

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13338. 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.

# 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

王云峰<sup>1</sup> 张晓辉<sup>1</sup> 李运飞<sup>2</sup> 韩月琪<sup>1</sup> 顾成明<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

<sup>2</sup> 65052 部队环境构设大队, 洮南 137101

**摘 要** 本文利用中尺度非静力 WRF (Weather Research Forecast, Version 3.4) 模式, 针对 1013 号“鲇鱼”台风个例, 通过对红外高光谱 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 资料经过基于空间梯度信息的质量控制之后同化进入模式, 来评估新的质量控制方法对同化效果的影响以及对台风数值模拟的改善情况。研究结果发现, 如果仅仅基于 WRFDA (WRF Data Assimilation system, Version 3.4) 模式自带的质量控制系统, 将会有部分梯度距平值明显较大超过阈值的资料被同化进入模式, 而这些可能受到“污染”且误差较大的资料同化进入模式必将会导致同化结果有较大误差, 影响分析结果的质量。而对 AIRS 资料经过基于空间梯度信息质量控制之后再同化进入模式, 确实可将梯度距平值大于阈值的“坏点”剔除掉, 从而使初始场的描述更加准确, 台风路径的模拟精度在一定程度上得到提高。综上可知, 基于空间梯度信息的质量控制方法整体上对改善同化效果有较好的正效应, 对台风的数值模拟也起到一定的促进作用。

**关键词** AIRS 资料 梯度信息 质量控制 台风

文章编号 1006-9895(2015)02-0303-12

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13338

## Application of Quality Control Method Based on Spatial Gradient Information in Assimilation of Infrared High Spectrum Data AIRS

WANG Yunfeng<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohui<sup>1</sup>, LI Yunfei<sup>2</sup>, HAN Yueqi<sup>1</sup>, and GU Chengming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

<sup>2</sup> Surroundings Building Team of 65052 PLA Troops, Taonan 137101

**Abstract** In this study, using nonhydrostatic mesoscale Weather Research Forecast (WRF) Version 3.4 model, a new quality control (QC) method is introduced that uses infrared high spectrum Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) data based on spatial gradient information. To access the effect of the new QC method on numerical typhoon simulation, assimilation and simulation experiments were performed using Typhoon Megi (2010). The results show that if using only the previous QC method provided by the WRF data assimilation system, some data points with gradient anomalies exceeding the threshold value are assimilated into the model. These data points may be contaminated by clouds or misidentified and can be regarded as “bad” points. When such bad data are assimilated into the numerical model, large errors can be brought into the model, which can significantly affect the quality of the initial analysis field. In the new QC method, gradient information checking should be done first to find and eliminate the bad data points. The new method

收稿日期 2013-12-24; 网络预出版日期 2014-08-07

资助项目 国际科技合作项目 2010DFA24650, 国家自然科学基金项目 41375106、41230421、41105065、11271195, 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY201106004, 江苏省自然科学基金 BK20131065

作者简介 王云峰, 男, 1972 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资料同化及台风数值模拟的研究。E-mail: wangyf@mail.iap.ac.cn

results in a more accurate initial field and improvement in the simulated typhoon tracks. Therefore, the new QC method based on spatial gradient information has a positive effect on improving assimilation results and plays an important role in the numerical simulation.

**Keywords** AIRS data, Gradient information, Quality control, Typhoon

## 1 引言

2002年5月4日,美国地球观测系统(Earth Observation System, EOS)的第二颗卫星Aqua发射成功,其上搭载了先进的超高光谱分辨率红外大气垂直探测仪(AIRS),该资料从 $15\ \mu\text{m}$ 到 $3.7\ \mu\text{m}$ 光谱范围内共有2378个光谱通道,1200的光谱分辨率和全球覆盖能力使其可以观测到全球大气整体状态及其变化。它的垂直分辨率为1 km,星下点分辨率为13.5 km。AIRS开辟了卫星大气探测的新时代,它不但使大气探测的垂直分辨率以及反演精度上了一个台阶,还为其他高光谱卫星资料的处理和应用奠定了基础(刘辉等,2008;刘旸等,2013)。

对于红外高光谱资料的应用研究,国内外已经有很多的工作。官莉(2006)利用高光谱分辨率大气红外探测器AIRS观测辐射值,用特征向量统计法反演大气温度、湿度等垂直廓线的算法,采用亮度温度分类和扫描角分类回归后,减小了反演误差。占瑞芬和李建平(2008)对AIRS反演的水汽数据在青藏高原地区的可信度作了详细评估,结果表明无论是全年还是各季节,AIRS反演的水汽数据与探空实测数据是相当一致的。张水平(2009)引入信息容量的概念,给出了一种对高光谱大气探测资料所包含各种大气参数有效信息进行描述的方法;然后以信息容量为指标,设计了利用“逐次吸收法”进行通道选择的计算方案,结果表明,利用信息容量为指标,并按照“逐次吸收法”进行通道选择是可行的。国内外对于红外高光谱AIRS资料的研究主要集中在反演方面(Fourrié and Thépaut, 2002; 蒋德明, 2007; 官莉等, 2009),这样就不可避免地要将反演系统的误差累加到卫星产品上,并导致不可预见的预报误差。因此,如何合理地利用AIRS资料将其同化进入模式是一个值得研究的问题。卢冰等(2013)利用降维投影四维变分同化方法,针对一次江淮流域的暴雨过程同化AIRS反演的温度及湿度廓线,结果表明能够改进此次强降水过程的湿度场、高度场、高低层散度场。McNally et al. (2006)发展了一个能够对AIRS资料进行同化的系统,该系统具有云污染检测,偏差订正和观测

误差订正的功能,试验结果表明,在欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Center of Medium-Range Weather Forecasts)的同化系统中,同化AIRS资料可以改进分析和预报的质量。

关于AIRS资料的云检测方法,国内外的专家学者同样做了许多卓有成效的工作。Goldberg et al. (2003)提出了适用于高光谱大气红外探测器AIRS的NESDIS-Goldberg云检测方案,分别对陆地和海洋表面的视场进行云检测;McNally and Watts (2003)提出一种红外高光谱卫星资料云探测算法,该算法可以有效地甄别出被云污染的通道。Li et al. (2004)提出利用高水平分辨率红外成像仪资料对单视场部分区域有云的高光谱红外探测资料进行订正。在国内,官莉(2007)利用精确匹配落在AIRS单个视野中的高空间分辨率的MODIS云检测信息来客观确定AIRS云检测。陈靖等(2011)在NESDIS-Goldberg云检测方案基础之上,提出了适合GRAPES-3Dvar的云检测方案,分别对海洋表面(4个检验)和陆地表面(3个检验)的视场进行云检测,剔除受到云污染的视场。朱文刚等(2013)借鉴McNally and Watts (2003)的云检测方案,结合GRAPES-3Dvar系统和AIRS仪器特征,对AIRS各个视场通道进行云检测,剔除受到云污染通道,从而为有云资料在数值天气预报资料同化系统中的应用奠定基础。王云峰等(2014)对WRFDA模式中AIRS亮温资料质量控制方案进行了检验,结果表明:WRFDA模式中11条质量控制原则对红外高光谱AIRS亮温资料的同化效果影响很大,不同的质量控制原则对观测资料的剔除能力也是不一样的。

