

钟波, 王云峰, 马刚, 等. 2018. 基于卫星资料梯度信息的新型变分同化方法对于台风数值模拟的研究 [J]. 大气科学, 42 (1): 164–177. Zhong Bo, Wang Yunfeng, Ma Gang, et al. 2018. A new variational assimilation method for numerical typhoon simulation based on gradient information of satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 164–177, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16281.

基于卫星资料梯度信息的新型变分同化方法 对于台风数值模拟的研究

钟波¹ 王云峰¹ 马刚² 马新园^{1, 2}

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 卫星资料凭着卫星遥感的全球性、连续性和高频次观测等优势, 成为一种重要的非常规资料来源, 但卫星观测仍然存在各种各样的观测误差, 其中包含由于观测偶然性所造成的统计学上的随机误差及仪器本身和辐射传输模式等造成的系统性偏差, 这些误差在很大程度上影响了卫星资料的质量。文中提出了一种能有效订正卫星观测资料系统性偏差的梯度信息同化算法, 该方法用一个梯度算子进行模式变量与观测变量的梯度变换, 从而达到订正系统性偏差的目的。本文利用 WRF (Weather Research Forecast) 模式及其同化模式 WRFDA (WRF Data Assimilation system), 以及 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 资料, 对台风“圆规”进行了实际的数值模拟和同化试验, 数值结果表明, 梯度信息同化方法能明显改善台风路径的模拟, 在处理可信度较低的资料时仍然适用。另外, 通过同化诊断分析, 发现卫星资料的系统性偏差对于台风数值模拟有较大影响, 而文中提出的梯度信息同化方法能较好的解决此类问题。

关键词 梯度信息同化 系统性偏差 WRFDA (WRF Data Assimilation system) 模式

文章编号 1006-9895(2018)01-0164-14

中图分类号 P457

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16281

A New Variational Assimilation Method for Numerical Typhoon Simulation Based on Gradient Information of Satellite Data

ZHONG Bo¹, WANG Yunfeng¹, MA Gang², and MA Xinyuan^{1, 2}

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Satellite data has been widely used as a non-conventional meteorological data in numerical weather prediction due to its global coverage and continuous, high-frequency observations. However, there are a variety of observation errors in satellite observations, including the random errors caused by the contingency of observations and systematic errors brought by the instrument itself and introduced by the Community Radiative Transfer Model, which influence the quality of satellite data to a large extent. A method of gradient information assimilation to correct the systematic errors of satellite data is proposed in this paper, which uses a gradient operator to make gradient transformation between the model variables and observation variables and realize the objective to eliminate the systematic errors. A numerical simulation of typhoon Kompasu is then conducted using the WRF (Weather Research Forecast) and WRFDA (WRF Data Assimilation system) model as well as the AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) data. The results indicate that the method of gradient

收稿日期 2016-12-06; **网络预出版日期** 2017-04-13

作者简介 钟波, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 研究方向为资料同化与数值模拟。E-mail: 308557251@qq.com

通讯作者 王云峰, E-mail: wangyf@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375106、11271195、41230421

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375106, 11271195, 41230421)

information assimilation can greatly improve the simulation of Kompasu's track, and the method can also be applied to process data of low reliability. In addition, through the assimilation diagnosis analysis, it is found that the systematic deviation of the satellite data has a great impact on numerical simulation of typhoons, and the gradient information assimilation method proposed in this paper can solve this kind of problem.

Keywords Gradient information assimilation, Systematic error, WRFDA (WRF Data Assimilation system) model

1 引言

随着空间技术和遥感技术的飞速发展, 各种卫星资料在气象领域的应用日趋多元化, 加上卫星遥感的全球性、连续性和高频次观测等优势, 使得卫星观测成为气象研究方面不可缺少的重要组成部分, 发挥的作用也越来越明显(董佩明等, 2008; 李小青等, 2012; 王云峰等, 2015)。特别是针对热带气旋方面的研究, 由于海洋上观测资料的缺乏, 使得卫星观测资料的作用尤为明显, 严卫等(2013)就利用了 Cloudsat 卫星资料分析了热带气旋的结构特征, 较为细致的刻画了热带气旋内部结构的演变过程。但由于卫星所携带的观测仪器本身在仪器制作精度, 各种定标、定位等方面存在误差, 使得最后的观测结果也存在一定的偏差。现阶段处理这类偏差的方式主要分为质量控制、偏差订正等。卫星资料的质量控制主要考虑物理量的取值范围, 剔除离群资料, 去除可信度不高区域的资料等, 这种方法只能减少使用可信度较低的卫星资料, 并不能从根源上消除误差本身。偏差订正的目的是为了消除或降低一些系统性偏差, 这些偏差的来源包含辐射传输模式的系统性偏差和观测仪器定标、定位的偏差, 以及传感器的响应特性随时间改变造成的系统性偏差。国内外科学家在误差对气象预报的影响方面进行了大量研究, 王金成等(2008)通过研究发现观测误差、模式误差等是初始场分析误差的重要来源。Wang et al. (2011)以 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式变分系统为基础, 在已知偏差订正的前提下, 迫使模式初始状态的映射偏差与卫星观测时的气团偏差一致, 达到偏差订正的效果, 但在实际业务中偏差的产生机制未知, 因此很难消除系统性偏差的影响。ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) 最初采用了全球扫描订正和线性气团订正, Eyre (1992) 引用了云辐射对此方案进行了调整, 但没有在本质上改进。Harris and Kelly (2001) 首先考虑了扫描订正对纬度的依赖性, 将全球分为 18 个纬度带, 应用来自模式背景场的气

团偏差预报因子对经过扫描线扫描订正后的结果进行气团偏差订正。刘志权等(2007)参照 ECMWF 以前的 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 偏差订正方案, 结合中国 ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder) 辐射产特征, 进行了扫描线偏差订正和气团偏差订正, 其中扫描线偏差订正是基于选择气团预报因子进行多元线性回归获得的, 试验结果表明误差订正前后, 误差分布更趋于高斯分布, 误差标准偏差也得到相应的降低。鲍艳松等(2014)基于经典的卫星资料偏差订正方法, 开发了 FY3A MWTS (FY3A-Microwave Temperature Sounder) 卫星资料偏差订正系统, 能有效消除气团偏差, 偏差订正后图像的平均观测残差有较大改善, 更接近于 0。王云峰等(2013)提出了一种基于浅水波模式的消除系统性偏差的时空梯度同化方法, 通过提取梯度信息作为新的观测资料进行同化, 从而隐性回避了系统性误差的影响, 使得同化效果更多的吸收时空整体分布趋势而非资料本身, 对于较低可信度的观测资料同样适用, 但此方法只研究浅水方程等理想试验, 尚未在实际业务中应用。

随着卫星观测资料的普及与快速发展, 观测资料中的系统性偏差问题亟待解决。本文运用 WRFDA 模块对 AIRS 观测资料进行同化试验, 并通过 WRF (Weather Research Forecast) 模式对台风“圆规”进行数值模拟, 对比不同方案下的同化效果, 并对结果进行分析。

2 卫星资料的同化原理

2.1 目标函数

在进行常规的同化方法时, 目标函数 J 表示为

$$J = J_B + J_C, \quad (1)$$

$$J_B = \frac{1}{2} \sum_i (X - X_b)^T B^{-1} (X - X_b), \quad (2)$$

$$J_C = \frac{1}{2} \sum_i (HX - T_B)^T W (HX - T_B), \quad (3)$$

其中, J_B 表示初始时刻模式控制变量 X 与背景场 X_b 的偏差, B 表示背景误差协方差矩阵, 上标 “T” 表示转置, “-1” 表示求逆, J_C 表示分析场与观测

场的偏差, $\mathbf{W}$ 是权重系数矩阵, 反映了观测资料的质量可信度, $\mathbf{H}$ 为观测算子, $\mathbf{T}_B$ 为观测资料的亮温。

2.2 WRFDA 同化模式

WRFDA (WRF Data Assimilation) 是 WRF 数值预报模式的同化模块, 它将观测资料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。

3 梯度信息的同化原理

3.1 水平梯度信息的构造

假设存在如下观测资料亮温真值矢量:

$$\mathbf{T}_B = (T_{B1}, T_{B2}, \dots, T_{BN})^T, \quad (4)$$

其中, N 为资料序列中的资料个数, 上标 “T” 表示转置。假设卫星资料存在整体一致性系统性偏差 δ , 也存在随机误差向量:

$$\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)^T, \quad (5)$$

且误差 β_i ($i=1, 2, \dots, N$) 具有无偏的随机分布特性。记模式状态变量为 $\mathbf{T}$, 记观测算子为 $\mathbf{H}$, 相当于运用 CRTM 模式将包含温度信息的廓线转化为亮温, 则有

$$\langle \mathbf{e}_0 \rangle = \langle \mathbf{H}\mathbf{T} - \mathbf{T}_B \rangle \neq 0, \quad (6)$$

