

张兴海, 端义宏. 2014. FY-2F 红外亮温资料模拟与偏差分析. 气象, 40(9):1066-1075.

# FY-2F 红外亮温资料模拟与偏差分析<sup>\* 1</sup>

张兴海 端义宏

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**提 要:** 为了实现西太平洋及东亚区域 FY-2F 可见红外自旋扫描辐射计(VISSR)资料的直接同化, 本文利用飓风天气预报模式(WRF For Hurricane, HWRF)和快速辐射传输模式(Community Radiative Transfer Model, CRTM)对 FY-2F 的亮温资料进行了模拟。在有云情况下, 中高纬度锋面云系模拟的相对较好, 而低纬热带云团模拟偏差较大。对于晴空条件下模拟的红外 1、2、4 通道(IR1、2、4)亮温, 受陆地下垫面发射率不均匀的影响模拟偏差较大, 且辐射传输模式平均而言低估了地表发射率。海洋下垫面的资料模拟情况要明显好于陆地。IR4 通道在白天受太阳短波影响观测亮温偏高。去除受云污染的资料仅保留晴空观测资料, 通过格点统计插值(Community Gridpoint Statistical Interpolation, GSI)质量控制和偏差订正, IR2 通道平均偏差减小约 50%, IR3 通道平均偏差从 3.7 K 减小到 0.34 K。而 IR1 通道质量较好, 偏差订正前后几乎没有变化。

**关键词:** FY-2F, 直接同化, 模拟亮温, 偏差订正

**中图分类号:** P405

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.004

## Simulation of Brightness Temperature in Infrared Channel of FY-2F and Bias Analysis

ZHANG Xinghai DUAN Yihong

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** To assimilate the radiance data of FY-2F imagery directly in West Pacific and East Asian, WRF for Hurricane (HWRF) and Community Radiative Transfer Model (CRTM) are used to simulate the brightness temperature (BT) of FY-2F. Under the cloudy condition, the frontal clouds are well-simulated in the middle and high latitude while the substantial bias exists in tropical cloud cluster of low latitude. In the clear sky condition, the BT of infrared channel 1, 2, 4 (IR1, 2, 4) are strongly influenced by the surface emission with big biases above the land because of the inhomogeneity and the radiation transfer model under-estimates the emissivity of land on average. Meanwhile it performs well above the ocean surface. The observation of IR4 channel are higher than simulated BT because of the influence of sun radiation. The cloudy contamination data are abandoned to keep the clear sky radiance in Community Gridpoint Statistical Interpolation (GSI). After quality control and bias correction of GSI, the bias of IR2 has a reduction of 50% on average and the average bias of IR3 is decreased from 3.7 K to 0.34 K. The quality of IR1 observation is better than other channels, and there is little change of the bias after correction.

**Key words:** FY-2F, direct assimilation, simulation of brightness temperature, bias correction

\* 国家自然科学基金项目(41375068)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB421500)共同资助

2014 年 5 月 17 日收稿; 2014 年 5 月 27 日收修定稿

第一作者: 张兴海, 主要从事热带气旋及资料同化研究. Email: 54zxhai@163.com

通信作者: 端义宏, 主要从事热带气旋及数值模拟研究. Email: duanyh@cma.gov.cn

## 引言

卫星资料同化是数值预报的热点问题。利用资料同化技术可以将卫星观测结果和数值模式有效的结合起来,提高卫星产品的释用水平,同时改进模式的初始场、提高数值模式的预报能力。受运行轨道的限制,极轨卫星观测在时间和空间上存在不连续,相比之下,静止卫星则拥有稳定不变的视场,并且能够做到连续观测,在热带气旋的监测方面具有很大的优势。

对于静止卫星,由于受制于卫星高度,探测通道一般位于红外和可见光波段。静止卫星扫描视场恒定,且时间分辨率很高。根据相邻时刻成像仪资料,利用空间相关的办法,可以反演得到云或水汽的移动轨迹,称之为云迹风资料。Velden 等(1997)利用地球静止业务环境卫星(Geostationary Operational Environmental Satellite, GOES)的水汽通道在连续的时间段上的观测资料,得到了对流层上层的风矢量。Goerss 等(1998)将 GOES-8 多通道云迹风信息加入到数值模式中,模拟了大西洋飓风,通过对4个飓风个例的对比研究,发现加入云迹风能够显著地减小路径预报误差。GFDL 飓风模式采用三维的最优插值方案将 GOES-8 反演得到的风场资料同化到模式中,通过超过100组的对比试验,发现引入了云导风后,12 h 路径误差平均减少5%,36 h 路径误差平均减少12%(Soden et al, 2001)。刘瑞等(2012)利用 WRF-3DVAR 同化系统同化 FY-2C 红外和水汽两个通道的云迹风反演产品,改进了模式对台风降水的模拟,提高了降水落区和强度的预报准确度。

随着大气辐射物理过程研究的不断深入,辐射传输模式考虑的物理过程越来越完善,模拟精度也越来越高。Eyer 等(1993)提出利用辐射传输模式理论上可以直接同化卫星观测到的辐射亮温。此后 Eyer(1997)利用变分同化成功地将星载大气垂直探测资料进行了直接同化,使卫星资料在数值模式中的应用进入一个新的阶段。为了实现在数值模式中直接同化卫星资料,Weng 等(2003)对辐射传输模式(vector discrete-ordinate radiative transfer model, VDISORT)进行了研究和改进,使得 VDISORT

在计算大气辐射及其雅克比项时速度更快、精度更高,为下一步直接同化辐射资料奠定了基础。丁伟钰等(2008)结合 WRF 输出的气象场资料,利用快速辐射传输模式(Radiative Transfer for TOVS, RTTOV)针对“珍珠”台风进行了研究,模拟了 HIRS/3 红外辐射亮温,结果表明,当不考虑有云的情况下,模拟亮温显著偏高,且无法得到台风的特征信息,考虑了云之后,对应低层通道(能量峰值在云顶以下)的模拟结果和观测比较一致。研究表明,红外辐射资料在直接同化方面具有潜在的应用价值。