AIRS资料本身具有2378个通道,WRF同化模式用到的只有281个通道,经过模式自带的质量控制之后就只剩下88个通道。尽管只剩下88个通道,但是相比于其他卫星资料而言,这88个通道所包含的资料数也是非常庞大的。AIRS资料数目远大于其他卫星资料,垂直分辨率也远高于其他卫星资料,理论上AIRS资料的同化效果也会明显好于其他卫星资料。但是,实际的情况却并非期望的那样,AIRS资料的同化效果不甚理想。这可能的

原因是 WRFDA 模式自带的质量控制对 AIRS 资料的质量控制不够严格。比如由于云、降水粒子的辐射效应模拟困难以及复杂下垫面的辐射计算不精确，大量受云、降水及复杂下垫面等因素影响的卫星资料同化误差较大。为了充分发挥卫星探测资料作用，本文主要是基于空间梯度信息对 AIRS 资料进行质量控制（王云峰等，2013），剔除某些可能受到云污染或复杂下垫面造成的误差较大的资料，以保证同化分析效果。

本文选取 1013 号台风“鲇鱼”为研究个例，基于红外高光谱 AIRS 资料，在原有的质量控制方案之上，利用其空间梯度信息再次对 AIRS 资料进行质量控制，然后进行直接同化，来检验基于空间梯度信息的质量控制方法对同化结果的影响以及对台风数值模拟的改善情况。

## 2 “鲇鱼”台风简介

2010 年第 13 号热带风暴“鲇鱼”于 10 月 13 日 12 时（协调世界时，下同）在西北太平洋洋面上生成，14 日 21 时加强为台风，16 日晚上加强成为强台风，17 日 00 时加强为超强台风。18 日 04 时 25 分在菲律宾吕宋岛东北部沿海登陆，登陆后减弱为强台风，随后进入南海东部海面，强度再度加强为超强台风，21 日 01 时减弱为强台风。23 日 04 时 55 分在我国福建省漳浦县登陆，登陆时中心附近最大风力 13 级，38 m/s 的风速，最低气压 970 hPa。登陆后强度迅速减弱，至 10 月 23 日 18 时停止对其编号。“鲇鱼”是近二十年同期西北太平洋和南海上最强的台风。

## 3 模式、资料及目标函数

### 3.1 数值模式与资料

本文中使用的模式包括 WRF 模式，WRFDA 模式和 CRTM（Community Radiative Transfer Model, Version 2.0.2）模式。

本文所使用的 GFS（Global Forecast System）资料是由美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）全球预报系统的 6 小时预报资料，该资料水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直方向为 26 层，分别为 1000、975、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa。与 NCEP 再分析资料最大的

不同是，它是通过前 6 个小时的观测场预报得到的，并没有同化任何卫星资料，因此对于本文所要研究的卫星资料同化易于得到对比结果，效果更佳。

AIRS 传感器是一个高光谱分辨率的仪器，共包括 2378 个红外波段（ $3.7 \sim 15.4 \mu\text{m}$ ）和 4 个可见光波段（ $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ）。不过 NCEP 提供的数据集中，已经对通道进行了精简，只包括 281 个通道。而在 WRFDA 模式中，又进一步进行了精简，只包括 88 个通道，中心波数覆盖范围为  $711 \sim 2240 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 3.2 目标函数

针对 AIRS 资料同化试验的总体目标函数  $J$  可定义为

$$J = J_B + J_{\text{AIRS}}, \quad (1)$$

其中， $J_B$  表示模式大气  $X$  与背景场  $X_B$  的偏差； $J_{\text{AIRS}}$  表示模式模拟的 AIRS 亮温值与实际观测卫星资料之间的偏差。具体表达式如下：

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

$$J_{\text{AIRS}} = \frac{1}{2} \sum_i [H_{\text{AIRS}}(X) - T_B^{\text{obs}}]^T O_{\text{AIRS}}^{-1} [H_{\text{AIRS}}(X) - T_B^{\text{obs}}], \quad (3)$$

其中，上标“T”表示转置，上标“-1”表示求逆运算， $B$  表示背景误差协方差矩阵，符号“ $\sum$ ”表示求和，下标符号“ $i$ ”表示同一时次不同的空间观测点， $H_{\text{AIRS}}$  表示利用 CRTM 模式正演计算 AIRS 亮温值的观测算子， $T_B^{\text{obs}}$  代表实际观测的卫星亮温值， $O_{\text{AIRS}}$  表示 AIRS 资料的误差协方差矩阵。

## 4 基于空间梯度信息的质量控制方法

### 4.1 资料预处理

根据下面二个方面的要求对 AIRS 资料进行筛选：

一是根据研究区域的大小，对卫星观测资料进行筛选。只有位于研究区域范围内，且与侧边界有一定距离的卫星观测资料才能保留，对于位于研究区域内处于侧边界附近的卫星观测资料不保留。

二是对于卫星亮温值进行时间连续性检验和空间连续性检验，同时进行物理量极限性检验，亮温的极限值为  $150 \sim 450 \text{ K}$  之间，对于不合理的卫星资料完全剔除。

### 4.2 空间梯度信息提取

卫星资料的梯度信息，严格来说，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。

水平方向梯度信息的提取方法是将卫星资料中相邻或相近两条卫星廓线之间的相同通道的亮温差值定义为一个新的观测资料，这个资料含有的信息就是一种类型的卫星资料水平方向梯度信息。在卫星扫描过程中，对 AIRS 资料来说，水平方向上，一根扫描线上有 90 个扫描点，假设某个扫描点某一通道亮温为  $T_1$ ，另外一个相邻的扫描点相同通道亮温为  $T_2$ ，那么可以定义新的观测资料为： $T = T_1 - T_2$ 。这就是最简单的一种水平方向梯度信息的表达方法，实际上的组合方式可以更加复杂，甚至可以加入权重系数，并且最后要根据同化效果的统计来确定最佳的提取方式。本文目前用的是最简单的方法。

卫星亮温资料的水平梯度信息，可以分成沿轨道方向和沿扫描线方向两种类别进行提取。对于沿轨道方向，采用对相邻两根扫描线上的具有相同扫描点数的两个点进行梯度求算，并根据求算的梯度大小进行分析和统计，得到临界的梯度值；对于沿扫描线方向，先要对每个扫描点扣除一个平均值（这个平均值是通过对该轨道卫星资料中所有相同扫描点的亮温值进行平均得到的），然后再沿扫描线方向求算梯度，并根据求算的梯度大小进行分析和统计，得到这种类别下的临界梯度值。本文着重对水平方向梯度中沿扫描线方向的信息进行检验，从而达到质量控制的目的。

#### 4.3 基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制方法

本文仅研究基于沿扫描线方向的梯度信息对 AIRS 资料进行质量控制，即将各通道亮温值的水平梯度距平与某一个经验性的阈值相比较，剔除超过阈值的资料，保留下所谓的好资料。

阈值是关乎基于梯度信息质量控制能否成功的一个关键，阈值虽然被认为是经验性的，但是阈值的选择也不是随意设定的。我们拟采用两种方法来确定阈值，并比较两种方法的优劣。第一种方法是平均值法，就是将各通道的梯度距平作加权平均，其平均值就是我们认为的阈值。第二种是统计方法，就是设定一串估计阈值  $x$ ，设定每个阈值后，经过检验、剔除的资料数为  $y$ ，理论上  $x$  与  $y$  存在一个负相关，作出统计关系图，找出变化率最大的点所对应的  $x$ ，此时的  $x$  就是我们认为的最优阈值。平均值法是对每个通道作一个各自的阈值，各通道