而具有误差的观测资料矢量可表示为

$$\hat{\mathbf{T}}_B = (T_{B1} + \delta + \beta_1, T_{B2} + \delta + \beta_2, \dots, T_{BN} + \delta + \beta_N)^T = \begin{pmatrix} \hat{T}_{B1}, \hat{T}_{B2}, \dots, \hat{T}_{BN} \end{pmatrix}^T, \quad (7)$$

为了消除 δ , 需要重新构建模式变量及观测矢量。首先将模式变量 $\mathbf{T}$ 进行梯度信息变换, 把 $\mathbf{T}$ 当做模式变量 $\mathbf{T}$ 到观测空间矢量的映射:

$$\hat{\mathbf{T}} = \begin{pmatrix} \hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_N \end{pmatrix}^T, \quad (8)$$

然后进行梯度信息变换:

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{pmatrix} \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1}{\Delta d_1}, \frac{\hat{T}_3 - \hat{T}_2}{\Delta d_2}, \dots, \frac{\hat{T}_N - \hat{T}_{N-1}}{\Delta d_{N-1}} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \tilde{T}_1, \tilde{T}_2, \dots, \tilde{T}_{N-1} \end{pmatrix}^T, \quad (9)$$

其中, $\mathbf{T}$ 为梯度信息变换后的新的模式变量, Δd_i 为两个资料位置的空间距离。相应的把观测矢量 $\mathbf{T}_B$ 改写为

$$\tilde{\mathbf{T}}_B = \begin{pmatrix} \frac{\hat{T}_{B2} - \hat{T}_{B1}}{\Delta d_1}, \frac{\hat{T}_{B3} - \hat{T}_{B2}}{\Delta d_2}, \dots, \frac{\hat{T}_{BN} - \hat{T}_{B(N-1)}}{\Delta d_{N-1}} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \tilde{T}_{B1}, \tilde{T}_{B2}, \dots, \tilde{T}_{B(N-1)} \end{pmatrix}^T, \quad (10)$$

其中, $\mathbf{T}_B$ 为梯度信息变换后观测矢量, 经过变换, 消除了 δ 的影响, 且变换后新变量的残差期望:

$$\langle \tilde{\mathbf{e}}_0 \rangle = \langle \mathbf{H}(\tilde{\mathbf{T}}) - \tilde{\mathbf{T}}_B \rangle = 0. \quad (11)$$

3.2 梯度信息同化

将梯度信息引入到卫星资料的同化中, 在只同化梯度信息时, 目标函数 $\mathbf{J}$ 表示为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_B + \mathbf{J}_D, \quad (12)$$

$$\mathbf{J}_B = \frac{1}{2} \sum_i (\mathbf{T} - \mathbf{T}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_b), \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} [\mathbf{DHT} - \mathbf{DT}_B]^T \mathbf{W} [\mathbf{DHT} - \mathbf{DT}_B], \quad (14)$$

其中, $\mathbf{T}_b$ 为背景场亮温值, $\mathbf{J}_D$ 表示经过梯度信息变换后新控制变量与新观测变量 $\mathbf{DT}_B = \begin{pmatrix} \tilde{T}_{B1}, \dots, \tilde{T}_{B(N-1)} \end{pmatrix}^T$ 的偏差, $\mathbf{D}$ 表示梯度信息算子。

在经过梯度信息变换后, 观测误差协方差矩阵 $\mathbf{W}$ 取成对角矩阵形式, 其选取的方法是, 根据模拟亮温梯度 $\mathbf{DHT}$ 与观测亮温梯度 $\mathbf{DT}_B$ 之间差值的平方的倒数乘以一个权重系数, 用以调节其目标函数分量的大小与其他项的大小处于一个量级上。

4 台风数值模拟试验

4.1 台风模拟和同化方案的设置

2010 年第 7 号台风 “圆规” (Kompasu), 2 日 05:30 (协调世界时, 下同) 前后其中心在朝鲜与韩国交界附近沿海登陆, 登陆时最大风力 12 级。本文以 2010 年 8 月 30 日 06:00 为模拟初始时刻, 向前预报 66 小时至 2010 年 9 月 2 日 00:00; 模式背景场由 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料产生, 模式采用三重移动嵌套网格, 网格距分别为 54 km、18 km 和 6 km, 水平网格数分别为 100×104 、 130×121 、 103×103 ; 垂直分层为 35 层, 模式层顶为 10 hPa; 物理过程采用 Thompson graupel 云微物理方案, Dudhia 短波辐射方案, YSU 边界层方案和 Kain-Fritsch (new Eta) 积云对流参数化方案等。热

带气旋中心位置为实况观测。具体的试验方案设置见表 1。CTRL 试验表示不采用任何变分同化方法直接进行数值模拟。AIRS 试验表示同化未叠加系统性偏差的卫星资料，在此基础上采用常规的三维变分同化方法。AIRS_GRD 试验表示同化未叠加系统性偏差的卫星资料，在此基础上采用梯度信息同化方法。AIRS_SYB 试验表示同化叠加特定系统性偏差的卫星资料，在此基础上采用常规的三维变分同化方法。AIRS_SYB_GRD 试验表示同化叠加特定系统性偏差的卫星资料，在此基础上采用梯度信息同化方法。

表 1 数值试验方案

Table 1 Configuration of numerical experiment

试验方案	初始场	是否加入 AIRS 资料	是否基于梯度信
		系统性偏差 (-1 K)	息的同化方法
CTRL	NCEP	NO	NO
AIRS	NCEP+AIRS	NO	NO
AIRS_GRD	NCEP+AIRS	NO	YES
AIRS_SYB	NCEP+AIRS	YES	NO
AIRS_SYB_GRD	NCEP+AIRS	YES	YES

表 1 中各试验方案在模式中的初始场均为 NCEP 全球 6 小时 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料，初始场中的“AIRS”表示在 NCEP 资料的基础上同化 AIRS

观测资料，“是否加入 AIRS 资料系统性偏差”表示在所同化的 AIRS 资料的亮温值上是否加上一个 -1 K 的系统性偏差，“是否基于梯度信息的同化方法”表示在同化 AIRS 资料时是否采用梯度信息同化方法。

4.2 台风模拟路径和改善比

图 1 是各组试验模拟的台风路径与实况间的对比图。从图 1a 中可以看出，与台风实况路径相比，AIRS_GRD 试验所模拟的台风路径与实况路径最为接近，AIRS 试验所模拟的台风路径与实况路径相差最大，说明运用常规同化方法同化 AIRS 资料以后，台风的数值模拟结果反倒变差了，而使用梯度信息同化方法同化相同的 AIRS 资料时，数值模拟结果得到明显的改善。从图 1b 中可以看出，除了 AIRS 试验以外的其他三种试验所模拟的台风路径与实况路径都比较接近，对比 AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验可以发现，都运用常规的同化方法，在 AIRS 资料上加一个系统性偏差后，数值模拟的结果得到明显的改善。

