

基于梯度信息的微波辐射亮温资料质量控制方法

马刚^{1,3}, 王云峰², 张晓辉², 顾成明², 钟波², 郭兴亮²

1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

3. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 卫星微波垂直探测器的辐射观测资料在数值预报中的同化应用使得数值预报水平有了巨大的飞跃。微波资料的质量控制是保证观测资料成功同化的关键所在。文章提出一种基于 AMSU-A(Advanced Microwave Sounding Unit-A)辐射亮温资料梯度信息的新质量控制方法, 将亮温梯度距平值明显较大的资料作为被降水污染或因为其他原因出现的“坏”的资料。利用中尺度非静力 WRF(Weather Research and Forecasting)模式和区域三维变分同化, 针对“海鸥”(2008)和“圆规”(2010)2 个个例, 对比旧质量控制中的降水检测和阈值检测方法, 评估该方法用于 AMSU-A 资料同化时对台风数值模拟的情况。研究表明, 旧质量控制方法将会使一些“坏”的微波观测资料同化进入模式, 降低模式分析场的质量, 进而导致同化结果有较大误差。相对于旧方法获得的分析场, 利用基于亮温梯度信息的质量控制方法可使更多“坏”的观测剔除, 同化后模式初始时刻的位势高度场和风场更接近于真实情况。与传统 AMSU-A 辐射资料的同化相比, 新质量控制方案使 2 个台风路径数值模拟的偏差有明显的减小: “海鸥”个例中, 模拟台风路径误差的最大改善比为 12, 路径误差改善约 540km; “圆规”个例的最大改善比为 13, 模拟路径误差减小 118km。

关键词: AMSU-A; 梯度信息; 质量控制; 台风数值模拟; 变分同化

中图分类号: P49; P456.7; P407.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2017)02-0086-10

A quality control method based on gradient information of microwave radiation data AMSU-A

MA Gang^{1,3}, WANG Yunfeng², ZHANG Xiaohui², GU Chengming², ZHONG Bo², GUO Xingliang²

1. Center of Satellite Meteorology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

3. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081, China

Abstract: Quality control (QC) is a key for microwave sounding radiance data assimilation in numerical weather prediction (NWP) models. In this study, a new approach of QC for Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) radiance was developed by introducing brightness temperature gradient of view point. In this approach, the data were considered to be contaminated by precipitation if their gradients were anomalously large, and would be discarded. Two typhoon cases, Kalmaegi in 2008 and Kompasu in 2010, were simulated by WRF (Weather Research and Forecasting) model to see the impacts of the new QC method on AMSU-A radiance. In the new QC cases, as the contaminated data removed from the three-dimensional variational assimilation (3DVar), the tracks of both typhoons were much closer to the observations due to the increments of initial geopotential height and wind fields. In addition, the typhoons' intensities were much closer to the

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-12-13. 孙淑杰编辑

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002、GYHY201506022); 国家自然科学基金项目(41375106)

作者简介: 马刚(1972—), 男, 北京人, 博士, 副研究员, 主要从事卫星资料质量控制与同化研究。E-mail: magang@cma.gov.cn

通信作者: 王云峰。E-mail: wangyf@mail.iap.ac.cn

Received date: 2016-05-10; **Revised date:** 2016-12-13. Editor: SUN Shujie

Foundation item: Public Science and Technology Research Funds Projects of Meteorology (GYHY201506002, GYHY201506022); National Natural Science Foundation of China (41375106)

Corresponding author: WANG Yunfeng. E-mail: wangyf@mail.iap.ac.cn

observations with more reasonable temperature field for the warm structure of typhoon core development. In the original cases, with much more contaminated AMSU-A radiance in WRF, both typhoons' tracks and intensities were much worse simulated. An improvement ratio to simulated track error was 12, that is an improvement to 540 km compared to the track without AMSU-A radiance assimilated, in the Kalmaegi case. And the ratio was 13 with 118 km improvement to simulated track in the Kompasu case.

Key words: AMSU-A; gradient information; quality control; numerical prediction of typhoon; variational assimilation

随着大气遥感探测技术的迅速发展, 红外、微波等卫星资料广泛应用于数值天气预报中, 并显著提高了数值预报的准确率(Andersson et al, 1994; Courtier et al, 1998)。20 世纪 90 年代以来, 国外在变分同化的框架内, 利用快速辐射传输模式及其 Jacobine 模式, 对星载大气垂直探测器的探测资料进行直接同化(Eyre et al, 1993; Eyre, 1997), 使卫星资料在数值预报中的应用进入一个新的时期。许多研究表明, 直接同化卫星辐射率可对全球的数值预报产生一致的正影响(Saunders et al, 1999; Derber et al, 1998; Chouinard et al, 1999)。随后, 针对美国东海岸的飓风个例, 在区域四维变分同化中引入 GOES 卫星的观测辐射资料的试验结果表明, 飓风的强度、路径和降水预报均有很大改进(Zou et al, 2001)。将高密度资料和卫星资料进行直接同化, 能有效地改善热带气旋初始场信息, 使热带气旋的内部结构得到重塑(Le Marshall et al, 2002)。

相对于卫星的红外探测方式, 微波观测能穿透非降水云, 在 50GHz 和 183GHz 观测地球大气温度和水汽三维分布。对于因为云覆盖而失去红外探测能力的地区, 微波观测仍能够透过云层测量部分大气参数。一些影响试验表明, NOAA(National Ocean and Atmosphere Administrator)极轨卫星 ATOVS (Advanced TIROS, Operational Vertical Sounder)中的 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)辐射率资料在变分同化框架下的应用, 可以明显地减小数值预报误差(Kelly, 1997; English et al, 2000)。多种来源观测资料对 ECMWF(European Center of Medium Weather Forecast)中期数值预报模式预报水平的影响表明, 极轨卫星 ATOVS 辐射率资料对模式预报水平的影响已经达到并部分超过传统的探空观测资料(Bouttier et al, 2001)。用增量三维变分系统同化 AMSU-A/B 辐射率资料的试验表明, 同化微波资料后能更加合理地反映台风三维结构特征, 并对台风路径预报具有积极的改善作用(Zhang et al, 2004)。

