

分类号 TP399

学号 13060087

U D C

密级 公 开

工学硕士学位论文

FY-3C 卫星微波辐射资料同化应用研究

硕士生姓名 吴应昂

学 科 专 业 计算机科学与技术

研 究 方 向 大规模科学与工程计算

指 导 教 师 张卫民 研究员

国防科学技术大学研究生院

二〇〇五年 11 月

论文书脊

(此页只是书脊样式，学位论文不需要印刷本页。)

FY-3C 卫星微波辐射资料同化应用研究

国防科学技术大学研究生院

**A Study on Application
of Assimilation of FY-3C Satellite
Microwave Radiance Data**

**Candidate: Wu Ying'ang
Advisor: Prof. Zhang Weimin**

A thesis

**Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering
in Computer Science and Technology
Graduate School of National University of Defense Technology
Changsha, Hunan, P.R.China
November, 2005**

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目： FY-3C 卫星微波辐射资料同化应用研究

学位论文作者签名： 吴应昂 日期： 2015 年 11 月 2 日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目： FY-3C 卫星微波辐射资料同化应用研究

学位论文作者签名： 吴应昂 日期： 2015 年 11 月 2 日

作者指导教师签名： 杨 日期： 2015 年 11 月 2 日

目 录

摘 要	i
ABSTRACT	ii
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 资料同化的发展	1
1.3 卫星观测资料的重要作用及其同化技术发展	3
1.3.1 卫星观测资料在同化系统中的重要性	3
1.3.2 卫星观测资料同化技术发展	4
1.4 我国气象卫星探测发展	6
1.5 论文研究内容和结构	7
第二章 WRF 模式系统及 RTTOV 介绍	10
2.1 WRF 模式及 WRFDA 同化系统	10
2.1.1 WRF 模式系统结构	10
2.1.3 WRFDA 同化系统	11
2.2 RTTOV 快速辐射传输模式	11
2.3 本章小结	14
第三章 FY-3C 卫星微波观测资料特性研究	15
3.1 FY-3C 微波探测仪介绍	15
3.2 研究方案设计	16
3.3 MWTS II 观测模拟偏差	17
3.4 MWHs II 观测模拟偏差	22
3.5 本章小结	28
第四章 FY-3C 微波观测资料同化关键技术研究	30
4.1 FY-3C 卫星微波观测资料偏差订正	30
4.1.1 偏差订正方法	30
4.1.2 偏差订正模块效果分析	31
4.2 FY-3C 卫星微波观测资料质量控制	32
4.2.1 极值检测	33
4.2.2 地表类型检测	33
4.2.3 临边检测	33
4.2.4 通道选择	33

4.2.5 离群资料筛选	34
4.3 云监测	35
4.3.1 云检测方法	35
4.3.2 云检测效果分析	35
4.4 微波辐射资料处理	37
4.5 系统构建和程序实现	40
4.6 同化系统“使用资料”质量特性分析	41
4.6 本章小结	42
第五章 同化预报试验分析	44
5.1 验天气过程介绍	44
5.2 试验设计	44
5.3 同化结果分析	45
5.3.1 目标函数极小化结果	45
5.3.2 分析要素场比较	46
5.4 台风预报效果	50
5.5 本章小结	51
第六章 总结与展望	53
6.1 论文总结	53
6.2 工作分析和下一步工作展望	54
致 谢	55
参考文献	57
作者在学期间取得的学术成果	61

表 目 录

表 1.1 FY-3 卫星星载探测仪..... 6

表 3.1 MWTS II 通道参数设计指标 15

表 3.2 MWHS II 通道参数设计指标 15

表 4.1 MWTS II 数据文件 HDF5 结构 38

表 4.2 MWHS II 数据文件 HDF5 结构 39

表 4.3 MWTS II 和 MWHS II 仪器编号序列 41

表 4.4 MWTS II“使用资料” 的观测背景偏差统计 42

表 4.5 MWHS II“使用资料” 的观测背景偏差统计 42

表 5.1 试验采用模式物理过程参数化方案设计 45

表 5.2 试验过程设置 45

表 5.3 对比试验目标函数极小化结果及观测量平均值 46

图 目 录

图 1.1 ECMWF 观测资料中卫星资料所占比例变化统计	4
图 1.2 ECMWF 观测资料对数值预报贡献评估统计	4
图 2.1 WRF 模式系统结构图	10
图 2.2 WRFDA 同化系统流程图	11
图 2.3 RTTOV 程序调用流程	14
图 3.1 MWTS II 在统计区域上行（左）和下行（右）扫描轨迹图	17
图 3.2 MWTS II 通道 1~8 观测亮温偏差值	19
图 3.3 MWTS II 通道 9~13 观测亮温偏差值	20
图 3.4 MWTS II 探测通道观测亮温偏差统计	21
图 3.5 MWTS II 通道观测背景偏差统计均值和标准差	22
图 3.6 2014 年 8 月观测背景偏差各通道统计参数平均值	22
图 3.7 MWHS II 在统计区域扫描路径图	23
图 3.8 MWHS II 通道 1~8 观测偏差值	25
图 3.9 MWHS II 通道 9~15 观测偏差值	26
图 3.10 MWHS II 探测通道观测亮温偏差统计	27
图 3.11 MWHS II 探测通道观测背景偏差均值和标准差	28
图 3.12 2014 年 8 月 MWHS II 探测通道背景偏差统计平均结果	28
图 4.1 MWTS II 观测资料偏差订正前（左图）后（右图）观测背景偏差分布 ..	31
图 4.2 MWTS II 观测资料偏差订正前（左图）后（右图）拟合散点图	31
图 4.3 MWTS II 观测资料偏差订正前（左图）后（右图）观测背景偏差分布 ..	32
图 4.4 MWTS II 观测资料偏差订正前（左图）后（右图）拟合散点图	32
图 4.5 2014 年 8 月 4 日卫星云图	36
图 4.6 MWTS II（左）和 MWHS II（右）云检测结果	37
图 4.7 MHS 观测在 WRFDA 中云检测效果	37
图 4.8 WRFDA 程序设计和修改示意图	41
图 5.1 台风“海鸥”运行路线（左）和卫星云图（右）	44
图 5.2 三组试验同化目标函数极小化过程	46
图 5.3 分析场相对湿度的分布场	48
图 5.4 分析场温度要素分布场	49
图 5.5 台风“海鸥”路径对比图	50
图 5.6 台风预报试验路径偏差和强度偏差大小	51

摘 要

FY-3C 卫星作为我国新一代极轨气象卫星业务卫星,搭载了新型微波温度计(MWTS II)和新型微波湿度计(MWHS II)具有高的探测精度,为数值预报系统提供了大量观测数据。为研究 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的在数值预报中的作用,如何正确将 MWTS II 和 MWHS II 观测资料加入同化系统,为数值预报提供精确初始场,具有十分重要实际意义。本文以 WRFDA 同化系统为基础,研究分析了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料同化所需关键技术,研究分析了 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的特征分布和质量,实现 MWTS II 和 MWHS II 观测资料在 WRFDA 中的同化应用。最后利用同化预报试验检验 MWTS II 和 MWHS II 资料对数值预报的影响。

通过研究和试验,得出以下主要成果和结论。

- (1) 首先采用观测亮温和背景模拟亮温差值统计方法,统计分析观测模拟偏差残差,并根据统计结果对 MWTS II 和 MWHS II 探测通道性能和观测资料质量进行评估。结果显示, MWTS II 和 MWHS II 部分观测通道显示了较好的同化应用能力,而 MWHS II 新采用的 118.75GHz 探测频点通道的观测质量表现非常好,显示了非常大的同化应用潜力。
- (2) 针对 FY-3C 资料特性和 WRFDA 同化系统特点,研究 MWTS II 和 MWHS II 观测资料同化过程所需的关键技术,并实现了 WRFDA 同化系统对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化应用。
- (3) 通过同化预报试验对台风“海鸥”进行了数值预报,并对同化分析场进行对比研究。通过对分析场的分析研究发现, MWTS II 和 MWHS II 资料的加入对同化系统生成的分析场产生了影响,而对台风天气的预报表明,对台风“海鸥”路径的预报产生了正效果,而对其强度的效果不明显。

关键词: 卫星资料同化; FY-3C 卫星; 新型微波湿度计; 新型微波温度计; WRF 模式

ABSTRACT

China's new generation of Polar Orbiting Meteorological Satellite FY-3C satellite have launched successfully, carrying the new Microwave Temperature Sounder II (MWTS II) and the new Microwave Humidity Sounder II (MWHS II) which have high detection accuracy. It provides a large number of observations for numerical prediction system. It is important to research the role of MWTS II and MWHS II observation data in numerical prediction, and achieve the direct data assimilation of MWTS II and MWHS II observations in data assimilation system. The paper studies the technologies of MWTS II and MWHS II observation data assimilation in WRFDA assimilation system, and the quality of MWHS II and MWTS II observations. Experiments are carried out to test the effect of MWHS II and MWTS II observation data on numerical prediction.