图 2 是各组试验模拟的台风路径与实况间的偏差情况。从图 2a 中可以看出，对比 CTRL 试验及 AIRS 试验，在同化 AIRS 资料以后，台风在预报时

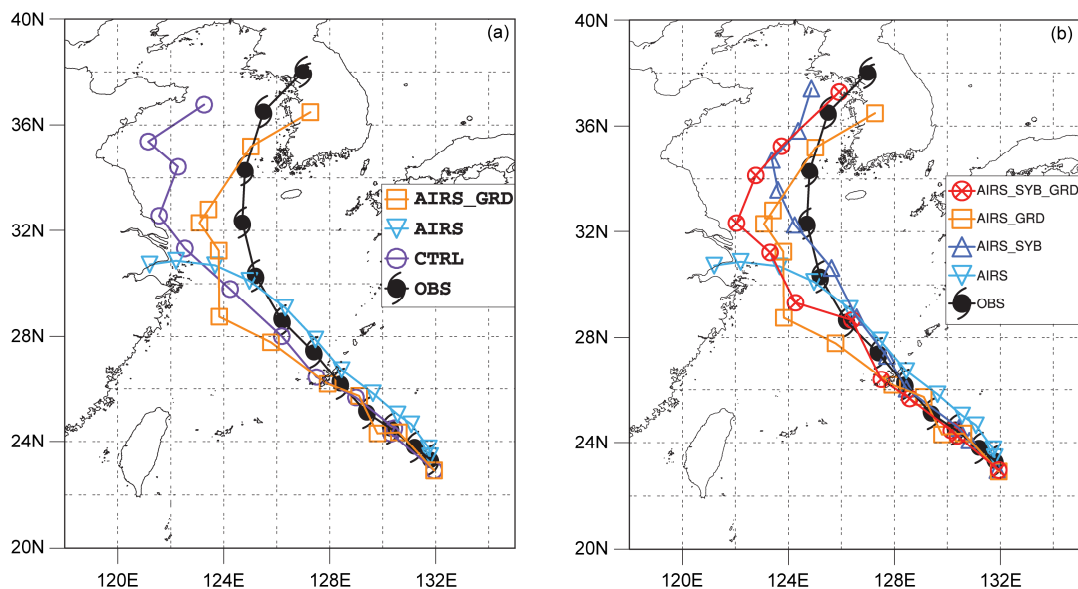


图 1 各试验台风模拟路径与 CMA-STI 西北太平洋热带气旋最佳路径 (OBS) 数据集: (a) 不考虑系统性偏差; (b) 考虑系统性偏差

Fig. 1 Tracks of typhoon from experiments and best track (OBS) provided by CMA-STI (China Meteorological Administration-Shanghai Typhoon Institute): (a) Not considering the systematic errors; (b) considering the systematic errors. The CTRL experiment indicates that numerical simulation is performed directly without variational assimilation method. The AIRS experiment indicates that numerical simulation is performed with conventional variational assimilation method, and data is not superimposed system bias. The AIRS_GRD experiment indicates that numerical simulation is performed with gradient information assimilation method, and data is not superimposed system bias. The AIRS_SYB experiment indicates that numerical simulation is performed with conventional variational assimilation method, and data is superimposed system bias. The AIRS_SYB_GRD experiment indicates that numerical simulation is performed with gradient information assimilation method, and data is superimposed system bias.

刻第 12~24 小时及第 54~66 小时路径误差较大,而且不如没有进行同化的 CTRL 试验。从图 2b 中可以看出,除 AIRS 试验外的其他三种方案的路径模拟偏差都比较接近,四种方案中 AIRS 试验的路

径偏差较大,特别是在 48 小时以后误差相比于其他方案明显加大。

图 3 是各组试验对比的路径改善比(两组试验模拟出的结果与实况间路径距离差值的差值)。从

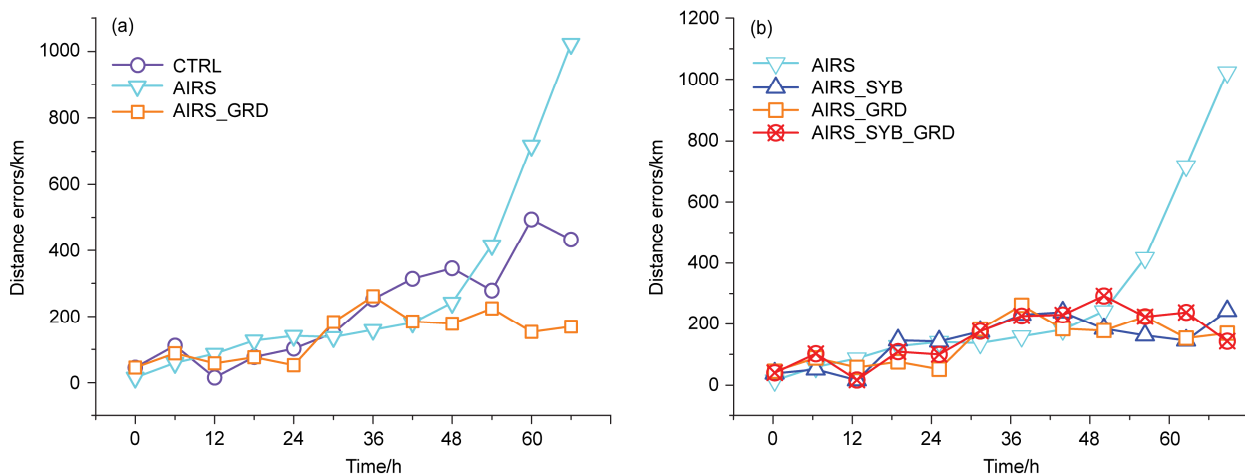


图 2 各试验 66 小时模拟的台风路径与实况偏差情况(单位: km): (a) 不考虑系统性偏差; (b) 考虑系统性偏差

Fig. 2 Track errors (units: km) of typhoon during the 66-h simulation by each experiment: (a) Not considering the systematic errors; (b) considering the systematic errors

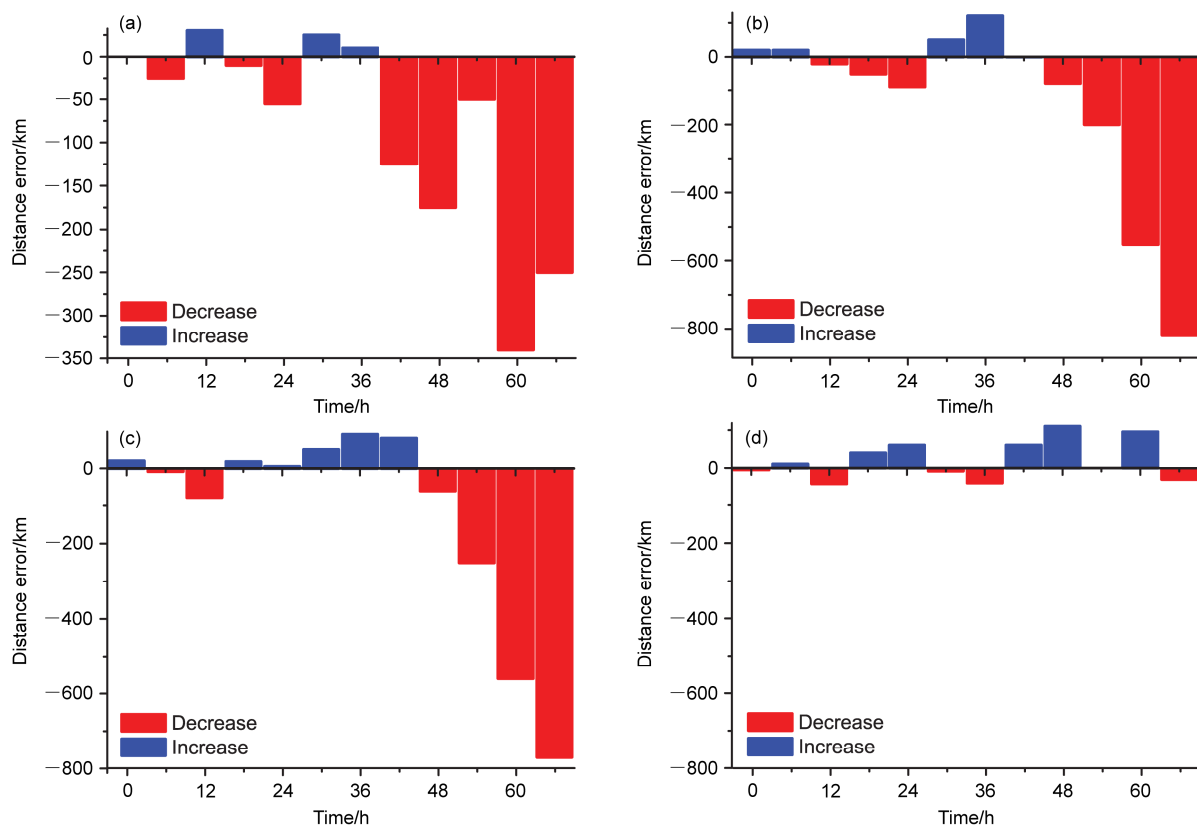


图 3 台风路径改善比(单位: km): (a) AIRS_GRD 试验与 CTRL 试验; (b) AIRS_GRD 试验与 AIRS 试验; (c) AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验

Fig. 3 Improvement of simulated typhoon track (the difference between the result of the one experiment compared to the actual result and the result of the other experiment compared to the actual result, units: km): (a) Expts (experiments) AIRS_GRD—CTRL; (b) Expts AIRS_GRD—AIRS; (c) Expts AIRS_SYB—AIRS; (d) Expts AIRS_SYB_GRD—AIRS_GRD

图 3a 与图 3b 中可以看出, AIRS_GRD 试验所模拟出的台风路径在 CTRL 试验及 AIRS 试验的基础上都有所改进, 而且改进的幅度与时次明显多于不改进的幅度与时次。另外, AIRS_GRD 试验在台风数值模拟时间达到 48 小时以后的改进尤为明显。从图 3c 中可以看出, 对比 AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验, 在减去一个系统性偏差 1 K 以后, AIRS_SYB 试验在后期的数值模拟中得到很大的改善。从图 3d 中可以看出, 通过对比 AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验, 在减去一个系统性偏差 1 K 以后, 路径的模拟结果中改进与不改进的时次与幅度相差不大, 与图 3c 中 AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验中的改善比幅度相比, 基本可忽略不计。综合以上分析可以得出, 在人为加入一个系统性偏差后, 常规同化方法得到一定程度的改进, 而对于梯度信息同化方法来说, 加入系统性误差后对于同化结果的影响较常规同化的结果可忽略不计。从这一点可以看出, 对于常规同化方法, 如果同化的观测资料存在系统性偏差, 对数值模拟的结果会产生较大的影响, 在对这部分系统性偏差进行订正后, 模拟结果会有明显的改善, 而对于梯度信息同化方法, 即使观测资料存在系统性偏差, 对数值模拟的影响也基本可忽略不计。