当前的数值预报背景场中缺乏对云参数足够的描述, 云雨大气环境中微波单次散射的快速辐射传

输计算使模拟计算与实际卫星的观测差距较大。因此微波观测在云雨大气环境中受大直径云、降水粒子的影响, 在区域数值预报中长期不能有效应用(English, 2007)。一般, 卫星探测资料在同化中要用质量控制剔除“坏”的观测。目前变分同化中, 对 AMSU 辐射率资料采用的传统质量控制方法, 包括散射指数检测、小雨检测、Bennartz 散射指数检测、卷云检测、极值检测、一致性检测等(Tiphaine et al, 2006; 任强 等, 2009; 杨寅 等, 2011)。ECMWF、NCEP 等的经验表明, 同化 AMSU-A 晴空资料时用上述质量控制能剔除受云和降水影响的“坏”的观测, 进而提高同化预报效果。法国气象局全球同化系统中对 AMSU-A 资料降水检测方案中, 当通道 4 观测与模拟的亮温偏差大于 1.5K 时, 判识视场受降水污染(Gérard et al, 2003)。加拿大气象中心三维变分系统中用 Bennartz 散射因子对 AMSU-B 资料进行降水检测, 当散射因子值在陆上大于 0、海上大于 15 和海冰大于 40 时将 AMSU-B 资料全部剔除(Bennartz et al, 2002; Chouinard et al, 2003)。

在 WRF_3DVar(Weather Research and Forecasting_3 Dimensional Variational assimilation)中, 对 AMSU-A 资料采用 31GHz 和 89GHz 的观测亮温差判识观测资料是否受水相的云和降水污染, 对 MHS (Microwave Humidity Sounder)资料采用 89GHz 和 150GHz 的观测亮温差进行冰相降水污染判识。实验表明, AMSU-A 资料经过质量控制后, 通常还有一些被降水污染的“坏”的观测没有被剔除。这些“坏”的资料进入同化系统后, 会使同化的模式初始场质量下降, 甚至导致模式预报失败。

国内研究表明指出, 利用时空梯度信息同化方法可以有效消除非常规资料中存在的系统性偏差, 也可以改进 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)资料的同化效果, 并对台风的数值模拟起到较好的促进作用(王云峰 等, 2013, 2015)。本文中, 在区域变分同化框架下对 AMSU-A 资料的质量控制中应用卫星资料水平梯度信息检测, 实现对受降水等因素污染的观测资料进一步剔除, 提高进入同化系统的

卫星资料质量;进而利用台风个例,评估该方法对同化结果的影响以及对台风数值模拟的改善情况。

本文共分 4 个部分:第一部分为区域资料同化/数值预报模式系统以及试验使用的全球数值预报资料和卫星观测资料;第二部分介绍了对 AMSU-A 资料进行的基于卫星亮温数据梯度信息的质量控制方法;第三部分对模拟结果进行了对比分析;结论在第四部分给出。

1 模式和资料

本文中使用的模式包括 WRF(Weather Research Forecast, Version 3.4)模式, WRFDA (WRF Data Assimilation system, Version 3.4)模式和 CRTM (Community Radiative Transfer Model, Version 2.0.2)模式。

1.1 WRF 区域数值预报模式系统

WRF 模式系统是新一代中尺度预报模式和同化系统。其结合先进的数值方法和资料同化技术,采用经过改进的物理过程方案,同时具有多重嵌套及易于定位于不同地理位置的能力。该模式为完全可压缩的非静力模式,水平方向采用 Arakawa C 网格点,垂直方向采用地形跟随质量坐标。

WRF Data Assimilation (WRFDA)是 WRF 的同化模块,它将观测场同化到数值预报得到的背景场中,利用变分同化技术,得到需要的分析场。目前的 WRF-3DVar 系统,可以同化常规观测资料和多种非常规资料如雷达、掩星资料、卫星辐射率资料等。WRFDA 同化系统整合了通用辐射传输模式 CRTM (Community Radiative Transfer Model)。可以对红外、微波光谱的 30 多种卫星探测资料进行变分同化。

CRTM 是美国卫星资料同化联合中心(JCSDA)近年来开发的一种快速辐射传输模式,目标是利用其实现数值天气预报中全部天气条件下卫星资料的同化应用。其具有较先进的辐射传输物理模型和较好的程序框架结构设计,是数值天气预报模式资料同化系统中非常重要的软件之一。CRTM 模式在晴空条件下能以较高精度正演模拟 AMSU-A、HIRS 等卫星传感器通道的辐射率资料。但是由于微波散射快速计算的误差较大,使得模式在云雨大气环境对微波观测的正演精度较差。CRTM 模式以大气温湿廓线、地表温度和湿度,洋面风向量等作为模式初始场,在卫星观测几何条件的约束下,完成卫星观测辐射的正演模拟。CRTM 的 Jacobian 模式也嵌入 WRFDA 框架中,因此可以有效计算正演卫星观测辐射的梯度变化,实现卫星观测资料的变分

同化。

模拟采用两层双向嵌套方案,外、内层的区域中心都为 30°N 、 121°E ,水平分辨率分别为 27km 和 9km,格点数分别为 145×145 和 106×106 ,垂直分层均为不均匀的 35 层,包括 1.000、0.993、0.983、0.970、0.954、0.934、0.909、0.880、0.845、0.807、0.765、0.719、0.672、0.622、0.571、0.520、0.468、0.420、0.376、0.335、0.298、0.263、0.231、0.202、0.175、0.150、0.127、0.106、0.088、0.070、0.055、0.040、0.026、0.013、0.000。模式顶层气压为 10hPa。内外两层区域的物理过程都采用了 Grell-Devenyi 积云方案、WSM-6 类云微物理参数方案、YSU 行星边界层方案、RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案。

1.2 试验资料

模式背景场由 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) GFS (Global Forecast System) 6h 预报资料提供,该资料时间间隔为 6 h,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。

CLW(cloud liquid water)资料来自于 MSPPS 系统 (Microwave Surface and Precipitation Products System)。该系统含有来自于 NOAA 和 METOP 卫星上 AMSU-A、AMSU-B 和 MHS 仪器的实时的地面和降水产品,包括来自于 AMSU-A 仪器的总降水、云水、海冰密集度、地表温度、地表发射率数据和来自于 AMSU-B 和 MHS 仪器的积雪、降水率、冰水路径和雪水当量数据。