之间没有存在必然的关系。统计方法是将所有通道作统一的一个阈值，各通道的阈值是一样的。

## 5 模式参数设置及试验方案设计

### 5.1 试验方案设计

为了检验基于空间梯度信息的质量控制方法对同化效果的影响以及对台风数值模拟的改善情况，本文设计了四组试验：（1）参照试验（CTRL）：不同化任何观测资料；（2）同化试验 1（AIRS）：基于 WRFDA 系统自带的质量控制方案，直接同化 AIRS 资料；（3）同化试验 2（AIRS\_QC1）：首先对 AIRS 资料进行基于梯度信息的质量控制，阈值选取采用平均值法，然后通过 WRFDA 模式直接同化该资料；（4）同化试验 3（AIRS\_QC2）：首先对 AIRS 资料进行基于梯度信息的质量控制，阈值选取采用统计法，然后通过 WRFDA 模式直接同化该资料。同化时间窗口设定为[-3 h, 3 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。详细试验方案见表 1。

表 1 数值试验设计

Table 1 Design of numerical experiments

试验方案	初始场	是否基于梯度	
		信息的质量控制	阈值选取
CTRL	GFS	否	无
IRS	GFS + AIRS	否	无
AIRS_QC1	GFS + AIRS	是	平均值法
AIRS_QC2	GFS + AIRS	是	统计法

### 5.2 模式参数设置

本文对“鲇鱼”台风在 2010 年 10 月 17 日 06 时~21 日 06 时进行了 96 小时的数值模拟。研究区域的中心取为 (18°N, 123°E)。水平方向采用了三重移动嵌套(图 1)，分辨率分别为 54、18 和 6 公里，网格数分别为 100×90、100×88 和 118×94。第一重网格是固定网格，第二重和第三重网格是基于涡旋自动跟踪技术的移动网格。第一重网格的时间积分步长取为 120 秒，第二重和第三重网格的时间积分步长分别取为上一重网格时间积分步长的 1/3。垂直分层为不均匀的 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。模式中使用的物理参

数化方案分别包括：Thompson 微物理方案、RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 长波辐射方案，Goddard 短波辐射方案、Yonsei University 边界层方案、Kain-Fritsch 参数化方案等。

## 6 结果对比分析

本文分别采用不同的阈值选择方法，对 AIRS 资料作质量控制，与不作相关质量控制的试验进行对比，从而检验质量控制的效果。

统计法选取的一串阈值是从 0.3 到 2.0，间隔 0.1，图 2 显示的是进入模式同化前选取各阈值后剩余的资料数。由图中可以看出，选取的阈值越大，剩余的资料数越多，而且从 0.3 到 2.0 随着阈值增大，剩余资料数的变化率逐渐减小。我们可以预见，

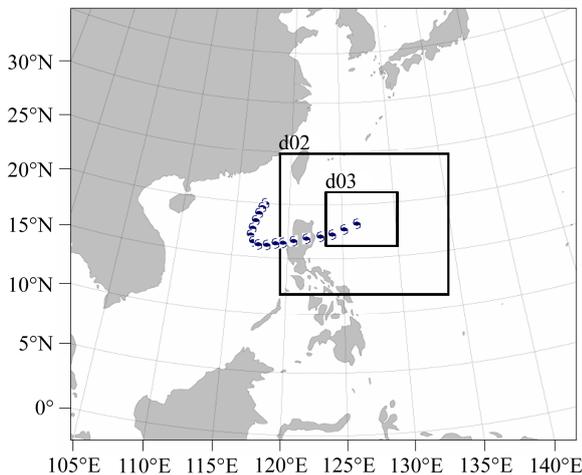


图 1 “鲑鱼”台风 2010 年 10 月 17 日 06 时~21 日 06 时的观测路径 (台风符号) 和模式区域设置

Fig. 1 Typhoon Megi observed track (Typhoon symbol) starting from 0600 UTC 17 October to 0600 UTC 21 October 2010 and model domains configuration

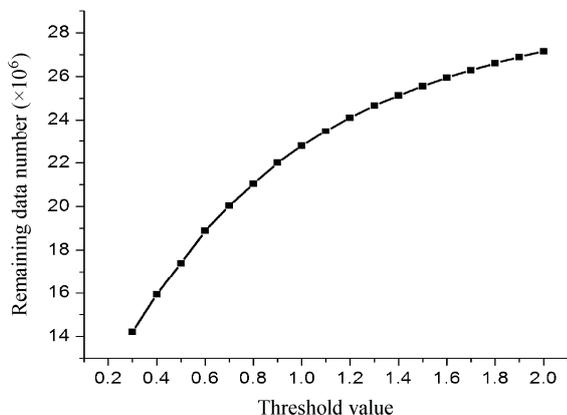


图 2 经过阈值筛选后剩余的 AIRS 资料数

Fig. 2 Number of remaining AIRS data after the threshold checking

如果阈值从一个极小值开始，其变化规律应该是一直增大，变化率应该先增大后减小。考虑到 AIRS 资料本身的数量和质量控制的质量，本文经验性的将阈值设置为 1.0。

平均值法选取阈值是将每个通道所有的梯度距平加权平均得到的，有多少个通道就对应多少个阈值。各个通道有各自的通道特点，因此梯度距平的平均值也相差很大，相比于统计法而言，它比较充分的考虑了各自通道的特性。表 2 统计了 AIRS 资料基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制的阈值。

表 2 基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制的统计阈值  
Table 2 Statistical threshold of quality control (QC) based on gradient information along the scanning line

资料类型	卫星平台	通道(数据集)	阈值
AIRS	AQUA	.....	.....
		92	1.497
		93	1.206
		94	1.832
		95	1.998
		96	1.828
		97	2.246
		98	2.118
		99	1.984
		100	2.466
		101	2.441
		102	2.743
		103	2.654
		.....	.....

### 6.1 质量控制结果对比分析

AIRS 资料同化进入 WRFDA 模式后有 88 个有效通道，每个通道都对应一个高度，AIRS 资料的卫星扫描方式与其他卫星不同，它是三条扫描线基本同时扫描，三条扫描线每隔 3 个点记录一次，每条扫描线具有 90 个视场。图 3 描述的是第 92 通道 (是指 281 个参与同化的通道的编号，下同) AIRS 资料的分布情况，其中黑色方框表示的是模拟的最外层区域。由图 3 可以看出在模拟区域范围内存在较多的 AIRS 资料。为了便于进行基于梯度信息的质量控制，对于 AIRS 资料预处理的一个首要原则是要保证每条扫描线具有完整的 90 个视场，因此要对 AIRS 资料进行筛选，如果扫描线中没有完整的 90 个视场 (比如缺点、断层)，则这条扫描线被认为不符合条件而整体被舍掉。

由表 2 可知基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制，AIRS 资料对应于第 92 通道上的阈值为 1.497。图 4 中给出了第 92 通道基于沿扫描线方向

