

## 通过影响高度多路径质量控制改进热带对流层低层 GPS 掩星资料同化效果



**通信作者简介:**邹晓蕾,南京信息工程大学教授。1984年7月毕业于南京气象学院,1988年8月获中国科学院大气物理研究所气象学博士学位,2001年获美国佛罗里达州立大学终身教授,2008年获美国气象学会会士。发展了美国国家气象局中期数值预报业务模式的全球四维变分同化系统和美国大气研究中心和美国海军研究实验室中尺度模式的两个区域四维变分同化系统。从事GPS掩星、极轨和静止卫星资料在数值预报和气候研究中的应用。发表180篇SCI学术论文,H指数为40。

邹晓蕾<sup>①\*</sup>,刘辉<sup>②</sup>

① 南京信息工程大学 资料同化和应用中心,江苏 南京 210044;

② 马里兰大学 地球系统科学交叉学科中心,马里兰州 20740

**摘要** 与观测气象、电离层和气候的GPS卫星计划COSMIC-1相比,COSMIC-2有更大功率的GPS接收天线,高2倍的采样率(100 Hz),小3倍的轨道倾角(24°)。因此,COSMIC-2和未来小卫星将为热带地区提供前所未有的大量无线电掩星观测资料。因为热带对流层低层水汽含量高,折射率有局地大梯度,违背大气球对称性假定,造成影响多路径现象,所以热带地区的掩星资料同化具有较大挑战性。本文首先利用之前研究中提出的影响参数多路径质量控制方法,去除热带对流层低层弯角模拟中出现影响参数多路径现象的资料,然后使用有限射线长度二维(2D)路径追踪观测算子和一维(1D)Abel变换观测算子,进行GPS弯角资料同化。结果表明,如果射线路径限制在离近地点±300~400 km的水平距离以内,有限射线长度2D路径追踪观测算子得到的弯角模拟与2D射线追踪观测算子得到的弯角廓线之差不仅无偏,而且其标准差远比1D Abel的弯角模拟精度高。此外,无论采用1D Abel变换还是有限射线长度2D路径追踪观测算子来模拟弯角,影响参数多路径质量控制方案都能进一步改进GPS掩星弯角资料同化和预报精度。

**关键词** GPS掩星弯角资料同化;有限射线长度2D路径追踪观测算子;影响参数多路径质量控制

气象、电离层和气候观测GPS(Global Positioning System)卫星计划COSMIC-2(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate)是中国台湾太空中心(NSPO)和美国海洋大气局(NOAA)的一个国际合作计划。它由六个低轨(Low-Earth Orbiting, LEO)小卫星组成。在低纬地区对流层低层,折射率是球面非对称的,造成影响参数多路径现象(Gorbunov et al., 1996; Healy, 2001; Sokolovskiy, 2003)。2019年发射成功的COSMIC-2将为低纬度地区提供大量掩星观测资料。因为GPS掩星资料处理过程中,在球对称的假设下才能将弯角量通过Abel反演得到折射率,所以低纬地区掩星资料同化不适合选用折射率作为观测变量(Poli and Joiner, 2004)。同样的,由于大气折射率是球面非对称的,一维(1D)Abel变换(Palmer et al., 2000)也不适合同化低纬地区的掩星资料,除非通过质量控制把影响参数多路径现象的资料先去掉。2D射线追踪观测算

\* 联系人, E-mail: xzou@nuist.edu.cn

2019-10-19收稿, 2019-11-15接受

国家重点研发计划资助项目  
(2018YFC1507004)

引用格式:邹晓蕾,刘辉,2020.通过影响高度多路径质量控制改进热带对流层低层GPS掩星资料同化效果[J].大气科学学报,43(1):116-127.

Zou X L, Liu H, 2020. Impact multipath quality control improving GPS RO data assimilation in the tropical lower troposphere[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 116-127. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191019002. (in Chinese).

子能够模拟 GPS 到 LEO 的射线路径 (Zou et al., 1999, 2000; Liu and Zou, 2003; Zou et al., 2004; Healy et al., 2007), 适合用于低纬地区掩星资料同化, 也可以用来模拟影响参数多路径现象 (Zou et al., 2019)。

尽管 2D 射线追踪观测算子在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初就被开发并被成功应用到全球变分同化系统中 (Zou et al., 1999, 2000; Liu and Zou, 2003; Zou et al., 2004), 但它对全球模式系统的并行计算至今仍然具有较大挑战。这是因为需要输入全球折射率场, 射线追踪算子才能模拟从发出无线电信号的 GPS 卫星到 LEO 卫星接收的完整射线路径。在全球资料同化系统中加入射线追踪算子需要在并行计算环境下完成大量节点间通信, 这会大大降低计算效率。而区域资料同化系统中缺少模式区域外部的折射率信息, 所以无法在区域资料同化系统中使用 2D 射线追踪观测算子。考虑到射线弯曲大多发生在近地面点附近, 本文提出了一个修改方案, 即把射线模拟限制在距离射线近地面点附近几百千米的局地范围内, 射线传播方程仅在有限的射线路径  $r_0 \pm s_R$  上积分, 其中  $r_0$  代表近地面点与地球中心之间的距离,  $s_R$  是与近地面点水平距离为  $R$  的射线路径长度。将这种修改了的 2D 射线追踪观测算子称为有限射线长度 2D 路径追踪观测算子。

热带对流层低层水汽含量大、尺度小, 对流天气频繁, 造成大气折射率的空间分布存在局地大梯度, 导致掩星射线的影响参数在同一射线上不再是一个常数。在折射率垂直和水平梯度较大的地区附近, 掩星射线的影响参数有显著变化 (约几百米)。因此, 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角廓线在射线的开始和结束位置, 即 GPS 和 LEO 卫星位置, 是影响参数的多值函数。将这种现象称为影响参数多路径现象 (Zou et al., 2019)。GPS 掩星资料处理过程中得到的 GPS 掩星弯角资料是在球对称大气折射率假设下根据波光学方法从掩星原始资料得到的, 因而, 是影响参数的单值函数 (Gorbunov, 2002; Jensen et al., 2003; Gorbunov and Lauritsen, 2004; Jensen et al., 2004)。球对称大气折射率假定在大气折射率局地梯度大的情况下并不成立, 所有, 需要剔除这些有影响参数多路径现象的资料后才能进行 GPS 掩星资料同化。基于以上考虑, 本研究将采用 Zou et al. (2019) 提出的影响参数多路径质量控制方案来剔除这些受多射线路径影响的资料。本文将同时应用 1D Abel 变换和有限射线长度 2D 路径追踪观测

算子, 来评估影响参数多路径质量控制方案对热带对流层低层 GPS 掩星资料同化的影响。

本文第一部分简要介绍 2D 射线追踪观测算子、1D Abel 变换观测算子和影响参数多路径质量控制方案。第二部分介绍数值验证设计方案。第三部分通过与原始 2D 射线追踪算子弯角模拟结果的比较, 评估用有限射线长度 2D 路径追踪观测算子和 1D Abel 变换观测算子的准确度和精确度。第四部分展示影响参数多路径质量控制对掩星资料同化的影响。第五部分给出本文的总结与结论。