We could achieve the following main results and conclusions through the researches and experiments.

- (1) With using the statistical method of the difference value of observation radiance brightness and background simulation brightness, the observation minus background bias is analyzed. The MWTS II and MWHS II channels performance and observation data quality is evaluated with the analyzing results. The results show that some observations of MWTS II and MWHS II channels could be assimilated, and the quality of the 118.75GHz probe channels in MWHS II is very good in all channels, that makes 118.75 probe channels a good assimilation potentiality.
- (2) After studying the quality of MWTS II and MWHS II observations and the WRFDA system, the technologies of bias correction, quality control and cloud detection is researched. We have achieved the assimilation of MWTS II and MWHS II observations in WRFDA assimilation system.
- (3) The assimilation and numerical prediction experiment was carried to forecast the typhoon 'Kalmaegi'. The experiment shows that MWTS II and MWHS II observation data were found to have a certain effect on the generation of the assimilation system. The MWTS II and MWHS II observation data in numerical system has a positive effect on the path prediction but little effect on the intensity forecast of the typhoon forecasting.

Key Words: Satellite data assimilation; FY-3C satellite; MWTS II; MWHS II; WRF model.

第一章 绪论

1.1 引言

数值天气预报是当今最常用的天气预报方式。数值天气预报是在一个已知的现有大气状态估计下，用模式来模拟天气演变的过程。对于一次完整的数值天气预报过程，初始条件的确定是非常重要的问题，初始条件的精确度直接影响数值预报结果的准确性，初始条件的确定由于其复杂性已经成为了一门独立的学科。资料同化用于为数值模式提供准确、合理的初始条件，也越来越受到重视。

资料同化要充分利用现有信息来确定一个最大可能精确的大气运动状态，同化观测资料来源主要有常规观测以及雷达、卫星等非常规观测资料。其中常规观测资料观测时间和地点固定，且多分布于人口密集等地区，时空分辨率低且分布不均匀，在偏远地区如海洋上空等极少有常规观测，而卫星观测具有全天候、全覆盖、资料一致等特点，随着发射的气象卫星不断增多，卫星资料用于确定模式初始场有很大贡献。但与常规观测资料相比，卫星探测的不是常规的模式变量，而是其他与模式变量相关的量，如微波探测仪探测的就是大气辐射率，对这些变量的同化不能简单的直接应用到模式中，因此在同化卫星观测资料时，应该采用不同的同化方法。同化卫星辐射率资料的方式主要有直接同化和间接同化两种，其中间接同化通过将卫星探测辐射值反演成大气垂直廓线，引入同化模式中；直接同化则通过辐射传输模式将背景场模拟成大气层顶向上辐射，可将观测辐射率资料直接引入同化计算中。由于间接同化反演过程很复杂，引入反演误差，因此在实际同化过程中一般采用间接同化的方式。

风云三号系列卫星作为我国第二代极轨气象卫星，其搭载的微波探测仪能够探测大气垂直温度和湿度信息，而最新发射的 FY-3C 卫星上所搭载了更先进的探测仪，其中新型微波温度计和新型微波湿度计相比 FY-3A/B 上所搭载的微波探测仪更先进，探测通道增多，探测精度更大，能够探测更加精确的大气信息，将 FY-3C 上所携带的微波辐射资料应用到数值预报中具有重大意义。但是目前没有现成同化 FY-3C 微波辐射资料的系统，将这些资料加入同化系统中还有许多问题需要解决，如同化系统对新的 FY-3C 微波资料的读取，资料的质量控制、偏差订正、云检测技术，及直接同化过程中需要的辐射传输模式等问题。

1.2 资料同化的发展

资料同化是采用一定方法将所得观测数据与数学模型结合起来，得到最优的

分析结果^[1]。早期试验中, Richardson^[2]和 Charney 等^[3]采用主观分析的方法, 并可用观测资料通过手工方法内插到网格点上。完成人工初始化是一件非常费时的工作, 因此人们很快提出了计算机自动计算的客观分析法。

由于早期天气预报中, 可用观测资料稀疏且分布不均匀, 全部使用观测资料还不足得到完整的模式初始条件, 因此需要使用背景场(第一猜值场)作为附加资料为预报模式准备初始条件^[4]是必要的。自此, 模式初始条件分析场的确立采用背景资料 $H(x^b)$ 和观测资料 y^o 的结合, 其中 H 为观测算子, x^b 为背景场。其处理方法首先通过设置观测背景增量的权重 W , 初始条件分析场 x^a 则为模式背景场的值加上带权观测增量值, 其计算方法如下式 1.1 所示。

$$x^a = x^b + W[y^o - H(x^b)]; \quad (1.1)$$

资料同化技术发展至今, 先后有过多种资料同化方法, 主要有多项式拟合法、最优插值法、逐步订正法、变分法以及卡尔曼滤波法等。而逐次订正法、最优插值法、变分法以及卡尔曼滤波法等都是采用上述方程 1.1 设计的。

早期的多项式拟合法^[5]是将不规则观测点上的气象观测资料内插分析网格上的大气变量分析值。可分为全局插值、局部插值和单点插值三种插值方法。

逐次订正法(SCM)由 Gilchrist 等^[6]提出, 采用方程 1.1 的设计思路, 其权重由经验得来, 将权重值作为观测点与网格点间距离的函数, 分析场通过多次迭代得到。该方法还有单点分析方案的特点, 即只有在影响半径范围内的观测资料才能影响分析场的结果。

最优插值法(OI 法)则由 Gandin 于 1963 年提出^[7], 与逐步订正法最大不同点在于其权重函数不是由经验给定, 而是由每一个网格点上分析误差协方差极小得到的。最优插值法能得到统计意义上的最优解, 相对于之前方法有明显优点, 分析精度提高。但是最优插值法的缺点在于观测变量和分析变量必须满足线性关系的条件, 直接影响其对很多观测资料的同化能力。

变分法最早由 Sasaki 引入资料同化分析中^[8]。该方法主要思想是找出一个使得度量背景和观测场之间距离的目标泛函极小的分析场。变分法包括三维变分方法(3DVAR)和四维变分方法(4DVAR)。在三维变分同化中, 其目标函数 $J(x)$ 一般采用定义的如下表达形式(式 1.2)^[9], 即定义为背景误差协方差的逆矩阵加权的分析场 x 与背景场 x^b 的距离, 加上被观测误差协方差逆矩阵加权的分析场 x 与观测资料 y^o 的距离, 当 $J(x)$ 达到极小值时, 所取的 x 值即为分析场结果。

$$J(x) = \frac{1}{2} \left\{ (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + [y^o - H(x)]^T R^{-1} [y^o - H(x)] \right\}; \quad (1.2)$$