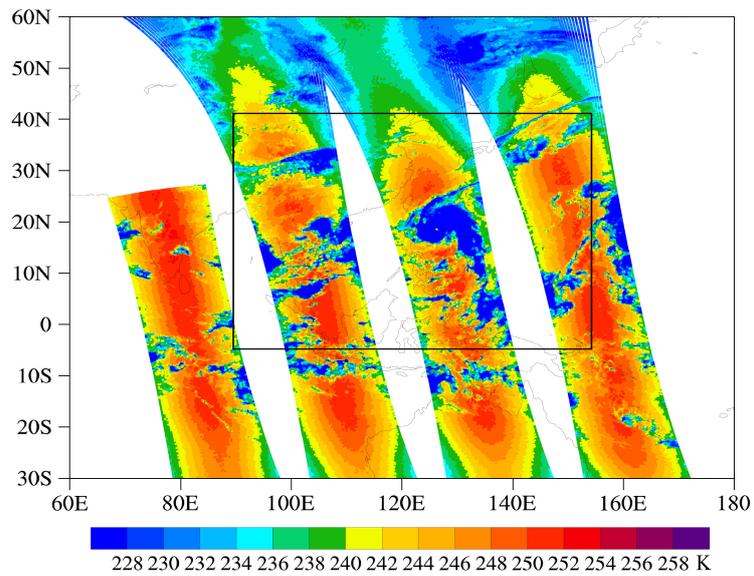


图3 第92通道的AIRS亮温的分布图(单位: K)

Fig. 3 Distribution of AIRS brightness temperature on channel 92 (units: K)

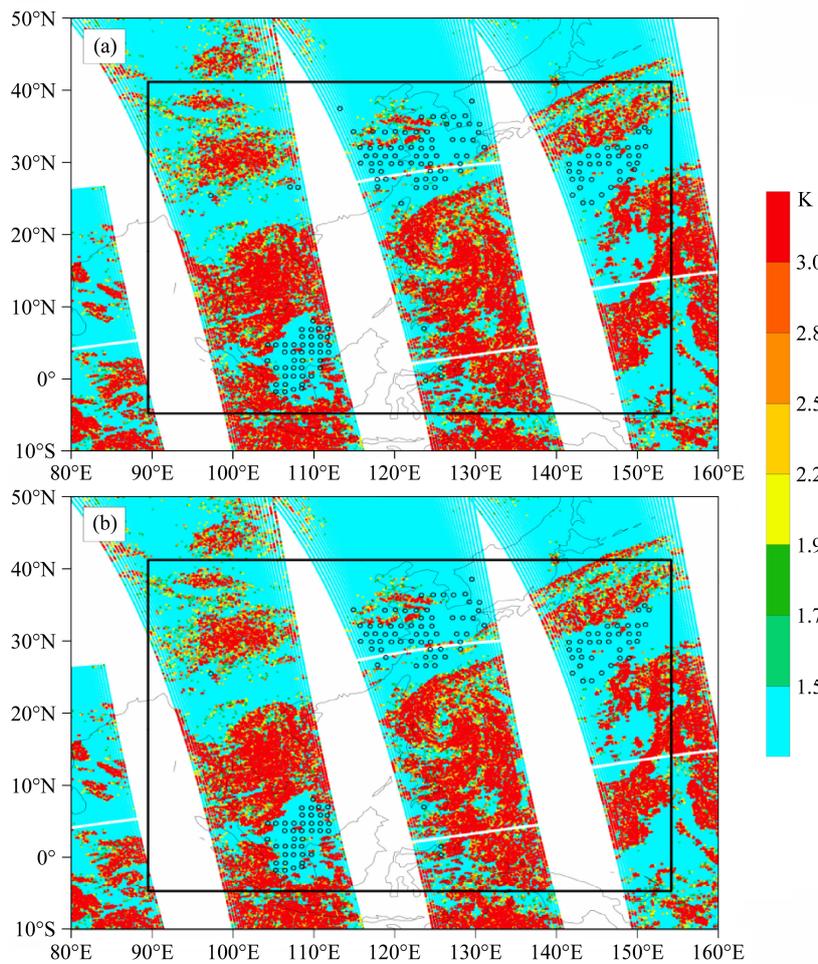


图4 第92通道基于沿扫描线方向的梯度距平分布(单位: K)和模式同化的资料(圆圈点): (a)未使用经过基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制方法; (b)使用了基于沿扫描线方向梯度信息质量控制方法。其中阈值选取为平均值法

Fig. 4 Distribution of gradient anomaly along scanning line on channel 92 (units: K): (a) Without the QC based on gradient information along the scanning line; (b) with the QC based on gradient information along the scanning line. The threshold is obtained by average method

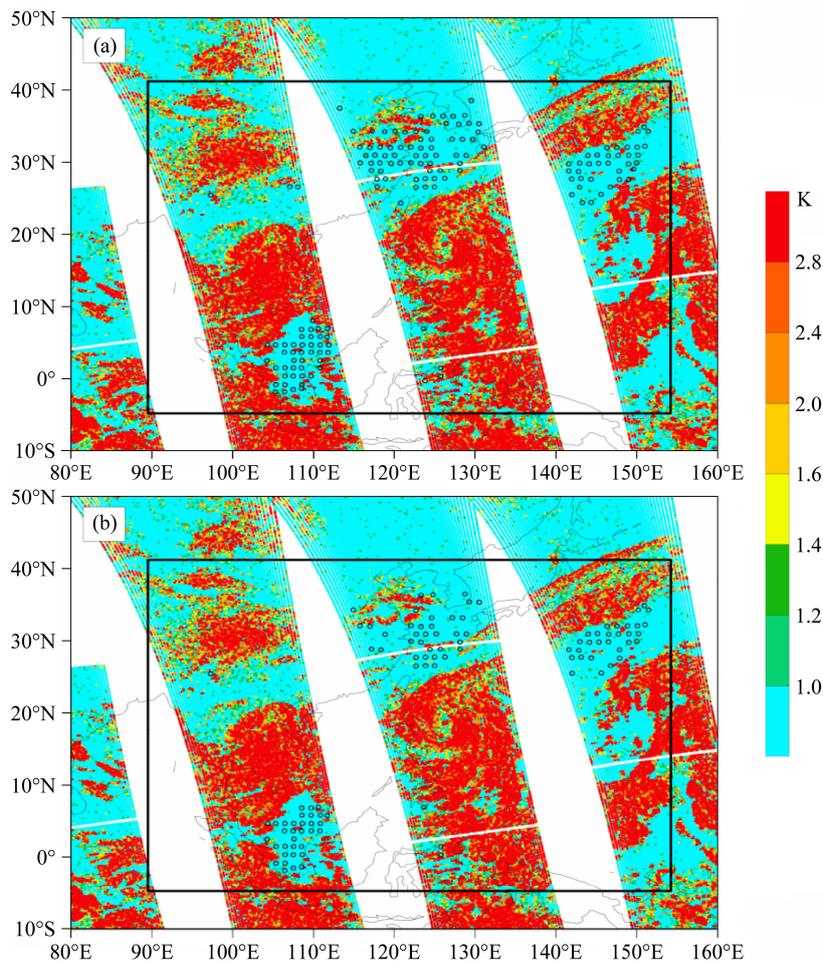


图5 第92通道基于沿扫描线方向的梯度距平分布(单位: K)和模式同化的资料(圆圈点): (a) 未使用经过基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制方法; (b) 使用了基于沿扫描线方向梯度信息质量控制方法。其中阈值选取为统计法

Fig. 5 Distribution of gradient anomaly along scanning line on channel 92 (units: K): (a) Without the QC based on gradient information along the scanning line; (b) with the QC based on gradient information along the scanning line. The threshold is obtained by statistical method