然而静止卫星红外通道资料的直接同化研究要滞后于极轨卫星。Köpken 等(2004)曾对 Meteosat-7 上搭载的可见光与红外成像仪资料进行研究并尝试同化。Szyndel 等(2005)和 Stengel 等(2009)对 Meteosat-8 卫星成像仪资料直接同化进行过研究,然而这些研究的结果均不够理想。Su 等(2003)的研究结果表明,在全球数值预报系统中直接同化 GOES 成像仪辐射资料,使得预报技巧略有下降。近两年,朱彤等(2012)利用 NCEP 全球预报模式同化了第二代气象卫星(Meteosat Second Generation-2, MSG)和 GOES 红外亮温资料。结果表明静止卫星红外亮温偏差较大,且很多通道存在非高斯型的偏差分布,通过新的定标后,水汽和二氧化碳通道同化能够对全球预报系统(Global Forecast System, GFS)6 d 预报具有显著的正影响。Zou 等(2011)和 Qin 等(2012)利用格点统计插值 GSI 系统将 GOES 卫星成像仪资料成功地同化进 WRF 区域模式中,对中尺度降水的预报有明显的改善。

随着辐射传输模式和同化理论的不断发展和完善,将静止卫星辐射资料直接同化进数值模式系统中已经具有了一定的可行性。由于静止卫星在热带气旋的监测方面具有很大的优势,因此同化静止卫星资料,特别是我国风云(FY)系列静止卫星资料,对西太平洋地区台风预报极有意义。令人遗憾的是目前国内外这方面的研究工作尚不多见。

在前人研究的基础上,我们尝试将 FY-2F 静止卫星资料同化入区域飓风模式 HWRF 中。由于资料的预处理往往是决定同化成败的关键环节之一,同时针对 FY-2F 卫星资料模拟和偏差的研究也不多见,因此本文主要着眼于 FY-2F 红外通道资料的模拟和偏差分析,为下一步的同化做准备。

# 1 资料及研究方法介绍

## 1.1 模式介绍

为了模拟 FY-2F 各红外通道亮温,本文利用 HWRf 模式来提供大气状态参数,并用快速辐射传输模式 CRTM 计算卫星接收到的红外辐射。

HWRf 模式是由 NOAA 及相关机构合作开发的最新的海-气耦合飓风模式。大气模块为非静力中尺度模式(WRF Nonhydrostatic Mesoscale Model, WRF-NMM),海洋模式为热带气旋普林斯顿海洋模式(Princeton Ocean Model for Tropical Cyclones, POM-TC)。由于 POM-TC 不能适用于西太平洋地区,因此本文研究中只使用大气部分模块,利用 HWRf 模式进行模拟试验。其中微物理方案为 Eta HWRf 方案(Rogers et al, 2001),长短波辐射为 GFDL 方案(Fels et al, 1981),积云参数化为简化的 Arakawa-Schubert 方案(Han et al, 2011)。

CRTM 是卫星资料同化联合中心(Joint Center for Satellite Data Assimilation, JCSDA)开发的快速辐射传输模式,与数值预报模式结合,可以用来模拟大气辐射传输过程,模拟大气外层卫星观测的辐射亮温及亮温梯度或雅克比项(Weng, 2007; Han et al, 2007)。CRTM 可模拟的波段包括红外和微波波段。物理过程综合考虑了地表发射、大气吸收,包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$  等气体的吸收,气溶胶、云和降水粒子散射效应,根据预报模式提供的大气状态廓线通过辐射传输方程,可以计算到达大气顶的辐射。

在 CRTM 模式中,云和降水粒子的光学参数是通过给定分布的米散射理论计算得到的。这些参数包括消光系数、单次散射比、相函数,为了加快计算速度,这些参数由预先计算好的查找表提供。根据预报模式不同的参数化方案,CRTM 中最多提供 6 种云和降水粒子组合,包括云水、云冰、雨、雪、霰以及雹(刘硕松等,2012)。云粒子的辐射效应一直是研究的难点,不同形态、不同相态的云粒子光学效应也不同,在快速辐射传输模式中做了极大的简化,这给计算带来了很大的误差。另一方面,由于预报模式在处理云和降水的过程中依赖于参数化的办法,参数化本身的不完善可能带来模式对云、降水类型和落区的预报误差。因此,有云情况下,特别是在红外波段 CRTM 模拟的亮温与实际观测偏差较大,这

一点我们会在下文中详细说明。

本文在研究中还用到了 GSI 同化系统。GSI 是 NOAA 开发并用于 NCEP 业务预报的变分同化系统。2007 年美国发展测试中心(Developmental Testbed Center, DTC)与 GSI 开发团队合作,将 GSI 同化系统引入 HWRf 模式中,成为 HWRf 模式中的同化模块。目前 GSI 是一个三维变分系统(3DVAR)。GSI 在资料分析和质量控制方面有出色的表现,目前能够同化绝大多数常见的气象资料,包括常规探空、地面观测以及卫星遥感资料。结合快速辐射传输模式,GSI 可以直接同化卫星辐射资料。

## 1.2 FY-2F 卫星介绍

FY-2F 卫星发射于 2012 年 1 月 14 日,是我国第四颗业务静止卫星。FY-2F 静止卫星的运行高度为赤道上空 35785 km,星下点经度为  $112^\circ\text{E}$ 。卫星平台搭载辐射仪为展宽可见光和红外自旋扫描辐射仪(Stretched-Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, S-VISSR)。FY-2F 卫星采用了我国自主研发的基于月球辐射校正的内黑体定标(CIBLE)方法,该方法可以显著提高红外波段定标精度(郭强等,2013)。关于 FY-2F 卫星观测通道分析在第二节会有详细说明。

## 1.3 研究个例介绍

本文选取 2012 年第 11 号强台风海葵(Haikui)作为 HWRf 模式模拟对象。“海葵”在日本冲绳县东偏南方约 1360 km 的西北太平洋洋面上生成。“海葵”台风生成后迅速向西北方向移动,8 月 5 日进入我国东海海域,6 日强度升级为台风。8 日台风海葵登陆我国浙江省象山县。登陆后穿过浙江省,进入安徽省境内,强度也减弱至热带风暴,并最终停止编号。本文研究的时段从 2012 年 8 月 5 日 06 时(世界时,以下均同)至 7 日 18 时。