可以证明方程 1.2 所定义的目标函数的三维变分法与最优插值法所求分析场是等价的^[10]。变分法优点在于摆脱了观测量和分析量之间线性关系, 使得直接同

化非常规观测资料如卫星观测资料等成为可能，同时将模式作为强约束条件，得到的分析初始场在模式和物理上能够与模式相协调。

三维变分方式在时间上是不连续的，这给资料同化带来一定误差，Thompson 指出要求在整个事件序列的分析过程中保持变量的动力协调^[11]，四维同化的思想提出。四维变分方法目标函数的定义则考虑了观测资料在时间区间上的分布，四维变分法解决了三维变分法得到的解在时间上不连续的缺点。其目标函数定义如下。

$$J(x_0) = \frac{1}{2}(x_0 - x^b)^T B^{-1}(x_0 - x^b) + \frac{1}{2} \sum_{m=0}^M [y_m^o - H_m(M_m(x_0))]^T (O + F)^{-1} [y_m^o - H_m(M_m(x_0))]; \quad (1.3)$$

卡尔曼滤波法（KF 法）则由数学家 Kalman 提出^[12]，以分析误差的最小方差为最优标准，是假定在线性系统、高斯白噪声下的一种递归资料处理方法。与最优插值法非常相似，不同之处在于 KF 法的预报或背景误差协方差由模式本身的演变来确定而不是将其当做常数的协方差矩阵^[13]。

1.3 卫星观测资料的重要作用及其同化技术发展

1.3.1 卫星观测资料在同化系统中的重要性

正文内容同化系统中同化的观测资料主要有常规观测资料和雷达、卫星探测等非常规资料。在所用观测资料中，常规观测资料的观测地点和观测时间相对固定，且集中于人类活动频繁地区、受时空限制较大，而海洋以及其他人口相对稀疏的地区得到的观测资料较少，远不能满足现在数值预报对观测资料的需求。而与之相比，卫星观测不受地面限制，对全球观测有较好覆盖，很好的补充了常规观测资料地区的大气状态，卫星观测具有较好的垂直空间分辨率，能得到大气天气变量的垂直分布，为数值预报提供了大量的资料来源。其中微波由于其具有一定穿透性等特点，在卫星观测中微波探测是主要手段之一。

现在数值预报使用的观测资料中，卫星观测资料已经占了绝大部分。根据欧洲中期天气预报中心（ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）对某次分析预报业务中所使用资料来源统计结果表明，进入同化业务系统中的观测资料中卫星资料占了 91.41%，而经过资料筛选后卫星资料占总资料量的 99.07%^[14]。图 1.1 为 ECMWF 对多年来观测资料中卫星资料所占比例进行统计结果^[15]，可以发现卫星资料所占比例逐年升高。卫星观测资料对同化效果影响也最明显。ECMWF 观测资料对数值预报贡献评估统计结果，如图 1.2 所示，可以看出 AMSUA 等资料为代表的卫星观测对预报技巧的提升起到了非常大的作用。

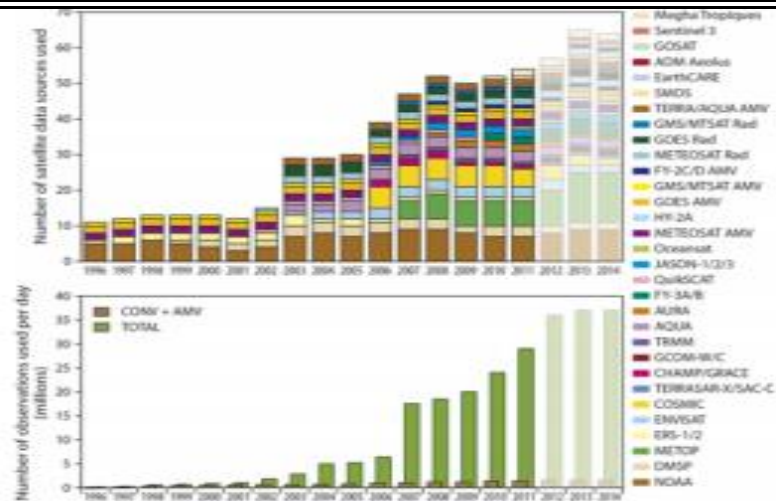


图 1.1 ECMWF 观测资料中卫星资料所占比例变化统计

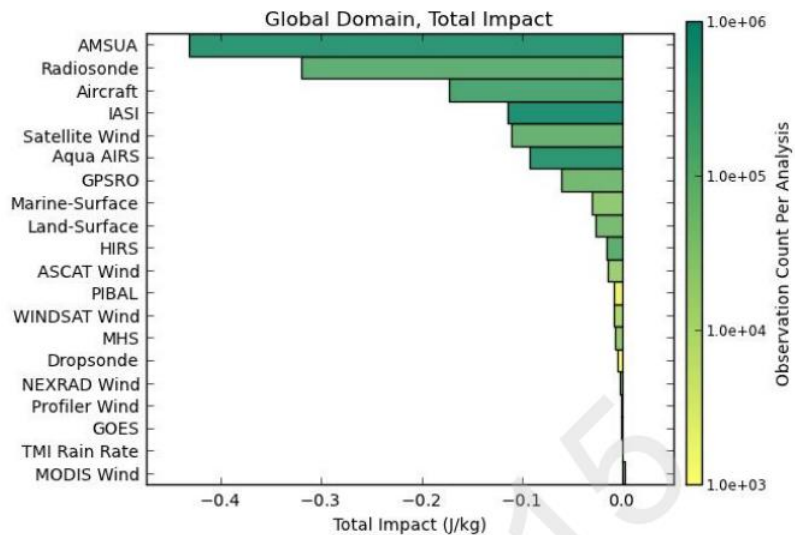


图 1.2 ECMWF 观测资料对数值预报贡献评估统计

1.3.2 卫星观测资料同化技术发展

不同于常规观测资料，卫星观测资料一般为大气辐射率，与数值模式中的温度、湿度、风场等模式变量不同，这使得卫星观测资料不能直接用于模式中运行，从而加大了卫星观测资料同化的复杂度，一般要采用观测算子进行观测辐射率亮温和模式变量之间的转换。另一方面，辐射率与模式变量之间是非线性关系，辐射率和模式之间转换更加复杂。卫星资料同化方法主要有直接同化和间接同化两种方法：直接同化直接使用大气辐射传输模式作为观测算子，从而可以将卫星观测资料直接接入同化系统中；间接同化则首先将卫星探测辐射率资料反演确定大气温度、湿度等变量的廓线，而后将反演廓线作为模式变量加入同化系统中。由于反演过程及其后分析误差特征比较难以确定，反演精度较低，因此间接同化引

入的反演误差将引起数值预报水平下降，现在卫星观测资料的主流方法为直接同化辐射率资料方法^[16]。

欧洲中期天气预报中心（ECMWF）作为中期天气预报数值预报中心中的佼佼者，早在其业务运行系统中实现了 ATOVS 等卫星辐射资料的直接同化，美国国家环境预报中心（NCEP, National Centers for Environmental Prediction）、美国国家大气研究中心（NCAR, National Center for Atmospheric Research, USA）等数值预报中心也已将卫星观测资料加入同化系统中。早在 20 世纪 90 年代初期，Eyer^[17]，Anderson 等^[18]人就将 TOVS 资料应用到同化系统中，改善了数值预报结果，并发现用变分方法直接同化辐射率资料的结果要优于间接同化方法。Deber 利用 NCEP 的 SSI 同化系统直接同化 TOVS 资料，也取得了较好结果^[19]。Liu^[20]详细介绍了 WRF 模式和 WRFDA 同化系统对辐射率资料的直接同化技术，并用 AMSU-A 资料进行试验验证，证明了在 WRF 模式中，AMSUA 微波辐射资料的同化对卡特里娜飓风的预报有正效果。Polkinghome 等人通过利用 GOES 资料和遥感资料进行试验，对同化受云影响的辐射率资料时背景场误差结构构造及治疗控制对试验结果影响的敏感性进行了分析^[21]；在此基础上，他们提出了云标记限制同化格点的方法，使模式中云类型更加靠近实际云，并采用四维变分方法同化受云影响的辐射率资料，通过试验表明了 cloud-resolving 模式中采用此方法可以同化受云影响的辐射率资料，并提高了模式云的质量^[22]。