的梯度距平分布情况和模式同化所用到的 AIRS 资料分布情况(用圆圈表示)。图 4a 描述的是未经过基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制(即 WRFDA 模式自带的质量控制系统)模式所用的 AIRS 资料分布情况,图 4b 反映了基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制之后进入同化系统中的 AIRS 资料分布情况。从图 4a 中可以看出,部分点的梯度距平值明显较大,超过阈值。通过我们的研究发现,卫星亮温梯度信息与云覆盖之间存在着较大关联。一般云覆盖区域,卫星亮温梯度值也大,而晴空区域,卫星亮温梯度值就小。那么这些梯度距平值明显较大的点可能是受到了云污染,姑且称之为“坏点”。这些坏点资料就是本文基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制着手要剔除的资料。图 4b 表明,经过梯度信息质量控制以后确实可将模式

中所用的部分梯度距平值大于阈值的点剔除。

同理当阈值选取为统计值 1.0 时,经过基于梯度信息质量控制以后同样也能将模式中的“坏点”剔除,见图 5。由于统计方法是将所有通道作统一的一个阈值,而平均值法是各自通道对应不同的阈值,因此不同的阈值选取方法,剔除的点也是有差别的。AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验相比于 AIRS 试验在第 92 通道上资料点数分别减少 10 个和 49 个(见图 6)。

图 7 描述的是经过不同的质量控制以后各通道亮温资料的剔除率对比情况。从图中可以看出,经过基于空间梯度信息的质量控制以后,由于剔除了各通道中受污染的“坏点”,亮温资料的剔除率较原质量控制方案增高,其中 QC\_2 方案剔除幅度较大。另外,还可以看出,第 22 通道和第 67 通道

(WRFDA 模式中分别对应的是第 118 通道和第 206 通道) 较为敏感, 较原质量控制方案是剔除幅度较大的两个通道。

AIRS 资料对应的其他各通道的基于沿扫描线方向梯度信息的质量控制都类似于前, 本文不继续赘述。

### 6.2 模拟结果对比分析

#### 6.2.1 对台风路径及强度的影响

图 8 和图 9 和分别描述的是各试验方案中模拟的 96 小时台风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台风北折前与实况比较接近, 登陆前移动速度偏快, 登陆后较实况移动速度偏慢, 北折以后移动位置偏东, 移动速度

较快, 误差逐渐增大, 最大误差发生在第 96 小时, 达到 306 公里左右; AIRS 试验模拟的台风移动路径与 CTRL 试验相比整体上除了没有改善以外反而误差更大, 尤其台风北折以后位置更加偏东, 从偏差图中可以看出最后五个时刻的误差均大于 200 公里, 最大误差约为 270 公里; AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验模拟的台风移动路径与 AIRS 试验相比都得到了较大幅度的改善, 尤其在台风北折以后的位置, 整体上更为偏西, 与实况更接近; AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 与 CTRL 试验相比, 在最后 30 小时, 模拟路径也有较大改进, 路径误差基本维持在 150 公里之内, 其中 AIRS\_QC2 试验整体上要好于 AIRS\_QC1 试验。在第 96 小时, 即最后一个时刻, AIRS\_QC2 试验模拟的位置偏差约为 144 公里, 较 CTRL 试验减小约 162 公里, 较 AIRS 试验减小约 124 公里。

为进一步对比分析基于空间梯度信息的质量控制后同化 AIRS 资料对台风路径模拟的影响, 统计了各组试验共同时次(2010 年 10 月 17 日 06 时到 2010 年 10 月 21 日 06 时)的误差总和(图 10), 可以看出, CTRL 试验中, 路径误差总和为 1781.2 公里, 而 AIRS 同化试验中为 2461.23 公里。这说明 AIRS 资料质量控制方案对台风路径模拟有较大影响, 如果只采用 WRF 模式自带的 AIRS 资料质量控制方案, 将 AIRS 同化进入数值模式后, 模拟的台风路径误差反而增大很多。采用基于空间梯度

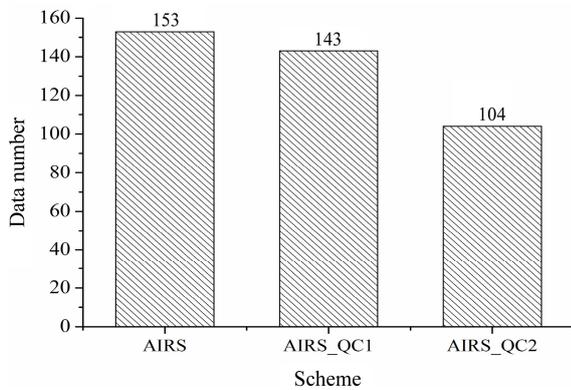


图 6 各试验中第 92 通道同化进入模式的 AIRS 资料数  
Fig. 6 Number of assimilated AIRS data in different experiments on channel 92

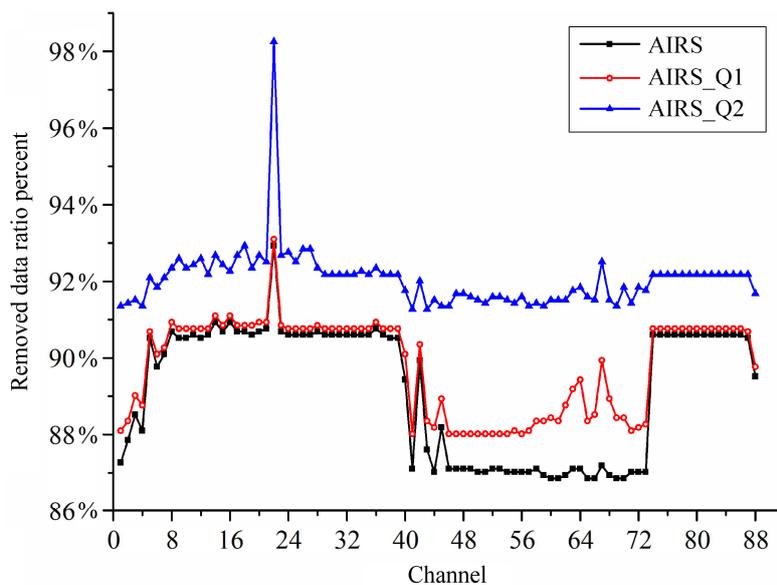


图 7 经过质量控制以后各试验中的资料剔除率  
Fig. 7 Removed data ratio after QC in different experiments

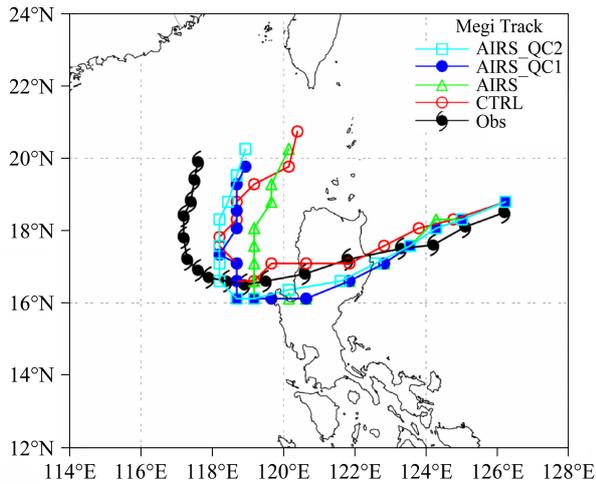


图 8 各试验方案中模拟的 96 小时台风路径

Fig. 8 Simulated 96-h typhoon tracks in different experiments

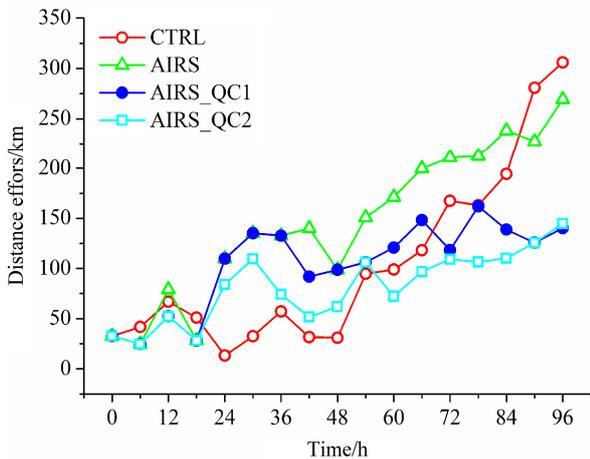


图 9 各试验方案模拟的台风路径与实况间的偏差情况 (单位: km)

