

临近空间全球温度场三维变分同化

谢衍新^{1,2}, 吴小成¹, 胡 雄¹, 杨钧烽¹, 肖存英¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以 TIMED\SABER 红外温度探测数据为观测值, WACCM 模式预报场为温度背景值, 采用三维变分同化方法, 获取了 20~100 km 临近空间范围的全球大气温度场, 三维变分同化后, 临近空间全球温度场的分布发生了明显的变化, 经验证算法可行。利用统计学方法对同化结果进行评估, 结果显示, 三维变分同化后临近空间全球温度场误差整体减小, 三维变分同化前的温度背景场误差最大可达 17 K, 三维变分同化后的温度分析场最大误差减小至 7 K 以内, 同化效果明显。该算法可用于为临近空间大气环境预报模式提供更精确的初值场。

关键词: 同化; 温度; 临近空间; 三维变分

中图分类号: P356 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0804005

Preliminary study on 3-dimensional variational assimilation of global temperature field in near space

Xie Yanxin^{1,2}, Wu Xiaocheng¹, Hu Xiong¹, Yang Junfeng¹, Xiao Cunying¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The near space global atmospheric temperature field from 20–100 km was achieved using 3-dimensional variational (3DVAR) assimilation method, of which the observation data was taken from TIMED\SABER temperature data and the background data was taken from WACCM model. Obvious variations could be seen in the near space global atmospheric temperature field after 3DVAR assimilation. An evaluation analysis based on statistical method was accomplished. The results indicate that the errors of the near space global atmospheric temperature field get a general decrease after 3DVAR assimilation, with the maximum error decreasing from 17 K to 7 K. The application of this 3DVAR assimilation algorithm can provide more accurate initial fields to near space atmospheric environment forecast model.

Key words: assimilation; temperature; near space; 3DVAR

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501503); 国家自然科学基金(41204137)

作者简介: 谢衍新(1990-), 女, 博士生, 主要从事数据同化及临近空间大气方面的研究。Email: xieyanxin12@mailsucas.ac.cn

导师简介: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事中高层大气和电离层探测与研究。Email: xhu@nssc.ac.cn

0 引言

数据同化方法作为提高数值模式预报精确程度的重要组成部分,在过去的几十年取得了许多的研究进展,许多学者致力于将数学领域新的研究成果引入资料同化领域并将提出的同化算法运用于实际应用^[1-3]。在 20~100 km 的临近空间,卫星等遥感探测工具为我们提供了大量空间分布广且分辨率高的观测数据,随着临近空间的战略价值日渐引起各国的关注和重视^[4-5],如何充分利用可获取的遥感探测资料研究临近空间环境的变化特征,同时改进临近空间大气数值模式的预报精度,为临近空间的开发和利用提供科学依据和保障,成为研究热点之一。

根据探测平台的不同,临近空间遥感探测数据的获取方法^[6]分为地基^[7]探测(雷达系统探测^[8-9])、空基探测(火箭^[10]、下投式探空仪器探测、气球搭载探测)、天基探测(卫星探测^[11])。地基和空基探测手段只能对特定的地区进行观测,存在局限性,相比之下,卫星遥感探测则能够提供时空覆盖范围广的大气结构信息,描述出天气系统的空间变化和时间演变。从对流层数值天气预报的研究成果来看,全球分布的卫星遥感探测资料对提升数值预报效果具有更大的作用。因此,卫星遥感探测资料也将成为改善临近空间数值模式预报效果的一种重要而有效的观测资料来源。

在众多同化算法中,变分同化算法作为主流算法之一,对数值预报质量的提高起到了关键作用。其中,三维变分同化算法是当今世界主要气象中心的业务运行算法^[1]。相比于纯粹的统计插值方法,三维变分同化算法具有能体现复杂的非线性约束关系,能使用所有有效观测,同化结果具有物理一致性和动力协调性,误差协方差的确定具有更大的自由度的优势^[13]。相比于卡尔曼滤波法和四维变分同化方法,三维变分同化方法具有计算时间短,占用机器内存小的优势^[14]。

对于三维变分同化技术,国内外学者进行了大量的研究,但大都集中在 10 km 以下的地面天气系统:如降水和水汽、台风、雾等的同化研究^[15-16]。在 20~100 km 之间的临近空间范围内,国外学者 K.W. Hoppel 等利用海军研究实验室大气变分同化系统(Naval Research Laboratory Atmosphere Variational