AMSU-A 在 50GHz 有 15 个频点探测大气温度的三维分布,可以全天候探测从地面到 5hPa 的大气温度分布。AMSU-A 采用跨轨扫描,在约 2400km 轨道宽度内,在 8s 的扫描周期内对地进行 30 次采样探测,形成 30 个探测像元,星下点分辨率为 45km。AMSU-A 通道在 50GHz O_2 吸收线设置 11 个通道探测大气和地表温度,在 23.8、31.4 和 89GHz 设置通道实现观测资料的降水污染剔除。一般在区域数值预报模式中,只对 AMSU-A 通道 4~9 的资料进行同化,高度覆盖 90hPa 以下的地球大气,可以保证使那些对于天气尺度和中尺度天气系统非常重要的温度扰动得到有效观测。

2 基于卫星亮温梯度信息的质量控制方法

2.1 原理介绍

卫星资料的梯度信息包括空间梯度信息和时间梯度信息,而空间梯度信息又包括水平方向梯度和垂直方向梯度,水平梯度信息进一步又可以粗略地

分成沿轨道方向和沿扫描线方向两种类别。本文根据王云峰等(2013)的结果,采用基于沿扫描线方向的梯度信息质量控制方法,对 AMSU-A 资料进行质量控制。

假设观测到的沿扫描线方向的卫星 AMSU-A 亮温资料记为 T_{Bi} ($i=1, \dots, N$; N 是一条扫描线的观测像元总数), 梯度信息 \hat{T}_{Bi} 的定义(王云峰等, 2013):

$$\hat{T}_{Bi} = \frac{T_{Bi+1} + T_{Bi}}{\Delta d_i} \quad (1)$$

这里 Δd_i ($i=1, \dots, N-1$) 是像元 i 与 $i+1$ 空间距离。梯度信息的距平值可以表示为:

$$\tilde{T}_{Bi} = \hat{T}_{Bi} - \Delta \bar{T}_B \quad (2)$$

其中 \tilde{T}_{Bi} 为梯度信息的距平, $\Delta \bar{T}_B$ 为梯度的平均值, 定义为 $\Delta \bar{T}_B = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \tilde{T}_{Bi}$ 。假设梯度信息的距平值大于阈值 ε 的时候, 对应的卫星观测是“坏”值, 即当 $\tilde{T}_{Bi} \geq \varepsilon$ 时, T_{Bi} 和 T_{Bi+1} 都将被删除。

表 1 中利用 2 个台风个例同化时间窗内的卫星轨道分布, 统计了 NOAA15、NOAA16 和 NOAA18 AMSU-A 资料基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制的阈值。从表中可以看出, 对于不同的通道, 其阈值也不相同。随着通道的探测高度升高, 梯度的阈值单调递减, 但是在通道 7 或通道 8 出现异常拐点, 这与 300hPa 到 200hPa 之间的云相态(过冷水与冰雪粒子共存)有关。一般 AMSU-A 资料对水相的云水等较为敏感, 对冰相的雪等粒子敏感性较差。

表 1 AMSU-A 资料基于沿扫描线方向梯度信息质量控制的阈值统计

Tab. 1 Threshold value of quality control based on AMSU-A gradient information along the scan line

卫星平台	通道	阈值
NOAA-15	5	0.304
	6	0.193
	7	0.207
	8	0.191
	9	0.164
NOAA-16	5	0.432
	6	0.231
	7	0.169
	8	0.236
	9	0.188
NOAA-18	5	0.389
	6	0.264
	7	0.283
	8	0.270
	9	0.187

采用基于卫星亮温梯度信息的质量控制方法(BGI_QC, quality control method of basing on gradient information)之后, 会对卫星各通道的水平梯度信息的平均值($\Delta \bar{T}_B$)产生较大的影响。图 1 是采用 BGI_QC 前后, 2016 年 7 月 16 日 15—21 时(UTC)NOAA-16 卫星各通道的 $\Delta \bar{T}_B$ 的分布情况。从图中可以看出, 采用 BGI_QC 后的 $\Delta \bar{T}_B$ 要远远小于采用 BGI_QC 前的 $\Delta \bar{T}_B$, 说明进入同化的 AMSU-A 资料均一性较好, 也说明对于受降水等因素影响而出现亮温水平梯度偏差值较大的“坏”的观测, 采用 BGI_QC 方法能够有效去除。

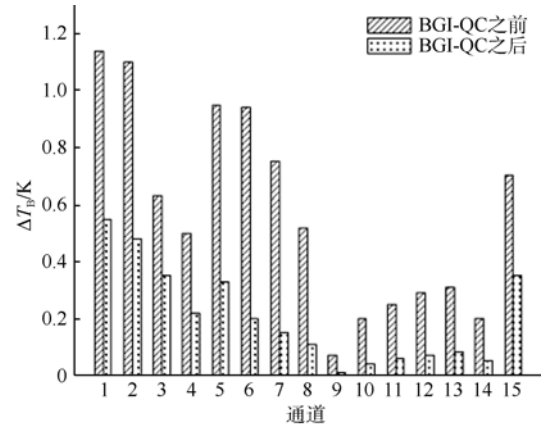


图 1 采用 BGI_QC 前后 NOAA-16 AMSU-A 通道的水平梯度信息的平均值

Fig. 1 The mean gradient of all AMSU-A channels of NOAA-16 with BGI_QC and without BGI_QC

2.2 CLW 与水平梯度信息的对比分析

卫星水平梯度信息与降水污染、冰雪下垫面和海陆高程分布等多种因素有关。但是无论是哪种原因造成的, 只要是造成了相邻扫描点之间的水平梯度值大于阈值, 那么对应的卫星亮度数据作为“坏”的观测都应该舍弃。

通过对比发现, 沿扫描方向的水平梯度与 CLW 的分布有较好的对应。对于 2010 年台风“圆规”, 图 2 是 2010 年 8 月 29 日 21 时—8 月 30 日 03 时模式模拟范围内 NOAA-18 AMSU-A 通道 5 沿扫描方向的水平梯度距平分布与匹配到 AMSU-A 像元的 CLW 分布。图 2a 是 CLW 的分布图。一般当 CLW 大于 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时视为有云或降水存在。从图中可以看出, CLW 大于 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的像元很多, 并且对台风的形状有很好的对应。图 2b 是通道 5 沿扫描方向的水平梯度距平分布, 可以看出, 当亮温梯度距平大于 0.31 K 时, 像元分布与图 2a 中基本相同。沿卫星前进方向的亮温水平梯度与 CLW 分布之间却没有这样的相似性(图略)。