我国卫星观测资料的同化研究虽然起步较晚，但是也有许多国内学者致力于卫星资料的同化研究。蒲朝霞等从理论上探讨了非定时观测的常规遥感气象资料的新的同化途径^[23]。王子厚等用 HIRS/2 探测仪亮温资料进行处理后加入同化系统，表明了数值预报中直接使用辐射亮温进行同化比使用反演资料要好^[24]。沈桐立等人在 MM4 模式中，采用变分法对有限区域内探空资料和卫星云图资料进行同化，结果表明对降水预报效果显著提高^[25]。闵锦忠等人的研究进一步表明了卫星云图反演资料的同化可改善降水预报^[26]。潘宁等人在 MM5 预报模式中，采用增量三维同化方法，对 AMSU-A 辐射资料与常规观测资料进行直接同化研究，并进行预报试验，表明了同化 AMSU-A 辐射资料对分析场中高层温度要素场影响最明显^[27]。在数值模式和同化系统的开发和设计上，我国许多数值预报中心或研究室开展了许多工作，并取得了很大的进展。国家气象局数值预报中心实现了自主的全球/区域一体化数值预报系统（GRAPES）^[28-29]，其中包含了用于同化 Atovs 等观测资料的三维变分同化子系统——GRAPES-3Dvar 系统^[30]，董佩明^[31]，朱国富^[32]等人在 GRAPES-3DVar 同化系统对 Atovs 等卫星辐射资料进行同化研究，分析了 GRAPES-3DVar 同化系统对卫星辐射资料的同化应用能力。

1.4 我国气象卫星探测发展

卫星观测资料同化应用的发展包括两个方面：气象卫星探测技术的发展和卫星观测资料同化技术的发展。随着数值预报需求和卫星探测技术的发展，我国逐步发展了自己的气象卫星探测系统。气象卫星按照轨道类型不同一般分为两个系列，太阳同步极轨气象卫星和地球静止轨道气象卫星^[33]。从 20 世纪 70 年代我国开始独立设计发展气象卫星，到现在已经实现了风云（FY）系列的极轨系列卫星和静止轨道系列卫星两种卫星设计和部署，其中极轨卫星包括 FY-1/3 系列，静止轨道卫星包括 FY-2/4 系列。世界气象组织（WMO）已经将风云系列气象卫星纳入全球业务应用气象卫星序列，风云气象卫星成为了全球综合对地观测系统的重要组成成员^[34]。随着卫星观测的发展，风云气象卫星的观测资料已经广泛应用于极端天气检测、天气预报以及气候预测等多个领域。

FY-3 系列卫星是我国第二代极轨气象卫星^[35]。其中 FY-3A/B 是试验型卫星，以分别于 2008 年 5 月 27 日和 2010 年 11 月 5 日发射成功，组成了上、下午星卫星观测网；FY-3C 卫星则于 2013 年 9 月 23 日发射成功，代替 FY-3A 正式投入业务使用，与 FY-3B 一起形成上、下午星观测网，实现全天候、全球对地进行多方面观测。

FY-3 系列卫星搭载了多种探测仪，探测频段包括微波、红外、可见光、紫外等光谱范围，表 1.1 介绍了 FY-3 系列卫星的星载遥感探测仪及其主要应用。

表 1.1 FY-3 卫星星载探测仪^[35]

仪器名称	探测光谱范围	应用
可见红外扫描辐射计（VIRR）	0.44 ~ 12.5 μm	植被、泥沙、雪、冰、陆/海表温度、云、水汽总量的探测
中分辨率光谱成像仪（MERSI）	0.40 ~ 12.5 μm	地表特征、植被、海洋水色、水汽总量、云特性等
微波成像仪（MWRI）	10. ~ 89 GHz	降水和云水、大气可降水、地表土壤水分、积雪等
红外分光计（IRAS）	0.69 ~ 15.0 μm	大气温、湿度廓线、射出长波辐射等探测
微波温度计（MWTS）	50 ~ 57 GHz	大气温度廓线、地表辐射率
微波湿度计（MWHS）	150 ~ 183 GHz	大气湿度廓线、降水
地球辐射探测仪（ERM）	0.2 ~ 3.8 μm; 0.2 ~ 50 μm	地球反射太阳辐射通量，射出长波辐射通量
太阳辐射探测仪（SIM）	0.2 ~ 50 μm	探测太阳常数

紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS)	0.16 ~ 0.4 nm	探测 O ₃ 垂直分布
紫外臭氧总量探测仪 (TOU)	0.30 ~ 0.36 μm	探测 O ₃ 总量
空间环境监测器 (SEM)	0.15 ~ 5.7 Mev; 3. ~ 300 Mev; 10 ~ 570 Mev	探测高能粒子、星体内辐射、卫星表面电位差和粒子事件等

FY-3C 作为 FY-3A/B 的完整升级，总共搭载了 12 类探测仪，除了搭载了表 1.1.1 中所示 11 类探测仪外，还搭载了全球导航卫星全球探测仪，用于掩星资料探测。FY-3 卫星所搭载的微波湿度计 (MWTS) 和微波温度计 (MWHS) 作为 FY-3 卫星载荷的重要组成部分，可全天候探测全球大气温度和水汽垂直分布。FY-3C 搭载的微波探测仪在 FY-3A/B 的基础上有了进一步的升级，搭载的新型的微波探测仪 (MWTS II) 和新型微波湿度探测仪 (MWHS II)，增加了多个探测通和探测频点，其探测精度有很大提升。

FY 系列气象卫星为环境监测、天气预报、资料同化等提供充足的观测资料，但是现在对我国自主资料远没有充分进行利用。我国第二代极轨气象卫星发射成功后，对其微波观测资料的利用一直是一个研究热点，FY-3A/B 的微波观测资料有了较多的研究，陆其峰在 ECMWF 的工作中，定量评价了 FY-3A 卫星观测资料的质量及应用前景，为 FY-3A 卫星辐射资料的应用打下基础^[36-38]。Keyi Chen 等人在陆其峰工作基础上，在 ECMWF 同化系统中应用 FY-3A/B 的 MWHS 进行试验，表明 MWHS 观测资料对 ECMWF 系统的数值预报效果产生了积极作用，并标明了 MWHS 观测资料是对 ECMWF 微波湿度资料的很好的补充，因此 ECMWF 将 FY-3A/B 的 MWHS 观测资料加入了其同化系统中^[39]。杨引明等人的研究表明了 FY-3A 微波观测资料的直接同化改善了台风路径预报^[40]。董佩明等在 WRFDA 中对 FY-3A 微波观测资料进行直接同化，并在云雨条件下分别采用 RTTOV 和 CRTM 对微波探测进行辐射亮温模拟，结果表明，FY-3A 微波资料的加入同化系统对台风预报产生了正影响，并且表明了影响卫星资料同化效果的关键之一是云检测^[41]。董佩明等人在 WRFDA 系统中扩展 FY-3A/B 的微波观测资料的同化功能，该模块已经发布在 WRF3.5 及以后版本的同化系统中^[42]。作为新发射的 FY-3C 卫星所搭载的新型微波探测仪也广受关注，Heather Lawrence 等人^[43]在 ECMWF 中对 MWHS II 资料进行了质量评价，并试图将部分通道在 ECMWF 的系统中进行同化。但国内对于 FY-3C 微波观测资料还没利用起来，对 FY-3C 微波资料的同化应用的关键技术还需进一步解决。

1.5 论文研究内容和结构

卫星观测资料对同化系统和数值预报的影响非常大，FY-3C 卫星的成功发射

及其携带的高精度微波探测器大量增加了卫星观测资料的来源，但是对 FY-3C 微波观测资料的同化应用还需要进一步的研究和发展。如何充分利用 FY-3C 微波观测资料可提高数值预报模式初始条件精确性，改善天气预报水平，成为了非常迫切的问题。因此，发展 FY-3C 微波观测资料的同化技术具有重要的研究价值和应用价值。本文通过研究分析 FY-3C 卫星微波观测资料特征分布，评价 MWTS II 和 MWHS II 观测资料质量；在 WRF3.6.1 模式及其三维变分同化系统 WRFDA 中，采用 RTTOV 快速辐射传输模式作为观测算子，发展适用于 FY-3C 卫星微波观测资料的质量控制、偏差订正等技术，设置数据输入接口，实现 WRFDA 同化系统对 FY-3C 微波观测资料的同化，并对 FY-3C 微波观测资料对同化系统和数值预报中的影响进行试验分析。