4.3 初始场的改进

图 4 是初始时刻各试验 500 hPa 风场偏差分布图。图 4a 与图 4b 主要反映梯度信息同化方法对风场的影响。从图 4a 中可以看出, 在 CTRL 试验的基础上通过常规同化方法同化 AIRS 资料以后, 台风所在区域有一个西北风的风场偏差, 而结合台风路径移动方向为东南—西北走向, 在一定程度上影响台风的前进, 这就使得在后期 AIRS 试验所模拟的台风路径比 CTRL 试验的移动慢, 导致路径轨迹偏差较大。从图 4b 可以看出, AIRS_GRD 试验相比于 AIRS 试验在台风所在区域有一个东南风的风场偏差, 结合台风走向, 这样的风速偏差有利于增加台风的移动速度。综合以上分析可以看出, 常规的 AIRS 资料同化方法在台风“圆规”的数值模拟中反而降低了台风路径模拟的准确度, 而同化 AIRS 资料的梯度信息对于台风“圆规”的路径模拟有一定的改进作用。图 4c 与图 4d 主要反映观测资料系统性偏差对风场的影响。从图 4c 中可以看出, AIRS_SYB 试验相比于 AIRS 试验在台风区域有一个东南风的风场偏差, 结合台风移动路径走向可以

看出这种风场偏差有利于加快台风的移动速度, 在台风“圆规”的路径模拟中 AIRS_SYB 试验的模拟结果明显优于 AIRS 试验, 而 AIRS 试验路径模拟偏差较大的原因就在于前期移动速度相比于其他方案较慢。从图 4d 中可以看出, AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验的风场偏差相比于 AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验的风场偏差基本可以忽略不计, 对于台风的移动路径也基本没有很大的影响。综合以上分析可以看出, 使用常规同化方法同化 AIRS 资料时, 在观测亮温值里加入一个系统性偏差, 对于初始场风场有明显改进, 而在梯度信息同化方法中, 加入一个系统性偏差对于初始场风场的影响几乎可以忽略不计。

图 5 是初始时刻各试验 850 hPa 相对湿度偏差分布图。图 5a 与图 5b 主要反映梯度信息同化方法对相对湿度场的影响。从图 5a 中可以看出, 在 CTRL 试验的基础上同化 AIRS 资料后, 相对湿度有一定程度的降低, 幅度为 20% 左右。从图 5b 中可以看出, AIRS_GRD 方案在 AIRS 方案上对于相对湿度的提升比较大, 部分区域增幅达到 45% 以上。图 5c 与图 5d 主要反映观测资料系统性偏差对相对湿度场的影响。从图 5c 中可以看出 AIRS_SYB 试验相比于 AIRS 试验在 850 hPa 相对湿度上有一定的提升, 提升幅度大部分处于 10%~20% 之间, 从图 5d 中可以看出, AIRS_SYB_GRD 试验相比于 AIRS_GRD 试验在 850 hPa 相对湿度上有一定的降低, 降低幅度大部分处于 5% 以下, 相比于图 5c 可以忽略不计。综合以上分析可以看出, 使用常规同化方法同化 AIRS 资料时, 在观测亮温值里加入一个系统性偏差, 对于相对湿度的影响比较大, 而在梯度信息同化方法中, 加入一个系统性偏差对于相对湿度的影响几乎可以忽略不计。

图 6 是初始时刻 23.1°N 垂直剖面温度偏差分布图。从图 6a 中可以看出, 在同化 AIRS 资料以后, 在 300 hPa 左右出现两个偏差正值中心, 分别位于 (23.1°N, 129°E)、(23.1°N, 146°E), 最大值分别在 2 K 与 4 K 以上。说明在同化 AIRS 资料以后, 在 300 hPa 高度上, 在台风中心附近出现了暖核, 暖核能一定程度上代表台风强度, 也就表明在同化 AIRS 资料后台风强度在 300 hPa 高度上得到了一定程度的增强, 另外, 在与高空暖核对应的 900 hPa 低层区域, 同样有两个偏差正值中心, 说明在低层台风的强度也有所增强。从图 6b 与图 6c 中可以看

出, AIRS_GRD 试验与 AIRS_SYB 试验中温度偏差基本都为负值, 说明 AIRS_GRD 试验与 AIRS_SYB 试验在 AIRS 试验的基础上暖核有一定的减弱, 台风强度也相应减弱。结合台风路径数值模拟可以发现, AIRS 试验所模拟的台风路径较差的原因就在于台风移动较为缓慢, 台风运动速度在很大程度上取决于台风的强度, 台风越强, 移动越慢, 而在 AIRS_GRD 试验与 AIRS_SYB 试验中, 由于初始场中台风强度在 AIRS 试验的基础上有所降低, 所模

拟的台风移动速速也就相应变快, 从而导致了整个台风路径模拟总体上得到改善。从图 6d 中可以看出 AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验的温度偏差数值较小, 总体上相比于图 6c 中的温度偏差值可忽略不计, 可以看出, 使用常规同化方法同化 AIRS 资料时, 在观测亮温值里加入一个系统性偏差, 对于初始场温度偏差有明显改进, 而在梯度信息同化方法中, 加入一个系统性偏差对于初始场温度偏差的影响几乎可以忽略不计。

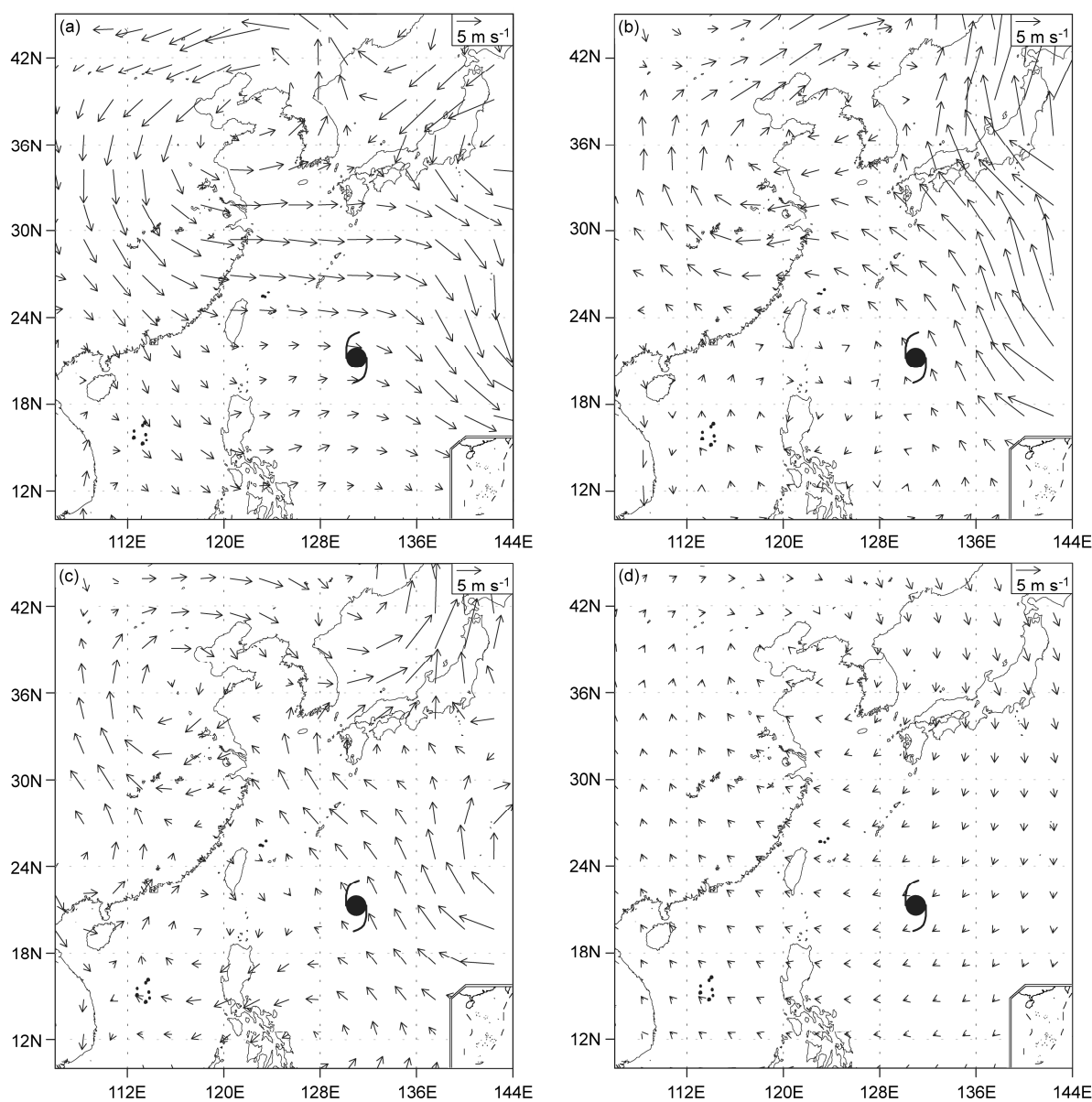


图4 初始时刻各试验 500 hPa 风场偏差分布 (单位: m s^{-1}): (a) AIRS 试验与 CTRL 试验; (b) AIRS_GRD 试验与 AIRS 试验; (c) AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验

