

金大智,李刚,张华,等. 2013. 红外高光谱资料近地面通道应用技术研究:海洋地区观测资料同化试验. 气象, 39(6):675-680.

红外高光谱资料近地面通道应用技术研究: 海洋地区观测资料同化试验^{*1}

金大智¹ 李刚¹ 张华² 朱文刚¹

1 南京信息工程大学数理学院, 南京 210044

2 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 由于下垫面的复杂性, 卫星近地面通道的辐射率资料没有得到充分开发和利用。就我国自主研发的 GRAPES-3DVar 而言, 红外高光谱近地面通道资料还没有应用于陆地, 即使在下垫面相对简单的海洋, 由于背景场海表温度估计不够准确, 红外高光谱资料的使用效果也不甚理想。针对 GRAPES 模式的背景场海表温度估计不够准确这一问题, 本文利用大气红外探测仪器 AIRS(The Atmospheric Infrared Sounder) 辐射率观测资料通过一维变分(1DVar)方法对其晴空视场点内的背景场海表温度进行调整, 再运用 GRAPES 全球分析预报系统进行同化分析, 研究了海表温度调整后对分析场的影响。结果表明, 利用一维变分调整后的海表温度不仅使得低层通道的模拟亮温与观测亮温更加匹配, 而且有效地改进了分析场, 对位势高度场高、中、低层均有不错的改进, 对低层湿度场以及风场的改进也较为明显。

关键词: 变分同化, 地表温度, 地表发射率, GRAPES-3DVar

中图分类号: P468

文献标识码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 06. 002

Application Research on Infrared Hyperspectral Data Near Surface: An Experiment on Assimilating Observation Data over Sea

JIN Dazhi¹ LI Gang¹ ZHANG Hua² ZHU Wengang¹

1 College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Because of the complexity of underlying surface, satellite radiation data near surface has not been fully developed and used. Infrared hyperspectral data near surface has not been applied on land in our GRAPES model, either, and even on the ocean where the underlying surface is simple relatively, the effect of using infrared spectral data is not very satisfied due to the inaccurate estimation of the sea surface temperature of the GRAPES model's background. In view of the question that the estimation of the sea surface temperature is inaccurate, this paper uses one dimensional variational (1DVar) method to adjust the background sea surface temperature when the FOV (field of view) of AIRS (The Atmospheric Infrared Sounder) is clear, and utilizes the GRAPES model to do cycle assimilation, then researches the influence of the analytic fields after adjusting the sea surface temperature. The results indicate that using 1DVar to adjust temperature not only makes the simulated brightness temperature in the low-level channels better match the observed brightness temperature, but also effectively improves the analytic fields. Besides, the geopotential height fields in the low, middle and upper atmosphere are all improved well, and the humidity fields and the wind fields in the lower atmosphere are also obviously improved.

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806003 和 GYHY201106008)资助

2012 年 6 月 4 日收稿; 2012 年 12 月 30 日收修定稿

第一作者: 金大智, 主要从事极轨卫星近地面通道的应用研究. Email: jindazhi1987@126.com

通信作者: 张华, 主要从事资料同化工作. Email: zhangh@cma.gov.cn

Key words: variational assimilation, surface temperature, surface emissivity, GRAPES-3DVar

引言

随着大气探测及资料同化技术的改善,卫星资料对数值预报水平的提高扮演着愈来愈重要的角色。目前欧美等发达业务中心预报所使用的资料中,卫星资料数量已经达到 90% 以上,卫星资料使用使得南半球预报效果改善超过两天,北半球也接近一天。但对于大多数数值预报业务中心,由于下垫面的复杂性,卫星近地面通道的辐射率资料没有得到有效应用。地表温度和地表发射率作为下垫面的两个重要特征物理量很难准确估计,从而导致近地面通道资料基本没有进入同化系统。

