均为  $2.5^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 FY-3C 掩星折射率廓线反演 ABLH 的结果

本文采用由 COSMIC 掩星折射率廓线反演的 ABLH 对由 FY-3C 折射率廓线得到的反演结果进行验证。采用了时间窗口为  $\pm 1$  h、空间窗口为 150 km 的匹配窗口,获取两个掩星任务时空匹配的折射率廓线对。图 1 给出了 4 组时空匹配的 FY-3C 和 COSMIC 掩星折射率廓线对及相应的 ABLH 反演结果。表 1 给出了各 ABLH 值对应的相对尖锐度。

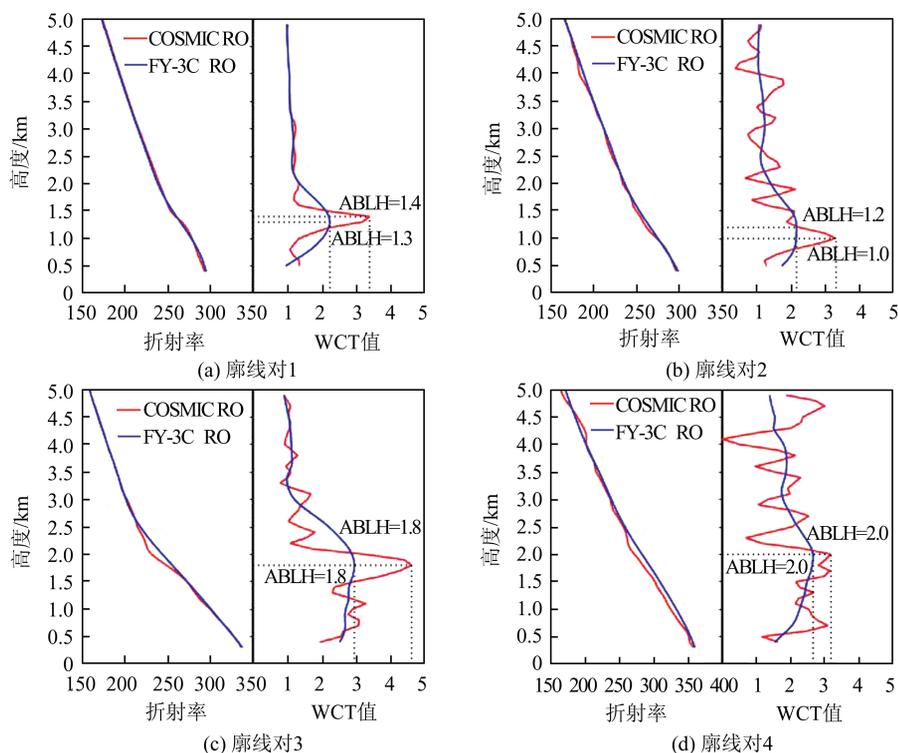


图 1 由 FY-3C 和 COSMIC 掩星的折射率廓线对反演 ABLH 的对比

Fig. 1 Comparison of ABLHs Inverted from Collocated Refractive Index Profiles of FY-3C and COSMIC RO

表1 图1中各廓线对ABLH反演值的相对尖锐度

相对尖锐度	Inverted in Fig. 1			
	廓线对1	廓线对2	廓线对3	廓线对4
RS(FY-3C)	1.6	1.5	1.4	1.3
RS(COSMIC)	2.4	2.2	2.1	1.5

图1(a)~图1(d)分别对应一组廓线对,图1(a)表示廓线对FY-3C:20170104\_2007\_G02和COSMIC:C001.2017.004.21.00.G01;图1(b)表示廓线对FY-3C:20170111\_1642\_G09和COSMIC:C001.2017.011.16.46.G06;图1(c)表示廓线对FY-3C:20170114\_0400\_G18和COSMIC:C001.2017.014.03.40.G18;图1(d)表示廓线对FY-3C:20170128\_0704\_G30和COSMIC:C006.2017.028.06.52.G20。在图1的各分图中,左边为廓线对中的两条原始折射率廓线,右边为相应的WCT值廓线,所对应的ABLH已经在图中标出;红色和蓝色分别代表COSMIC和FY-3C的ABLH反演结果。