Fig. 4 500-hPa wind field deviation (units: m s^{-1}) at the initial time: (a) Expts AIRS—CTRL; (b) Expts AIRS_GRD—AIRS; (c) Expts AIRS_SYB—AIRS; (d) Expts AIRS_SYB_GRD—AIRS_GRD

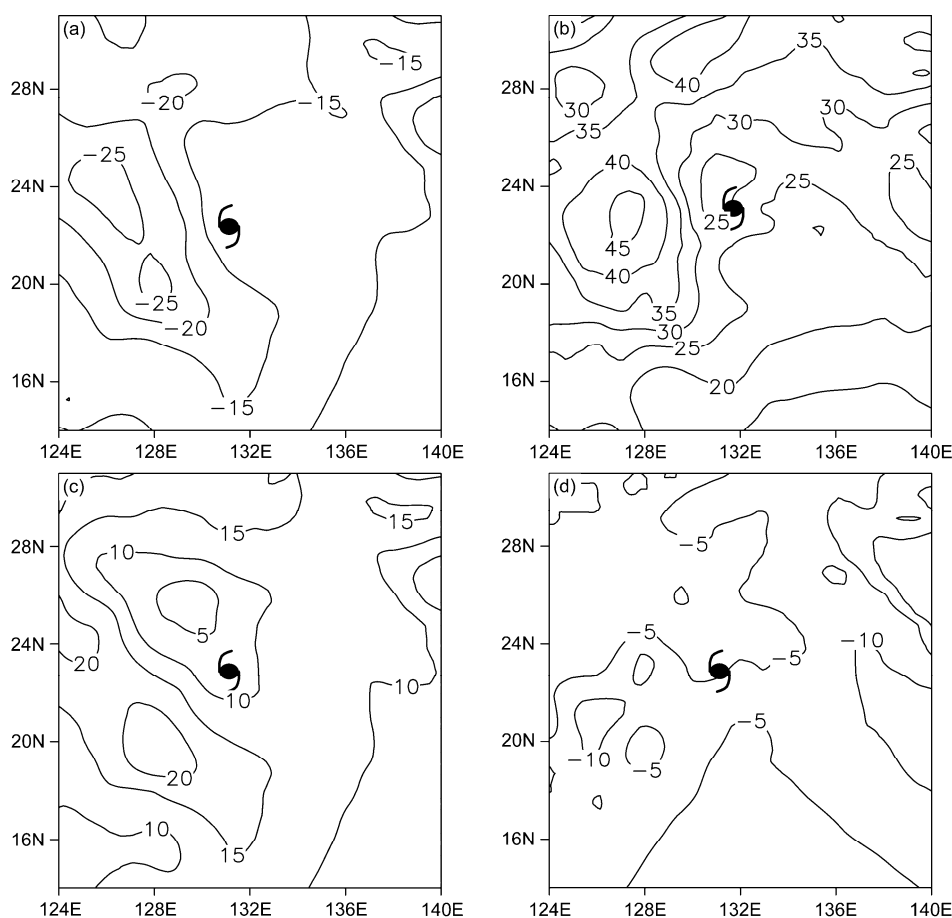


图5 初始时刻各试验 850 hPa 相对湿度偏差分布 (单位: %): (a) AIRS 试验与 CTRL 试验; (b) AIRS_GRD 试验与 AIRS 试验; (c) AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验

Fig. 5 Bias of 850-hPa relative humidity (units: %) at the initial time: (a) Expts AIRS-CTRL; (b) Expts AIRS_GRD-AIRS; (c) Expts AIRS_SYB-AIRS; (d) Expts AIRS_SYB_GRD-AIRS_GRD

图 7 是初始时刻 23.1°N 垂直剖面位势高度偏差分布图。从图 7a 中可以看出, AIRS 试验中在同化 AIRS 资料以后, 低层 800 hPa 以下区域出现了负的位势高度偏差, 位势高度偏差为负值说明同化 AIRS 资料以后低层位势高度降低, 这就使得低层的台风强度增强, 而在 200 hPa 以上区域位势高度偏差出现两个正值中心, 说明在该区域同化 AIRS 资料后位势高度增加, 所对应的台风强度降低, 不过考虑到台风在垂直方向的结构分布, 通常在 200 hPa 以上区域位势高度的值对于台风强度的影响较小。从图 7b 与图 7c 中可以看出, AIRS_GRD 试验与 AIRS_SYB 试验中位势高度偏差在 600 hPa 以下区域都为正值, 说明相比于常规的资料同化方法, 梯度信息同化与加上一定系统性偏差的常规资料同化方法在该区域的位势高度有所增加, 所对应区

域的台风强度相对降低了, 而在高层 200 hPa 以上区域都为负值, 说明相比于常规的资料同化方法, 梯度信息同化与加上一定系统性偏差的常规资料同化方法在该区域的位势高度有所降低, 所对应的台风强度有一定程度的增强, 结合台风路径数值模拟可以发现, AIRS 试验所模拟的台风路径较差的原因就在于台风移动较为缓慢, 台风运动速度在很大程度上取决于台风的强度, 台风越强, 移动越慢, 而在 AIRS_GRD 试验与 AIRS_SYB 试验中, 由于初始场中台风强度在 AIRS 试验的基础上有所降低, 所模拟的台风移动速度就相应变快, 从而导致了整个台风路径模拟总体上得到改善。从图 7d 中可以看出 AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验的温度偏差数值较小, 总体上相比于图 7c 中的温度偏差值可忽略不计, 可以看出, 使用常规同化方