# 2 FY-2F 红外通道权重函数分析

S-VISSR 扫描仪共有 5 个通道,其中 4 个位于红外光区(IR),一个为可见光通道(VIS)。其通道具体对应的波段范围及具体信息如表 1 所示。可见光通道位于  $0.55\sim 0.75\ \mu\text{m}$ ,分辨率约为 1.25 km,观测目标反照率为 1%时的信噪比为 1.2,对应的观

测的反照率误差为 0.8%。IR1 和 IR2 为两个红外分裂窗通道, 对应波段分别为 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ , 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ , 300 K 观测亮温误差约为 0.2~0.4 K。该波段范围内大气气体吸收较少, 除了受水汽等少数气体影响外, 来自近地面的大部分红外辐射可以穿透大气层到达卫星, 因此称为大气窗区。IR3 为水汽通道, 波段为 6.3~7.6  $\mu\text{m}$ , 该波段受水汽影响严重, 因此观测信息中能够反映大气中的水汽信息。IR4 为近红外通道 3.4~4.0  $\mu\text{m}$ , 该通道波段处于太阳辐射能量范围, 在白天容易受到太阳辐射的影响, 在这一通道卫星所接受到的辐射既包括热发射也包括大气散射(刘香娥等, 2010)。由于波长较长, 红外通道的分辨率较粗, 均为 5 km。

图 1 为利用美国标准大气廓线计算的 FY-2F 红外通道(实线)与 GOES-12 红外通道(虚线)权重函数。黑色、绿色分别为 IR1、IR2 通道, 蓝色为 IR3

表 1 FY-2F 各通道基本信息

Table 1 The basic information of each channel of FY-2F

通道	波段/ $\mu\text{m}$	SNR or NE $\Delta T$ @ specific input	分辨率 /km
VIS	0.55~0.75	1.2 @ 1% albedo	1.25
IR1	10.3~11.3	0.2~0.4 K @ 300 K	5
IR2	11.5~12.5	0.2~0.4 K @ 300 K	5
IR3	6.30~7.60	0.3~0.6 K @ 260 K	5
IR4	3.50~4.00	0.3~0.6 K @ 300 K	5

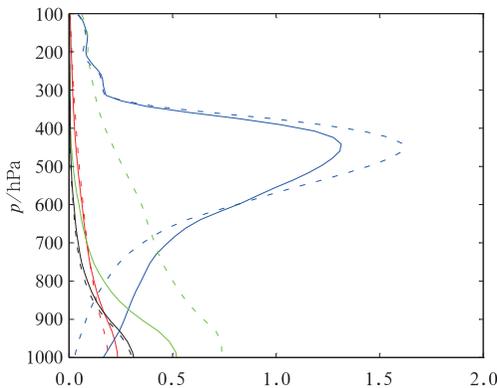


图 1 FY-2F 红外通道权重函数分布 (实线为 FY-2F, 虚线为 GOES-12, 黑、绿、蓝、红色实线分别对应 FY-2F 的 IR1 至 IR4 通道, 黑、绿、蓝、红色虚线对应 GOES-12 的第四、六、三、二通道)

Fig. 1 Weighting functions of infrared channels of FY-2F

(black, green, blue and red solid lines refer to IR1 to IR4 and the corresponding dotted lines refer to the fourth, sixth, third and second channels of GOES-12, respectively)

水汽通道, 红色为 IR4 近红外通道。从权重函数的分布上来看, FY-2F 卫星 IR1、2、4 通道权重函数峰值均为近地层, 绝大部分信息来源于 700 hPa 以下。IR1 与 IR2 通道为大气窗区通道, 其主要的吸收气体是水汽。IR3 通道, 即水汽通道的权重函数峰值在 400~500 hPa 高度。由于 FY-2F 和 GOES-12 各个通道在波段上略有差别, 其权重函数分布也有一些不同, 其中 GOES-12 第六通道(图中绿色虚线所示)的波长为 13.0~13.7  $\mu\text{m}$ , 该波段主要的吸收气体为 CO<sub>2</sub>, 与 FY-2F 卫星波段相近的 IR2 通道相差最大, 相比之下 FY-2F 卫星 IR2 通道权重函数分布更集中在低层。IR1、IR2 和 IR4 通道权重函数峰值都在近地面, 其亮温受下垫面影响很大。而水汽通道峰值在 400~500 hPa 之间, 近地面权重函数较小, 辐射信息绝大部分来源于对流层中层, 亮温资料受下垫面影响较小。当下垫面情况复杂时, 比如不均匀的陆地下垫面, 地表发射率的计算比较困难, 使得低空通道亮温的模拟误差较大。

### 3 模拟和观测亮温对比分析

#### 3.1 有云情况下模拟亮温对比

如上文所述, CRTM 模式中包含了 6 种云水、云冰粒子。在模拟亮温的过程中, 主要考虑 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>3</sub> 两种气体吸收。通过大气模式向 CRTM 提供的大气状态参数主要包括各层气压、温度、水汽混合比和臭氧含量, 同时还包括近地层的一些参数, 如 10 m 高的风速、下垫面覆盖类型及土壤温度等。通过辐射传输方程 CRTM 可以模拟出卫星接收到的红外辐射。

为了减少模式积分带来的误差, 利用 HWRF 模式积分 6 h 提供大气背景场, 初始场为 FNL (Final Analyses) 资料。图 2 为 IR1 通道 CRTM 模拟的红外云图与 FY-2F 观测云图对比。由于模式和观测资料的分辨率不一致, 为了避免由于插值带来的误差, 将两者的分辨率统一地降低到 0.25°。图 2 所示的区域为 0°~60°N、90°~160°E, 格点数为 240×280。

模拟和观测云图对应的时刻为 2012 年 8 月 7 日 00 时, 云图中心为即将登陆浙江宁波的台风海葵。可以看到中高纬度地区为明显的两槽一脊形式, 我国东北地区至鄂霍次克海地区在高压脊的控制之下。从云图的模拟来看, 由于初始场中高纬度

天气主导形式比较准确,槽前的天气尺度锋面云系模拟得比较好。当然,在一些细节方面模拟的还有欠缺,模拟的云系亮温分布比较均一,高云和低云不能很好地分开,特别是对高空的卷云,模式还不能很好地模拟出来,这可能既和 CRTM 模式中对冰粒子的形态简化和辐射计算能力有关,也与气象模式提供背景信息不够准确有关。