## 1 GPS 掩星资料同化观测算子, 影响参数多路径质量控制

### 1.1 GPS 掩星资料同化观测算子

2D 射线路径追踪观测算子求解以下的 GPS 无线电信号传播轨迹方程 (Zou et al., 1999; Liu and Zou, 2003):

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{d\tau^2} = n \nabla n. \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{r}$  是从地球中心到模拟射线轨迹上任意一点的三维矢量;  $\tau$  是与射线长度  $s$  和大气折射率  $n$  有关的一个参数, 即  $d\tau = \frac{ds}{n}$ 。方程 (1) 是二阶常微分方程, 它等价于以下的一阶常微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{y} \\ \frac{d\mathbf{y}}{d\tau} = n \nabla n \end{cases}. \quad (2)$$

其中  $\mathbf{y}$  是一阶常微分方程组中引入的一个新变量, 它描述射线上任意一点的切线方向。

求解一阶常微分方程组 (2) 需要知道模式变量  $(\mathbf{r}, \mathbf{y})$  在近地面点的值, 即  $(\mathbf{r}_0, \mathbf{y}_0)$ 。因此, 本文用 COSMIC RO 资料提供的近地面点距离地球中心的位置矢量  $\mathbf{r}_0$  和该处的 GPS 无线电信号传播轨迹的切线方向  $\mathbf{y}_0$ , 从近地面点  $\mathbf{r}_0$  沿着切线方向  $\mathbf{y}_0$  和  $-\mathbf{y}_0$  两个方向对方程组 (2) 进行积分, 计算新的射线路径位置和切线方向, 积分步长大约是 2 km 或更小。除了得到模式模拟的弯角量, 在积分过程中还计算出另外一个主要参数, 称为影响参数, 用  $a$  表示。廓线的垂直间隔为 100 m。射线上某点的影响参数定义为该点到地球局地曲率中心的距离  $r \sin \phi$  乘以折射指数  $n(r)$  的乘积, 即  $a = m(r) \sin \phi$ , 其中  $\phi$  是射线切线方向和局地半径矢量之间的夹角。在近地面点,  $\phi \equiv \phi_0 = 90^\circ$ ,  $a \equiv a_0 = r_0 n(r_0)$ 。随着射线路径的

变步长积分,可以算出距地表约 20 200 km 的 GPS 卫星处的切线矢量( $t_G$ )和距地表约 730 km 的 LEO 卫星切线矢量( $t_L$ ),以及影响参数  $a$  在射线路径不同点上的值。最后,利用 2D 射线追踪算子模拟弯角的几何公式:

$$\alpha_{\infty}^{2D} = \angle(t_G, t_L) \quad (3)$$

得到弯角模拟适线: $\alpha(a_0)$ ,  $\alpha(a_G)$ , 或  $\alpha(a_L)$ 。弯角模拟廓线的垂直间隔为 100 m。为了表达一致,在(3)中将原始 2D 射线路径追踪算子计算的影响参数表示为  $\alpha_{\infty}^{2D}(r)$ 。

改用有限射线长度 2D 路径追踪观测算子后弯角模拟的即使公式为:

$$\alpha_{s_R}^{2D-limited} = \angle(t_{-R}, t_R) \quad (4)$$

其中  $t_{-R}$  和  $t_R$  分别表示从近地面点向 GPS 和 LEO 卫星方向积分到  $s_R$  距离处的射线切线方向,其中  $s_R$  中的下标“R”代表  $s_R$  与近地面点的水平距离。本研究将把“R”设为  $\pm 250, \pm 300$  和 400 km,通过比较  $\alpha_{s_{\pm R}}^{2D-limited}$  和  $\alpha_{\infty}^{2D}$  的很多样本值,估算用  $\alpha_{s_R}^{2D-limited}$  来近似  $\alpha_{\infty}^{2D}$  的准确度和精确度。

给定折射指数垂直廓线  $n(r)$ ,便可以通过计算以下积分算子,

$$\alpha^{1D}(a) = -2a \int_a^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{\mu^2 - a^2}} \frac{dn}{d\mu} d\mu, \text{ 其中 } \mu = nr \quad (5)$$

### 1.2 影响参数多路径质量控制方案

在大气状态是球对称的假定下,大气折射指数是到地球中心距离的函数:

$$n(r) = n(r) \quad (6)$$

此时,影响参数  $a$  沿射线路径不变,即布格尔(Burger)公式成立:

$$a = m(r) \sin\phi = \text{const.} \quad (7)$$

如果大气状态不是球对称的,影响参数  $a$  沿着射线路径变化而变化,即  $a = a(s_r) \neq \text{const.}$

为方便起见,引入一个与影响参数相关的量——影响高度  $h_r$ 。影响高度  $h_r$  是影响参数  $a$  减去地球局地曲率  $R_r$ ,即  $h_r = a_{s_r} - R_r$ ,用来描述影响参数沿射线路径在地球表面以上的高度变化。在近地面点的影响高度为  $h_0 = a_0 - R_0$ 。

影响参数多路径质量控制方案是用来剔除影响参数  $a(s_r) \neq \text{const.}$  沿射线路径有变化(即  $a(s_r) \neq \text{const.}$ )的资料。首先识别出影响参数在有限射线长度局地 2D 路径追踪两端的值  $a_{s_{\pm R}}$ ,它有可能不同于近地面点处影响高度  $a_0$  的廓线,即

$$|a_{s_{\pm R}, m} - a_{0, m}| > 0 \quad (8)$$

其中“ $m$ ”代表第  $m$  根模拟射线。假定  $m+i$  根射线在近地面点的影响高度低于  $m+i-1$  根射线在近地面点的影响高度。这种情况一般出现在沿射线路径有小尺度天气使大气折射指数在该局地的垂直和水平梯度突然增大,使模式模拟的弯角  $\alpha_{s_{\pm R}}^{2D-limited}$  是影响参数  $a_{s_{\pm R}}$  的多值函数。影响参数多路径质量控制方案中的第一步是剔除弯角模拟存在多值问题的资料。

影响参数多路径质量控制方案中的第二步,进一步剔除影响参数在近地面点和 LEO 或 GPS 卫星处之差大于模拟数据垂直间隔两倍的资料,即满足条件:

$$|\Delta a|_{s_{\pm R}} \equiv |a_{s_{\pm R}}^{2D-limited} - a_0| \geq 200 \text{ m} \quad (9)$$

影响参数多路径质量控制方案中的第三步,进一步剔除影响高度比弯角模拟存在多值问题射线的影响高度低的所有资料。原因是在这种情况下观测反演和模式模拟的弯角之间存在明显偏差(Zou et al., 2019)。Zou et al. (2019)用图示的方法详细描述了上述三个影响参数多路径质量控制步骤剔除的资料和垂直分布特点。