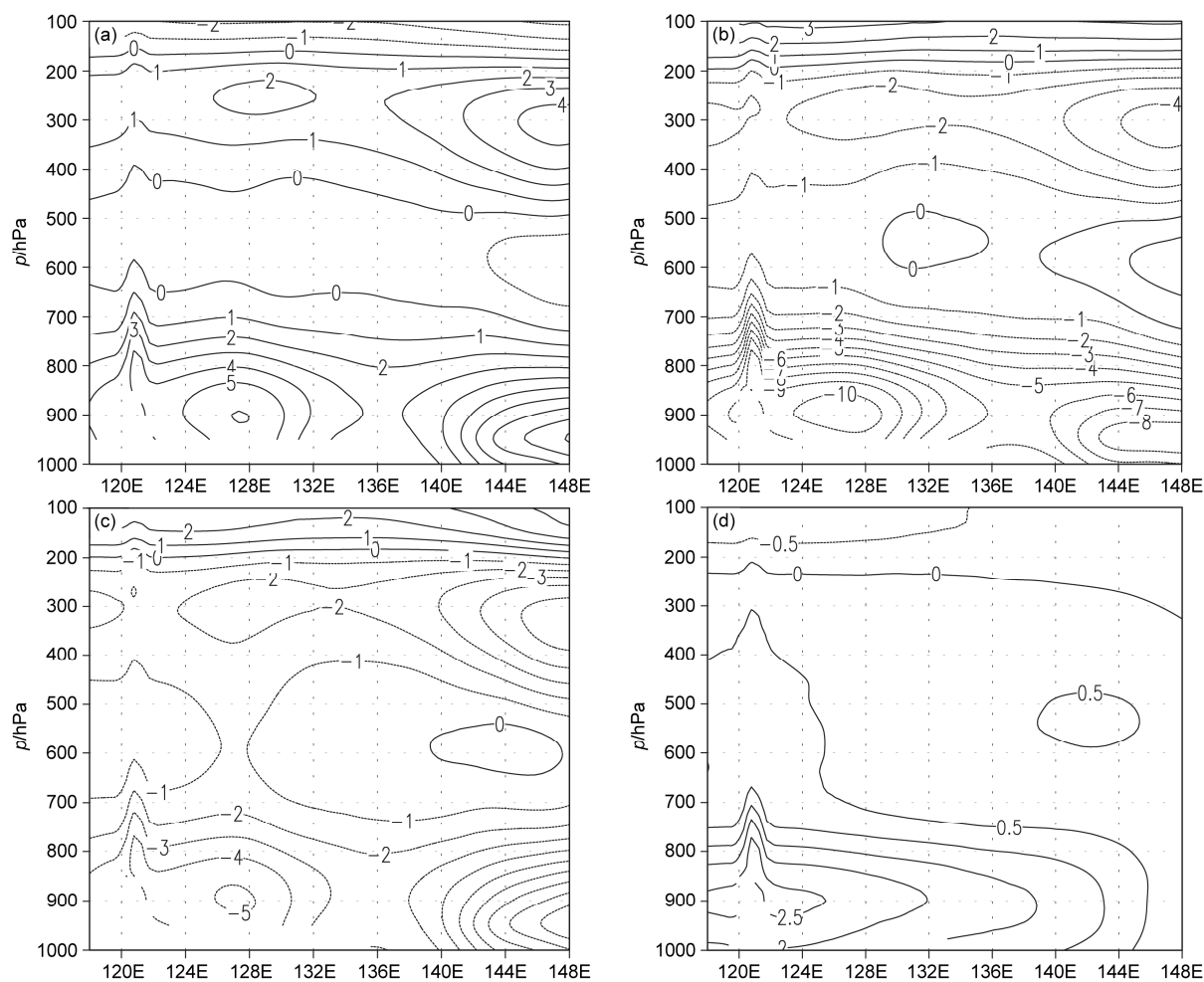


图6 初始时刻各试验垂直剖面温度偏差分布(单位: K): (a) AIRS 试验与 CTRL 试验; (b) AIRS_GRD 试验与 AIRS 试验; (c) AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验

Fig. 6 Vertical cross sections of temperature biases (units: K) at the initial time: (a) Expts AIRS—CTRL; (b) AIRS_GRD—AIRS; (c) Expts AIRS_SYB—AIRS; (d) Expts AIRS_SYB_GRD—AIRS_GRD

法同化 AIRS 资料时,在观测亮温值里加入一个系统性偏差,对于初始场位势高度偏差有明显改进,而在梯度信息同化方法中,加入一个系统性偏差对于初始场位势高度偏差的影响几乎可以忽略不计。

4.4 同化诊断分析

图8是 AIRS 资料 186 通道、196 通道、206 通道、216 通道的观测场与背景场之间的差值(OMB)分布图,为了避免偶然性表示出平均水平,每隔 10 个通道选取一组值进行分析,其中灰色区域为模式剔除掉的视场点区域。郭杨等(2015)在研究微波湿温探测仪的定标时指出,借助于正演辐射传输模式计算得到的 OMB 偏差分析结果可以在一定程度上反映仪器整体定标情况,而其中系统性误差占了很大的比重。从图 8a 中可以看出, AIRS 试验亮温

偏差大部分为正值,且在 0.75 以上,而图 8b 中的 AIRS_SYB 试验是在 AIRS 试验的基础上将背景场减去了一个 1 K 的系统性偏差,其亮温偏差值明显减小。图 9 分别是第 186 通道、196 通道、206 通道、216 通道背景场与观测场亮温偏差散点分布图,图 9a 中的散点大部分位于对角线下,偏向于 OBS 场的亮温值,而图 9b 中能明显看出加上一个系统性偏差后,亮温的散点分布更加靠近对角线,说明在加上一个 -1 K 的系统性偏差后,背景场与观测场之间的物理量偏差减小,观测场中的系统性偏差得到一定程度上的订正,这一点从偏差均值的减小也能看出。背景场亮温是由模式变量通过辐射传输模式所正演得到的亮温值,观测场亮温值为卫星观测资料所得到的亮温值,如果不存在系统性偏差只存

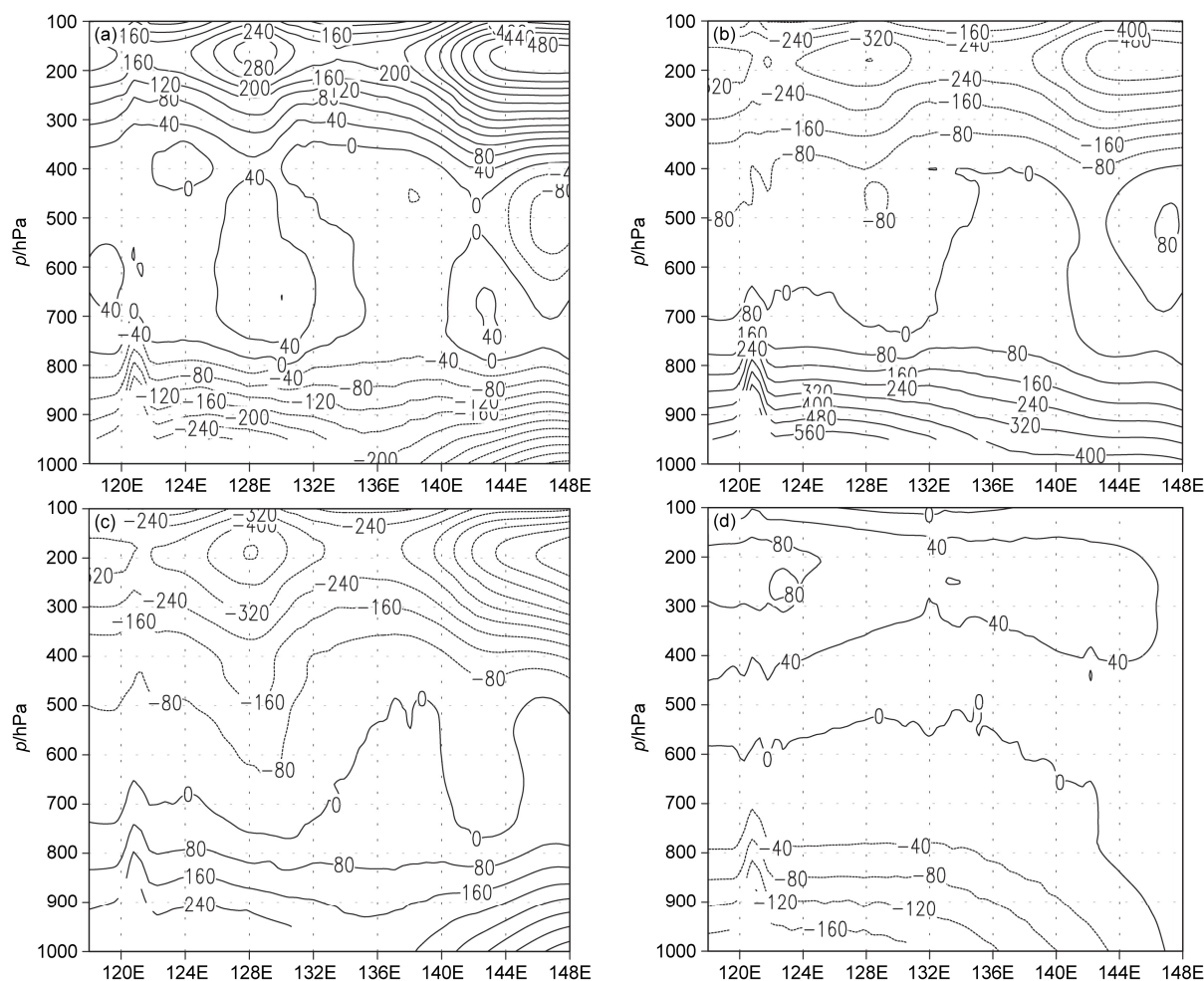


图7 初始时刻各试验垂直剖面位势高度偏差分布(单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$): (a) AIRS 试验与 CTRL 试验; (b) AIRS_GRD 试验与 AIRS 试验; (c) AIRS_SYB 试验与 AIRS 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验与 AIRS_GRD 试验

Fig. 7 Vertical cross sections of geopotential height biases (units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) at the initial time: (a) Expts AIRS—CTRL; (b) Expts AIRS_GRD—AIRS; (c) Expts AIRS_SYB—AIRS; (d) Expts AIRS_SYB_GRD—AIRS_GRD

在随机性误差的情况下, OMB 的偏差均值应该接近于 0。

图 10 是各组试验观测场与分析场的差值 (OMA) 与 OMB 对比图。四种试验中同化后的各通道 OMA 值均小于 OMB 值, 说明经过同化, 分析场在背景场的基础上更加靠近观测值, 达到了同化效果。另外, 传统的资料同化方法 OMA 相比于 OMB 的值下降比较明显 (图 10a、c), 而梯度信息同化下降幅度比较小 (图 10b、d)。出现这种现象的原因在于梯度信息同化主要是同化观测场的趋势, 而并非物理量本身, 导致 OMA 值的下降并不是很明显。传统的同化方法 OMA 的值虽然下降比较明显, 但观测场的值也存在很大的系统性偏差及随机性偏差, 可信度得不到保证, 在后期的数值模