对于中低纬度地区,包括台风云系的模拟,模式的结果还存在很大的问题。可以看到,中南半岛、南海以及菲律宾周围大部分地区模拟出大片连续的云团,这与真实的观测是不符的。这表明云图的模拟对于低纬度热带云团的模拟包括热带气旋、季风云系等存在较大的误差,这与大气模式在热带地区存在较大不确定性也是一致的。

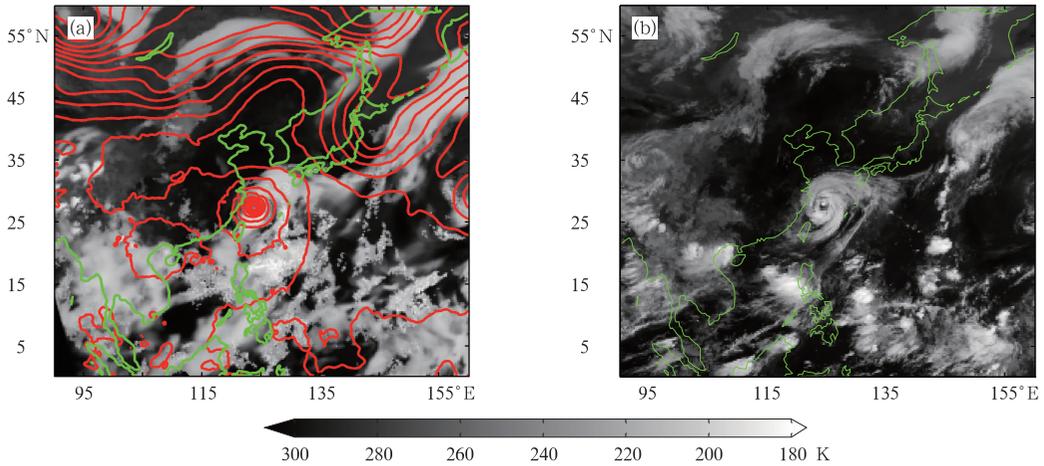


图 2 FY-2F 红外 IR1 通道模拟和观测亮温

(a)CRTM 模拟的云图, (b)FY-2F 观测云图

(对应时次为 2012 年 8 月 7 日 00 时,单位:K)

Fig. 2 Simulation and observation brightness temperature of FY-2F in IR1

(a) simulation by CRTM, (b) observation of FY-2F in IR1

(The time is 0000 UTC 7 August 2012, Unit: K)

### 3.2 晴空条件下的模拟对比

由于模式对云的处理存在较大的误差,对于同样的模式大气背景状态输出,我们利用 CRTM 在晴空条件下进行模拟。采用 FY-2F 亮温资料中的云分类信息,选取晴空下的观测亮温,并将模拟亮温和观测亮温进行对比,结果如图 3 所示。可以看到,去除了云之后,很明显大部分的观测亮温值都分布在观测亮温和模拟亮温相等的直线附近。总体来看,IR3 通道模拟和观测亮温符合得最好,但有一定的系统性偏差,观测亮温可能在定标时偏高。IR1、IR2 和 IR4 三个通道陆地下垫面的点比海洋上的点分布要发散,表明对于三个近地层通道,受下垫面影响较大。在陆地下垫面,由于地表发射率非常不均匀,模式在计算辐射亮温的过程中有很大的误差。从模拟的情况来看,陆地下垫面的模拟亮温比实际观测偏小,辐射模式可能低估了陆地下垫面的发射率。IR1、IR2 两个窗区通道在海洋上的模拟亮温和

观测亮温比较一致,其中 IR1 通道模拟亮温比观测值略微偏大。前文提到 IR3 通道的权重函数峰值分布在对流层中层,因此下垫面的影响很小,从模拟和观测亮温对比上很明显地能看出来,不管是海洋上还是陆地上,IR3 通道模拟亮温和观测符合得都很好,两者没有明显的差别。IR4 通道在陆地和海洋上的观测值都比模拟值要偏大,一方面是由于 IR4 通道波长较短,在白天易受太阳辐射的影响,另一方面也可能与 IR4 通道的定标有关。

## 4 GSI 偏差订正效果

在实际的同化中,辐射亮温资料总是要经过一定的质量控制和偏差订正才能进入同化系统中。因此,将原始的 FY-2F 资料经过一定的预处理,输入到 GSI 系统中,利用 GSI 系统进行质量控制和偏差订正。为了减少观测资料之间的相关,将原始资料进行稀疏化处理,将分辨率降低到 40~60 km。其