近地面通道资料有助于描绘地表特征,并且在地表温度和地表发射率准确估计的条件下,能够对低层大气的温度、湿度廓线的反演起到积极作用,对辐射率资料的质量控制也有很大的帮助(Yao et al, 2011)。尤其是在数值天气预报中,准确的地表温度和地表发射率能够同化更多近地面通道的资料,从而提高数值预报的性能。

对于地表温度的反演国内外学者做了大量富有成效的工作。例如 Becker 等(1990)提出的局地分裂窗算法,该方法主要是通过辐射传输模型模拟不同地表条件和大气状况下,地表温度和发射率对红外辐射亮温的影响,从而发展出一个利用 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)⁴ 和 5 通道亮温数据反演地表温度的线性模型。此外,还有利用物理反演的方法将地表温度和地表发射率分离,例如 Li 等(2007)通过提取光谱发射率的特征向量,同时反演光谱发射率、地表温度以及大气温度、湿度廓线。

总而言之,这些统计方法或者物理反演方法均将辅助的地表发射率信息(比如先验的地表发射率值或者光谱发射率的特征向量)有效地融入到地表温度的反演算法中,能够提高地表温度反演的准确性,其不足之处是:地表发射率如果估计不够精确,反演结果则不太理想。

我国科学家自主发展的三维变分同化系统 GRAPES-3DVar 还未在陆地上使用红外高光谱近地面通道资料,即使在下垫面相对简单的海洋,由于背景场海表温度估计不够精确,红外高光谱资料的

使用效果也不甚理想。分析表明,GRAPES-3DVar 的分析场质量与 ECMWF 和 NCEP 相比,在对流层低层差距明显。因此,开展卫星近地面通道辐射亮温资料的应用研究,不仅对于提高卫星资料应用水平和改进预报效果有重要意义,而且可以满足业务需求。

作为研究工作的第一步,选取下垫面结构相对简单的海洋,针对 GRAPES 全球模式的背景场海表温度估计不够准确这一问题,采用卫星窗区通道观测资料通过一维变分方法反演地面温度,即对 AIRS 晴空视场点内的背景场海表温度进行调整,再运用 GRAPES 全球分析预报模式进行同化试验,着重研究了海表温度调整后对分析场的影响。

1 变分同化系统简介

变分同化方法的基本思想是将资料同化归结为一个表征分析场与观测场、分析场与背景场偏差的二次泛函极小值问题。该泛函一般定义为:

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

其中, x 表示分析向量, x^b 表示背景向量, B 表示背景误差协方差矩阵, R 为观测误差协方差矩阵, y 表示观测向量,上标 T、 -1 分别表示矩阵的转置和逆, H 为观测算子(Zhang et al, 2004),它代表模式空间向观测空间的一种映射,当 y 与 x 为同类型的物理变量时,观测算子即为一个简单的插值算子;如果 y 与 x 具有不同的物理属性,此时观测算子为分析变量的一些泛函信息,算子 H 为模式空间向观测空间的具有某种复杂结构的映射算子,如对卫星辐射率资料来说,算子 H 即为辐射传输模式。

1.1 一维变分

本文使用的一维变分系统为 NWPSAF Met Office 1DVar 3.3 版本,分析向量包括温、湿度廓线以及地面参数等,辐射传输模式采用 RTTOV7。变分目标函数的梯度为:

$$\nabla_x J(x) = B^{-1}(x - x^b) + H^T R^{-1}[H(x) - y] \quad (2)$$

式中 $\mathbf{H} = \partial H / \partial \mathbf{x}$ 为 Jacobi 矩阵。当目标函数梯度值为 0 时, 所求得的 \mathbf{x} 即是我们所要的最优解。当背景向量元素个数大于卫星通道使用数时, 迭代公式如下 (Rodgers, 1976):

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{x}_n)[\mathbf{H}(\mathbf{x}_n)\mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{x}_n) + \mathbf{R}]^{-1} \times [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_n) - \mathbf{H}(\mathbf{x}_n)(\mathbf{x}^b - \mathbf{x}_n)] \quad (3)$$