## 2 实验设计

本研究使用美国中尺度天气预报模式的高级研究版本(Advanced Research version of the Weather Research and Forecasting model (WRF), ARW)做预报,利用 Anderson et al. (2009)发展的集合卡尔曼滤波资料同化研究试验平台(data assimilation research testbed, DART)同化 GPS 掩星资料。ARW 模式配置如下:水平分辨率为 16 km,从地面到 30 hPa 共有 45 个垂直层,模式区域( $90^\circ \sim 180^\circ \text{E}, 18^\circ \sim 28^\circ \text{N}$ )位于赤道西太平洋,物理过程参数化方案包括 Noah 地表类型、Goddard 微物理方案、选用新浅对流参数化的 Kain-Fritsch 积云方案、延世大学边界层方案、快速辐射传输模型长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案(Skamarock et al., 2008)。初始条件和侧边界条件选用欧洲中尺度预报中心(ECMWF)的全球分析资料。本研究对 2012 年 4 月 16—30 日每天 00 时、06 时、12 时、18 时(世界时,下同)的资料进行同化,同化资料包括 COSMIC 弯角,探空观测的风和温度、云迹风、飞机观测的温度和风以及陆地和船舶地表气压。实验配置与 Liu et al. (2018)研究中的相同。

### 3 有限射线长度 2D 路径追踪观测算子及其弯角模拟精度

搭载在 GPS 卫星上的无线电信号发射器连续地发射频率为  $f_{c1} = 1\ 227.6\ \text{MHz}$  和  $f_{c2} = 1\ 575.42\ \text{MHz}$  的无线电信号,搭载于 LEO 卫星上的 GPS 信号接收器得到这两个频率的无线电信号穿过大气时发生的电磁信号相位随时间变化的观测资料。具体来说,大气折射率的梯度会使电磁射线的传播路径弯曲。GPS 与 LEO 卫星之间的累积相位延迟与真空中传播的相位延迟的差称为过剩光学路径长度 (phase excess)。过剩光学路径长度的时间导数称为多普勒频移 (Doppler shift excess)。假设大气的折射指数是球对称的,则可从多普勒频移资料,加上给定掩星事件时 GPS 和 LEO 卫星的空间位置和运行速度,根据一个三维 (3D) 几何公式计算出弯角  $\alpha$  (Zou et al., 1999)。当 LEO 低轨卫星绕地球运行时, GPS 接收器便能提供从大气顶层到地表的弯角垂直廓线。

一般来说,由于大气折射率随高度的增加呈指数减小,大气弯角会随高度减小。当大气折射率在某些局地随高度增加或水平梯度大时(或二者同时发生),经过这些地方的射线的影响参数会沿着射线变化,弯角会随高度的减小而增加,导致多个无线电信号同时到达 LEO 上的 GPS 接收器。在模式模拟过程中也会出现类似的现象,射线路径交叉,发生影响参数多路径现象。Zou et al. (2019) 发现,2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日  $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$  之间,约 18% 的 COSMIC 掩星资料弯角模拟廓线都存在影响参数多路径问题,其中绝大部分影响参数多路径射线都集中在热带对流层低层。

GPS 无线电信号传播路径(即射线)的影响高度在离开近地面点后迅速增加,在距离近地面点水平距离约 1 200 km 处,射线比近地面点的影响高度已经高出大概 100 km。也就是说,如果模式顶在地表以上 100 km 处,那么 GPS 无线电信号传播路径在离近地面点的水平距离大约是 1 200 km 处已经到达模式层。如果在 3.3 km 影响高度近地面点处的大气折射率约 260 N-unit,通常在离近地面点水平距离大约是 500 km 处的射线附近的大气折射率已经减小到只有 20 N-unit。高度越低,大气折射率和它垂直梯度越大,有局地大水平梯度的可能性也越大。因此, GPS 无线电信号传播射线的弯曲主要发生在近地面点附近(见公式(1))。

选用以下三种射线积分最大距离  $R(h_0)$  来测试有限射线长度 2D 路径追踪观测算子的精度。影响高度在 2 km 的射线离近地面点的最大水平距离设为  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}} = \pm 250\ \text{km}$ 、 $\pm 300\ \text{km}$  和  $\pm 400\ \text{km}$ ,影响高度在 15 km 的射线离近地面点的最大水平距离设为  $R(h_0)|_{h_0=15\ \text{km}} = \pm 200\ \text{km}$ ,影响高度在 2~15 km 之间的模拟射线的  $R(h_0)$  ( $2\ \text{km} < h_0 < 15\ \text{km}$ ) 则根据  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}}$  和  $R(h_0)|_{h_0=15\ \text{km}}$  的值通过线性插值得到。顺便指出,2 km 影响高度已接近地球表面。为了比较以上三个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子和修改前的 2D 射线追踪观测算子模拟结果,图 1 展示了两种观测算子模拟的 COSMIC 弯角散点图。其中,图 1a, 1b 和 1c 分别是把有限射线长度 2D 路径追踪观测算子的射线积分长度  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}}$  限制在离近地面点的水平距离小于 250 km (图 1a)、300 km (图 1b) 和 400 km (图 1c)。图 1d 展示了 1D Abel 变换观测算子和 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角比较。图 1 中的散点为 2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日  $30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$  之间的、通过第一步影响参数多路径质量控制的、且影响高度在 3~3.3 km 的 COSMIC 掩星资料。结果与预期的一致,随着  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}}$  从  $\pm 250\ \text{km}$  增加到  $\pm 400\ \text{km}$ ,有限射线长度 2D 路径追踪观测算子得到的弯角模拟结果与 2D 射线追踪观测算子得到的越来越接近。即使有限射线长度 2D 路径追踪观测算子的阈值设为  $\pm 250\ \text{km}$ ,它模拟的弯角(图 1a)也比 1D Abel 变换观测算子模拟的(图 1d)更接近 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角。当有限射线长度 2D 路径追踪观测算子的射线积分总长度限制在离近地面点的水平距离在地球表面小于 400 km、在影响高度 15 km 处小于 200 km 时,即使在热带对流层低层,有限射线长度 2D 路径追踪观测算子模拟的弯角非常接近 2D 路径追踪观测算子的模拟结果包括在热带低层大气的弯角模拟。

图 2 展示了有限射线长度 2D 路径追踪观测算子和 1D Abel 变换观测算子对被第一步影响参数多路径质量控制剔除的多值弯角资料的模拟结果。通过比较图 1 和图 2 发现,对于影响参数多路径模拟结果,局地和非局地两种射线追踪观测算子模拟的弯角差别更大;有限射线长度 2D 路径追踪观测算子模拟的弯角在  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}} = \pm 250\ \text{km}$  和  $\pm 300\ \text{km}$  时存在负偏差(即比 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角小)。但当  $R(h_0)|_{h_0=2\ \text{km}} = \pm 400\ \text{km}$  时,即使在影响参数多路径弯角模拟情况下,有限射线长度