Fig. 9 Track errors of simulated typhoons in different experiments relative to the best track (units: km)

信息的质量控制方案以后, 模拟的台风路径误差总和与 CTRL 试验相比都要有所下降, 分别降为 1766.28 公里 (AIRS\_QC1 同化试验) 和 1391.52 公里 (AIRS\_QC2), 这说明, 文中提出的新的质量控制方案是有效的。另外, 统计“改善比”(李兴武等, 2012) (指相对于 AIRS 试验, AIRS\_QC 试验模拟的路径偏差减小和增大的预报时次之比, 偏差为 0 计为增大; 图略), 可以发现 AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验的改善比分别为 10:7 和 14:3。这些一致性的结果进一步证明了基于空间梯度信息的质量控制可以有效改善初始场, 并改善台风的路径模拟准确率。

图 11 反映了各试验方案所模拟的台风海平面中心气压变化情况。对于实际观测来说, 初始时刻

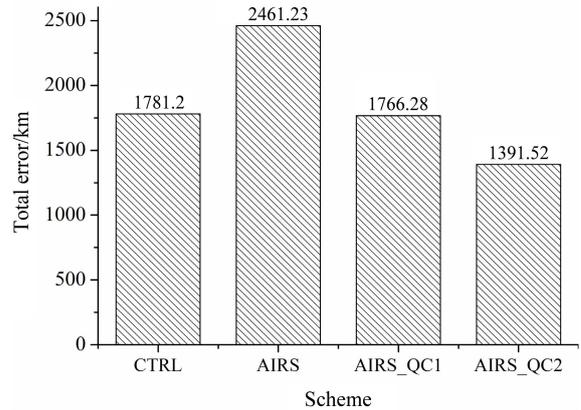


图 10 各试验方案中各个时次的路径误差之和 (单位: km)

Fig. 10 Sums of total track errors in different experiments (units: km)

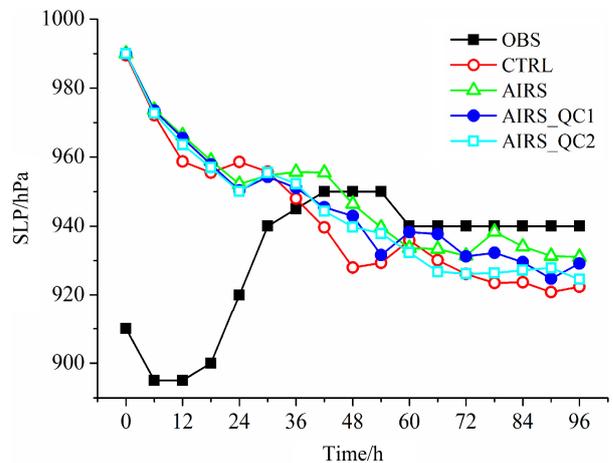


图 11 实况和各试验方案模拟的台风海平面中心气压 (单位: hPa)

Fig. 11 Observed and simulated sea level pressures in different experiments (units: hPa)

台风在洋面上的强度很强, 最低气压为 910 hPa, 之后逐渐增强, 最低气压达到 895 hPa, 登陆后台风强度开始减弱, 最后基本维持在 940 hPa 左右。从图中可知, 不论是 AIRS 试验还是 AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验, 所模拟的台风海平面中心气压强度在初期与 CTRL 试验一样误差都较大, 只在台风离开岛后误差才逐渐减小, 其中 AIRS 试验模拟的台风强度在后期较接近于实况。综上所述可知, 不论是哪种方案, 同化红外高光谱 AIRS 资料, 对改进台风强度的效果不甚明显, 尤其是在模拟初期甚至比参照试验效果更差。究其原因是同化卫星资料主要改善环境场, 对台风的内部结构影响不大。台风的路径与环境场密切相关, 所以路径有较明显的改进, 但台风强度主要与内部结构有关, 所以对强度的改进很小。另一方面, 这也可能与目前

WRF-3DVAR 中辐射传输模式主要能有效模拟晴空条件下的卫星辐射率资料, 还不能合理模拟有云或受降水影响区域的辐射率资料有着重要关系(Liu and Barker, 2006)。

### 6.2.2 分析增量场结果分析

为了便于对比新的质量控制方案对 AIRS 资料同化效果的影响, 因此, 下面主要是将 AIRS\_QC1 同化试验和 AIRS\_QC1 同化试验的数值结果分别与 AIRS 试验的数值结果进行对比。

图 12 描述的是初始时刻(2010 年 10 月 17 日 06 时) AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验分别与 AIRS 试验之间的 500 hPa 风场偏差情况。因为 500 hPa 风场的变化在一定程度上揭示了台风引导气

流的变化, 所以与台风移动路径密切相关。从图中可以看出, AIRS\_QC2 试验对 500 hPa 风场的改变稍大。初始时刻台风环流中心位于(18.5°N, 126.1°E)附近, AIRS\_QC1 试验、AIRS\_QC2 试验与 AIRS 试验的 500 hPa 风场偏差都是一个顺时针的反气旋式环流, 环流中心分别位于(27°N, 107°E)和(30°N, 114°E)附近。受这个环流的作用, 一致的北偏东风促使台风向西移动, 因此与 AIRS 试验相比, 在台风北折以后移动方向更容易偏西, 这与图 7 中 AIRS\_QC1 试验和 AIRS\_QC2 试验模拟的台风移动路径相一致。