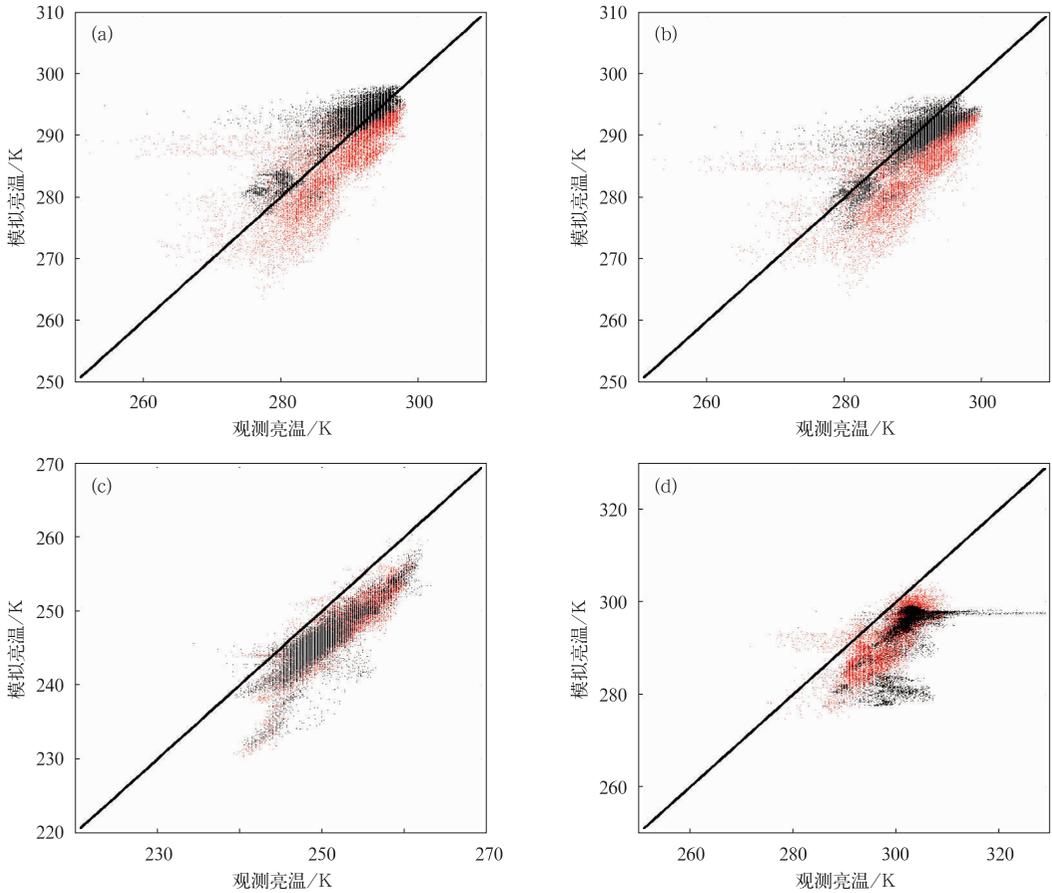


图 3 晴空条件下模拟和观测亮温对比

(a)IR1, (b)IR2, (c)IR3, (d)IR4  
(红色为陆地下垫面、黑色为海洋下垫面)

Fig. 3 The comparison between simulated and observed BT under clear-sky condition

(a) IR1, (b) IR2, (c) IR3, (d) IR4

(Red dots are data of land and black dots are data of ocean)

中,如上文所述,保留 IR1、IR2 和 IR4 三个通道的海洋下垫面资料及 IR3 通道陆地和海洋下垫面的资料,且对于这四个红外通道的只处理晴空资料。而质量控制仿照 GSI 系统中对 GOES 卫星资料的处理方案。具体的资料的稀疏化和 GSI 的质量控制方案可以参考 Zou 等(2011)。

针对通过质量控制的资料点,用观测亮温(O)减去模拟亮温(B)得到 O-B 分布,图 4 为 2012 年 8 月 7 日 00 时 FY-2F 红外 IR1 通道云图,彩色点为通过质量控制的点,颜色代表 O-B 的值。通过质量控制的点均位于晴空,但不是所有资料都能通过质量控制。可以看到对于 IR1、IR2、IR3 通道,大多数资料 O-B 值在  $\pm 1.5$  K 之间,其中 IR2 通道在渤海湾上空的资料点偏差大于 1.5 K。IR4 通道为

短波红外通道,在白天易受太阳辐射影响,00 时对应图中区域基本为白天,因此绝大部分观测资料亮温偏高,O-B 值均超过 4.5 K。

GSI 中偏差订正分为两个部分:一部分为气团偏差订正  $b^{air}(x, \beta)$  (air-mass dependent in GSI), 一部分为扫描角度的偏差订正  $b^{angle}$  (separate scan-angle dependent)。偏差订正后的结果为:

$$\tilde{h} = h(x) + b^{air}(x, \beta) + b^{angle}$$

式中,  $h(x)$  是利用辐射传输模式将背景场  $x$  转化为模拟亮温。对于静止卫星,由于视场恒定,GSI 不对扫描角度进行订正。对于气团订正项的计算为:

$$b^{air}(x, \beta) = \sum_{i=1}^N \beta_i [a_i p_i(x)]$$

式中,  $p_i(x)$  为预报因子项,  $a_i$  为预先设定的参数,

估算变量  $x$  和  $\beta$  的方法为:

$$J(x, \beta) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B_x^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(\beta - \beta_b)^T B_\beta^{-1}(\beta - \beta_b) + \frac{1}{2}[y - \tilde{h}(x, \beta)]^T R^{-1}[y - \tilde{h}(x, \beta)]$$

通过将  $J$  的极小化, 可以估算  $\beta$ 。对于同化晴空辐射资料, 气团订正中包含 5 个预报因子  $p(x)$ : 全局的补偿项(global offset), 天顶角(zenith angle), 云水项(cloud liquid water), 温度递减率(lapse rate)及其平方(square of the lapse rate)。

图 5 给出了经过 GSI 偏差订正后的观测与模拟亮温的散点图。对比资料点观测亮温(经过偏差订正)和模拟亮温, 可以看到 IR1、IR2 通道观测亮温和模拟亮温比较一致。散点集中的分布在 O 与 B 相等的直线附近, 由于只同化晴空范围亮温资料, 因此亮温变化范围较小, 大致在 285~300 K 区间。

IR2 通道 O 与 B 散点分布相对更发散一些。IR3 通道散点分布集中在 O 与 B 相等的直线附近, 亮温范围为 245~265 K 之间, 散点分布相比 IR1、IR2 通道更为集中, 这表明 IR3 通道资料质量较高, 一般而言同化进模式后效果会更好。IR4 通道由于受到太阳辐射的影响, 出现超过 5 K 的整体偏差, 同时, 该通道资料 O 与 B 亮温散点分布也没有明显的线性分布。资料点模拟亮温主要集中在 293~298 K 之间, 观测亮温则集中在 301~306 K。经过偏差订正后, 除 IR4 通道外, 其余三个通道的资料分布形态都更接近正态分布, 且基本没有系统性的偏差。

由于 IR4 通道经过质量控制和偏差订正仍存较大的问题, 所以进一步检验了 IR4 通道的资料质量。选取 2012 年 8 月 7 日 00、06、12 和 18 时 4 个时次, 经过 GSI 质量控制后的 O 与 B 散点分布如图 6。可以看到对于图 6a、6b 为 00 和 06 时, 对应西太平洋地区为白天时间, IR4 通道 O 与 B 散点呈