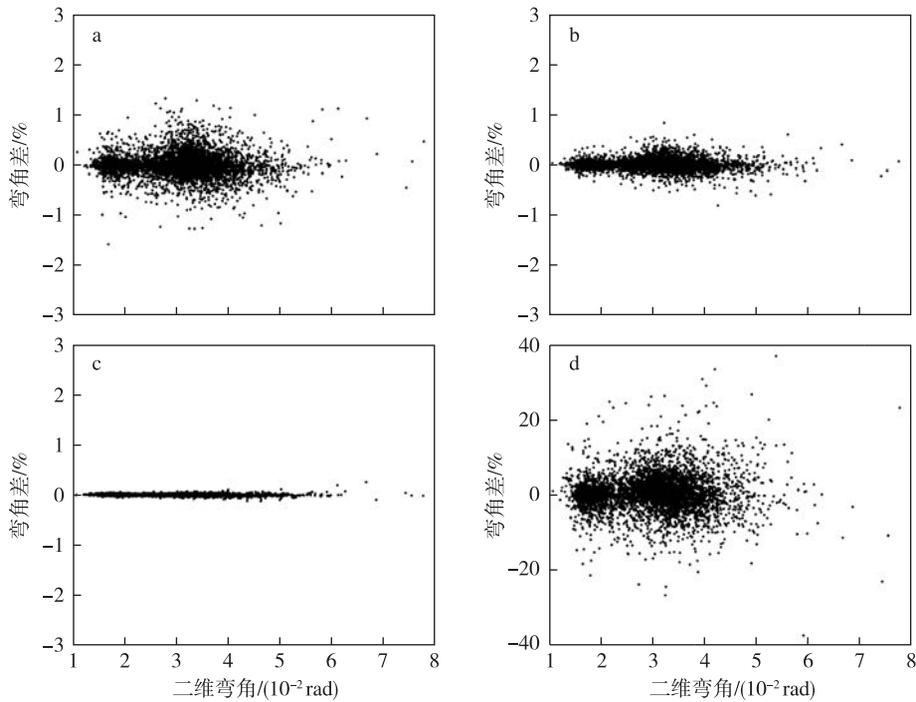


图1 有限射线长度 2D 路径追踪算子(a,b,c)以及 1D Abel 变换观测算子(d)与 2D 射线追踪观测算子得到的弯角模拟之差的散点图(a,b,c 中有限射线长度分别定义为以近地面点为中心的水平距离小于 250、300、400 km;图中资料包括 2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日 30°S~30°N 所有影响高度在 3~3.3 km 并通过影响参数多路径质量控制方案中的第一步检验)

Fig.1 Fractional differences of bending angle (BA Diff.) from simulations between the 2D raytracing operator and (a) the  $\pm 250$  km, (b)  $\pm 300$  km, (c)  $\pm 400$  km limited-ray-path raytracing operators, and (d) the 1D local operator as a function of the 2D raytracing simulated bending angle (2D BA) for rays whose impact heights are within 3—3.3 km of all COSMIC ROs within (30°S,30° N) from 19 March to 30 April 2017 that pass the QC1 step

2D 路径追踪观测算子模拟的弯角也与 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角非常接近。也就是说,影响参数多路径质量控制方案可以采用  $R(h_0) |_{h_0=2 \text{ km}} = \pm 400 \text{ km}$  的有限射线长度 2D 路径追踪观测算子。

图 1 和图 2 仅仅展示了有限射线长度 2D 路径追踪观测算子对影响高度在 3~3.3 km 范围内射线的弯角模拟结果。有限射线长度 2D 射线路径追踪观测算子在其他影响高度(2~14 km)的弯角模拟结果如图 3 和 4 所示。图 3 中把 3 个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子及 1D Abel 变换观测算子的弯角模拟与原始 2D 射线追踪观测算子得到的结果进行了比较。两种观测算子弯角模拟结果之间的相对偏差(图 3a)和标准差(图 3b)的垂直分布,包括 2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日热带地区 30°S~30°N 之间通过前两步影响参数多路径质量控制的所有 COSMIC 掩星资料。三个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子模拟得到的弯角基本上都是无偏的。与 2D 射线追踪观测算子模拟结果相比,1D Abel 变换

观测算子模拟的弯角在影响高度 5 km 以下有明显的正偏差,在影响高度约 3.8 km 处正偏差最大,弯角相对偏差约 6%。2D 射线追踪算子与其他观测算子得到的模拟结果之差的标准差在影响高度 3 km 处最大,其中与 3 个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子模拟的弯角之间的标准差较小( $< 1.2\%$ ),与 1D Abel 变换观测算子模拟的弯角之差的标准差大于 4.8%。另外,如果不做影响参数多路径质量控制,3 个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子及 1D Abel 变换观测算子与原始 2D 射线追踪观测算子得到的弯角模拟差的偏差和标准差(图 4)整体都比做了影响参数多路径质量控制的(图 3)大,再次说明对热带地区 GPS 掩星质量进行影响参数多路径质量控制的有效性和必要性。

基于图 2—5 的结果可以得出如下结论:射线积分范围限制在离射线近地面点水平距离小于 200~400 km(15 km 影响高度小于 200 km,2 km 影响高度小于 200 km)的 2D 有限射线长度 2D 路径追踪

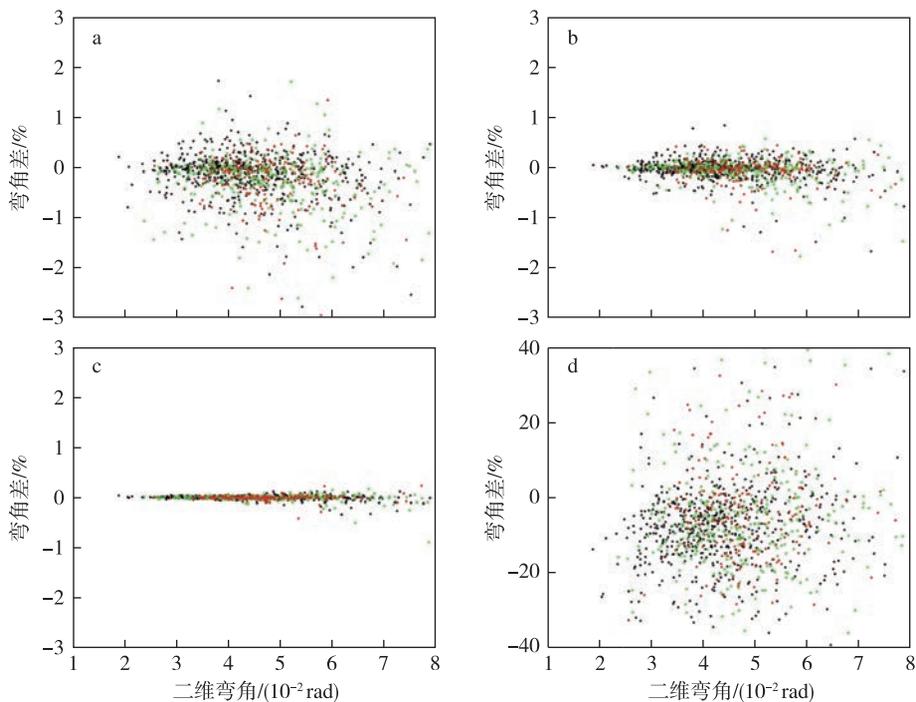


图2 与图1相同,但资料不同,是被影响参数多路径质量控制方案中的第一步剔除的多值弯角资料(近地面点影响高度从高到低的第一、第二和第三根射线分别用黑色、绿色和红色点表示)

Fig.2 Same as Fig.1 except for those simulations with multivalued bending angles for which the QC1 test fails(The first, second, and third rays from higher to lower impact heights are shown as black, green, and red dots, respectively)