拟结果中不一定能得到很好的改善。

5 结论

由于海面上观测资料的不足, 随着卫星探测技术的发展, 卫星资料同化对于台风预报的作用越来越明显。但是考虑到探测仪器的自身误差及复杂天气环境, 卫星资料的可信度及利用率并不高, 并且在一些特殊的台风个例模拟中还可能起着负作用, 这其中大部分原因归咎于卫星亮温资料的系统性偏差。本文利用 WRF 模式及 WRFDA 同化 AIRS 资料对台风“圆规”进行了数值模拟, 得出以下结论:

(1) 在 WRF 模式中, 通过对台风“圆规”进行数值模拟, 发现梯度信息同化方法能改善台风风

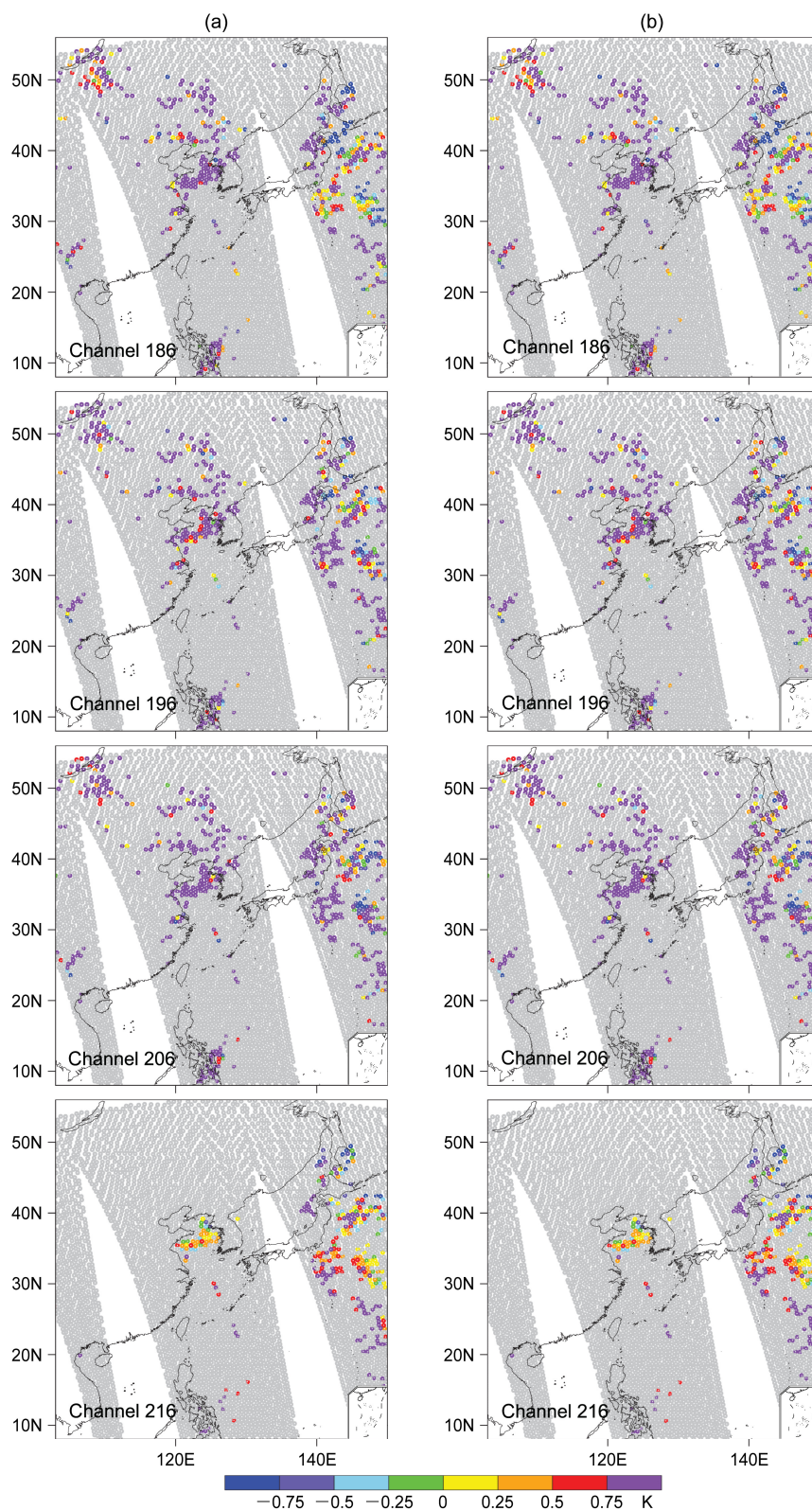


图 8 (a) AIRS 试验与 (b) AIRS_SYB 试验第 186、196、206、216 通道的背景场与观测场的差值 (OMB) 分布 (单位: K)。灰色区域为模式剔除掉的视场点区域

Fig. 8 The OMB (Observation field Minus Background field) distributions (units: K) at channels 186, 196, 206, 216 in experiments (a) AIRS and (b) AIRS_SYB. The gray areas represent view fields removed by quality control

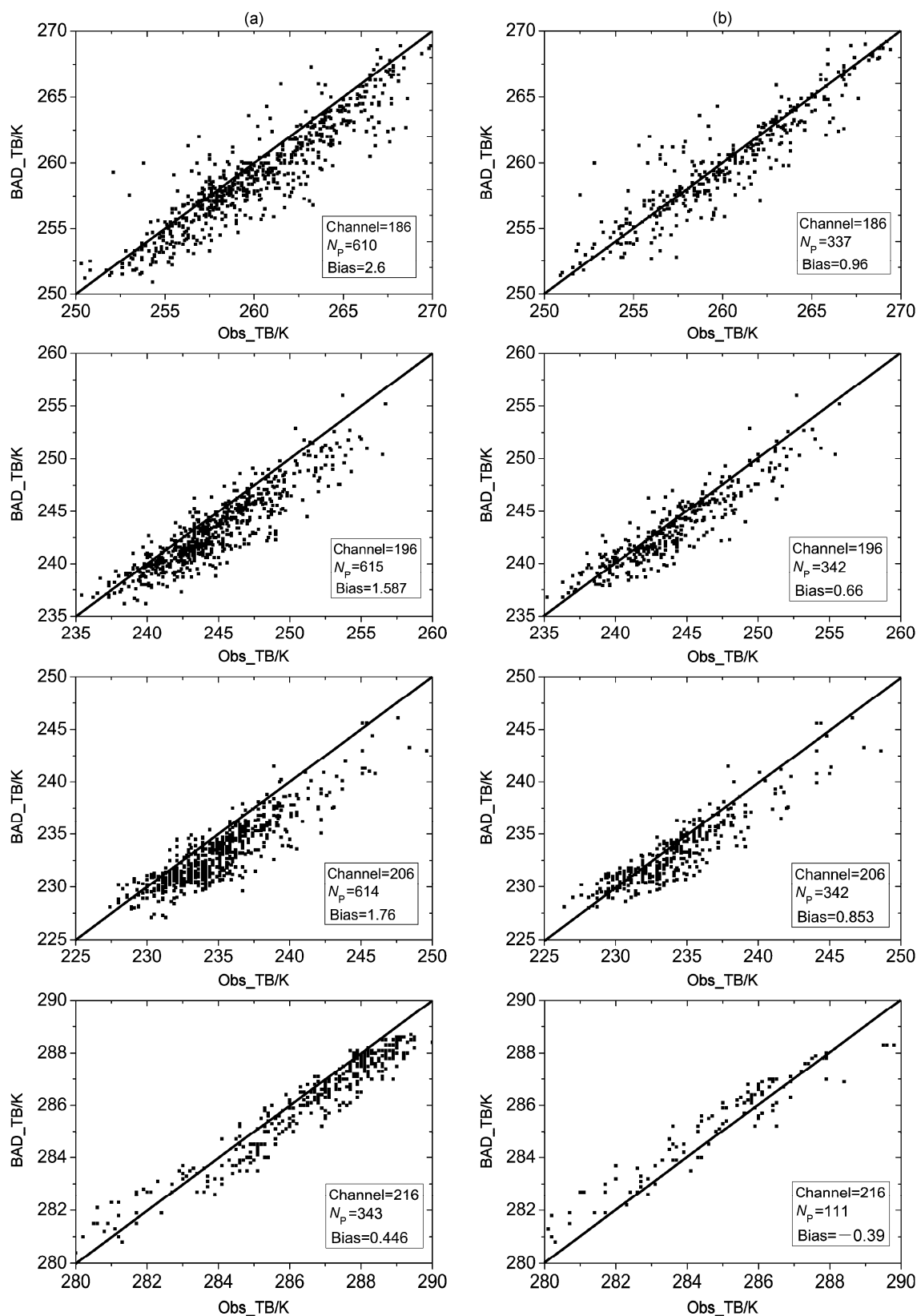


图9 第186、196、206、216通道背景场(BAD_TB)与观测场亮温(Obs_TB)散点分布(单位: K): (a) AIRS试验; (b) AIRS_SYB试验。 N_p 表示同化的视场点的个数