由图1(a)和图1(b)的两组廓线对可知,两种掩星资料的ABLH反演结果仅存在0.1 km的差异;而图1(c)和图1(d)的两组廓线对,ABLH反演结果则完全相同,表明利用WCT方法可以探测出FY-3C掩星折射率廓线中可能存在的突变,即利用WCT法由FY-3C折射率廓线反演ABLH是可行的。对比由两个掩星任务的折射率廓线反演ABLH的过程,发现图1(b)~图1(d)所示的3组折射率廓线对中,FY-3C与COSMIC掩星折射率廓线存在较明显的差异,进而导致相应的WCT值序列差异显著。虽然FY-3C产品的折射率随高度变化相对平缓,但ABLH仍被有效确定,验证了WCT法能够检测出折射率廓线中的微弱变化。而COSMIC掩星折射率廓线包含的细节变化更丰富,所对应的WCT值序列的波动性更强。图1(a)的廓线对中,两个掩星任务的折射率廓线符合程度很高,其对应的WCT值廓线的波动无明显区别,但COSMIC折射率廓线对应的WCT值序列的突变性更明显,表明其折射率资料包含的ABL结构特征更显著。

表1给出的各廓线对ABLH相对尖锐度的比较结果也表明,在每个廓线对中,由COSMIC折射率廓线反演的ABLH相对尖锐度均比由FY-3C折射率廓线反演的ABLH相对尖锐度更大。差异存在的原因是FY-3C掩星的低层(5 km以下)大气折射率产品的精度和垂直分辨率与

COSMIC相比都较低,这可能与FY-3C掩星观测的开环跟踪数据质量有一定关系。

进一步对2017年全年两个掩星任务时空匹配的所有有效折射率廓线对反演的ABLH值进行统计,得到ABLH反演成功的廓线对有173组,其散点图如图2所示。

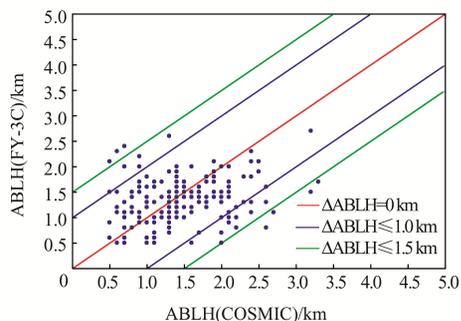


图2 2017年FY-3C和COSMIC掩星折射率廓线对反演的大气边界层高度散点图

Fig. 2 Scatter Plot of ABLHs Derived from Collocated FY-3C and COSMIC RO Refractive Index Profiles During 2017

由图2可知,2017年全年所匹配的FY-3C掩星和COSMIC掩星折射率廓线对反演的ABLH存在一定差异。对差异超过1.5 km的廓线对进行分析,发现差异存在的主要原因是廓线对中FY-3C折射率廓线的垂直分辨率和精度有限。因此,忽略折射率资料本身质量的影响,可以认为两种掩星折射率资料反演的ABLH差异绝对值小于等于1.5 km,且主要集中于1 km以内,这为利用FY-3C掩星折射率资料反演全球ABLH并对其进行特征分析提供了可能性。

## 2.2 用FY-3C折射率廓线反演的全球ABLH分布

在上述由FY-3C掩星折射率廓线反演ABLH的个例比较及统计验证结果的基础上,本文利用2015—2018年的FY-3C掩星折射率廓线对全球ABLH进行了反演。各年FY-3C原始廓线经过质量控制和高度筛选,成功反演及进一步满足相对尖锐度约束条件的廓线数量统计结果,如图3所示。

由图3可见,2015—2018年FY-3C掩星折射率廓线数量整体上逐年增加,质量合格率在87%左右。但各年满足高度区间条件的廓线数量占比31%左右,反演ABLH成功并满足RS约束条件的折射率廓线占25%左右。

对上述由2015—2018年FY-3C掩星折射率廓线反演的ABLH进行全球分布分析,其结果如图4所示。

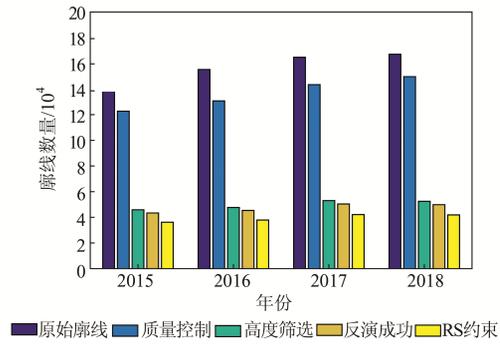


图 3 2015—2018 年参与反演 ABLH 的 FY-3C 掩星折射率廓线数量

Fig. 3 Number of FY-3C RO Refractive Index Profiles Used for the Inversion of ABLHs During 2015—2018