当背景向量元素个数小于卫星通道使用数时, 则使用迭代公式:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}^b + [\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_n)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}_n)]^{-1} \times \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_n)\mathbf{R}^{-1}[\mathbf{y} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_n) - \mathbf{H}(\mathbf{x}_n)(\mathbf{x}^b - \mathbf{x}_n)] \quad (4)$$

当 $n=0$ 时, \mathbf{x}_0 即 \mathbf{x}^b 。根据背景向量元素个数和卫星通道使用数的多少, 选择不同迭代公式的目的是为了加速收敛。

1.2 三维变分

三维变分分析系统采用 GRAPES-3DVar, 该系统采用格点模式, 目标函数采用增量形式; 控制变量取为流函数 ψ , 非平衡速度势函数 χ_u , 非平衡位势 ϕ_u 和比湿 q (或相对湿度), 考虑了质量场和风场之间的平衡约束关系; 通过变量变换进行预调节 (Pre-conditioning), 降低了目标函数 Hessian 矩阵的条件数, 改善了收敛性, 避免了直接计算背景误差协方差矩阵的逆 B^{-1} 的困难; 下降算法调用有限内存的 BFGS 方法 (LBFGS) (张华等, 2004)。

1.3 大气辐射传输及地表发射率

根据大气辐射传输方程, 卫星观测亮温 T_b 可简单表示成:

$$T_b = \epsilon T_s \Gamma + T_a^{\downarrow} (1 - \epsilon) \Gamma + T_a^{\uparrow} \quad (5)$$

式中, 公式右端第一项为地表项, ϵ 表示地表发射率, T_s 表示地表温度, Γ 表示大气透过率, T_a^{\downarrow} 和 T_a^{\uparrow} 分别表示大气下行和上行辐射。卫星近地面通道的观测亮温主要受地表项的影响, 即地表发射率和地表温度的影响。

地表发射率是反映地表热辐射性质的一个重要参数, 它随地表类型以及波长变化。图 1 为 MODIS/UCSB 光谱发射率数据库各种类型材质的发射率, 主要包括 4 大类材质的光谱发射率: (1) 水、冰、雪; (2) 土壤、矿物; (3) 植被; (4) 人造材质 (详见 <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>)。如图 1 所示, 地表发射率随地表类型以及波长均有明显的变化, 但是在 $1 \mu\text{m}$ 附近的波段,

发射率随地表类型的变化相对较小。对于结构复杂的陆地而言, 准确估计其地表发射率非常困难, 而海洋的结构相对简单, MODIS/UCSB 光谱发射率数据库中包含三种海水样本的发射率 (如图 2), 发射率随波长的变化相对较小, 特别是在 $11 \mu\text{m}$ 附近的波段, 发射率基本接近于 1, 因此本文选择海洋进行初步试验。