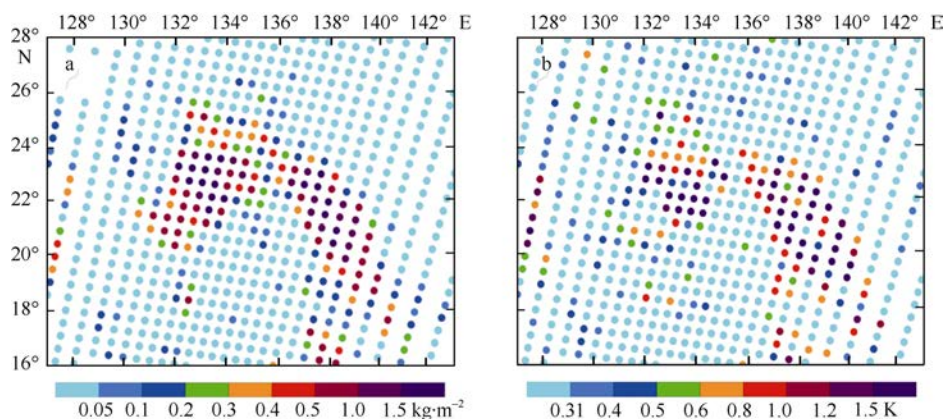


图2 CLW 分布(a)与 NOAA-18 AMSU-A 通道 5 沿扫描方向的水平梯度距平分布(b)

Fig. 2 CLW (a) and horizontal gradient anomalies with respect to brightness temperature of NOAA-18 AMSU-A along its scanning direction (b)

2.3 降水污染验证分析

国外经验表明,通常只有晴空卫星观测资料被同化,当模式区域内有云或降水存在时,受降水污染的 AMSU-A 资料都不能用于变分同化。

图 3 是 CLW 分布和被同化进入模式的 NOAA-18 AMSU-A 通道 5 亮温分布 (空心小圆圈表示进入同化卫星观测),时间设定与图 2 中相同。图 3a

红圈标记的区域中,经过传统的质量控制,还有一些 CLW 值大于 $0.1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的观测像元被保留下来。经验表明,当 CLW 大于 $0.1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,可以确定该区域有降水发生。这说明被降水污染的 AMSU-A 中“坏”的观测仍然参与了同化。图 3b 表明,使用了 BGI_QC 方法之后,这些“坏”的观测数量明显减少,基本上被剔除了。

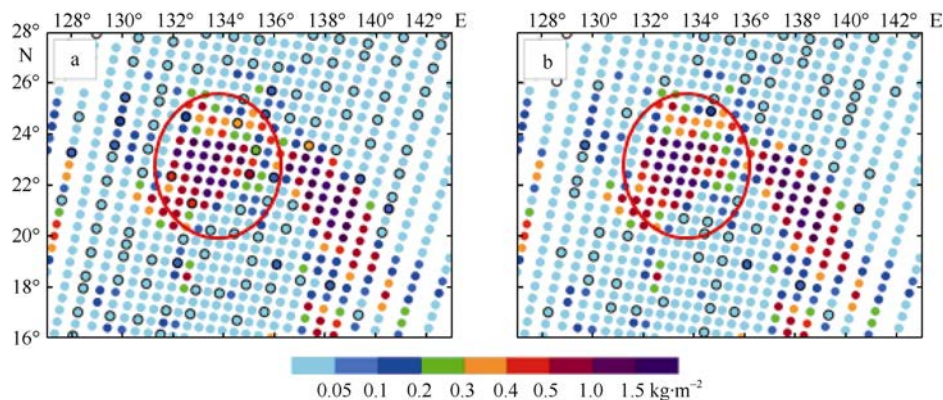


图3 CLW 分布情况和 NOAA-18 AMSU-A5 通道卫星亮温资料的分布

a. 不采用 BGI_QC 方法; b. 采用 BGI_QC。小圆圈表示被同化的卫星亮温资料,红色大圆圈表示对比区域

Fig. 3 CLW and brightness temperature with respect to channel 5 of NOAA-18 AMSU-A. Small circles indicate satellite data used in assimilation. Big red circle denotes the area used for comparison. a) Without BGI_QC; and b) with BGI_QC)

3 试验分析

3.1 台风个例

本文利用了 2 个台风个例——“海鸥”台风(2008)和“圆规”台风(2010)分别对 BGI_QC 方法进行了验证。

2008 年第 7 号台风“海鸥”于 7 月 15 日下午在菲律宾吕宋岛北部以东的洋面上生成,17 日发展成为台风,21 时 40 分前后“海鸥”在台湾省宜兰县南部沿海第一次登陆,登陆时中心附近最大风力有 12 级($33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。18 日 18 时 10 分在福建省霞浦县长春

镇再次登陆,登陆时中心附近最大风力有 10 级($25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),登陆后很快在霞浦境内减弱为热带风暴,逐渐转向偏北方向移动。19 日凌晨“海鸥”进入浙江,傍晚进入江苏境内。20 日凌晨从江苏以东进入黄海南部海面。

2010 年第 7 号台风“圆规”于 8 月 28 日在雅蒲岛以东约 305km 的太平洋的楚克附近海面生成。8 月 30 日,“圆规”掠过冲绳县,达到顶盛。9 月 1 日 19 时在黄海南部海面减弱为台风,2 日 05 时 30 分前后其中心在朝鲜与韩国交界附近沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有 12 级。

3.2 台风“海鸥”(2008)的同化和模拟情况

为了检验基于卫星亮温资料梯度信息的质量控制方法对同化效果的影响,本文设计了3组试验:

控制试验 Ctrl——不同化任何观测资料;

Exp.1——基于 WRFDA 系统自带的质量控制方案,直接同化 NOAA18 AMSU-A 亮温资料;

Exp.2——首先对 NOAA18 AMSU-A 亮温资料进行基于梯度信息的质量控制,然后通过 WRFDA 模式进行同化。

详细试验方案见表 2。同化时间窗口设定为 $[-3\text{h}, 3\text{h}]$,同化试验是在外层区域进行,内层区域的初始条件从外层区域插值获取。模拟时段为 2008 年 7 月 16 日 18 时—19 日 18 时(UTC)。

表 2 试验方案设计

Tab. 2 Numerical experimental designs

试验方案	形成模式初始场所用的资料	质量控制方法
Ctrl	NCEP GFS	没有 QC
Exp.1	NCEP GFS + AMSU-A	WRFDA_QC
Exp.2	NCEP GFS + AMSU-A	BGI_QC_X + WRFDA_QC