图 4 中,数据空白区表示该区域没有合格的 FY-3C 折射率廓线数据或者反演失败。整体而言,由 FY-3C 掩星折射率资料反演的各年 ABLH

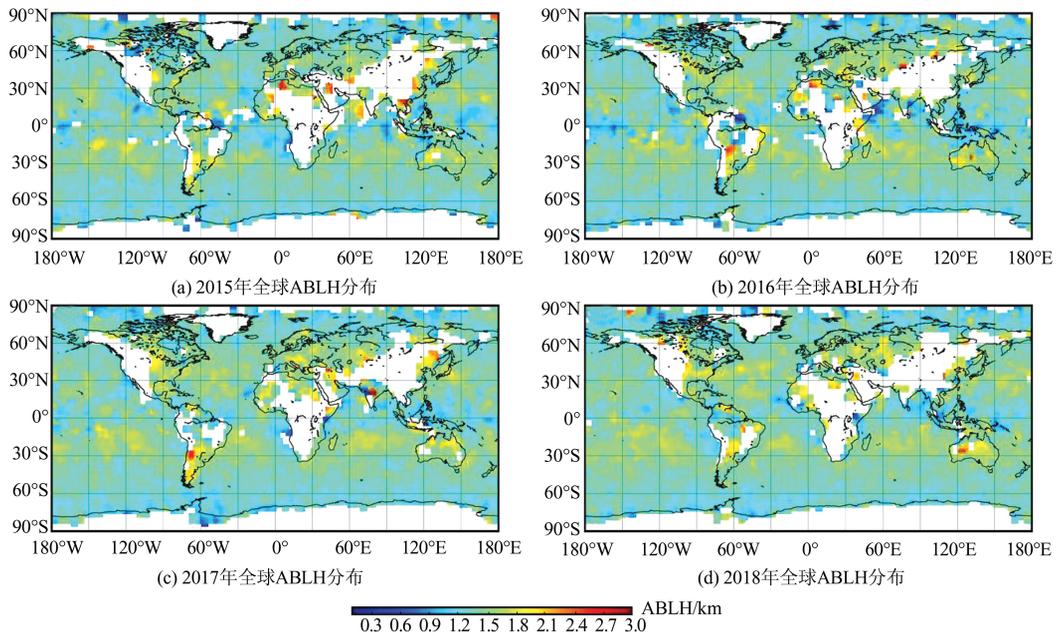


图 4 2015—2018 年由 FY-3C 掩星折射率廓线反演的 ABLH 全球分布图

Fig. 4 Global Distributions of ABLHs Derived from FY-3C Refractive Index Profiles During 2015—2018

此外,图 4 中的 ABLH 数据空白区主要分布在两极地区和陆地上,尤其是在 30°S 以南、北美洲中西部、南美洲东部、格陵兰岛以及非洲和亚洲等地区。主要原因是这些地区由于纬度过高或者高原、山脉地形造成 FY-3C 掩星折射率资料缺失或者折射率廓线质量较差,因而,合格的 ABLH 反演结果缺失情况严重。

### 2.3 总结和讨论

本文以 COSMIC 掩星折射率资料反演的 ABLH 为参照,尝试基于 WCT 法利用 FY-3C 折射率产品确定边界层高度,并进行 2015—2018 年各

的空间分布在不同纬度带以及海洋和陆地上的差异基本体现了大气边界层与地表气候及地形的关系。

图 4 给出的各年 ABLH 全球分布特征和文献 [13] 采用 COSMIC 掩星折射率廓线反演得到的 2012 年全球 ABLH 分布的主要特征基本一致。各年陆地 ABLH 较海域的 ABLH 整体偏高,这是由于海陆气压差异造成了其大气湍流强弱的不同;高于 2 km 的 ABLH 主要出现在南美洲中南部、撒哈拉沙漠非洲的西北部、阿拉伯半岛中部、印度半岛中部及澳大利亚中西部等地区,主要原因是这些地区都是高温干燥又少雨的陆地区域,其大气含水量较少导致发生大气湍流的位置偏高。但图 4 与文献 [13] 存在细节上的不同,具体表现为图 4 的 ABLH 在北半球中低纬度带和南半球低纬度带偏高,而在赤道附近偏低。