本文具体工作及章节结构安排如下：

第一章：绪论。本章主要分析文章的研究背景和本文的研究意义。首先介绍资料同化的方法和发展，指出卫星观测资料在资料同化和数值预报的突出作用，提出了对 FY-3C 卫星微波观测资料进行同化的意义，本章还着重介绍了资料同化尤其是卫星资料同化的发展，并通过对之前学者在卫星辐射资料同化中工作的介绍，为 FY-3C 微波观测资料的同化提供技术参考。最后概括了本文主要工作内容和文章结构。

第二章：WRF 模式系统及 RTTOV 辐射传输模式介绍。本章首先介绍了课题研究所采用的 WRFV3.6.1 模式的主要特点及其框架结构，然后分析了 WRFDA 三维变分同化系统，并针对本实验所要同化辐射资料流程进行详细分析，最后对卫星观测资料直接同化所需的关键技术快速辐射模式 RTTOV 模式进行分析。通过本章分析，了解研究系统结构，为实现同化技术的模块打下基础。

第三章：FY-3C 卫星微波观测资料特性研究。本章首先详细介绍了 MWTS II 和 MWHS II 各通道的设计指标，然后采用观测辐射和背景模拟辐射亮温差值的统计研究方法，进行观测偏差残差的统计。根据统计结果，分析 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的特性和质量，依次评估 MWTS II 和 MWHS II 各通道观测资料的同化应用潜力，并以此确定同化系统接收的微波探测资料。

第四章：FY-3C 微波观测资料同化关键技术研究。真正在 WRFDA 系统和 FY-3C 微波观测资料质量特性研究基础上，首先对同化过程中所需要的偏差订正、质量控制、云检测等关键技术进行研究，并在 WRFDA 系统相应模块中进行程序实现；然后根据 FY-3C 微波观测资料的数据文件编码格式和 WRFDA 同化系统接口，实现 FY-3C 微波观测资料和 WRFDA 同化系统的对接，最终实现 FY-3C 微波观测资料在 WRFDA 中的同化应用。

第五章：同化预报试验分析。本章以台风天气为实例设置三个试验进行对比，

并从同化结果和数值预报结果来分析 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对同化系统和数值预报效果的影响。

第六章：总结与展望。对论文的主要成果和结论进行总结，分析研究中还存在的问题并讨论下一步的工作安排。

第二章 WRF 模式系统及 RTTOV 介绍

本课题拟采用 WRF3.6.1 模式的同化系统中实现对 FY-3C 微波观测资料的直接同化，直接同化所采用的卫星观测资料的观测算子为 RTTOV v11.2 快速辐射传输模式。在进行同化之前，需对 WRF 模式、WRFDA 同化系统以及 RTTOV 快速辐射传输模式等有一定的了解。

2.1 WRF 模式及 WRFDA 同化系统

WRF (The Weather Research and Forecast) 模式由 NCAR、NCEP 等多家科研机构共同研制和开发的，它在中尺度数值天气预报领域的应用比较广泛。WRF 模式是一种完全可压非静力模式，同时包含数据同化、大气模拟和数值天气预报的模式系统，对中尺度天气的模拟和预报有比较好的改善^[44]。

2.1.1 WRF 模式系统结构

WRF 模式具有灵活、易维护、可扩展等特点，其系统结构的模块化、结构化清晰。WRF 模式系统框架主要包括前处理、WRF 基础软件库和后处理三个部分，其中 WRF 基础软件库是其主要部分，包括动力求解方案、初始化模块、数据同化模块和物理过程等^[45]。具体系统结构流程图如图 2.1 所示。

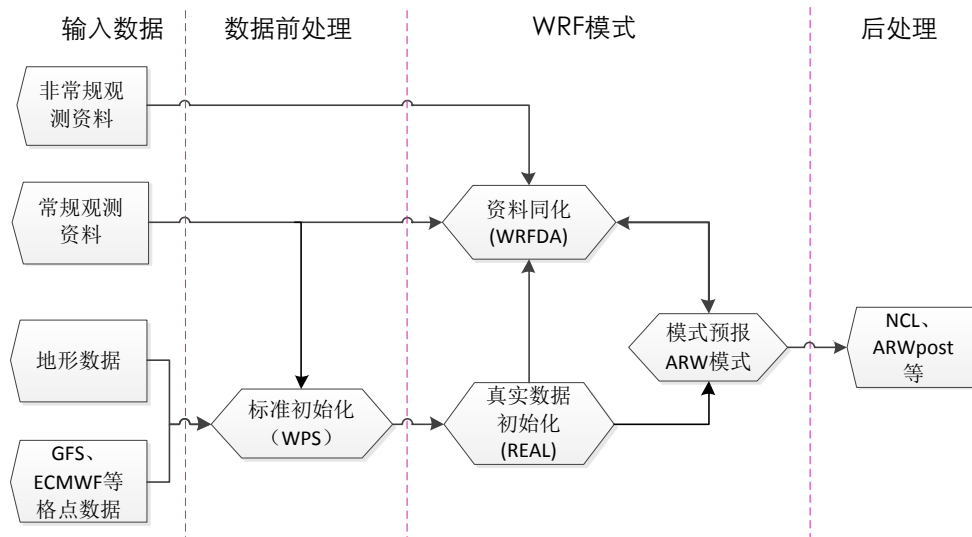


图 2.1 WRF 模式系统结构图^[45]

在模式进行同化预报运行过程中，主要经过前处理（WPS）、同化模块（WRFDA）、动力求解框架（ARW、NMM）以及后处理（Post-Processing&Visualization）四个模块过程，其中 WRFDA 同化模块系统作为本文主要工作系统，将进行进一步详细介绍。

2.1.3 WRFDA 同化系统

WRFDA 是 WRF 模式的同化系统, WRFDA 变分同化系统使用增量同化技术, 采用共轭梯度法进行极小化运算。在 WRFDA 系统中已经实现了三维变分同化 (3Dvar)^[46]系统和四维变分同化 (4Dvar)^[47]系统。WRFDA 同化过程先在 Arakawa A 网格进行同化分析, 并将分析增量插值到 Arakawa C 网格上进行计算, 并与背景场相加得到同化的分析场^[48]。其同化流程如图 2.2 所示。

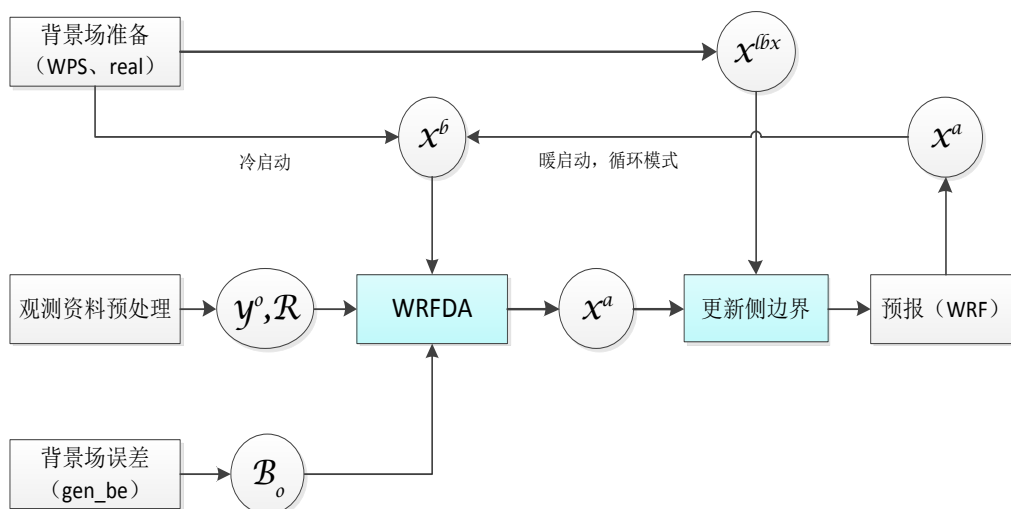


图 2.2 WRFDA 同化系统流程图^[45]