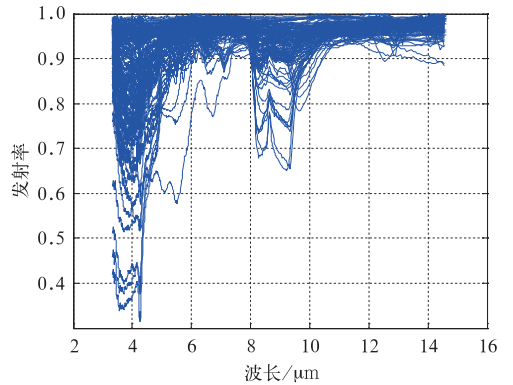


图 1 MODIS/UCSB 光谱发射率数据库各种类型材质的发射率

Fig. 1 The MODIS UCSB Emissivity Library

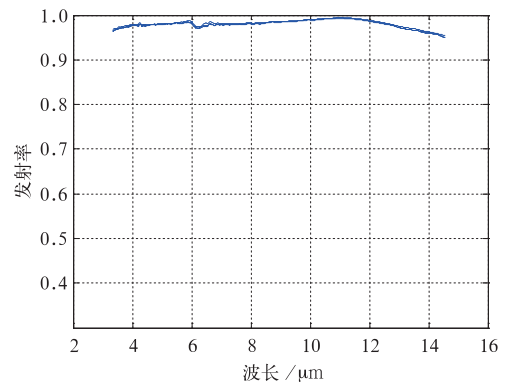


图 2 MODIS/UCSB 光谱发射率数据库 3 种海水样本的发射率

Fig. 2 Three kinds of seawater samples of the MODIS UCSB Emissivity Library

2 试验

2.1 试验方案

针对 GRAPES 全球模式的预报场地表温度和地表发射率估计不够准确这一问题, 本文利用实际卫星观测资料通过一维变分同化系统对地表温度进

行调整,包括质量控制、一维变分及三维变分同化试验,具体流程如图 3。

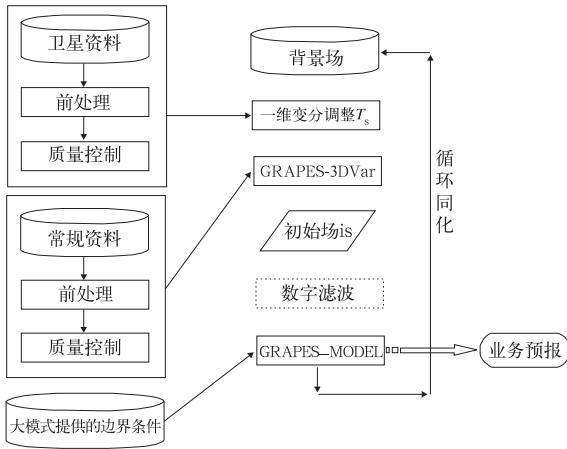


图 3 流程图

Fig. 3 The flow chart

(1) 质量控制

为避免实际卫星观测资料误差对地(海)表温度调整的影响,首先需要进行质量控制,包括云检测、偏差订正、稀疏化、极值检查、背景场检查、海陆边界检查等。

(2) 一维变分

采用一维变分方法和实际卫星观测资料,对 AIRS 晴空视场点内的背景场海表温度进行调整。根据大气红外波段的特性,选择地表发射率变化小的 $11\ \mu\text{m}$ 附近窗区通道资料进行地表温度调整试验,即固定地表发射率、仅调整地表温度。由于海洋下垫面结构相对简单,因此本文选择在海洋区进行初步试验,该波段海水发射率接近 1,所以调整过程中海表发射率固定取值 1.0;通道选择包括 5 个窗区通道(通道 672、787、791、843 和 870),这些通道的权重函数峰值均接近地表,对来自地表的辐射相当敏感;观测误差与原一维变分同化系统一致。

(3) 三维变分同化试验

最后,运用 GRAPES 全球分析预报模式进行同化试验,着重研究了海表温度调整后对分析场的影响。

在采用 GRAPES 全球模式进行数值模拟时,总共进行了为期 10 天(共 41 个时次)的试验(2009 年 7 月 1 日 18 时至 2009 年 7 月 11 日 18 时,00、06、12 和 18 时),每 6 小时输出一次格距为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球分析场。为了对比分析海表温度调整前后 GRAPES 全球模式的分析场,设计了如下两个同化

试验方案(见表 1)。将得到的分析场与 FNL 资料进行比较(注:NECP 分析资料同化了更全面的观测资料,相对于 GRAPES 来说,可以视为“真值”),来说明海表温度经过一维变分调整后对分析场的改进。

表 1 同化试验方案

Table 1 Assimilation experiment scheme

| 名称 | 内容 |
|------|---|
| CTRL | temp+synop+airep+ship+ATOVS+AIRS (with no 1DVar) |
| TEST | temp+synop+airep+ship+ATOVS+AIRS (with 1DVar) |