观测算子法可应用于影响参数多路径质量控制和 GPS 掩星资料同化中。

#### 4 RO 掩星资料同化结果

进行连续两周的 GPS 掩星资料循环同化试验来展示影响参数多路径质量控制对热带对流层低层 GPS 掩星资料同化的改进效果。2012 年 4 月 16—30 日,6 h 循环,每天 4 次同化 COSMIC 弯角观测资料。图 5a 和 5b 展示了 2012 年 4 月 16—30 日整个同化区域内 COSMIC 弯角观测(O)和 6 h 预报作为背景场的弯角模拟(B)之差的垂直分布,以及弯角观测与同化得到的分析场的弯角模拟(A)之差的垂直分布。GPS 掩星弯角资料同化使用了两个观测算子,即 400 km 有限射线长度 2D 路径追踪观测算子和 1D Abel 变换观测算子。图 5c 展示了所同化的 COSMIC 资料数量。用有限射线长度 2D 路径追踪观测算子的同化实验得到的 O-B 的标准差是最小的。采用 1D Abel 变换观测算子并通过影响参数多路径质量控制的掩星数据最少。值得一提的是,影响参数多路径质量控制方案对采用 1D Abel 变换观测算子进行的同化也产生了正效果。虽然在 3 km 影响高度附近 O-B 有较明显

的正负偏差,O-A 的偏差很小。

图 6 展示了从 2012 年 4 月 16—30 日 4 个资料同化实验经过/未经过影响高度 QC 的情况下 1~2.5 km 范围内 O-B 和 O-A 的弯角标准差的日变化。经过影响参数多路径质量控制后,采用 1D Abel 变换观测算子和有限射线长度 2D 路径追踪观测算子时 O-B 的弯角标准差都一致比没有做该质量控制的显著减小,采用有限射线长度 2D 路径 2D 追踪观测算子时的 O-A 也显著减小。利用影响参数多路径质量控制和有限射线长度 2D 路径追踪观测算子后, GPS 掩星资料同化得到的分析场与 COSMIC 弯角观测资料甚至在 2 km 影响高度附近也非常接近。

GPS 掩星弯角资料同化对热带低层大气中的水汽场进行了调整。利于 ECMWF 分析场,图 7 给出了 48 h ARW 模式预报的总可降水量(TPW, Total Precipitable Water, 单位:mm)误差的标准差的水平分布。其中,图 7a,b 中的 48 h 模式预报结果分别是在同化过程中执行或未执行影响参数多路径质量控制的、采用 1D Abel 变换观测算子计算的弯角进行初始化。除了掩星弯角资料同化中的观测算子改用 400 km 有限射线长度 2D 路径追踪观测算

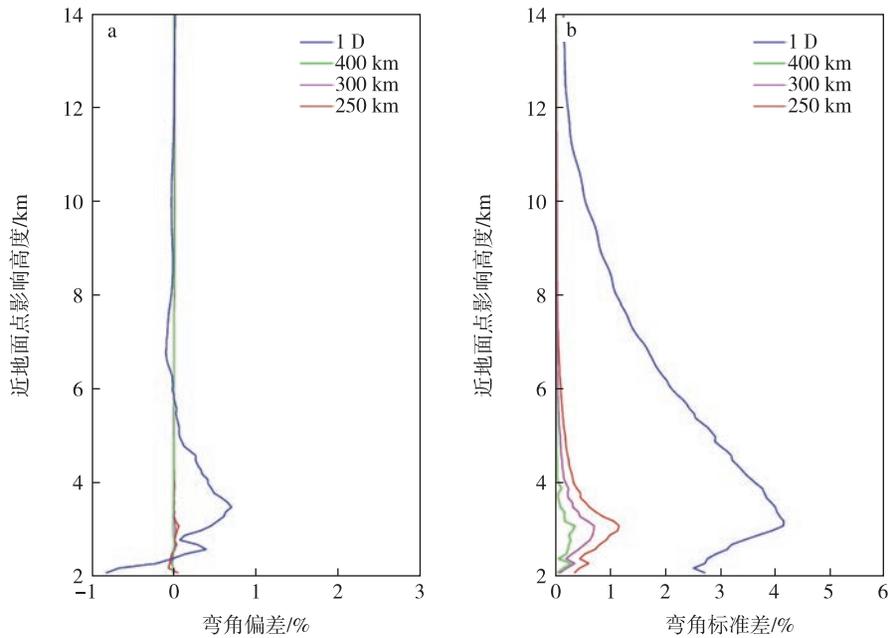


图3 有限射线长度 2D 路径追踪算子以及 1D 局地算子与 2D 射线追踪算子模拟的弯角的相对偏差(a)和标准差(b)的垂直分布(有限射线长度限制在 $\pm 400$ 、300 和 250 km 的结果分别用绿色、紫红色和红色表示,1D 算子的结果用蓝色表示;资料为 2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日  $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$  所有通过影响参数多路径质量控制方案中的第一、二步的 COSMIC RO 资料)

Fig.3 Vertical distributions of the (a) means and (b) standard deviations of fractional differences of bending angle(BA) between the 2D raytracing operator and the  $\pm 250$  km (red),  $\pm 300$  km (magenta),  $\pm 400$  km (green) limited-ray-path raytracing operators, and the 1D local operator (blue) for all COSMIC ROs within ( $30^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{S}$ ) from 19 March to 30 April 2017 that pass the QC1 and QC2 steps

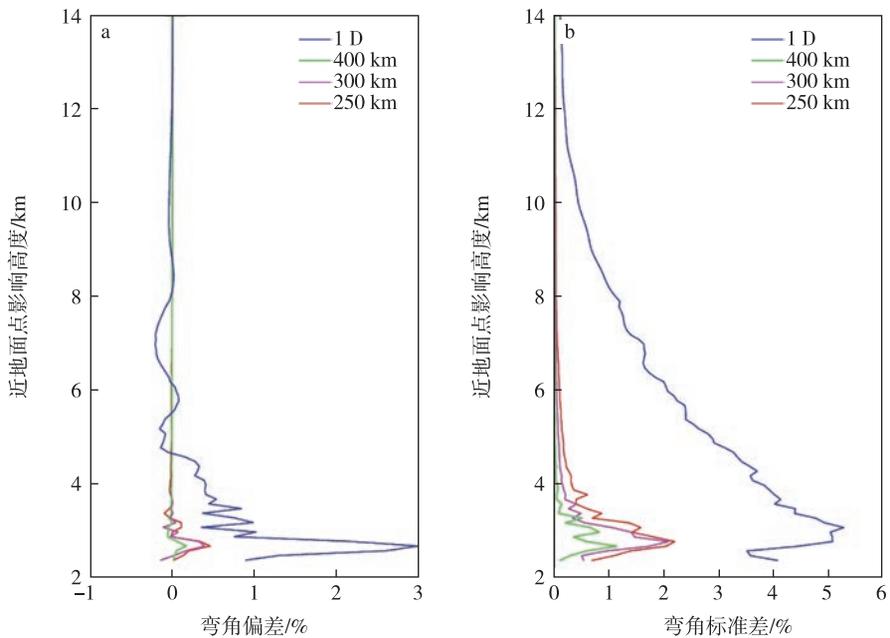


图4 与图3相同,但资料不同,是被影响参数多路径质量控制方案中的第一、二步剔除的 COSMIC 弯角资料

Fig.4 Same as Fig.3 except for those RO profiles eliminated by the QC1 and QC2 steps