图 13 是初始时刻 AIRS\_QC 试验与 AIRS 试验的位势高度偏差场沿 18.5°N 的垂直剖面图。在台风

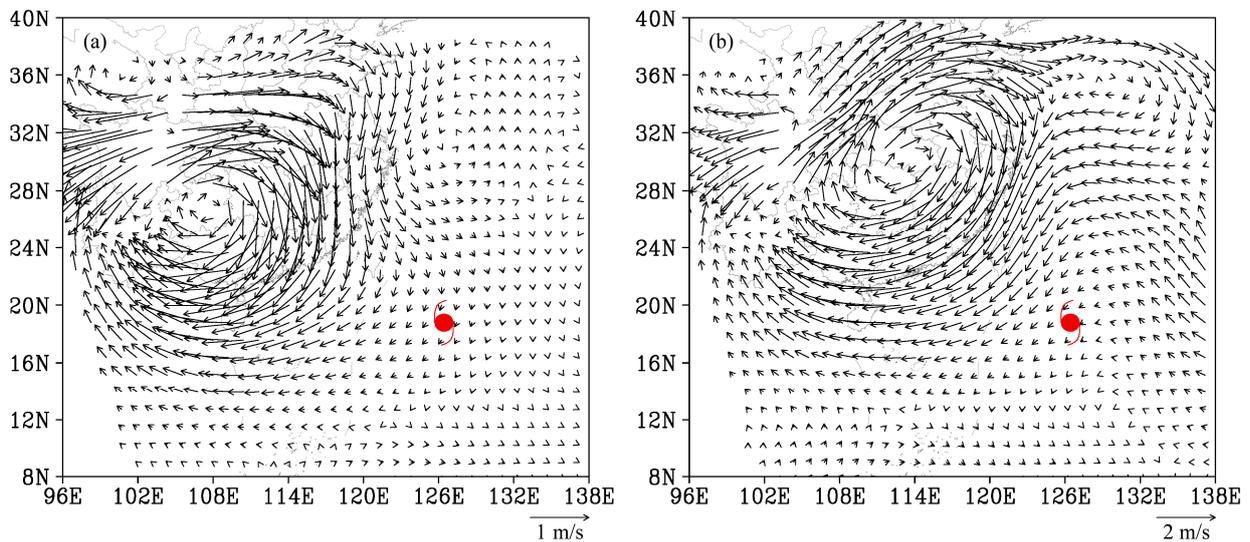


图 12 初始时刻各试验与 AIRS 试验的 500 hPa 风场偏差分布图(单位: m/s): (a) AIRS\_QC1 减去 AIRS; (b) AIRS\_QC2 减去 AIRS  
Fig. 12 Differences of wind field at initial time on 500 hPa between different experiments and AIRS experiment (units: m/s): (a) AIRS\_QC1 minus AIRS; (b) AIRS\_QC2 minus AIRS

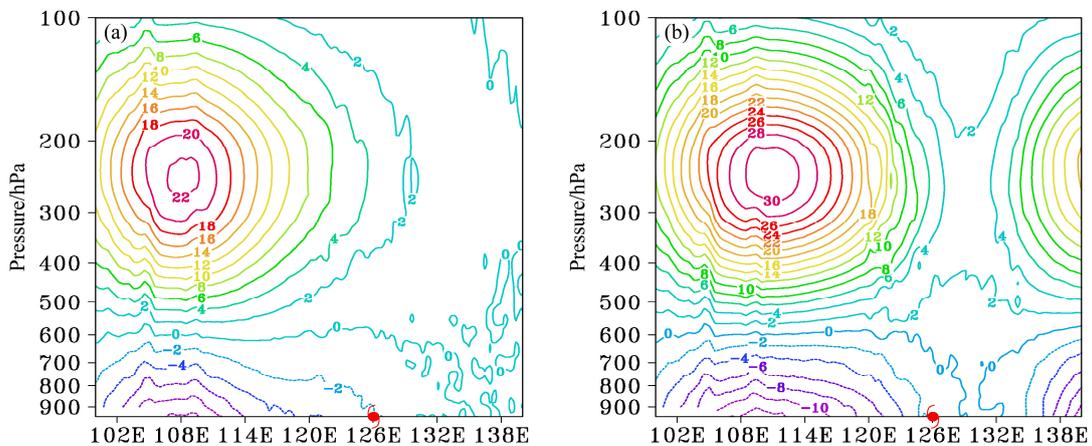


图 13 初始时刻各试验与 AIRS 试验的位势高度偏差场沿 18.5°N 的垂直剖面图(单位:  $m^2s^{-2}$ ): (a) AIRS\_QC1 减去 AIRS; (b) AIRS\_QC2 减去 AIRS  
Fig. 13 Vertical distribution of geopotential height along 18.5°N at initial time between different experiments and AIRS experiment (units:  $m^2s^{-2}$ ): (a) AIRS\_QC1 minus AIRS; (b) AIRS\_QC2 minus AIRS

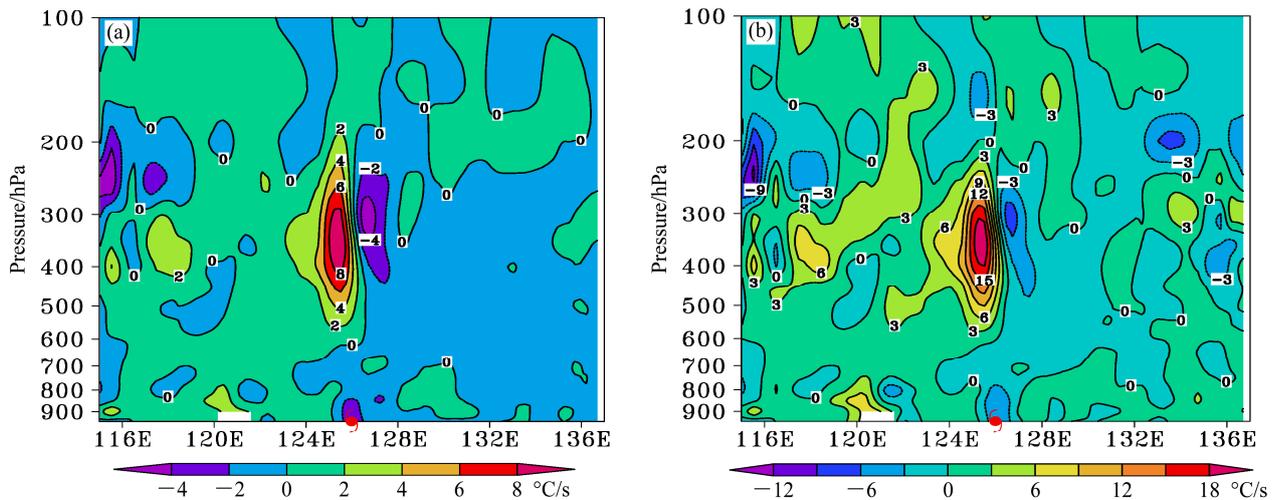


图 14 初始时刻各试验与 AIRS 试验的温度平流偏差场沿 18.5°N 的垂直剖面图 (单位: °C/s): (a) AIRS\_QC1 减去 AIRS; (b) AIRS\_QC2 减去 AIRS  
Fig. 14 Vertical distribution of temperature advection along 18.5°N at initial time between different experiments and AIRS experiment (units: °C/s): (a) AIRS\_QC1 minus AIRS; (b) AIRS\_QC2 minus AIRS

西侧, 从地面到 600 hPa 高空, AIRS\_QC1 试验、AIRS\_QC2 试验与 AIRS 试验的位势高度偏差值都小于 0, 即位势高度降低, 这有利于台风向西移动。其中 AIRS\_QC2 试验的位势高度降的更为明显, 因此也就更有利于台风西移。图 14 是初始时刻 AIRS\_QC 试验与 AIRS 试验的温度平流偏差场沿 18.5°N 的垂直剖面图。在台风东侧, 冷平流随着高度的增加而增加, 有正的位势倾向, 冷平流中心位于 300 hPa 左右; 在台风西侧暖平流随着高度的增加而增加, 有负的位势倾向, 暖平流中心位于 350 hPa 左右。同样这也有利于台风的西移。其中 AIRS\_QC2 试验的温度平流偏差量级稍大, 因此西移更为明显。综上所述, 相对于 AIRS 试验, 经过基于空间梯度信息的质量控制以后对初始场的描述更为准确, 利于物理场的预报。

## 7 总结

本文针对 1013 号台风“鲇鱼”, 设计了四组模拟试验, 采用不同的阈值选取方法对红外高光谱 AIRS 资料经过基于空间梯度信息的质量控制后同化进入初始场, 来评估新的质量控制方法对卫星亮温资料同化效果的改进程度以及对台风数值模拟的改善效果。