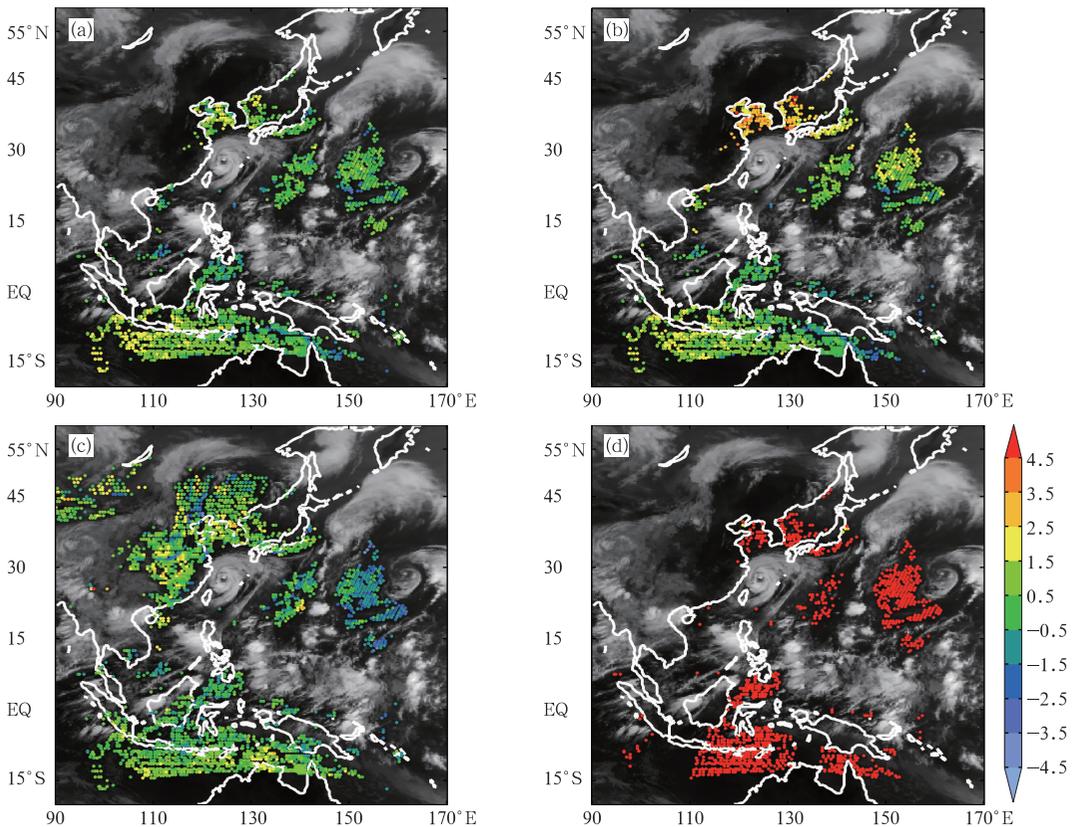


图 4 通过 GSI 质量控制的资料点与偏差值分布 (单位:K)

(a) IR1, (b) IR2, (c) IR3, (d) IR4

Fig. 4 The distribution of data and bias after quality control of GSI (unit: K)

(a) IR1, (b) IR2, (c) IR3, (d) IR4

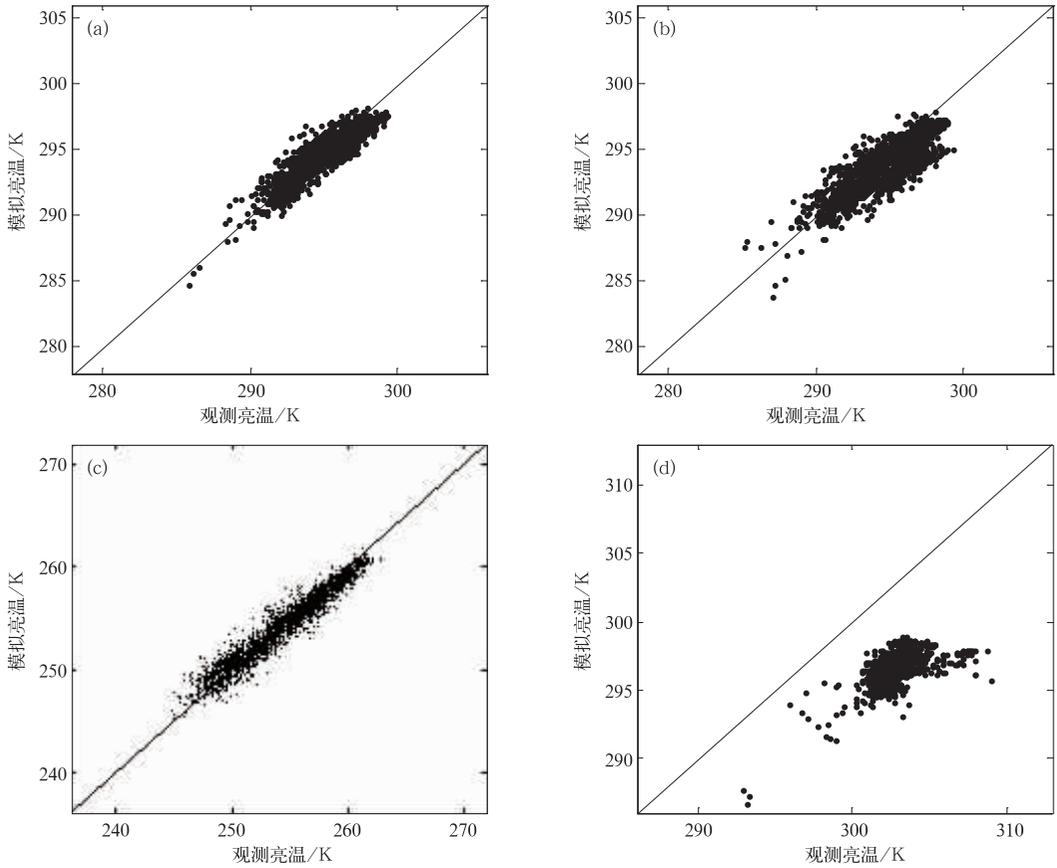


图 5 经过 GSI 偏差订正后模拟和观测亮温对比

(a) IR1, (b) IR2, (c) IR3, (d) IR4

Fig. 5 The comparison of simulated and observed brightness temperature after bias correction by GSI