对卫星资料同化效果的检验,一般是分析同化后模式分析场相对于初始场的增量。本文的工作是在已有的卫星同化过程中引入新的质量控制方法,对初始场同化效果的改进主要分析经过新质量控制后的分析场与原有同化算法的分析场之间的增量。在台风数值模拟中,500hPa 风场的变化在一定程度上反映了台风引导气流的变化,可能会对台风的移动路径有影响。

图 4 描述了 2008 年 7 月 16 日 18 时 Exp.2 中 500hPa 模拟风场相对于 Exp.1 试验的增量。此时的台风环流中心位于 $123^{\circ}12'E$ 、 $21^{\circ}18'N$ 附近,风速增量整体上小于等于 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,对台风系统移动的影响不大。风速增量在台风中心东北和西南分别形成两个反气旋环流,台风中心的西北向风速增量在 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,叠加到初始风场上,有减缓台风向西北方向移动的趋势。

图 5 是 Exp.2 与 Exp.1 中的物理量增量沿 $21^{\circ}18'N$ (台风中心)的经向垂直剖面,分析时刻与图 4 相同。

图 5a 为位势高度场的增量,从图中可以看出,Exp.2 相对 Exp.1 的位势高度增量剖面在台风中心上空的 200hPa 以下为负,负值中心位于初始时刻台风中心以东约 $129^{\circ}E$ 附近的 400~300hPa 之间,而且中心轴线是向西倾斜的,即位势高度降低,台风强度得到加强。这说明经过质量控制之后的 AMSU-A 资

料同化使得台风中心位势高度降低,并使台风强度在一定程度上得到加强。

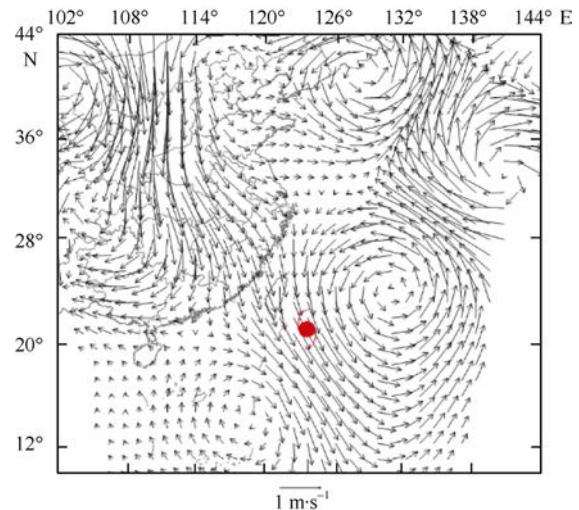


图 4 Exp.2 与 Exp.1 中的 500hPa 风场增量分布

Fig. 4 Increment to wind field at 500 hPa between Exp.2 and Exp.1

图 5b 中是 Exp.2 与 Exp.1 中的温度增量沿 $21^{\circ}18'N$ 的经向垂直剖面, Exp.2 与 Exp.1 中的温度增量在台风中心上空的中、低层表现为正值,其量级为 $10^{-1}K$; 高层既有负值中心又有正值中心,其量级都为 $10^{-1}K$ (950~500hPa 之间表现为正值,其量级为 $10^{-1}K$; 在 500~250hPa 之间为负值,在 250~100hPa 之间表现为正值,其量级都为 $10^{-1}K$)。这说明新质量控制方法在同化 AMSU-A 资料时对温度场改变进一步放大,一定程度上丰富了温度场的中尺度信息。特别是在 200hPa 高度上,多了一个正的温度中心,位置台风中心偏东;而正温度中心表明低层暖空气被垂直输送到高层大气,中心温度越高,表明垂直输送越强,作为表征台风强度的一个关键指标,台风越强,正的温度中心越明显。

图 6a 是各试验方案模拟的台风移动路径与实况的对比。图中显示, Ctrl 试验模拟的台风移动路径既未登陆台湾岛也未登陆大陆,与实况间误差较大。Exp.1 试验中模拟台风移动路径与 Ctrl 试验相比误差更大,尤其在后期还更加偏向于外海,且在整个模拟过程中均未登陆台湾岛和大陆。Exp.2 试验中,用沿扫描方向的 BGI_QC 方法对参与同化的 AMSU-A 资料进行质量控制,模拟的台风移动路径无论与 Ctrl 试验相比还是与 Exp.1 试验相比都有了一定程度的改善,更趋向于实况,其登陆台湾岛的地点与实况接近,但登陆大陆的地点偏东北方向。

图 6b 反映了各组试验所模拟的台风路径与实况之间的偏差情况。从图中可以看出, Exp.1 中模拟的台风路径偏差在 3 组试验中是最大的, 每个时刻的误差都大于 Ctrl 试验, 随着时间误差逐渐增大, 台风路径最大偏差出现在最后一个时刻, 偏差竟达到 1054km 左右。而 Exp.2 模拟与 Ctrl 试验相比, 台

风路径偏差有一定程度的减小, 最大路径偏差同样也发生在最后一个时刻, 约为 510km, 比 Exp.1 中的模拟偏差分别减小 544km。在第 24h 即台风登陆台湾的时刻, Exp.2 中模拟的登陆偏差仅为 10km 左右。在第 42h 即台风登陆大陆的时刻, Exp.2 较 Ctrl 试验偏差减小了 183km。