其中圆圈中所述为 WRFDA 系统中的输入输出资料, 其中 x^b 为背景场, 可通过 real 程序生成或采用 WRF 模式预报场作为背景场; y^o 为输入观测资料, 包括常规观测资料和以卫星观测资料为代表的非常规观测资料, 可读取资料格式包括 ASCII 格式或 PRERBUFR 格式文件, 对于不能直接读取的观测资料, 需要对观测资料进行预处理, 本研究所要处理的 FY-3C 微波辐射资料将作为 y^o 的一部分接入同化系统; B_o 为背景偏差文件, R 为观测偏差, 背景和观测偏差文件的正确性直接影响同化结果的准确性; x^a 为分析场, 是 WRFDA 同化系统同化背景场和分析场所得结果; x^{lbx} 为侧边界, 在 WRFDA 得出同化分析场后, 可对侧边界进行更新。分析场 x^a 可作为模式预报的初始场, 可加上更新后的侧边界场接入 WRF 模式中进行模式预报。

2.2 RTTOV 快速辐射传输模式

从三维变分同化的目标函数定义过程可以看出, 观测算子 H 是变分同化的关键技术之一, 它定义了大气状态量和实际观测量之间关系。对于卫星微波观测资料的同化, 观测算子的目的在于将温、湿等模式变量转换为微波观测的辐射值。在实际应用中, 我们采用辐射传输模式完成这一过程。

在给定大气湿度廓线、大气湿度廓线以及其他云参数等状态量后，大气辐射传输模式可以计算卫星微波探测仪的每一个通道沿着观测方向所接收到的辐射强度。我们假设大气层中云为简单的黑色不透明云层，忽略散射效应下，大气顶接收到的辐射大小 $L(\nu, \theta)$ 表示为：

$$L(\nu, \theta) = (1 - N)L^{Clr}(\nu, \theta) + NL^{Cld}(\nu, \theta); \quad (2.1)$$

其中 $L^{Clr}(\nu, \theta)$ 为晴空大气层顶接收到的上行辐射， $L^{Cld}(\nu, \theta)$ 为满云时大气层顶接收到的上行辐射， N 为有效云覆盖量。当 N 为 0 时，则视为完全晴空大气。设置液态水浓度廓线向量为 0，则晴空大气层顶接收的上行辐射值 $L^{Clr}(\nu, \theta)$ 表达式如下：

$$L^{Clr}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta)\varepsilon_s(\nu, \theta)B(\nu, T_s) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T)d\tau + (1 - \varepsilon_s(\nu, \theta))\tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau; \quad (2.2)$$

其中 B 为普朗克函数， ε_s 为地表辐射率， τ_s 为地表到大气层顶透射率， T_s 为模式表面温度， T 为模式层间平均温度。上述方程右边第一项为地表的出射辐射量，第二项为大气发射辐射量，第三项是地表反射的大气下行辐射量，第一、三项合称为地表辐射率贡献项。

对于受云影响的辐射量在假定某一层有不透明的黑体云，布满整个模式区域的条件下计算，其表达式为：

$$L^{Cld}(\nu, \theta) = \tau_{Cld}(\nu, \theta)B(\nu, T_{Cld}) + \int_{\tau_{Cld}}^1 B(\nu, T)d\tau; \quad (2.3)$$

其中 T_{Cld} 为云顶温度， $\tau_{Cld}(\nu, \theta)$ 为云顶到大气层顶的透过率。

RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) 是 ECMWF 研究开发的一种快速辐射传输模式^[49]，该模式以大气温度、湿度、臭氧含量等垂直廓线为输入，通过不同探测仪通道的权重高度等系数计算得到相应的辐射值。在 ECMWF 最新发布的 RTTOV v11.2 版本中，其模式层增加到了 54 层，垂直高度范围从 1050.00hPa 到 0.005hPa。能处理 NOAA、MetOp、GOES 以及 FY 等系列卫星的多种辐射探测通道资料，并且已经初步实现了对 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 的辐射亮温的正演计算^[50]。因此本文选用 RTTOV v11.2 作为快速辐射传输模式接入同化系统中。

RTTOV 具有四个基本模式：正向模式(Forward Model)、切线性模式(Tangent-linear model)、伴随模式(Adjoint model)和 K 矩阵模式(K-matrix model)。

正向模式需调用函数为 `rttov_direct()`，用于直接计算观测点大气层顶指定通道的辐射率值，其调用流程如图 2.3 所示。正向模式即为辐射传输模式正演计算过程，

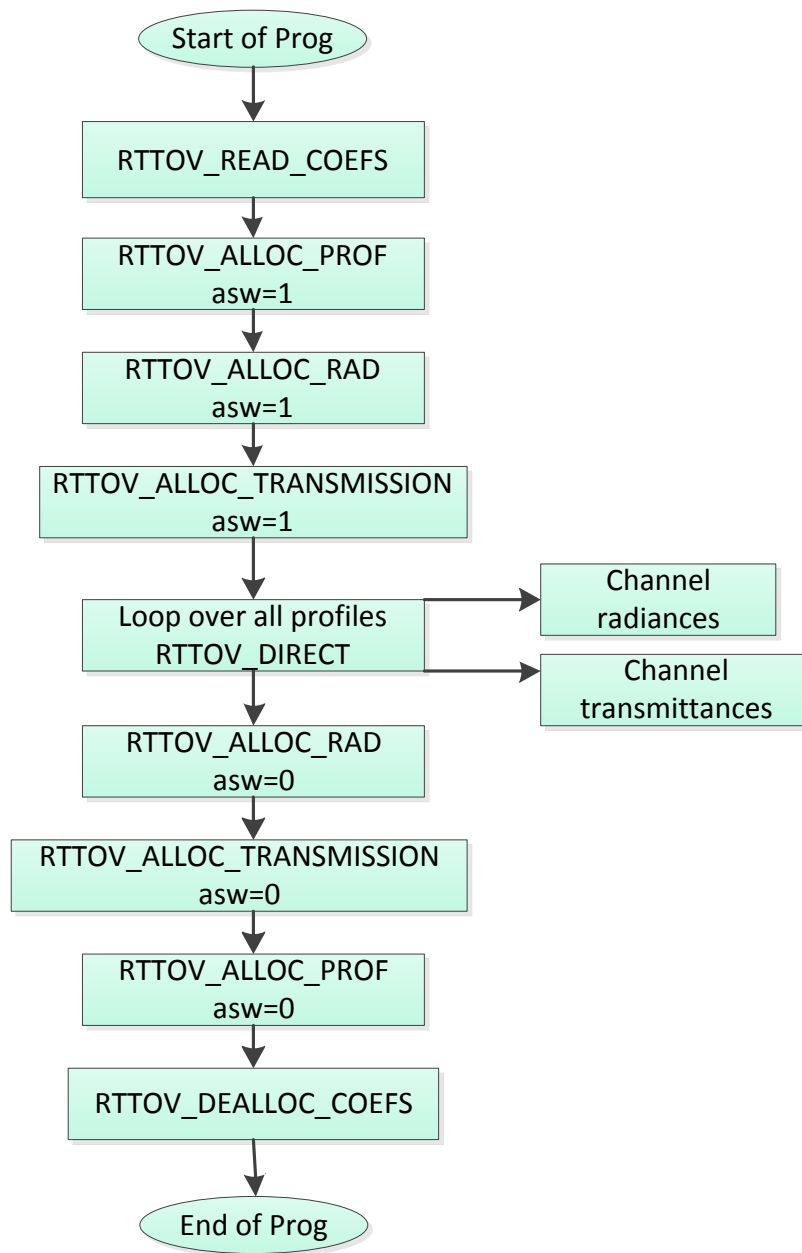
在给定大气温度廓线、大气湿度廓线以及表面状态等模式变量情况下，根据不同探测通道的光谱响应函数，计算卫星通道模拟辐射值。在实际运行过程中，不同探测仪模拟计算过程中要分别调用。模式变量由背景场提供，而通道的响应函数则采用透过率系数文件输入，MWTS II 和 MWHS II 的系数文件采用从 NWP SAF 官网上所发布的 54 层的系数文件 `rtcoef_fy3_3_mwts2.dat` 和 `rtcoef_fy3_3_mwhs2.dat`。在研究过程中，计算观测背景偏差 OMB 时，则需要调用该过程来计算模拟亮温值。

$$OMB = y^o - H(x^b) \quad (2.4)$$

K 矩阵模式调用函数 `rttov_k()`，用于计算正向模式运行过程中每个输入廓线的 Jacobian 矩阵 H。

切线性模式需调用函数为 `rttov_tl()`，在 RTTOV 计算过程求解正向模式的切线性算子，即大气廓线发生扰动下的辐射率变化情况。

伴随模式需调用函数 `rttov_ad()`，用于计算 RTTOV 正向模式的伴随矩阵，可解决极小化计算中所需要的目标函数的梯度问题。

图 2.3 RTTOV 程序调用流程^[50]