Data Assimilation System)进行同化实验^[17],以 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)和 MLS(Microwave Limb Sounder)温度数据为观测值,海军实验全球大气预报场为背景值,得到 80 km 以下的全球大气温度场分布,但文中没有对同化前后结果的精度进行对比评估分析。

文中采用三维变分同化方法,以 SABER 温度观测数据为观测值,WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) 模式预报场为背景值,获取 20~100 km 覆盖临近空间范围(包含对流层顶)的全球大气温度场,并利用统计学方法对三维变分同化前后的结果进行评估,为临近空间大气环境的预报提供更精确的初值场。文中第 1 节详细介绍同化算法,第 2 节给出同化实验概况及同化结果,第 3 节为结论。

1 三维变分同化算法

从最优估计理论出发,由贝叶斯公式可推导出三维变分同化形式^[1]。

$$P_a(x) = P_b(x_b)P_o(y) \quad (1)$$

上式是估值理论下的贝叶斯公式,它表征了分析值与先验值、观测值之间的关系。其中 $P_o(y)$ 是观测资料的概率密度分布值; $P_b(x_b)$ 是背景资料的概率密度分布值; $P_a(x)$ 是观测资料和背景资料条件下的概率密度分布值。当 $P_a(x)$ 的概率密度达到极大值时,得到的 x 则为观测资料和背景资料经过同化之后得到的最优值。假设概率密度分布是服从正态分布的,则有:

$$P_a(x) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}(x-x_b)^T B^{-1}(x-x_b) - \frac{1}{2}(y-H\{x\})^T R^{-1}(y-H\{x\})\right] \quad (2)$$

大气温度状态参量 x 的最优估计值(称为分析值)应使公式(2)的概率密度函数 $P_a(x)$ 取得最大值,即价值函数 $J(x)$:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x-x_b)^T B^{-1}(x-x_b) + \frac{1}{2}(y-H\{x\})^T R^{-1}(y-H\{x\}) \quad (3)$$

达到最小值。式中: x_b 是 WACCM 模式预报输出的温度背景场; B 是背景场 x_b 的误差协方差矩阵; y 是 SABER 温度观测值; H 是观测算子,它把所研究的大气温度参量映射到 SABER 温度观测量上; R 是观测值 y 的误差协方差矩阵。

对公式(3)进行求导,并进行一系列的变换,可以求解出温度分析场 x 的状态最佳值:

$$x = x_b + BH^T[R + HBH^T]^{-1}(y - Hx_b) \quad (4)$$

式中: $(y - Hx_b)$ 是在观测值空间表示的真实值与背景值之差,即观测增长。则公式(4)表示温度分析场 x 是温度背景场 x_b 与观测增长 $(y - Hx_b)$ 之间的加权平均,其中 $BH^T[R + HBH^T]^{-1}$ 是权重矩阵。文中从公式(4)出发,进行临近空间温度的三维变分同化实验。同化结果的精确程度则通过三维变分同化的温度分析场与 SABER 温度场 x_i 进行对比来判定。将全球同化范围按经度、纬度划分网格,观测算子的设定从最小二乘法的思想出发,利用观测值与同化范围内网格的从属关系,若观测值所在空间位置从属于空间网格,权重参数设定为 1,若观测值所在空间位置不从属于空间网格,权重参数设定为 0,权重参数组成的矩阵,可将 WACCM 模式的温度背景场映射到 SABER 温度观测值上。该观测算子的设定,使得观测算子 H 矩阵出现大量 0 元素,因此在数据处理过程中可使用稀疏矩阵的方法,避免 0 元素参与庞大的矩阵运算,此方法在保证同化效果的情况下,克服了三维变分同化因数据庞大而造成程序运行时间过长的问題,以便快速及时的为预报模式提供初值场,可为预报时效性提供保障。