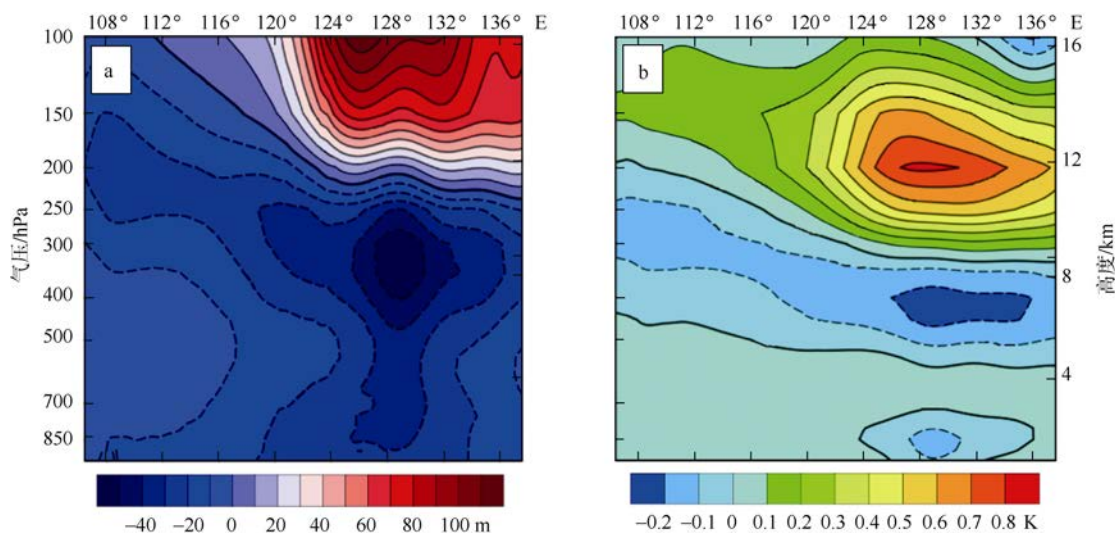


图 5 Exp.2 与 Exp.1 的物理量增量沿 21°18'N 的经向垂直剖面

a. 位势高度增量(单位: m); b. 温度增量(单位: K)

Fig. 5 Meridional section to increments between Exp.2 and Exp.1 along 21°18'N. a) Geopotential height (units: m); and b) temperature (units: K)

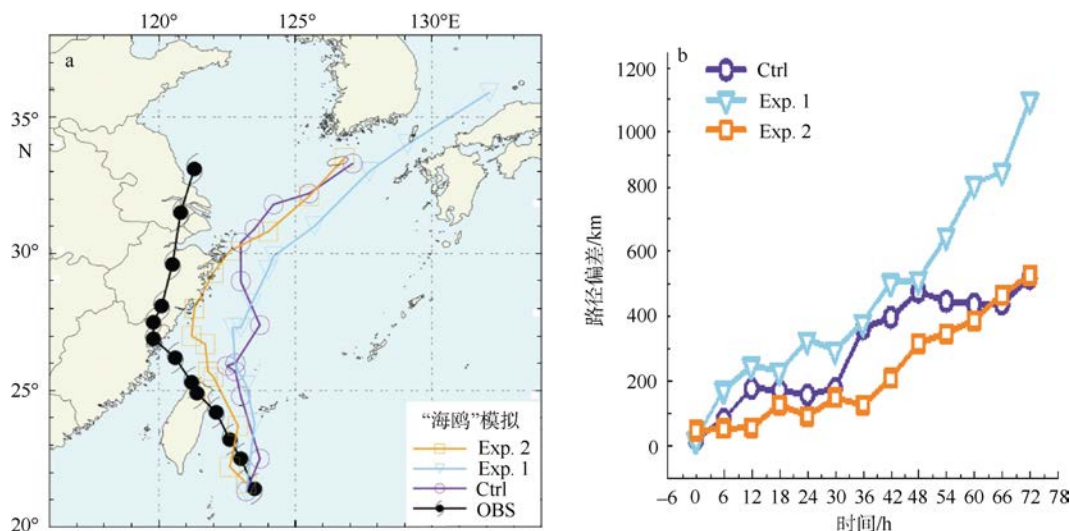


图 6 各试验方案模拟的台风预报路径情况与实况的对比

a. 各方案的模拟台风路径; b. 模拟路径与实际路径的偏差

Fig. 6 Comparison of simulated tracks and observations for Typhoon Kalmaegi. a) Simulated typhoon tracks by all three experiments; and b) departures of the simulated tracks from observations

为进一步对比分析新质量控制方法在 AMSU-A 资料的同化中对台风路径模拟的影响, 这里统计了“改善比”(这里的“改善比”定义为相对于 Exp.1 和 Exp.2 模拟的路径偏差减小和增大的预报时次之

比, 其中偏差为 0 按增大统计, 如图 7 所示), 可以看出 Exp.2 的改善比为 12 : 1, 路径误差减小最多可达 540km 左右, 而路径误差只有一个时刻增大了约 20km。

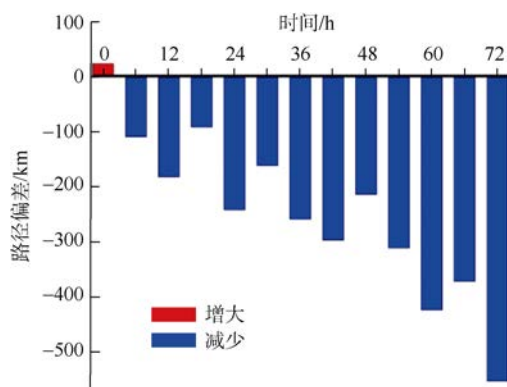


图7 Exp.2 与 Exp.1 对台风路径预报的“改善比”

Fig. 7 Improvement to predicted typhoon track by Exp.2 with respect to Exp.1 for Typhoon Kalmaegi

3.3 台风“圆规”(2010)的同化和模拟情况

对于台风“圆规”(2010)的试验与前一个例相同。图8描述了初始时刻(2010年8月30日00时) Exp.2 与 Exp.1 中的 500hPa 风场增量分布。初始时刻台风环流中心($132^{\circ}24'E$, $22^{\circ}48'N$)附近的环流为东向风场增量中, 约 $1m \cdot s^{-1}$ 。增大的东风分量减弱了台风向西、向北的移动速度, 使台风移动速度与实际情况更为接近, 进而在预报中减小台风路径模拟误差。

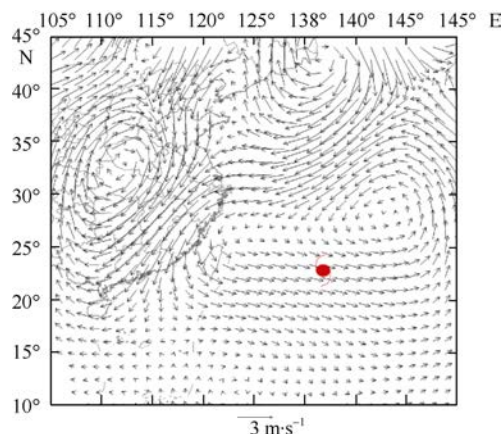


图8 初始时刻 Exp.2 与 Exp.1 中的 500hPa 风场增量分布
Fig. 8 Increment to wind field at 500 hPa to Exp.2 and Exp.1