2.3 本章小结

本章介绍了课题研究所采用的 WRF3.6.1 模式的主要特点及其框架结构，着重介绍 WRFDA 同化系统，并对卫星资料直接同化方法的关键技术快速辐射模式中的 RTTOV 模式进行详细介绍和分析。为在 WRFDA 中实现微波观测资料的同化设计打下基础。

第三章 FY-3C 卫星微波观测资料特性研究

3.1 FY-3C 微波探测仪介绍

MWTS II 增加到了 13 个探测通道，探测扫描周期为 8/3 秒，每条扫描线观测 90 个地球视场，星下点分辨率 33km，位于 50~60GHz 的探测频率和探测地表发射率和地面到 6hPa 高度的大气温度分布状态。MWTS II 通道参数设计指标如下表 4.1 所示。

表 3.1 MWTS II 通道参数设计指标

通道序号	中心频率/GHz	带宽/MHz	灵敏度/K	动态范围 /K	定标精度 /K	主波效率
1	50.3	180	1.5	3~340	1.5	>90%
2	51.76	400	0.9	3~340	1.5	>90%
3	52.8	400	0.9	3~340	1.5	>90%
4	53.596	400	0.9	3~340	1.5	>90%
5	54.40	400	0.9	3~340	1.5	>90%
6	54.94	400	0.9	3~340	1.5	>90%
7	55.50	330	0.9	3~340	1.5	>90%
8	57.290344(fo)	330	0.9	3~340	1.5	>90%
9	fo±0.217	78	1.5	3~340	1.5	>90%
10	fo±0.3222±0.048	36	1.5	3~340	1.5	>90%
11	fo±0.3222±0.022	16	2.3	3~340	1.5	>90%
12	fo±0.3222±0.010	8	3.0	3~340	1.5	>90%
13	fo±0.3222±0.0045	3	4.5	3~340	1.5	>90%

MWHS II 探测仪则有 15 个探测通道，探测扫描周期为 8/3 秒，每条扫描线观测 98 个地球视场，星下点分辨率 15km。MWHS II 同时拥有 183.31GHz 探测频点和 118.75GHz 探测频点。其中 183.31GHz 探测频点与原微波湿度计的主探测频点一致，但探测通道有所增加，细分通道设置有 5 个探测通道，用于大气湿度垂直探测；而 118.75GHz 探测频点位于氧气吸收线，是世界上第一个在业务上使用该探测频点的微波探测仪，细分有 8 个探测通道，用于大气温度的高空间探测；辅助探测频点则位于大气窗区的 89GHz 和 150GHz，用于背景微波辐射探测和降水检测等^[51]。由于 MWHS II 同时拥有温度和湿度探测通道，又被称为微波湿温探测仪。表 4.2 显示了 MWHS II 探测仪通道各项设计指标。

表 3.2 MWHS II 通道参数设计指标

通道序号	中心频率/GHz	极化方式	带宽/MHz	灵敏度/K	动态范围/K	定标精度/K	主波效率
------	----------	------	--------	-------	--------	--------	------

1	89	V	1500	1.0	3~340	1.3	>92%
2	118.75 \pm 0.08	H	20	3.6	3~340	2.0	>92%
3	118.75 \pm 0.2	H	100	2.0	3~340	2.0	>92%
4	118.75 \pm 0.3	H	165	1.6	3~340	2.0	>92%
5	118.75 \pm 0.8	H	200	1.6	3~340	2.0	>92%
6	118.75 \pm 1.1	H	200	1.6	3~340	2.0	>92%
7	118.75 \pm 2.5	H	200	1.0	3~340	2.0	>92%
8	118.75 \pm 3.0	H	1000	1.0	3~340	2.0	>92%
9	118.75 \pm 5.0	H	2000	1.0	3~340	2.0	>92%
10	150	V	1500	1.0	3~340	1.3	>95%
11	183.31 \pm 1	H	500	1.0	3~340	1.3	>95%
12	183.31 \pm 1.8	H	700	1.0	3~340	1.3	>95%
13	183.31 \pm 3	H	1000	1.0	3~340	1.3	>95%
14	183.31 \pm 4.5	H	2000	1.0	3~340	1.3	>95%
15	183.31 \pm 7	H	2000	1.0	3~340	1.3	>95%

3.2 研究方案设计

为了更好的同化应用 FY-3C 卫星微波探测辐射资料,对 FY-3C 卫星微波观测资料的特征分布进行分析是必须的,研究 FY-3C 卫星微波观测资料的性能和大气探测精度,研究微波观测资料误差来源,从而为 FY-3C 微波观测资料的质量控制提供指导。

研究上采用微波探测仪观测亮温与 RTTOV 快速辐射传输模式正演模拟亮温差值分布统计方法。仪器观测辐射亮温值来自国家卫星气象中心发布的 MWTS II 和 MWHS II 观测资料,模拟亮温则使用 NCEP 的 fnl 在分析资料为背景场,作为 RTTOV 快速辐射传输模式的输入数据,通过使用 FY-3C 卫星的 MWTS II 和 MWHS II 探测仪在 RTTOV 中的快速辐射透过率系数,从而计算 MWTS II 和 MWHS II 探测仪的模拟辐射亮温值的方法。观测模拟亮温偏差分布用于分析 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的特征分布。以此评价 MWTS II 和 MWHS II 探测精度和辐射资料的质量,观测误差的分布,还可作为质量控制的依据。

中国气象卫星中心每天更新 FY-3C 卫星观测资料,其中 MWTS II 和 MWHS II 观测资料是以 HDF5 格式封装的 Level 1 数据。下面通过分别对 MWTS II 和 MWHS II 资料的观测偏差统计分析。

模拟分析区域选取我们研究中常用的对我们影响也比较大的区域——东亚和西北太平洋地区,具体区域设置为 20°S~40°N、105°E~170°E。根据卫星轨道扫描线可以看出,每天有多次上行扫描和下行扫描经过该区域,其中上行扫描时间为每天 00 时左右,下行扫描时间为 12 时左右,在分析过程中,将上行和下行扫描分别作为一个统计样本,则每天有两个统计样本,从 2014 年 8 月 1 日到 2014 年 8

月 30 日，共分析 30 天，每天两个分析样本，总共 60 个分析样本。

在进行具体分析过程中，观测亮温和模拟亮温差值的统计参数，主要包括观测模拟偏差的平均值（mean）、标准差（stdv）和均方根（rms），其表达式分布如公式 3.1~3.3 所示。

$$mean = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{obs} - T_{bg}) \quad (3.1)$$

$$stdv = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{obs} - T_{bg} - mean)^2} \quad (3.2)$$

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{obs} - T_{bg})^2} \quad (3.3)$$

3.3 MWTS II 观测模拟偏差

图 3.1 表示了 MWTS II 在模拟分析区域内卫星上行和下行扫描视场图。可以看出，在该区域内 MWTS II 每天上行扫描轨道有 3 条，下行扫描轨道 3 条。