注:temp, synop, airep, ship 分别是探空、地面、飞机和船舶观测资料;with no 1DVar 表示未对海表温度进行调整;with 1DVar 表示对海表温度进行调整。

2.2 海表温度调整效果分析

通过比较海表温度调整前后卫星观测亮温和模拟亮温偏差的概率密度函数,检验一维变分调整效果。试验统计了 2009 年 7 月 1 日 18 时到 11 日 18 时每隔 6 小时的 AIRS 观测亮温和模拟亮温的偏差,并从中选取权重函数峰值位于地表、850、500 和 250 hPa 对应通道号为 787、1911、1917、162 四个通道作为高、中、低层代表进行比较分析。

地表温度对近地面通道辐射率资料的贡献较大,因此采用上述变分方法进行海表温度调整后,会对这些通道的模拟亮温产生较大影响。图 4 给出海表温度调整前后卫星观测亮温和模拟亮温偏差的概率分布,由图 4 可知,温度调整后对近地面通道 787 以及 1911 的改进尤为明显,不仅使得平均偏差接近 0,而且偏差的分布更加集中。随着高度增加,调整后的海表温度对模拟亮温的影响也在逐渐减弱,中层通道 1917 略有改进,高层通道 162 的改进则微乎其微。调整后的海表温度使得地面及近地面通道的模拟亮温与观测亮温更加匹配,对于中、高层通道也具有一定积极作用,但与低层通道的改进是无法比拟的。

2.3 同化试验

试验结果表明:特别是在低层,TEST 方案要明显优于 CTRL 方案,即海表温度经过一维变分的调整,对低层的分析场产生较为明显的正影响。以下分别结合低、中、高层的位势高度场、湿度场以及风场加以具体分析。

首先,对于位势高度场,主要分析 850、500 和

250 hPa 这三层的影响(如图 5)。就位势高度场而言, TEST 方案不仅在低层的 850 hPa 有明显的改进, 在 500 hPa 以及 250 hPa 的改进效果也是相当明显。不难发现, 随着高度的上升, 改进效果有逐渐减弱的趋势; 此外, 南半球的整体改进效果要优于北半球。

其次, 对于湿度场, 如图 6, TEST 方案不仅在 850 hPa 明显优于 CTRL 方案, 在 500 hPa, TEST 方案与 CTRL 方案相比也稍有改进; 而在 250 hPa, 南半球略有改进, 北半球则影响甚微。调整后的海表温度主要对中、低层湿度场的影响较大, 对高层的改进则不明显。

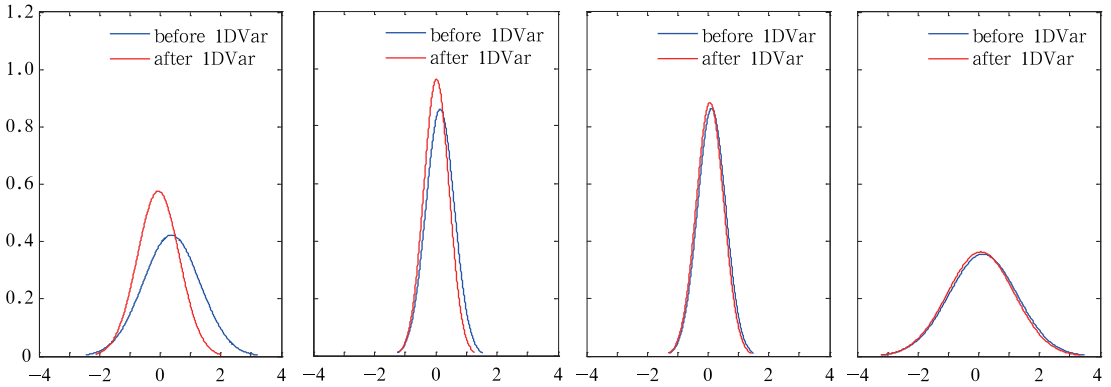


图 4 海表温度调整前后卫星观测亮温和模拟亮温偏差的概率分布

Fig. 4 The PDF of the bias between bright temperatures of satellite observations and simulations