图9是 Exp.2 与 Exp.1 中的物理量增量沿 $22^{\circ}48'N$ (台风中心)的经向垂直剖面, 分析时刻与图8相同。图9a是位势高度场的增量, 从图中可以看出 Exp.2 与 Exp.1 中的位势高度增量在台风中心附近两侧上空的 250hPa 以下为负, 即位势高度降低。图9b是温度场增量, 图中显示, 在台风中心上空的 500hPa 以下和 300hPa 以上偏差都表现为正值, 量级为 $10^{-1} \sim 10^0 K$ 。特别是在 200hPa 高度上, 存在一个暖的温度中心核, 暖中心位于台风中心以西。

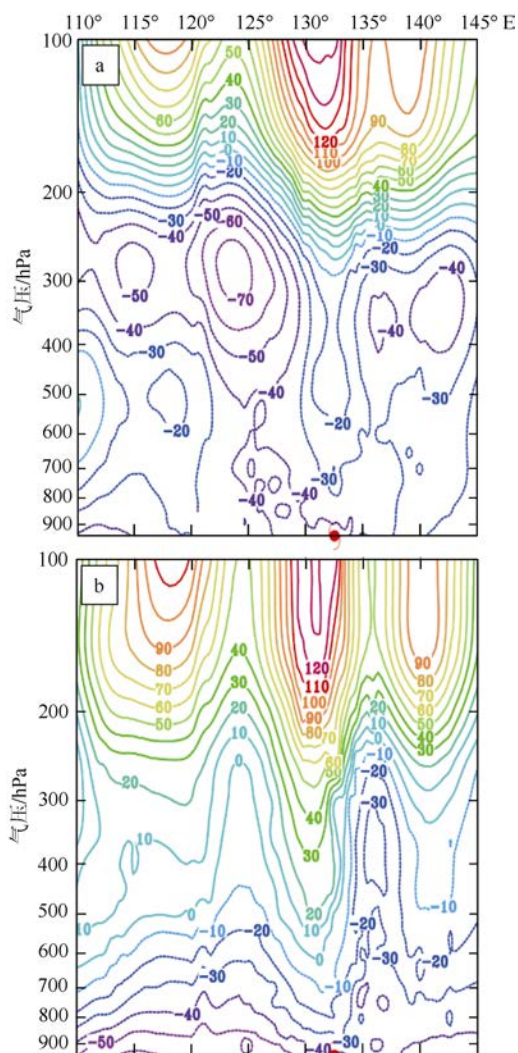


图9 Exp.2 与 Exp.1 中的物理量增量沿 $22^{\circ}48'N$ 的经向垂直剖面

a. 位势高度增量(单位: m); b. 温度增量(单位: K)

Fig. 9 Meridional sections to increments between Exp.2 and Exp.1 along $22^{\circ}48'N$. a) Geopotential height (units: m); and b) temperature (units: K)

图10a、b分别描述的是各试验方案模拟的台风移动路径与实况间的对比图及偏差图。Ctrl 试验模拟的台风移动路径在第24h之前与实况比较接近, 误差整体维持在 150km 之内; 之后移动位置较实况偏西, 误差逐渐增大, 最大误差发生在第42h, 约为 281km 左右, 模拟的最终位置没有登陆, 与实况不符。Exp.1 试验模拟的台风移动路径与 Ctrl 试验相比整体上移动速度较快, 较 Ctrl 试验基本没有改善反而误差更大, 最大误差发生在第36h, 达到 367km 左右。Exp.2 模拟的台风路径与 Exp.1 结果相比在一定程度都得到了改善, 模拟偏差全都保持在 250km 之内, 在第42h之后移动位置更加偏东, 与实况比较接近; 在第72h, Exp.2 模拟的位置偏差约为 187km, 较 Exp.1 和 Ctrl 试验偏差分别减小约 80km 和 85km。

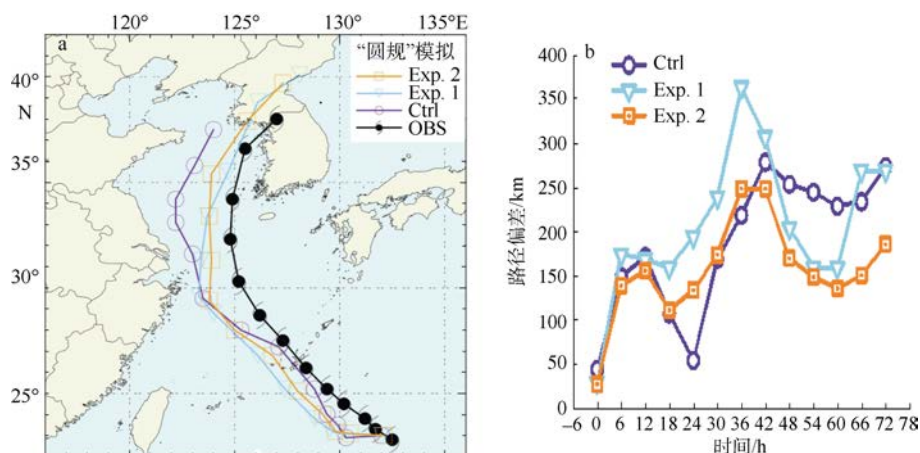


图 10 各组试验模拟的台风路径与实况间的对比图(a)及其偏差情况(b)

Fig. 10 Comparison of simulated tracks and observations for Typhoon Kompasu. a) Simulated typhoon tracks by all three experiments; and b) departures to the simulated tracks with respect to observations

为进一步对比分析新质量控制方法应用后同化 AMSU-A 资料对台风路径模拟的影响, 统计了台风路径模拟误差的“改善比”(图 11), 定义如图 7。由图中可以看出 Exp.2 预报的改善比为 13 : 0, 最大改善距离(偏差减小)约为 118km。这种一致性的结果进一步证明了基于梯度信息的质量控制对同化效果改善的有效性, 对改善台风的路径模拟有较大贡献。