2 三维变分同化实验

2.1 SABER 温度数据

TIMED 卫星于 2001 年 12 月 7 日发射升空,从 2002 年 1 月 22 日开始获取 SABER 探测器的观测数据。SABER 是一个 10 通道宽带辐射计,在 TIMED 卫星沿轨道飞行过程中采用临边测量 CO_2 的红外辐射信号,在此基础上生成低平流层到低热层包括各种大气参量(温度、气压和密度等)的垂直廓线。文中选用 SABER 版本 V1.07 温度数据作为观测值。V1.07 版本数据改进了 UMLT 区域的非局部热动平衡(non-LTE)算法,其温度数据已经得到验证^[18]。SABER 温度数据的误差如下:在 15~32 km 高度范围内,误差从 1.5 K 递减至 0.8 K;在 32~54 km 高度范围内,误差从 0.8 K 递增至 2.1 K;在 54~64 km 高度范围内,误差从 2.1 K 递减至 1.6 K;在 64~80 km 高度范围内,误差从 1.6 K 递增至 2.3 K;在 80~100 km 的高度范围内,误差从 2.3 K 显著增加至 8.4 K。

2.2 WACCM 模式

WACCM 模式是 NCAR 开发的一个化学-气候全耦合的综合数值模式(chemistry-climate models, CCMs)^[19]。WACCM 由 NCAR 三个部门共同合作完成,HAO(High Altitude Observatory)的高层大气模式 TIME GCM,ACD(Atmospheric Chemistry)中层大气化学模式 MOZART,CGD (Climate and Global Dynamics) 对中层大气模式 WACCM,WACCM 采用 CESM(Community Earth System Model)作为框架。因此,WACCM 模式包含中层大气的化学模式(化学反应加热过程、平流层气溶胶等),MLT 区域离子化学(离子拖曳、极光过程和太阳质子事件等),大气中短波辐射和长波辐射,重力波参数化以及分子扩散和成分分离等过程。模式提供水平分辨率为 $4^\circ \times 5^\circ$ 和 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ (纬度 \times 经度)。模式在垂直方向有 66 层,分辨率是变化的:高于 65 km 分辨率是 3.5 km,平流层(50 km)附近采用 1.75 km,在低平流层(30 km)是 1.1~1.4 km,对流层采用 1.1 km,在近地面采用更高的垂直分辨率。对于所有的分辨率,物理参数化的时间步长是 1800 s。文中将 WACCM 模式在“Specified Dynamics”(SD)状态下运行,称为 WACCM-SD,其中 0~50 km 的对流层和平流层融合了 GEOS5.2 的再分析资料,松弛系数在 50 km 以下设为 0.1,50~60 km 线性递减,60 km 以上自由运行^[20]。

2.3 实验数据概况

此次三维变分同化实验所要求取的分析场为 2013 年 10 月 1 日 00:00 时的全球温度场,温度背景场为 WACCM 模式输出的 2013 年 10 月 1 日 00:00 时刻的温度预报场,温度观测场与温度背景场时间相匹配,选用 2013 年 9 月 30 日 21:00 至 2013 年 10 月 1 日 03:00 的 SABER 温度观测数据。图 1 给出了此次实验中 SABER 温度观测数据的全球分布情况。其中“ \times ”型点代表用于三维变分同化试验的 270 条观测数据廓线位置分布,“ Δ ”型点代表用于检验三维变分同化试验效果的 90 条真值廓线位置分布(“ Δ ”型点未参与同化过程)。将 SABER 温度观测数据,应用三维变分同化算法获得全球大气温场,再将未用于同化的 SABER 温度廓线与同化后的分析场中相应地理位置处的温度廓线进行比较,可得到同化结果的误差,进而评估同化效果。

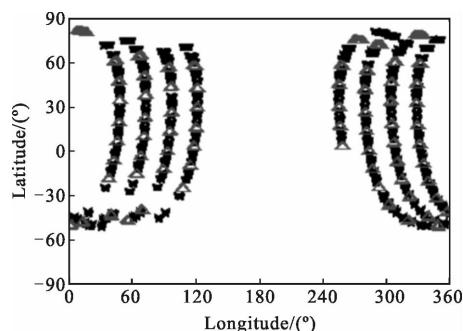


图 1 三维变分同化实验中 SABER 温度观测数据分布
Fig.1 Global temperature distribution of SABER temperature observation data in 3DVAR assimilation experiment

误差协方差表征数据的误差特性，体现了数据对同化结果贡献的权重。此次三维变分同化实验中背景误差的值设定在 10~15 K 的范围内，并随海拔和纬度的增高而增大。背景误差有效相关距离水平方向设定为 1 个网格，垂直方向设定为 2 个网格。观测误差的设定来源于 SABER 数据误差分析，各观测误差之间没有相关性。