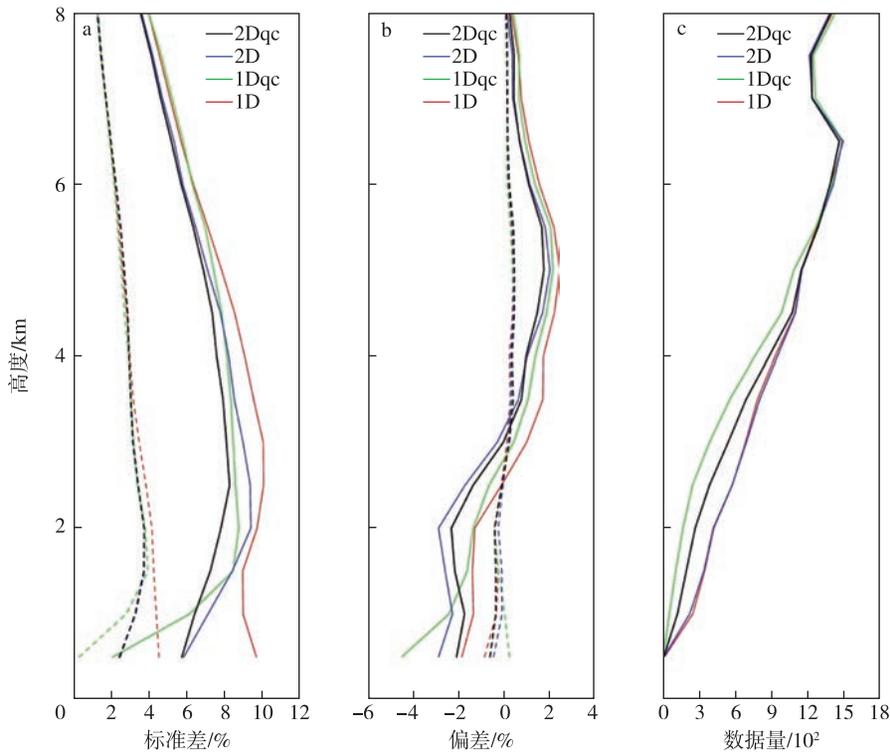


图5 2012年4月16—30日同化区域内COSMIC弯角观测资料与6h预报背景场模拟的弯角之间的相对弯角差((O-B)/O,实线)以及与同化分析场模拟的相对弯角差((O-A)/O,虚线)的标准差(a;单位:%)和偏差(b;单位:%)的垂直分布;参与同化的资料量(c;采用±400km有限射线长度的2D路径追踪观测算子同化了经过(黑色曲线)或未经过(蓝色曲线)影响参数多路径质量控制的COSMIC掩星资料,以及采用1D Abel观测算子同化了经过(绿色曲线)或未经过(红色曲线)影响参数多路径质量控制的COSMIC掩星资料)

Fig.5 Vertical distributions of (a) standard deviations and (b) biases of the fractional differences in bending angle between the COSMIC observation retrievals over the entire assimilation domain from 16 to 30 April 2012 and the 6 h forecasts (solid lines, O-B) as well as analyses (dashed lines, O-A) using the 400 km limited-ray-path 2D raytracing operator with (2Dqc, black) and without (2D, blue) the impact multipath QC, and the 1D operator with (1Dqc, green) and without (1D, red) the impact multipath QC. (c) RO data counts assimilated in the four experiments

子外,图8c,d与图8a,b相同。图7中的统计结果是根据2012年4月16—30日模式区域内所有COSMIC掩星观测资料计算得到的。用400km有限射线长度2D路径追踪观测算子同化通过影响参数多路径质量控制得到的分析场做模式的初始场,得到的48h水汽预报结果(图7d)与ECMWF水汽分析场资料最吻合,48h预报的TPW标准偏差在整个模式区域内都小于7mm。

本研究也将模式预报与美国国家环境预测中心(NCEP)业务使用的探空观测资料进行了比较。首先,将COSMIC掩星廓线与探空观测资料进行匹配,匹配的空间距离小于300km,时间之差小于2h。图7d展示了探空资料站的空间位置。为了把这些

匹配到的探空观测资料作为验证资料,这些探空资料没有被同化到本文提到的4个同化试验中。图8展示了2012年4月17—30日在0000UTC和1200UTC起报的24h和48h比湿预报与探空比湿观测资料之间的偏差和标准差垂直分布。无论采用有限射线2D路径追踪观测算子还是1D Abel变换观测算子,影响参数多路径质量控制后再进行GPS掩星资料同化对24h和48h比湿预报都有正贡献。经过影响参数多路径质量控制并采用有限射线长度2D路径追踪观测算子的GPS掩星弯角资料同化实验得到的比湿场预报相比于探空观测资料的偏差最小,预报精度最高。

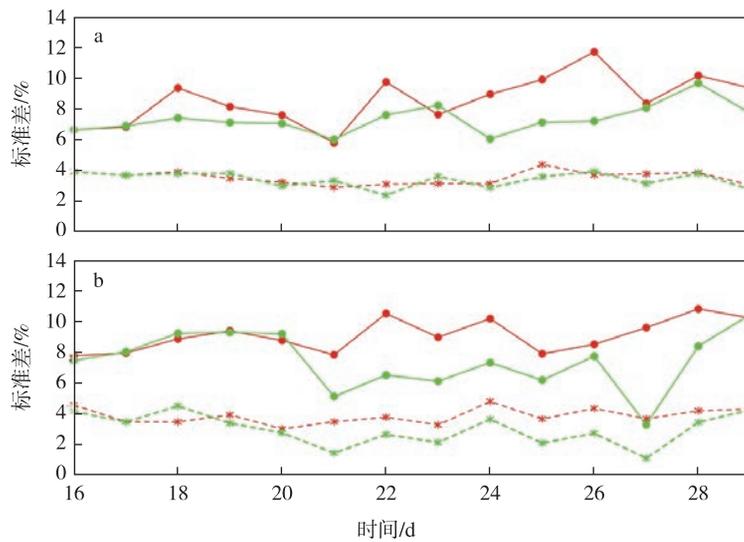


图6 GPS掩星弯角资料同化中采用1D Abel变换观测算子(a)和 $\pm 400$  km有限射线长度2D路径追踪观测算子(b)得到的弯角的O-B标准差(实心圆和实线)和O-A的标准差(星号和虚线)的每日变化曲线(是否加入影响参数多路径质量控制的实验结果分别用红色和绿色表示;数据为2012年4月16—30日影响高度2.5 km以下资料)

Fig.6 The daily evolutions of standard deviations of bending angle of the (O-B) (solid dots connected by solid lines) and (O-A) (asterisks connected by dashed lines) differences without (red) and with (green) the impact multipath QC from the experiments using (a) the 1D and (b) the 400-km limited-ray-path 2D raytracing operator. The statistics are averaged over impact heights below 2.5 km from 16 to 30 April 2012