年全球边界层高度空间分布分析。得到如下结论:

1) 在 WCT 反演方法基础上进行相对尖锐度的约束,能够探测 FY-3C 掩星低层大气折射率廓线中可能存在的突变,反演 ABLH。但是所反演的 ABLH 与利用 COSMIC 掩星折射率廓线反演的结果相比存在一定差异,主要原因是 FY-3C 掩星的低层大气折射率廓线的精度和垂直分辨率总体上都相对较低。

2) 由 FY-3C 掩星折射率廓线反演的各年 ABLH 全球分布在不同纬度以及海洋和陆地上的差异,基本体现了大气边界层与地表气候及地

形的关系。但由于反演成功率相对较低,合格反演结果的数量有限,所得到的ABLH空间分布在细节特征上的呈现仍有待提升。

### 3 结 语

本文首次尝试利用FY-3C折射率产品确定边界层高度,结果表明,虽然FY-3C中性大气产品对于ABL研究具有应用潜力,但目前基于NSMC(National Satellite Meteorological Center)公布的折射率产品进行ABLH反演的成功率总体上较低。要进一步发挥FY-3C中性大气产品对于ABL研究的应用价值,进一步提高其低对流层产品的精度和垂直分辨率,这对接收机开环跟踪数据的质量以及数据处理的精化两方面提出了要求。随着FY系列后续卫星上新一代掩星接收机的应用,可期待基于FY掩星低层大气数据产品开展更深入的ABL结构研究,为中国自主开展的掩星任务数据产品的气象与气候应用提供参考。

致谢:感谢国家卫星气象中心提供FY-3C掩星大气产品数据;COSMIC数据分析中心提供COSMIC掩星大气产品数据。

### 参 考 文 献

- [1] Garratt J R. The Atmospheric Boundary Layer [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(1-2): 89-134
- [2] Zhou Wen, Yang Shengpeng, Jiang Xi, et al. Estimating Planetary Boundary Layer Height over the Tibetan Plateau Using COSMIC Radio Occultation Data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(1): 117-133(周文, 杨胜朋, 蒋熹, 等. 利用COSMIC掩星资料研究青藏高原地区大气边界层高度[J]. *气象学报*, 2018, 76(1): 117-133)
- [3] Russell P B, Uthe E E, Ludwig F L, et al. A Comparison of Atmospheric Structure as Observed with Monostatic Acoustic Sounder and LiDAR Techniques[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(36): 5 555-5 566
- [4] Kumar K K, Jain A R. L Band Wind Profiler Observations of Convective Boundary Layer over Gadanki, India (13.5°N, 79.2°E) [J]. *Radio Science*, 2006, 41(2):1-12
- [5] 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*, 1997, 102 (D19): 23 429-23 466
- [6] Von E A, Teixeira J, Wickert J, et al. Using CHAMP Radio Occultation Data to Determine the Top Altitude of the Planetary Boundary Layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6):667-677
- [7] Basha S G, Ratnam M V. Identification of Atmospheric Boundary Layer Height over a Tropical Station Using High-Resolution Radiosonde Refractivity Profiles: Comparison with GPS Radio Occultation Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(11):713-721
- [8] Ratnam M V, Basha G. A Robust Method to Determine Global Distribution of Atmospheric Boundary Layer Top from COSMIC GPS RO Measurements [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2010, 11(3): 216-222
- [9] Sokolovskiy S, Kuo Y H, Rocken C, et al. Monitoring the Atmospheric Boundary Layer by GPS Radio Occultation Signals Recorded in the Open-Loop Mode [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (12), DOI:10.1029/2006GL025955
- [10] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S V, et al. Estimating Atmospheric Boundary Layer Depth Using COSMIC Radio Occultation Data [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68(8):1 703-1 713
- [11] Ao C O, Waliser D E, Chan S K, et al. Planetary Boundary Layer Heights from GPS Radio Occultation Refractivity and Humidity Profiles [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (D16), DOI: 10.1029/2012JD017598
- [12] Chan K M, Wood R. The Seasonal Cycle of Planetary Boundary Layer Depth Determined Using COSMIC Radio Occultation Data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(22):12 422-12 434
- [13] Xu Xiaohua, Liu Shulun, Luo Jia. Analysis on the Variation of Global ABL Top Structure Using COSMIC Radio Occultation Refractivity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 94-100(徐晓华, 刘树纶, 罗佳. 利用COSMIC掩星折射指数分析全球大气边界层顶结构变化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43 (1):94-100)
- [14] Basha G, Kishore P, Ratnam M, et al. Global Climatology of Planetary Boundary Layer Top Obtained from Multi-satellite GPS RO Observations [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52:2 385-2 398
- [15] Liao M, Zhang P, Yang G L, et al. Preliminary Validation of the Refractivity from the New Radio Occultation Sounder GNOS/FY-3C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(2):781-792
- [16] Xu Xiaohua, Zhu Zhouzong, Luo Jia. Quality Analysis of the Neutral Atmospheric Products from FY-3C Radio Occultation Based on IGRA2 Radiosonde