2.4 实验结果

图 2(a)和(b)为高度 45 km 处同化前后温度随经度和纬度的分布图。图(a)为三维变分同化前的背景温度分布图，图(b)为三维变分同化 SABER 温度数据后的温度分布图。对比图 2(a)和(b)可知，三维

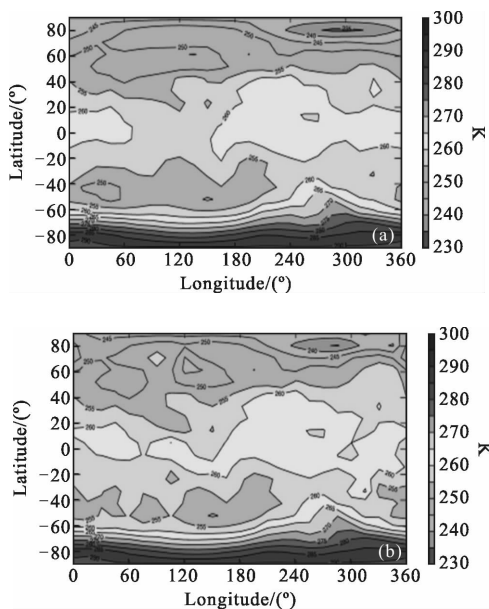


图 2 三维变分同化前后 45 km 处温度全球分布
Fig.2 Global temperature distribution at 45 km before and after 3DVAR assimilation

变分同化后，在北纬 40°~80°，经度 70°~120° 的范围内，低温区域明显缩小；在北纬 70°~90°，经度 240°~360° 的范围内，低温区域明显缩小；在南纬 20°到北纬 20°，经度 270°~330° 的范围内，低温区域扩大；在南纬 20°~40°，经度 280°~350° 的范围内，高温区域扩大；在南纬 60°到北纬 20°，经度 40°~150° 的范围内，高温区域扩大。在三维变分同化 SABER 温度数据后，温度的全球分布出现了较为明显的变化。

图 3(a)和(b)为高度 120°E 处同化前后温度随纬度和高度的分布图，图 3(a)为三维变分同化前的背景温度分布图，图 3(b)为三维变分同化 SABER 温度数据后的温度分布图。对比图 3(a)和(b)可知，三维变分同化后，在南纬 60°到北纬 80°，高度 70~100 km 范围内，温度明显降低；在南纬 40°到北纬 20°的 40~50 km 高度范围，高温区域扩大。在北纬 60°~90°，高度 50~60 km 范围内，高温区域缩小。三维变分同化 SABER 温度数据后，温度随纬度和高度的分布出现了较为明显的局部变化。

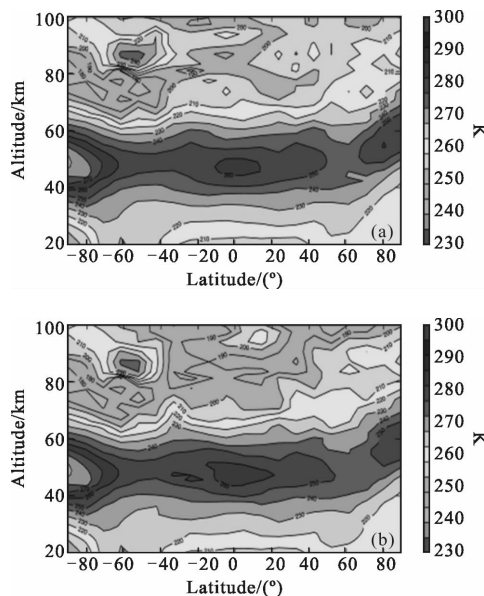


图 3 三维变分同化前后 120°E 处温度全球分布
Fig.3 Global temperature at 120°E before and after the 3DVAR assimilation

图 4 是未用于同化的 SABER 温度廓线与同化前后的背景场和分析场中相应地理位置处的温度廓线的比较分析图，四幅图选取的廓线位置包含了南北纬、东西经的低、中、高纬度地区。图中实线代表 SABER 温度真实值廓线，点线虚线代表 WACCM 模