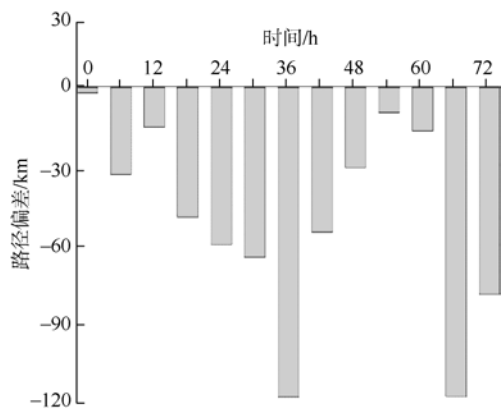


图 11 Exp.2 与 Exp.1 预报路径误差的“改善比”

Fig. 11 Improvement of predicted typhoon tracks by Exp.2 to Exp.1 for Typhoon Kompasu

4 总结与讨论

本文介绍了一种基于微波资料梯度信息的质量控制方法, 结合 CLW 资料进行了降水污染分析对比, 并利用台风“海鸥”(2008)和“圆规”(2010)2 个个例, 设计了同化试验和模拟试验, 评估了 BGL_QC 方法对卫星亮温资料同化和台风数值模拟的改善效果, 结论如下。

1) 沿扫描线方向的卫星资料梯度信息与 CLW 资料之间有一定的对应关系: 一般来说, 云覆盖区域的卫星亮温梯度大, 而晴空区域的卫星亮温梯度小。应用了 BGL_QC 方法之后, 可以在一定程度上剔除被云污染的卫星资料;

2) 同化 AMUS-A 资料时, 应用 BGL_QC 方法比不应用 BGL_QC 方法更有利于提高台风路径的数值模拟准确率;

3) 应用 BGL_QC 方法同化 AMUS-A 资料时, 风场、位势高度场和温度场都在一定程度上增加了中尺度信息, 整体上使台风初始场的描述更加准确, 这可能是台风路径模拟更为准确的原因。

参考文献 References

- 任强, 董佩明, 薛纪善, 2009. 台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验[J]. 应用气象学报, 20(2): 137–146. REN QIANG, DONG PEIMING, XUE JISHAN, 2009. The use of microwave satellite data affected by cloud in numerical forecast of typhoon[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 20(2): 137–146 (in Chinese).
- 王云峰, 费建芳, 袁炳, 等, 2013. 消除系统性观测误差的时空梯度信息同化方法研究[J]. 大气科学, 37(1): 54–64. WANG YUNFENG, FEI JIANFANG, YUAN BING, et al, 2013.

Assimilation of temporal and spatial gradient information to eliminate the systematic observation error[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 37(1): 54–64 (in Chinese).

- 王云峰, 张晓辉, 李运飞, 等, 2015. 基于空间梯度信息的质量控制在红外高光谱 AIRS 资料同化中的应用研究[J]. 大气科学, 39(2): 303–314. WANG YUNFENG, ZHANG XIAOHUI, LI YUNFEI, et al, 2015. Application of quality control method based on spatial gradient information in assimilation of infrared high spectrum data AIRS[J]. Chinese

- Journal of Atmospheric Sciences, 39(2): 303–314 (in Chinese).
- 杨寅, 韩威, 董佩明, 2011. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述[J]. 气象, 37(11): 1395–1401. YANG YIN, HAN WEI, DONG PEIMING, 2011. Overview on the quality control in assimilation of AMSU microwave sounding data[J]. Meteorological Monthly, 37(11): 1395–1401 (in Chinese).
- ANDERSSON E, PAILLEUX J, THÉPAUT J N, et al, 1994. Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 120(517): 627–653.
- BENNARTZ R, THOSS A, DYBBROE A, et al, 2002. Precipitation analysis using the advanced microwave sounding unit in support of nowcasting applications[J]. Meteorological Applications, 9(2): 177–189.
- BOUTTIER F, KELLY G, 2001. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 127(574): 1469–1488.
- CHOUINARD C, HALLÉ J, 1999. The impact of TOVS radiances in the CMC 3D variational analysis system[C]// Technical Proceedings of the 10th International TOVS Study Conference. Boulder, Colorado: 92–98.
- CHOUINARD C, HALLÉ J, 2003. The assimilation of AMSU-B radiances in the CMC global data assimilation system: difficulties and impact relative to AMSU-A radiances[C]// Proceedings of 13th International TOVS Study Conference. Sainte Adde, Canada.
- COURTIER P, ANDERSON E, HECKLEY W, et al, 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: formulation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124(550): 1783–1807.
- DERBER J C, WU W S, 1998. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system[J]. Monthly Weather Review, 126(8): 2287–2299.
- ENGLISH S J, RENSHAW R J, DIBBEN P C, et al, 2000. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 126(569): 2911–2931.
- ENGLISH S J, 2007. Issues in the assimilation of cloud and precipitation affected radiances and prospects for future instruments[C]//Proceedings of ECMWF Seminar on Recent Development in the use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction. Reading UK: ECMWF Publication, 59–74.
- EYRE J R, KELLY G A, MCNALLY A P, et al, 1993. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 119(514): 1472–1463.
- EYRE J R, 1997. Variational assimilation of remotely-sensed observations of the atmosphere[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 75(1B): 331–338.
- GÉRARD É, RABIER F, LACROIX D, et al, 2003. Use of ATOVS raw radiances in the operational assimilation system at Météo-France[C]//Proceedings of 13th International TOVS Study Conference. Sainte Adele, Canada.
- KELLY G, 1997. Impact of observations on the operational ECMWF system[C]//Technical Proceedings of the 9th International TOVS Study Conference. Igls, Austria: 20–26.
- LE MARSHALL J F, LESLIE L M, ABBEY R F Jr, et al, 2002. Tropical cyclone track and intensity prediction: The generation and assimilation of high-density, satellite-derived data[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 80(1–4): 43–57.
- SAUNDERS R, ANDERSSON E, KELLY G, et al, 1999. Recent development at ECMWF in the assimilation of TOVS radiances[C]//Technical Proceedings of the 10th International TOVS Study Conference. Boulder, Colorado: 463–474.
- TIPHAINE L, NIGEL A, PASCAL B, 2006. AAPP documentation software description document[R]. NWPSAF-MF-UD-002, 1–142.
- ZHANG HUA, XUE JISHAN, ZHU GUOFU, et al, 2004. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21(2): 283–290.
- ZOU XIAOLEI, XIAO QINGNONG, LIPTON A E, et al, 2001. A numerical study of the effect of GOES sounder cloud-cleared brightness temperatures on the prediction of hurricane felix[J]. Journal of Applied Meteorology, 40(1): 34–55.