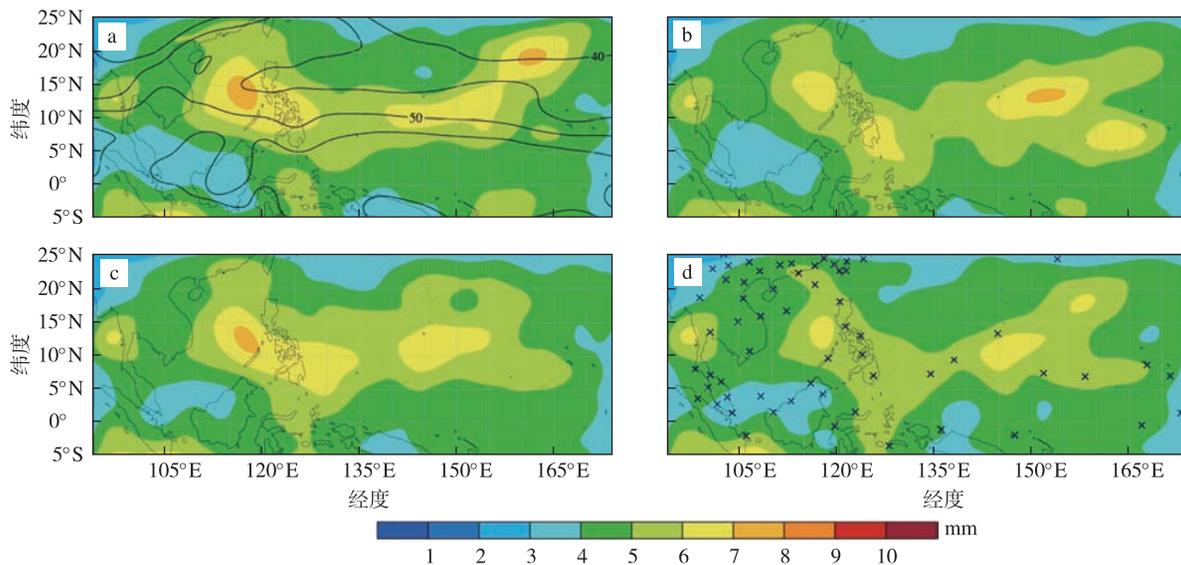


图7 GPS掩星弯角资料同化中采用1D Abel变换观测算子(a,b)和 $\pm 400$  km有限射线长度2D路径追踪观测算子(c,d)得到的48 h总可降水量预报(单位:mm)与ECMWF分析场之间的标准差的水平分布:(a),(c)未加入影响参数多路径质量控制的实验结果;(b),(d)加入影响参数多路径质量控制的实验结果(用于验证预报结果的探空站位置分别在图d中用“x”符号标出)

Fig.7 Horizontal distributions of standard deviations of total precipitable water (unit: mm) between the ECMWF analyses and the 48 h forecasts initialized by the analyses generated using (a,b) the 1D operator (a) without and (b) with the impact multipath QC and (c,d) the 400 km limited-ray-path 2D raytracing operator (c) without and (d) with the impact multipath QC. Statistics are calculated over the entire assimilation domain and the time period 16—30 April 2012. The radiosonde locations are indicated by the “x” symbols in (d)

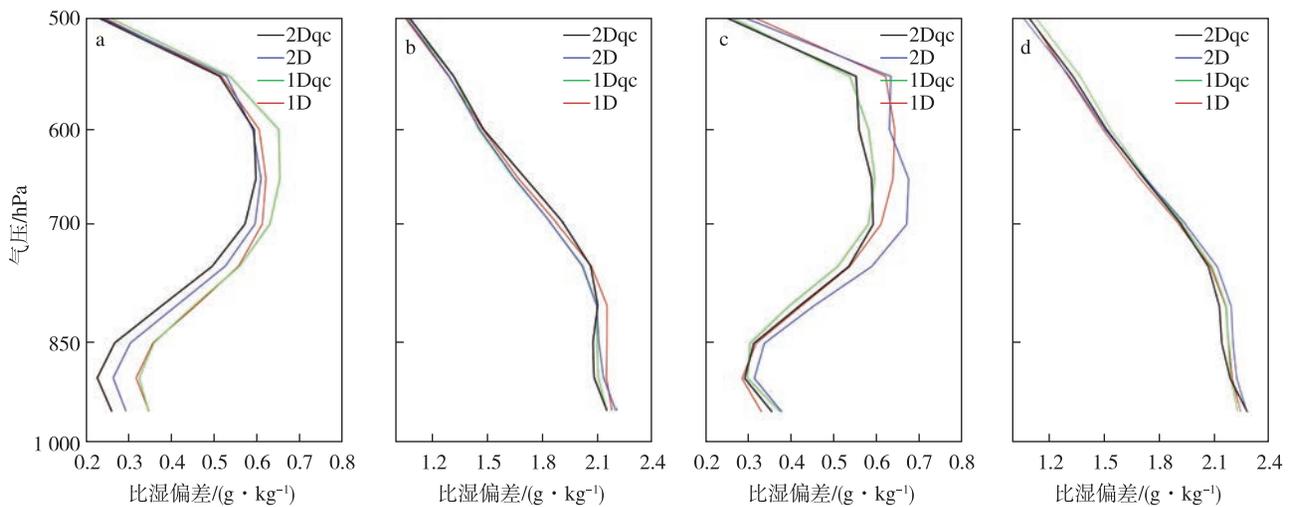


图8 模式预报起报时间在 0000 UTC 和 1200 UTC 的 24 h (a,b) 和 48 h (c,d) 比湿预报与探空比湿观测资料的偏差 (a,c) 和标准差 (b,d) 的垂直分布 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig.8 Vertical distributions of the (a,c) biases and (b,d) standard deviations of specific humidity between radiosonde data and the (a,b) 24-hour and (c,d) 48-hour forecasts during the period of 17–30 April 2012

## 5 总结与结论

本研究是 Zou et al. (2019) 的后续研究。Zou et al. (2019) 首次提出了影响参数多路径质量控制方案。本文提出和讨论了有限射线长度 2D 路径追踪观测算子, 并研究了加入影响参数多路径控制对热带低纬地区 GPS 掩星弯角资料同化和数值预报的影响。首先利用 3 个不同有限射线长度的 2D 路径追踪观测算子和原始 2D 射线追踪算子, 对 2017 年 3 月 19 日—4 月 30 日  $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$  的数值预报背景场进行了 COSMIC 掩星弯角资料模拟, 发现 3 个有限射线长度 2D 路径追踪观测算子模拟的弯角和原始 2D 射线追踪算子模拟的弯角相近。虽然在对流层低层 (2~3 km), 以近地面点为中心的  $\pm 200$  km 和  $\pm 300$  km 射线长度的 2D 路径追踪观测算子与原始 2D 射线追踪观测算子模拟的弯角相比存在小的正偏差, 经过影响参数多路径质量控制, 以近地面点为中心的  $\pm 400$  km 射线长度的 2D 路径追踪观测算子可以消除此正偏差。