式背景温度值廓线, 短线虚线代表三维变分同化后的温度分析值廓线。由图可知, 在 50~100 km 高度范围内, WACCM 温度背景值与 SABER 温度真实值差别较为明显, 经过三维变分同化后的温度分析值相比于 WACCM 温度背景值, 更加接近 SABER 温度真实值, 同化效果明显。

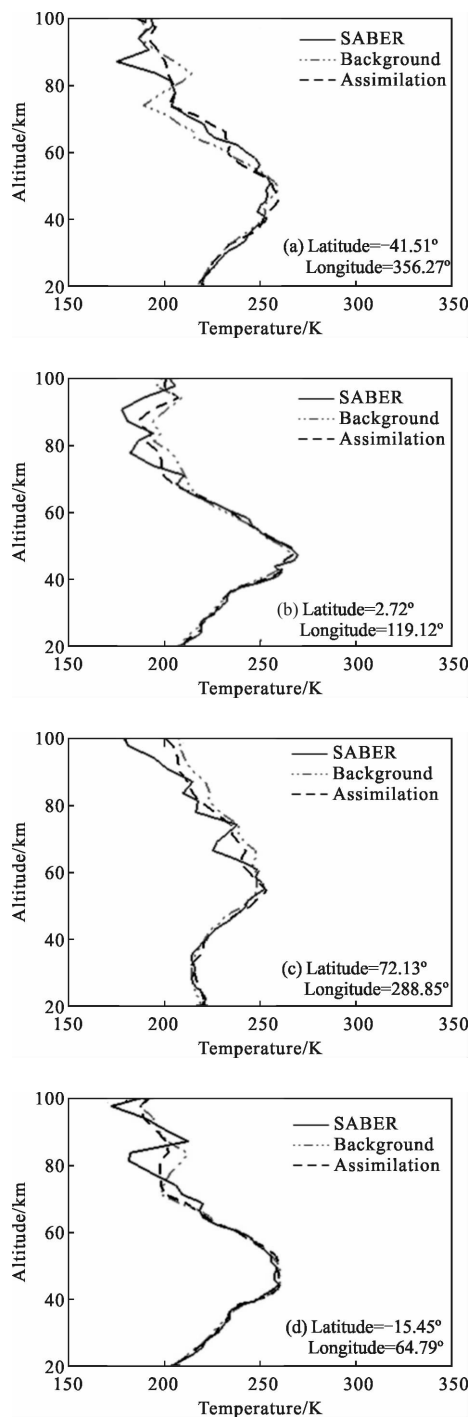


图 4 三维变分同化前后温度廓线

Fig.4 Temperature profiles before and after 3DVAR assimilation

将所有未用于同化的 SABER 温度廓线与同化前后的背景场和分析场中相应地理位置处的温度廓线进行统计分析, 结果见图 5。图 5(a)中, 实线与 SABER 温度值的差别比较大, 尤其在高度 70 km 以上, 误差逐步增大到 17 K。对比图 5(b)可知, 同化后的温度分析值与 SABER 温度值的差别明显减小, 代表温度背景值与 SABER 温度值偏差的平均值, 虚线代表标准偏差, 从图中可以看出温度背景场即使在 70 km 以上, 误差也控制在 7 K 以内, 并且同化后的温度分析值与 SABER 温度偏差的标准差也明显减小。