- Data and COSMIC Radio Occultation Products [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 384-393(徐晓华, 朱洲宗, 罗佳. 利用 IGRA2 探空数据和 COSMIC 掩星资料对 FY-3C 掩星中性大气产品进行质量分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 384-393)
- [17] Fengyun Satellite Data Center [EB/OL]. [2019-09-01]. <http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/DataView.aspx>
- [18] CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center [EB/OL]. [2019-09-01]. <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/>
- [19] Gamage N, Hagelberg C. Detection and Analysis of Microfronts and Associated Coherent Events Using Localized Transforms[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50(5): 750-756
- [20] Lewis H W. A Robust Method for Tropopause Altitude Identification Using GPS Radio Occultation Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, DOI: 10.1029/2009GL039231

## Inversion and Analysis of Atmospheric Boundary Layer Height Using FY-3C Radio Occultation Refractive Index Data

ZHU Zhouzong<sup>1</sup> XU Xiaohua<sup>1,2</sup> LUO Jia<sup>1,3</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** The first meteorological satellite for global navigation satellite system (GNSS) radio occultation (RO) observation of China, Fengyun-3C (FY-3C), whose products have been released since June 2014, was launched in 2013. But the references about the application of FY-3C RO data in the study of atmospheric boundary layer height (ABLH) are still not available. **Methods:** Firstly, we derived ABLH values by the wavelet covariance transform (WCT) method, based on FY-3C RO refractive index data. Secondly, the feasibility of the method was verified by representative and statistical comparison with the ABLH inversion results of COSMIC (constellation observing system for meteorology ionosphere and climate) RO refractive index data. Then, we presented the global distribution of FY-3C ABLHs, and made a detailed analysis. **Results:** The heights of steep transitions in the FY-3C RO refractivity index profiles of lower atmosphere, which correspond to the ABLHs, can be derived by using the WCT method with constraints on relative sharpness. The latitudinal differences and land-sea differences in the global distributions of ABLHs basically reflect the relationship between ABLH and climate and topography. **Conclusions:** Because of the low precision and vertical resolution of FY-3C RO products in the lower atmosphere, the success rate for the inversion process is not high on the whole, and the representations on the detailed characteristics of the distribution of ABLH need to be improved.

**Key words:** radio occultation (RO); Fengyun-3C (FY-3C); refractive index; atmospheric boundary layer height; wavelet covariance transform

**First author:** ZHU Zhouzong, master, specializes in GNSS radio occultation atmospheric. E-mail: zhzzhu@whu.edu.cn

**Corresponding author:** XU Xiaohua, PhD, professor. E-mail: xhxu@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41774033, 41774032, 42074027); the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1503502).

**引文格式:** ZHU Zhouzong, XU Xiaohua, LUO Jia. Inversion and Analysis of Atmospheric Boundary Layer Height Using FY-3C Radio Occultation Refractive Index Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 395-401. DOI: 10.13203/j.whugis20190271 (朱洲宗, 徐晓华, 罗佳. 利用 FY-3C 折射率对大气边界层高度的反演与分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 395-401. DOI: 10.13203/j.whugis20190271)