(a) IR1, (b) IR2, (c) IR3, (d) IR4

现明显的系统性偏差,观测亮温明显高于模拟亮温,且资料点分布比较分散,线型趋势不太明显。图 6c、6d 对应 12 和 18 时,该时刻西太平洋地区基本为夜间。IR4 通道资料观测亮温与模拟亮温基本没有很好的线性关系。特别是当观测亮温大于 300 K 时,模拟亮温从 295~310 K 以上,与观测亮温值关系不大。虽然图 6 只给出了一天 4 个时次,但其他时间的资料也有类似的现象。IR4 通道观测资料与模拟结果相差较大,尤其是在夜间,这说明即使在排除太阳影响下,IR4 通道资料的模拟仍存在的问题。从同化的角度来看,该通道资料质量不佳,因此在选择同化通道时,需要剔除 IR4 通道的资料。

对台风海葵 8 月 5 日 06 时至 7 日 18 时,间隔 6 h,共 11 个时次的卫星观测资料,利用 GSI 进行偏差订正,对比偏差订正前、后的平均偏差  $O-B$  的

值。如表 2 所示,  $a$  为订正后平均偏差,  $b$  为订正前平均误差。可以看到对于 IR2、IR3 通道,所有时次, GSI 订正后的平均偏差均小于订正前,但改善效果随着时次和通道的不同而有差异。IR1 通道偏差订正后改善效果比较小,甚至大多数时次出现订正后偏差略有增大的现象。订正前平均偏差仅有 0.42 K,订正后略有增大达到 0.47 K,相比其他通道, IR1 通道的资料质量应该是最优的。IR2 通道偏差订正的改善效果随着时次变化明显,  $O-B$  经过订正最大可以减小 72.9%,最小仅有 8%,订正前平均偏差为 2.15 K,订正后仅为 1.20 K。IR3 通道改善最为明显,订正前平均偏差几乎均在 3.5 K 以上,而偏差订正后,平均为 0.34 K,最大偏差不超过 0.9 K,这主要是由于 IR3 通道的主要误差来源于系统性偏差。从上面的分析来看, GSI 对于 FY-2F 亮温资料的偏差订正是比较成功的。

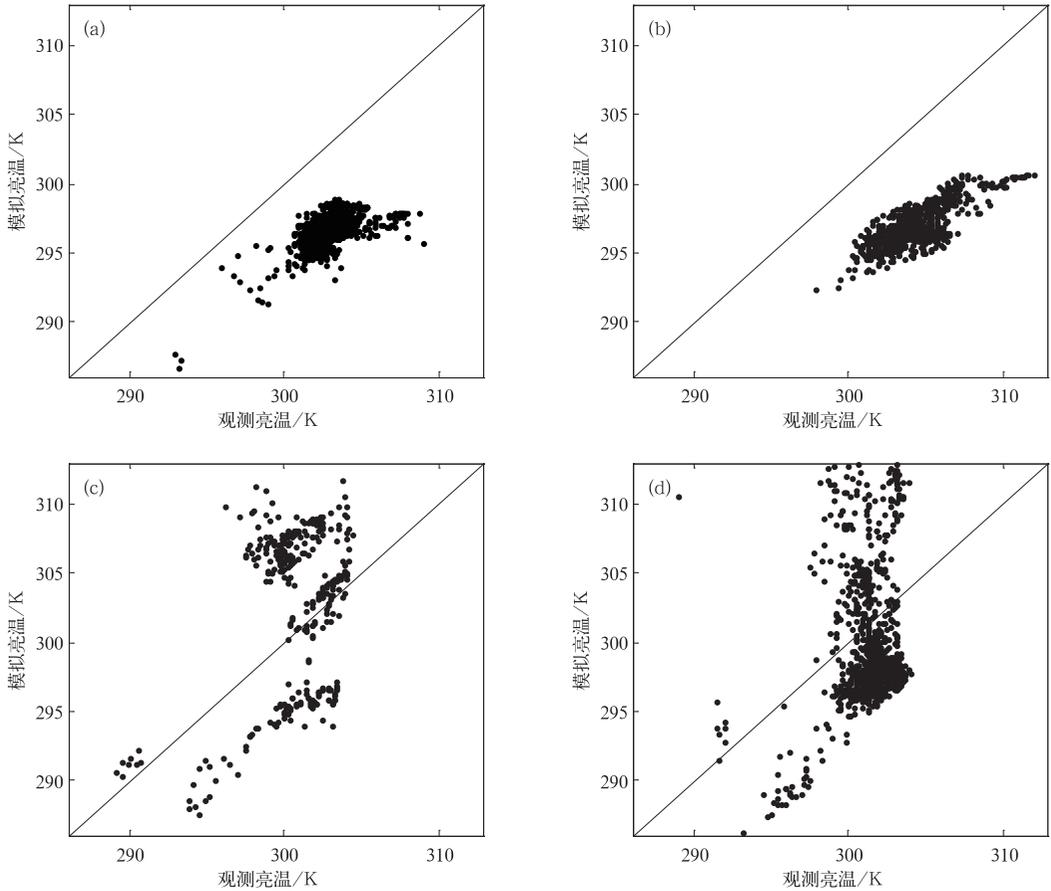


图 6 2012 年 8 月 7 日 IR4 通道观测和模拟亮温对比

(a)00 时, (b)06 时, (c)12 时, (d)18 时

Fig. 6 The comparison of simulated and observed brightness temperature in IR4 on 7 August 2012

(a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC, (d) 1800 UTC

表 2 GSI 偏差订正前后平均 O-B 值 (单位: K)

Table 2 The averaged O-B before and after bias correction by GSI (unit: K)

时间/时	0506	0512	0518	0600	0606	0612	0618	0700	0706	0712	0718
IR1(b)	0.57	0.61	0.45	0.63	0.47	0.42	-0.05	0.27	0.82	0.35	0.15
IR1(a)	0.67	0.66	0.51	0.72	0.58	0.46	-0.03	0.33	0.83	0.40	0.07
IR2(b)	2.32	2.47	2.33	2.56	2.25	2.15	1.86	2.00	2.25	1.55	2.00
IR2(a)	1.95	1.89	1.50	1.63	1.11	0.95	0.58	0.70	0.97	1.43	0.54
IR3(b)	3.58	3.70	3.83	3.96	3.61	3.75	3.63	3.60	3.62	3.48	3.81
IR3(a)	0.09	0.61	0.61	0.38	-0.12	0.50	0.07	0.15	0.22	0.88	0.32