Fig. 9 Scatter plots of brightness temperature (TB, units: K) at channels 186, 196, 206, 216 between background field (BAD_TB) and observation field (Obs_TB): (a) AIRS; (b) AIRS_SYB. N_p represents the number of assimilated view field

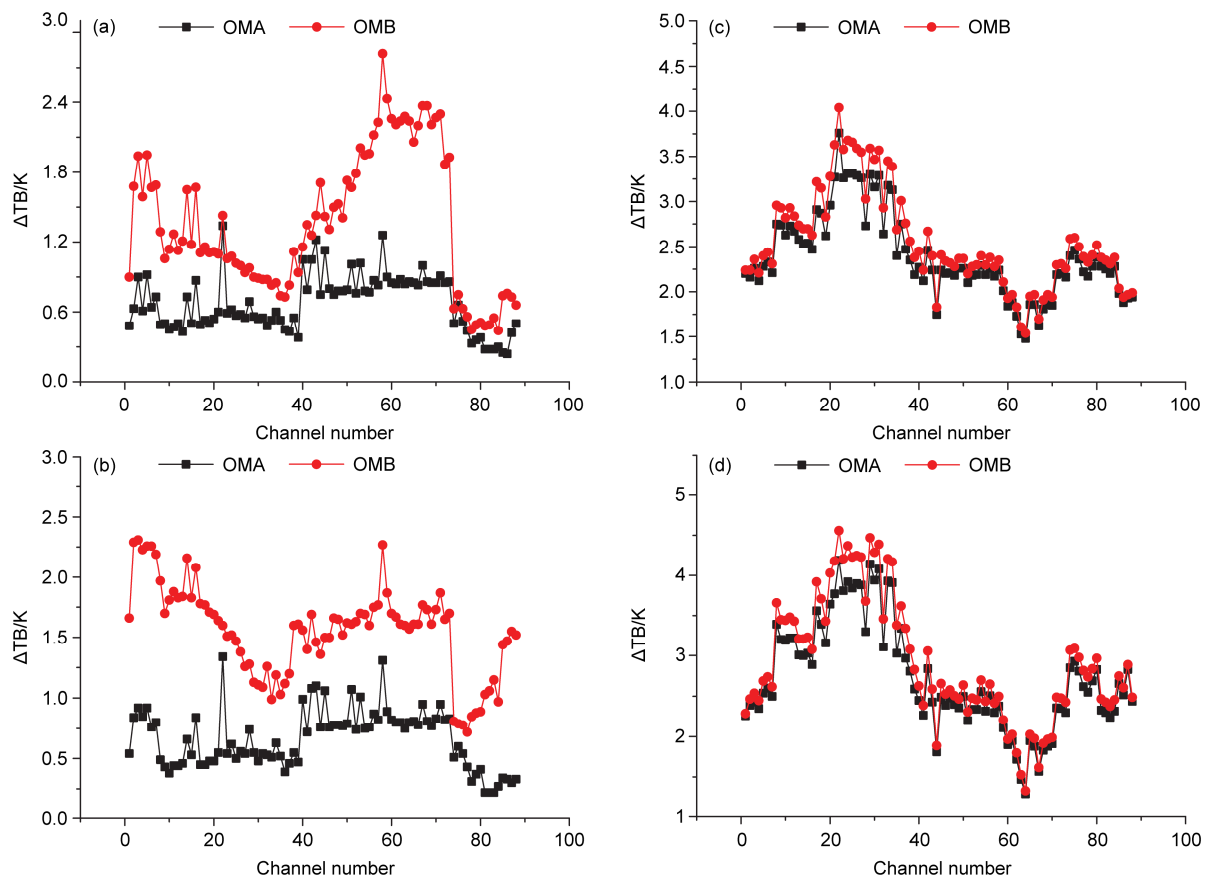


图 10 各组试验 OMA (观测场与分析场的差值) 与 OMB (观测场与背景场之间的差值) 亮温对比 (单位: K): (a) AIRS 试验; (b) AIRS_GRD 试验; (c) AIRS_SYB 试验; (d) AIRS_SYB_GRD 试验

Fig. 10 Comparison of TB (units: K) between OMA (Observation field Minus Analysis field) and OMB (Observation field Minus Background field): (a) AIRS; (b) AIRS_GRD; (c) AIRS_SYB; (d) AIRS_SYB_GRD

场、相对湿度场、垂直剖面温度偏差及垂直剖面位势高度偏差, 对台风路径的模拟有一定程度的改进。

(2) 在台风“圆规”的数值模拟中, 当亮温资料的系统性偏差减小时, 背景场与观测场的偏差均值也在减小, 此时所模拟的台风路径有明显的改善, 可以看出, 系统性偏差的影响在卫星资料同化中不可忽视。

(3) 在 WRFDA 模块对 AIRS 资料的同化试验中, 观测亮温的系统性偏差对于梯度信息同化方法的影响较小, 与常规的同化方法对比起来基本上可以忽略不计, 从这点来看, 梯度信息同化方法能较好的订正观测资料中的系统性偏差。

(4) 在 WRFDA 同化诊断分析中, 从各通道 OMB 的散点分布图可以看出, 系统性偏差是确实存在的, 且对于数值模拟的影响不容忽视, 另外,

梯度信息同化方法的 OMA 相比于 OMB 的下降幅度没有常规的同化方法明显, 但梯度信息同化方法的侧重点在于观测场趋势的同化, 并且对于可信度不高的观测资料仍然适用, 大大增加了卫星资料的利用率。

本文初步研究了卫星资料梯度信息同化方法对于台风数值模拟的积极影响, 下一步工作主要在于围绕垂直方向的梯度信息提取与同化及时间维度的梯度信息提取与同化, 并进行批量化的台风数值模拟试验, 以便能更加详尽地研究梯度信息同化方法在台风数值模拟上的意义。

参考文献 (References)

- 鲍艳松, 王晓丽, 闵锦忠, 等. 2014. 风云三号卫星微波大气温度探测仪资料偏差订正方法研究 [J]. 热带气象学报, 30 (1): 145–152. Bao Yansong, Wang Xiaoli, Min Jinzhong, et al. 2014. A radiance-bias

- correction scheme for Fengyun 3A microwave temperature sounding for radiance assimilation [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 30 (1): 145–152, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.01.016.
- 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 2008. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展 [J]. *气象科技*, 36 (1): 1–7. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. 2008. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 36 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.001.
- Eyre J R. 1992. A Bias Correction Scheme for Simulated TOVS Brightness Temperatures [M]. Technical Memorandum, UK: ECMWF, 28pp.
- 郭杨, 卢乃锰, 漆成莉, 等. 2015. 风云三号 C 星微波湿温探测仪的定标和验证 [J]. *地球物理学报*, 58 (1): 20–31. Guo Yang, Lu Naimeng, Qi Chengli, et al. 2015. Calibration and validation of microwave humidity and temperature sounder on board FY-3C satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58 (1): 20–31, doi:10.6038/cjg20150103.
- Harris B A, Kelly G. 2001. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127 (574): 1453–1468, doi:10.1002/qj.49712757418.
- 李小青, 杨虎, 游然, 等. 2012. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构 [J]. *地球物理学报*, 55 (9): 2843–2853. Li Xiaqing, Yang Hu, You Ran, et al. 2012. Remote sensing typhoon Songda's rainfall structure based on microwave radiation imager of FY-3B satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55 (9): 2843–2853, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.004.
- 刘志权, 张凤英, 吴雪宝, 等. 2007. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 113–123. Liu Zhiquan, Zhang Fengying, Wu Xuebao, et al. 2007. A regional ATOVS radiance-bias correction scheme for radiance assimilation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (1): 113–123, doi:10.11676/qxxb2007.011.
- 王金成, 李建平, 丑纪范. 2008. 两种四维奇异值分解同化方法的比较及误差分析 [J]. *大气科学*, 32 (2): 277–288. Wang Jincheng, Li Jianping, Chou Jifan. 2008. Comparison and error analysis of two 4-dimensional singular value decomposition data assimilation schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 277–288, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.07.
- Wang X, Li G, Zhang H, et al. 2011. The GRAPES variational bias correction scheme and associated preliminary experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (1): 51–62, doi:10.1007/s13351-011-0004-0.
- 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* (in Chinese), 37 (1): 54–64, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11234.
- 王云峰, 张晓辉, 李运飞, 等. 2015. 基于空间梯度信息的质量控制方法在红外高光谱 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* (in Chinese), 39 (2): 303–314, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13338.
- 严卫, 韩丁, 周小珂, 等. 2013. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结构特征 [J]. *地球物理学报*, 56 (6): 1809–1824. Yan Wei, Han Ding, Zhou Xiaoke, et al. 2013. Analysing the structure characteristics of tropical cyclones based on CloudSat satellite data [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56 (6): 1809–1824, doi:10.6038/cjg20130603.