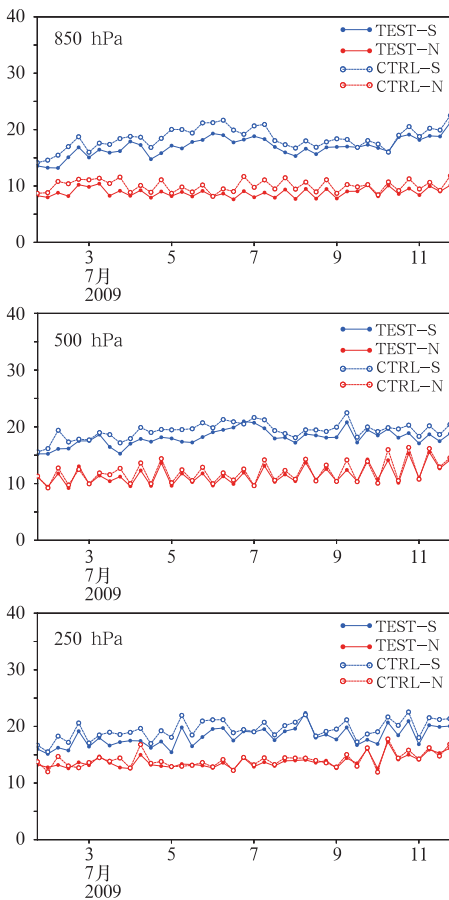


图 5 位势高度均方根误差 (单位: gpm)

Fig. 5 The RMSE of geopotential height (unit: gpm)

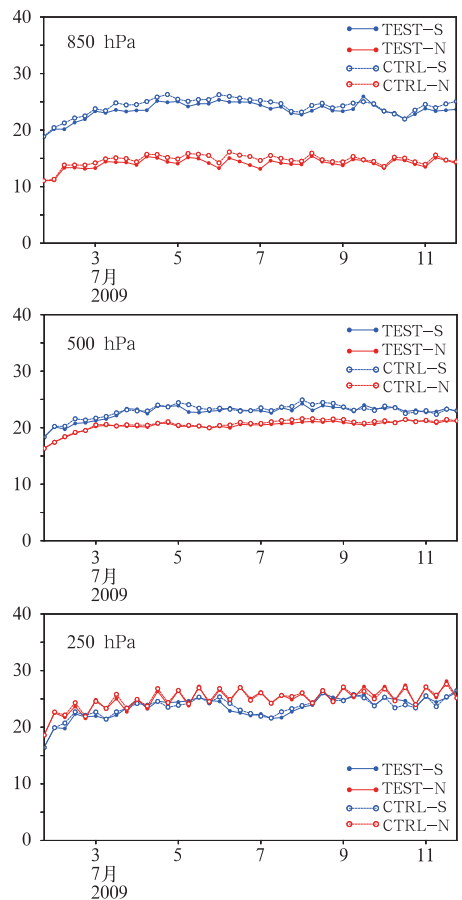


图 6 湿度均方根误差 (单位: %)

Fig. 6 The RMSE of humidity (unit: %)

最后,再看对风场的影响。图 7 和图 8 显示,对 850 hPa 南北半球东西、南北风场均方根误差均有所减小,中、高层中性(图略)。这表明地温调整不仅可以改进位势高度和水汽的分析质量,对风场分析质量的改进也有帮助。