注:(a)为订正后平均误差,(b)为订正前平均偏差

(a) after bias correction, (b) before bias correction

## 5 结论与讨论

本文利用 HWRP 模式和 CRTM 辐射传输模式对 FY-2F 的红外成像仪资料进行了模拟。研究表明,由于模式对云的处理方案还存在较大的缺陷,目前无法通过快速辐射传输模式很好地模拟出云的

细节特征,特别是对热带云系的模拟偏差较大。对于晴空辐射的模拟,IR1、IR2 和 IR4 三个低层通道受下垫面的影响严重。特别是对于陆地下垫面,由于地表发射率极不均匀,CRTM 模式低估了平均发射率,导致陆地下垫面模拟亮温平均值偏低,而海洋上的模拟情况则要明显好于陆地。IR3 通道由于是中层通道,因此受下垫面影响较小。

通过模拟和实测的亮温资料进行对比,发现 IR4 近红外通道在白天受太阳辐射影响严重,亮温值明显偏大。而夜晚的观测资料则偏差更大,目前除了该通道观测资料质量的问题,我们还没有找到其他解释。因此,在后面的同化研究中,将舍弃 IR4 通道的辐射资料。

自 8 月 5 日 06 时至 7 日 18 时,间隔 6 h 共 11 个时次,利用 GSI 进行偏差订正。结果显示,GSI 的偏差订正对于 IR3 通道改进最明显,观测误差从平均 3.7 K,减少到仅有 0.34 K。IR2 通道平均误差改善也达到 50% 左右。IR1 通道则没有改进,原始的观测资料平均偏差仅有 0.42 K,订正后略有增大,上升到 0.47 K。

本文的研究为下一步直接同化 FY-2F 亮温资料打下了基础。但值得指出的是,以上的研究只是基于很少的观测样本进行的,真正具有普适意义的结论还需要建立在更多观测资料和样本之上。我们的研究目的是要将研究时段的资料同化如模式系统中,而不是对 FY-2F 的卫星资料进行校准。同时,由于所用资料距离 FY-2F 卫星发射升空仅半年时间,FY-2F 的校准和标定工作还未结束,我们相信后续的 FY-2F 亮温资料质量会更加令人满意。

## 参考文献

丁伟钰,万齐林. 2008. “珍珠”台风卫星红外通道亮温的数值模拟. *大气科学*, 32(3): 572-580.

郭强,陈博洋,张勇,等. 2013. 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展. *气象科技进展*, 3(6): 6-11.

刘瑞,翟国庆,王彰贵,等. 2012. FY-2C 云迹风资料同化应用对台风预报的影响试验研究. *大气科学*, 36(2): 350-360.

刘硕松,董佩明,韩威,等. 2012. RTTOV 和 CRTM 对“罗莎”台风卫星微波观测的模拟研究与比较. *气象学报*, 70(3): 585-597.

刘香娥,王广河. 2010. FY-2C 静止气象卫星红外通道辐射特性研究. *气象*, 36(2): 39-47.

朱彤,翁富忠. 2012. 在 NCEPGDAS 中同化 MSG 和 GOES 资料. *大气科学学报*, 35(4): 385-390.

Eyre J R. 1997. Variational assimilation of remotely-sensed observations of the atmosphere. *J Meteor Soc Japan*, 75: 331-338.

Eyre J R, Kelly G A, McNally, et al. 1993. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119(514): 1427-1463.

Fels S B, Schwarzkopf M D. 1981. An efficient accurate algorithm for calculating CO<sub>2</sub> 15 μm band cooling rates. *J Geophys Res*,

Oceans, 86(C2): 1205-1232.

Goerss J S, Velden C S, Hawkins J D. 1998. The impact of multi-spectral GOES-8 wind information on Atlantic tropical cyclone track forecasts in 1995. Part II: NOGAPS forecasts. *Mon Wea Rev*, 126(5): 1219-1227.

Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea Forecasting*, 26(4): 520-533.

Han Y, Weng F, Liu Q, et al. 2007. A fast radiative transfer model for SSMIS upper atmosphere sounding channels. *J Geo Res*, 112: D11121.

Köpken C, Kelly G, Thépaut J-N. 2004. Assimilation of Meteosat radiance data within the 4D-Var system at ECMWF: assimilation experiments and forecast impact. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130: 2277-2292.

Qin Z, Zou X, Weng F. 2012. Evaluating added benefits of assimilating GOES imager radiance data in GSI for coastal QPFs. *Mon Wea Rev*, 141: 75-92.

Rogers E, Black T, Ferrier B, et al. 2001. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. *NWS Tech Pro Bull*, 488: 15.

Soden B J, Velden C S, Tuleya R E. 2001. The impact of satellite winds on experimental GFDL hurricane model forecasts. *Mon Wea Rev*, 129(4): 835-852.

Stengel M, Undén P, Lindskog M, et al. 2009. Assimilation of SEVIRI infrared radiances with HIRLAM 4D-Var. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135: 2100-2109.

Su X, Derber J, Jung J. 2003. The usage of GOES imager clear-sky radiance in the NCEP global data assimilation system. Preprints, 12th Conf. on Satellite Meteorological and Oceanography, Long Beach, CA, Amer Meteor Soc, 3. 20.

Szyndel M D E, Thépaut J-N, Kelly G. 2005. Evaluation of potential benefit of SEVIRI water vapour radiance data from Meteosat-8 into global numerical weather prediction analyses. *Atmos Sci Lett*, 6: 105-111.

Velden C S, Hayden C M, Nieman S J, et al. 1997. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(2): 173-195.

Weng F. 2007. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *J Atmos Sci*, 64: 3799-3807.

Weng F, Liu Q. 2003. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part I: Forward radiative transfer and Jacobian modeling in cloudy atmospheres. *J Atmos Sci*, 60(21): 2633-2646.

Zou X, Qin Z, Weng F. 2011. Improved coastal precipitation forecasts with direct assimilation of GOES 11/12 imager radiances. *Mon Wea Rev*, 139: 3711-3729.