无论是采用有限射线长度 2D 路径追踪观测算子还是 1D Abel 变换观测算子, 影响参数多路径质量控制方案对热带低纬度地区的 GPS 掩星弯角资料同化都十分重要。如果采用 1D Abel 变换观测算子, 那么只在影响参数多路径质量控制方案中才需

要用到有限射线长度 2D 路径追踪观测算子, 不需要用到它的伴随算子。通过以下 4 个组合进行两周的 6 h 循环资料同化试验: 做或不做影响参数多路径质量控制, 采用有限射线长度 2D 路径追踪算子或 1D Abel 变换观测算子。COSMIC 掩星弯角观测资料与 1D Abel 变换观测算子模拟的弯角之差的偏差和标准差经过影响参数多路径质量控制后显著减小。在 4 个同化试验中, 对 COSMIC 掩星弯角观测资料进行影响参数多路径质量控制并采用有限射线长度 2D 路径追踪观测算子时, 同化得出的水汽背景场和分析场与没有参与同化的探空观测资料相比更为精确。若采用影响参数多路径质量控制和有限射线长度 2D 路径追踪观测算子, 24 和 48 h 预报的水汽场与 ECMWF 分析结果最接近。

以上结论有待利用其他资料同化系统做更长时间的数值试验, 进一步检验影响参数多路径质量控制方案和有限射线长度 2D 路径追踪观测算子对热带低纬地区 GPS 掩星资料同化和数值预报的影响。

**致谢:** 本项研究工作得到了中国国家重点研究计划项目 2018YFC1507004 的支持。邹晓蕾和刘辉分别是南京气象学院 (现南京信息工程大学) 77 级和 78 级的大学生。在母校 60 周年校庆之际, 作者以此文感谢母校的培养。

## 参考文献(References)

- Anderson J, Hoar T, Raeder K, et al., 2009. The data assimilation research testbed: a community facility [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(9): 1283-1296. doi: 10.1175/2009BAMS2618.1.
- Gorunov M E, 2002. Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere [J]. *Radio Sci*, 37(5): 9-1-9-10. doi: 10.1029/2000RS002592.
- Gorunov M E, Lauritsen K B, 2004. Analysis of wave fields by Fourier integral operators and their application for radio occultations [J]. *Radio Sci*, 39(4). doi: 10.1029/2003rs002971.
- Gorunov M E, Sokolovsky S V, Bengtsson L, 1996. Space refractive tomography of the atmosphere: modeling of direct and inverse problems [R]. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany; 59.
- Healy S B, 2001. Radio occultation bending angle and impact parameter errors caused by horizontal refractive index gradients in the troposphere: a simulation study [J]. *J Geophys Res*, 106(D11): 11875-11889. doi: 10.1029/2001JD900050.
- Healy S B, Eyre J R, Hamrud M, et al., 2007. Assimilating GPS radio occultation measurements with two-dimensional bending angle observation operators [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133(626): 1213-1227. doi: 10.1002/qj.63.
- Jensen A S, Lohmann M S, Benzon H H, et al., 2003. Full spectrum inversion of radio occultation signals [J]. *Radio Sci*, 38(3): 1040. doi: 10.1029/2002rs002763.
- Jensen A S, Lohmann M S, Nielsen A S, et al., 2004. Geometrical optics phase matching of radio occultation signals [J]. *Radio Sci*, 39(3): RS3009. doi: 10.1029/2003rs002899.
- Liu H, Zou X, 2003. Improvements to a GPS radio occultation ray-tracing model and their impacts on assimilation of bending angle [J]. *J Geophys Res*, 108(D17): 4548. doi: 10.1029/2002JD003160.
- Liu H, Kuo Y H, Sokolovskiy S, et al., 2018. A quality control procedure based on bending angle measurement uncertainty for radio occultation data assimilation in the tropical lower troposphere [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 35(10): 2117-2131. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0224.1.
- Palmer P I, Barnett J J, Eyre J R, et al., 2000. A nonlinear optimal estimation inverse method for radio occultation measurements of temperature, humidity, and surface pressure [J]. *J Geophys Res*, 105(D13): 17513-17526. doi: 10.1029/2000JD900151.
- Poli P, Joiner J, 2004. Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. I: ray tracing [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(603): 2787-2805. doi: 10.1256/qj.03.228.
- Skamarock W, Klemp J B, Dudhia J, et al., 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR. Boulder, Colorado, USA. doi: 10.5065/D68S4MVH.
- Sokolovskiy S, 2003. Effect of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere [J]. *Radio Sci*, 38(3): 1058. doi: 10.1029/2002rs002728.
- Zou X, Vandenberghe F, Wang B, et al., 1999. A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements [J]. *J Geophys Res*, 104(D18): 22301-22318. doi: 10.1029/1999JD00450.
- Zou X, Wang B, Liu H, et al., 2000. Use of GPS/MET refraction angles in 3D variational analysis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126: 1-28. doi: 10.1002/qj.49712657003.
- Zou X, Liu H, Anthes R, et al., 2004. Impact of CHAMP radio occultation observations on global analysis and forecasts in the absence of AMSU radiance data [J]. *J Meteorol Soc Japan*, 82(1B): 533-549. doi: 10.2151/jmsj.2004.533.
- Zou X, Liu H, Kuo Y H, 2019. Occurrence and detection of impact multipath simulations of bending angle [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*. doi: 10.1002/qj.3520.

## Impact multipath quality control improving GPS RO data assimilation in the tropical lower troposphere

ZOU Xiaolei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Center of Data Assimilation for Research and Application, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup>Earth System Science Interdisciplinary Center(ESSIC), University of Maryland, 20740, USA

The Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC-2) has more powerful GPS receiver antennas, a twice higher sampling rate of 100 Hz, and a three times smaller inclination of  $24^\circ$  than those of COSMIC-1. COSMIC-2 will, therefore, provide an unprecedented ample number of radio occultation (RO) data in the tropics. Assimilation of RO data in the tropics is challenging due to unique features such as large horizontal gradients of refractivity, spherical asymmetry, and impact multipath in the moist tropical lower troposphere. Bending angle data assimilation in the tropical lower troposphere is done in this study using a two-dimensional (2D) limited-ray-path raytracing operator and a one-dimensional (1D) Abel transform operator. An impact multipath quality control (QC) developed in our previous study is incorporated to eliminate occurrences of impact multipath in bending angle simulations. The fractional differences in bending angle simulations between the limited-path-length raytracing operators and the original 2D raytracing operator have zero bias, and their standard deviations are more than three times smaller than those between the 1D Abel transform operator and the 2D raytracing operator. The highest accuracy and precision are achieved for the 2D limited-ray-path raytracing operator if the ray path is confined within  $\pm 400$  km. Use of the physically based impact multipath QC is shown to improve COSMIC data assimilation and forecast results using either the 1D Abel transform or the 2D limited-ray-path observation operators of bending angle in the tropical lower troposphere.

**GPS RO bending angle data assimilation; limited-ray-path-length raytracing operator; impact parameter multiparty quality control**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191019002

(责任编辑:刘菲)