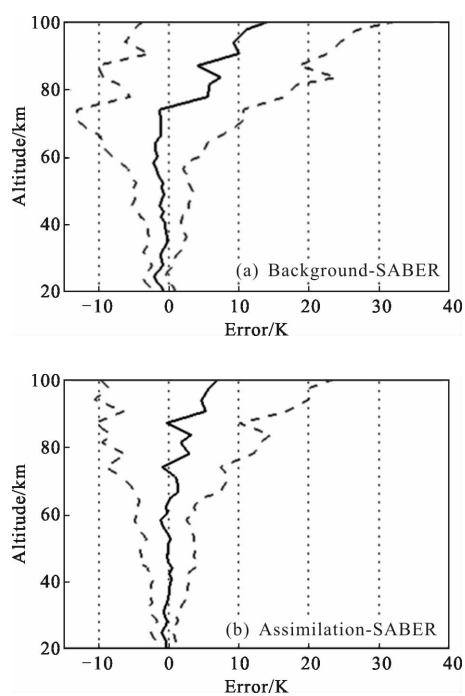


图 5 三维变分同化前后误差统计分析

Fig.5 Error statistical analysis before and after 3DVAR assimilation

3 结论

文中基于 SABER 卫星红外温度探测数据, 采用三维变分同化方法, 以 WACCM 模式预报场数据为温度背景场, 获取了 20~100 km 临近空间全球大气温度场。对比三维变分同化前后的临近空间全球温度场分布, 变化较为明显, 经验证算法可行。由基于统计学的同化评估结果可知, 三维变分同化后, 20~100 km 临近空间全球温度场的误差整体减小, 最大误差由三维变分同化前的 17 K 减小至三维变分同化后的 7 K 以内, 同化后的温度分析场相对于温度背景场更接近真值, 同化效果明显。

文中三维变分算法的应用可为临近空间大气环境预报模式提供更精确的温度初值场, 在后续研究中, 将利用三维变分同化后的温度分析场作为温度初值场输入临近空间大气环境预报模式, 验证三维变分同化方法对预报结果的改进效果。

参考文献:

- [1] Bouttier F, Courtier P. Data Assimilation Concepts and Methods March 1999[M]. UK: Ecmwf Org, 2002.
- [2] Ma Jianwen, Qin Sixian. Recent advance and development of data assimilation algorithms [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(7): 747-757. (in Chinese)
- [3] Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(1): 1-7. (in Chinese)
- [4] Lv Daren, Chen Zeyu, Guo Xia, et al. Recent progress in near space atmospheric environment study [J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(6): 674-682. (in Chinese)
- [5] Xu Rong, Men Tao, Zhang Rongzhi. Application of near space platform based photoelectric detecting system to space situation awareness[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(6): 546-553. (in Chinese)
- [6] Chen Fenggui, Chen Guangming, Liu Kehua. Analysis of near space environment and its effect [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013(4): 71-75. (in Chinese)
- [7] Zhang Jingxu. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection[J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(1): 10-16. (in Chinese)
- [8] Yan Z, Hu X, Guo W, et al. Development of a mobile Doppler lidar system for wind and temperature measurements at 30-70 km [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2016, 188: 52-59.
- [9] Cheng Yongqiang, Hu Xiong, Xu Li, et al. Advances of Na Lidar in near space detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 28-31. (in Chinese)
- [10] Fan Zhiqiang, Sheng Zheng, Wan Li, et al. Comprehensive assessment of the accuracy of the data from near space meteorological rocket sounding [J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, 62(19): 199601. (in Chinese)
- [11] Ma Chao, Liao He, Zhou Wenlong, et al. Discussion on retrieval of satellite atmosphere remote sensing by spaceborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 13-17. (in Chinese)
- [12] Wang Zhongyi, Jiang Gengming. Inversion of IRAS/FY-3B atmosphere temperature and humidity profiles based on fast locally linear regression [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1529-1539. (in Chinese)
- [13] Cheng Dongshen, Shen Tongli, Ma Gelan, et al. Advances in the meteorological data assimilation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, 27(4): 550-564. (in Chinese)
- [14] Guan Yuanhong, Zhou Guangqing, Lu Weisong, et al. Theory development and application of data assimilation methods [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2007, 30(4): 1-8. (in Chinese)
- [15] Engeln A V, Nedoluha G, Kirchengast G, et al. One-dimensional variational (1-D Var) retrieval of temperature, water vapor, and a reference pressure from radio occultation measurements: A sensitivity analysis[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D11): 4337-4349.
- [16] Zhang H, Chou J, Qiu C. Assimilation analysis of rammasun typhoon structure over northwest pacific using satellite data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 389-395.
- [17] Hoppel K W, Baker N L, Coy L, et al. Assimilation of stratospheric and mesospheric temperatures from MLS and SABER into a global NWP model [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, 8(20): 6103-6116.
- [18] Remsberg E E, Marshall B T, Garcia-Comas M, et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D17): 1641-1653.
- [19] Richter J H, Sassi F, Garcia R R, et al. Dynamics of the middle atmosphere as simulated by the Whole Atmosphere Community Climate Model, version 3 (WACCM3) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D8): 693-695.
- [20] Yang J F, Xiao C Y, Hu X, et al. Responses of zonal wind at -40° N to stratosphere sudden warming events in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere [J]. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60(6): 935-945.