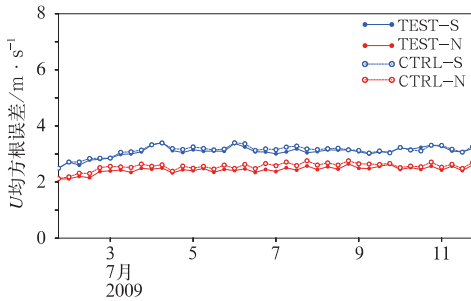


图 7 850 hPa U 风场均方根误差
Fig. 7 The RMSE of U wind field

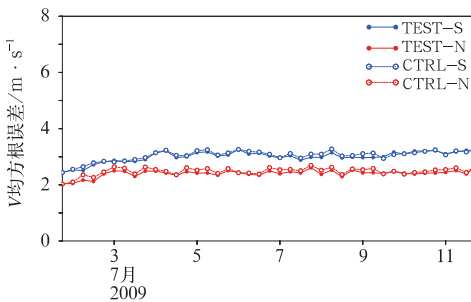


图 8 850 hPa V 风场均方根误差
Fig. 8 The RMSE of V wind field

综上所述,TEST 方案对湿度场以及风场的改进主要集中在低层,对中、高层影响不大;而该方案对高、中、低层的位势高度场均有积极影响。该方案对南半球高度场和湿度场的整体改进程度要优于北半球,这主要是因为南半球的海洋面积要大于北半球,此外,北半球的常规资料较为密集,相比较而言南半球 AIRS 卫星资料的贡献率就较高。风场的改进幅度不及高度场和湿度场,其主要原因是:大气辐射率主要包含大气温度和水汽的信息,而风场只能通过平衡方程和数值预报模式得到间接的贡献。本文仅对 AIRS 晴空视场点内的海表温度进行了调整,而经过云检测后仅剩余约 10% 的晴空辐射率资料,这也在很大程度上制约了地温调整方案的效果。总之,利用一维变分调整后的海表温度对分析场起到了积极的影响。

3 总 结

数值模式预报场地表温度偏差大是一个普遍现象,我国 GRAPES 模式的预报场地温偏差更大,导致卫星近地面通道的资料不能进入同化系统,因此很有必要对背景场地表温度进行调整。针对这个问题,本文采用一维变分方法和实际卫星观测资料对海表温度进行调整。分析表明,海表温度经过变分调整后质量得到了很大的提高,不仅使得低层通道模拟亮温与观测亮温的平均偏差接近 0,而且偏差的分布更加集中。调整后的地表温度能够有效地改进分析场质量,对位势高度场高、中、低层均有不错的改进,对低层湿度场以及风场的改进也较为明显。

目前,卫星辐射率资料主要应用于海洋地区,陆地资料还没有得到很好的应用。陆地与海洋相比,其结构复杂了很多,地表发射率受到地表类型、波长、季节等因素的影响,地表温度也随地表类型和时间变化。我们计划在下一步的工作中,研究陆地卫星辐射率资料的应用,采用更准确的地表发射率算法,通过地温调整方案改善陆地卫星辐射率资料的应用能力。

参考文献

- 张华,薛纪善,庄世宇,等. 2004. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. 大气科学进展, 62(1): 31-41.
- Becker F, Zhaoliang L. 1990. Towards a local split window method over land surface temperature from a satellite. International Journal of Remote Sensing, 11: 369-394.
- Rodgers C D. 1976. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. Rev Geophys, 14: 609-624.
- Li Jun, Li Jinlong, Elisabeth Weisz. 2007. Physical retrieval of surface emissivity spectrum from hyperspectral infrared radiances. Geophysical Research Letters, 34: 16.
- Yao Zhigang, Li Jun, Li Jinlong, et al. 2011. Surface Emissivity Impact on Temperature and Moisture Soundings from Hyperspectral Infrared Radiance Measurements. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50: 1225-1235.
- Zhang Hua, Chou Jifan and Qiu Chongjian. 2004. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over northwest pacific using satellite data. Chinese Science Bulletin, 49(4): 389-395.