通过对红外高光谱 AIRS 资料进行基于空间梯度信息 (沿扫描线方向) 的质量控制过程中, 我们发现:

(1) 如果仅仅基于 WRFDA 模式自带的质量控

制系统, 将会有部分梯度距平值明显较大超过阈值的资料点被同化进入模式, 而这些可能受到“污染”误差较大的资料点同化进入模式必将会导致同化结果有较大误差, 影响分析结果的质量。

(2) 而对 AIRS 资料经过基于空间梯度信息质量控制之后再同化进入模式, 确实可将梯度距平值大于阈值的“坏点”剔除掉, 从而对初始场进行了有效的改善。

(3) 不同的阈值选取方法, 剔除的点也是有差别的。统计法是将所有通道作统一的一个阈值, 而平均值法选取阈值虽然初始剔除的资料较少、改进缓慢, 但是它充分考虑到了各通道的梯度特性, 具有一定的提升空间。

针对 1013 号台风“鲇鱼”进行数值模拟试验, 通过试验可以初步得出:

(1) 经过基于空间梯度信息 (沿扫描线方向) 的质量控制后同化 AIRS 资料整体上使台风初始场的描述更加准确, 利于物理场的预报。

(2) 经过基于空间梯度信息的质量控制以后同化 AIRS 资料对台风路径模拟有较大的改善效果。

(3) 由于同化卫星资料主要改善环境场, 对台风的内部结构影响不大, 而台风强度主要与内部结构有关, 所以不论是哪种方案, 同化卫星资料 AIRS 对改进台风强度没有太大的帮助。

综上所述, 基于空间梯度信息的质量控制方法整体对改善同化效果有较好的正效应, 对台风的数值模拟也起到一定的促进作用。

## 8 讨论

(1) 基于空间梯度信息的质量控制方法对同化效果的改进程度在一定程度上也依赖于本身卫星资料对初始场的影响程度。即如果本身卫星资料对初始场影响不甚敏感,那么基于空间梯度信息的质量控制方法对同化效果的改进也是有限的。

(2) 基于空间梯度信息质量控制能否成功的一个关键因素取决于阈值的选取,因此说如何合理地选取阈值对基于空间梯度信息的质量控制是十分重要的。以后可结合统计法和平均值法的优点来更加合理地选取阈值。

### 参考文献 (References)

- 陈靖, 李刚, 张华, 等. 2011. 云检测在高光谱大气红外探测器辐射率直接同化中的应用 [J]. 气象, 37 (5): 555–563. Chen Jing, Li Gang, Zhang Hua, et al. 2011. Application of cloud detection to assimilation of AIRS radiance data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (5): 555–563.
- Fourrié N, Thépaut J N. 2002. Validation of the NESDIS Near-Real-Time AIRS Channel Selection [M]. Reading, UK: European Centre for Medium Range Weather Forecasts.
- 官莉. 2006. 利用 AIRS 卫星资料反演大气廓线 I. 特征向量统计反演法 [J]. 南京气象学院学报, 29 (6): 756–761. Guan Li. 2006. Retrieving atmospheric profiles from MODIS/AIRS observations I. Eigenvector regression algorithms [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (6): 756–761.
- 官莉. 2007. 星载红外高光谱资料的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 6–60. Guan Li. 2007. Application of Spaceborne Hyperspectral Infrared Data (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 6–60.
- 官莉, 王振会, Huang Hunglung. 2009. 红外高光谱资料模拟大气廓线反演对云的敏感性 [J]. 气象科学, 29 (3): 312–316. Guan Li, Wang Zhenhui, Huang Hunglung. 2009. Simulation of atmospheric profile retrieval sensitivity to cloud from hyperspectral infrared data [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (3): 312–316.
- Goldberg M, Qu D Y, McMillin L M, et al. 2003. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 41 (2): 379–388.
- 蒋德明. 2007. 高光谱分辨率红外遥感大气温湿度廓线反演方法研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 29–42. Jiang Deming. 2007. Approach to high spectral resolution infrared remote sensing of atmospheric temperature and humidity profiles [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 29–42.
- 卢冰, 刘娟娟, 王斌, 等. 2013. DRP-4DVar 方法同化 AIRS 反演资料在一次江淮流域暴雨中的应用 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 562–570. Lu Bing, Liu Juanjuan, Wang Bin, et al. 2013. Assimilation of AIRS sounding retrievals on a heavy rainfall over Changjiang and Huaihe River basin by using DRP-4DVar approach [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 562–570.
- 刘辉, 董超华, 张文建, 等. 2008. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验 [J]. 气象学报, 66 (4): 513–519. Liu Hui, Dong Chaohua, Zhang Wenjian, et al. 2008. Retrieval of clear-air atmospheric temperature profiles using AIRS observations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (4): 513–519.
- 刘阳, 蔡波, 班显秀, 等. 2013. AIRS 红外高光谱资料反演大气水汽廓线研究进展 [J]. 地球科学进展, 28 (8): 890–896. Liu Yang, Cai Bo, Ban Xianxiu, et al. 2013. Research progress of retrieving atmosphere humidity profiles from AIRS data [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 28 (8): 890–896.
- 李兴武, 董海萍, 郭卫东, 等. 2012. ATOVS 不同卫星资料在台风模拟中的同化试验研究 [J]. 热带气象学报, 28 (2): 157–166. Li Xingwu, Dong Haiping, Guo Weidong, et al. 2012. Data assimilation experiments in typhoon numerical prediction using different ATOVS radiance data [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (2): 157–166.
- Li J, Menzel W P, Sun F T, et al. 2004. AIRS subpixel cloud characterization using MODIS cloud products [J]. J. Appl. Meteor., 43 (8): 1083–1094.
- Liu Z Q, Barker D. 2006. Radiance data assimilation in WRF-Var: Implementation and Initial Results [C]// The 7th WRF Users' Workshop. NCAR, Boulder, Colo.
- McNally A P, Watts P D. 2003. A cloud detection algorithm for high spectral resolution infrared sounders [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 129 (595): 3411–3423.
- McNally A P, Watts P D, Smith J A, et al. 2006. The assimilation of AIRS radiance data at ECMWF [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132 (616): 935–957.
- 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.
- 王云峰, 韩月琪, 马刚, 等. 2014. AIRS 资料质量控制对飓风路径模拟的影响试验 [J]. 气象科学, 34 (4): 383–389. Wang Yunfeng, Han Yueqi, Ma Gang, et al. 2014. Influential experiments of AIRS data quality control method on hurricane track simulation [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34 (4): 383–389.
- 占瑞芬, 李建平. 2008. 青藏高原地区大气红外探测器 (AIRS) 资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征 [J]. 大气科学, 32 (2): 242–260. Zhan Ruifen, Li Jianping. 2008. Validation and characteristics of upper tropospheric water vapor over the Tibetan Plateau from AIRS satellite retrieval [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 242–260.
- 张水平. 2009. AIRS 资料反演大气温度廓线的通道选择研究 [J]. 气象科学, 29 (4): 475–481. Zhang Shuiping. 2009. Hyperspectral atmospheric sounding information channel selection study [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 475–481.
- 朱文刚, 李刚, 张华, 等. 2013. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究 [J]. 气象, 39 (5): 633–644. Zhu Wen'gang, Li Gang, Zhang Hua, et al. 2013. Study on application technique of cloud detection and clear channels hyperspectral atmospheric infrared detector AIRS data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (5): 633–644.