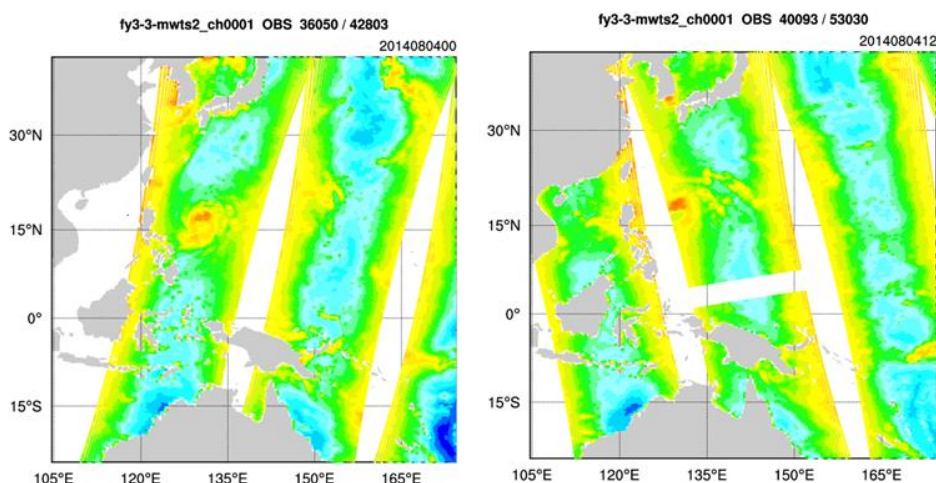


图 3.1 MWTS II 在统计区域上行（左）和下行（右）扫描轨迹图

我们以 2014 年 8 月 4 日的下行扫描轨道的观测背景偏差差值（OMB）进行分析。图 3.2 和图 3.3 显示了探测通道 1~13 各观测视场在未经过系统偏差订正前的各通道观测亮温和模拟亮温差值大小，即原始观测和模拟亮温差。横纵坐标分别为经度和纬度，其中灰色区域为非海面区域，由于研究只考虑海洋表面资料的同化，因此对于非海洋表面的资料不在统计范围内。并对各通道观测模拟亮温偏差分布情况进行统计，如图 3.4 所示，图中横坐标为观测背景亮温偏差大小，纵坐标为分布在不同偏差值的观测视场数量。而各通道观测模拟亮温偏差平均值大小和标准差统计结果如图 3.5 所示。从对 MWTS II 的观测背景偏差统计结果可得出以

下结论。

(1) 权重函数峰值高度不同的通道由于观测亮温影响因素不同，其系统偏差方向不一致，中低层大气观测辐射亮温值偏小，而高层大气观测辐射亮温值偏大。

(2) 在实际应用 MWTS II 辐射资料时，如在同化过程中，需要满足观测背景无偏性的要求，因此将对其进行偏差订正。在未进行偏差订正前，对其观测背景偏差的分布形态以及标准差的统计结果就更为重要。从图 3.4 的偏差分布统计结果和图 3.5 中所求的各通道偏差标准差大小来看，位于通道观测权重函数峰值位于中层大气的通道分布形态较好，如通道 3、4、5、6、7、8，偏差分布范围较小，且更集中于其平均差大小处；而比较其偏差标准差大小可以看出，所对应通道的标准差大小也比较小。

(3) 在对该特例进行分析的基础上，统计了试验所进行的 60 次观测背景偏差统计结果，如图 3.6 所示，分别表示了 2014 年 8 月各通道观测背景偏差的偏差大小的平均值和偏差标准差平均值，通过一个月的统计，仍可得出上述分析结论。

(4) 经过以上分析，我们在同化应用过程中去除偏差分布范围较大、观测背景偏差标准差较大的通道，以减少观测资料给同化带来的误差。同时参考 WRFDA 同化 ATMS、AMSUA 等微波观测所使用的通道可以发现，WRFDA 对 ATMS 和 AMSUA 通道的同化主要集中于观测权重函数位于中层大气的几个通道。因此，在本研究中，MWTS II 观测在 WRFDA 中的同化只使用 MWTS II 的第 3、4、5、6、7、8 六个通道的观测资料。

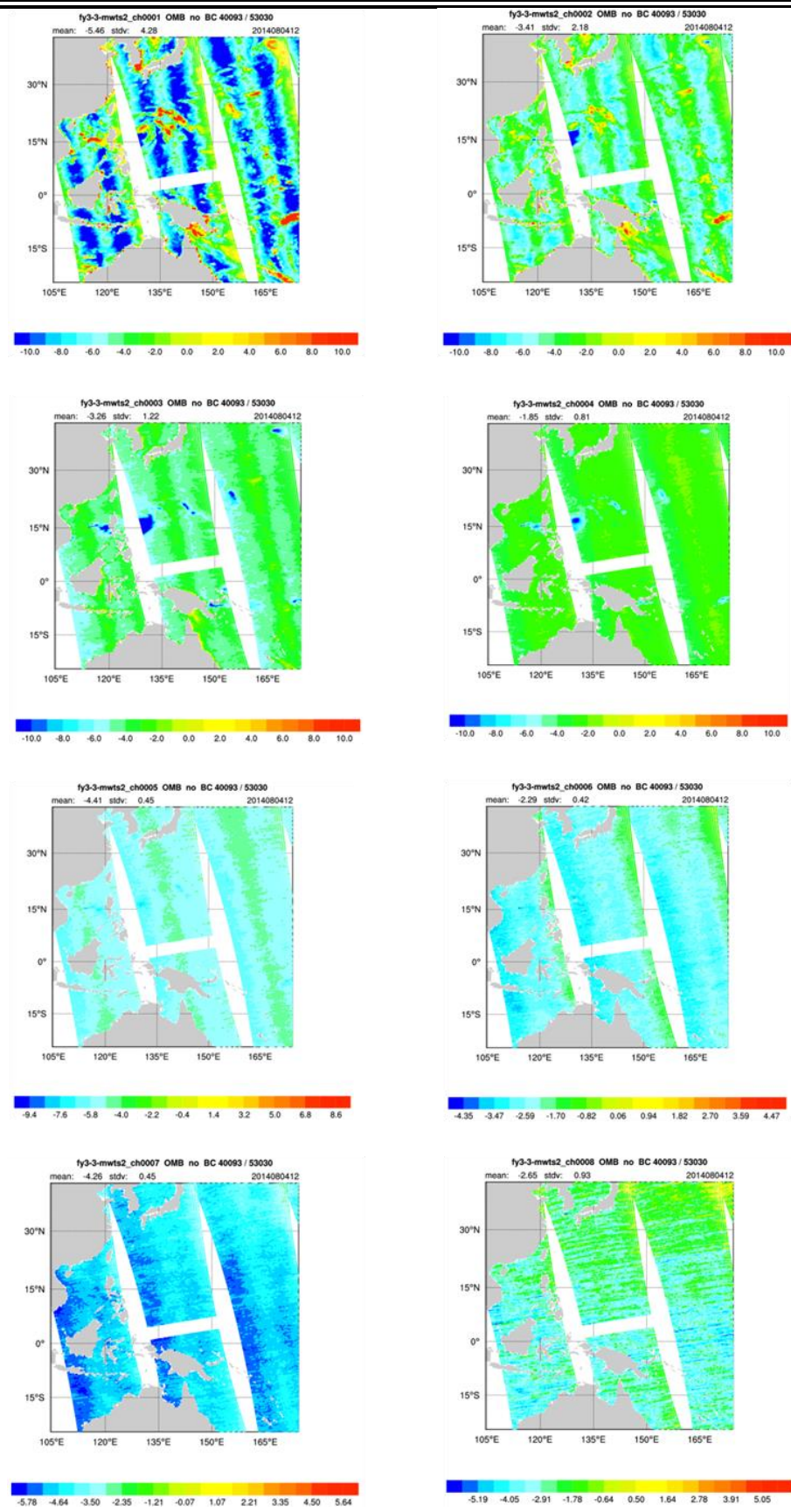


图 3.2 MWTS II 通道 1~8 观测亮温偏差值

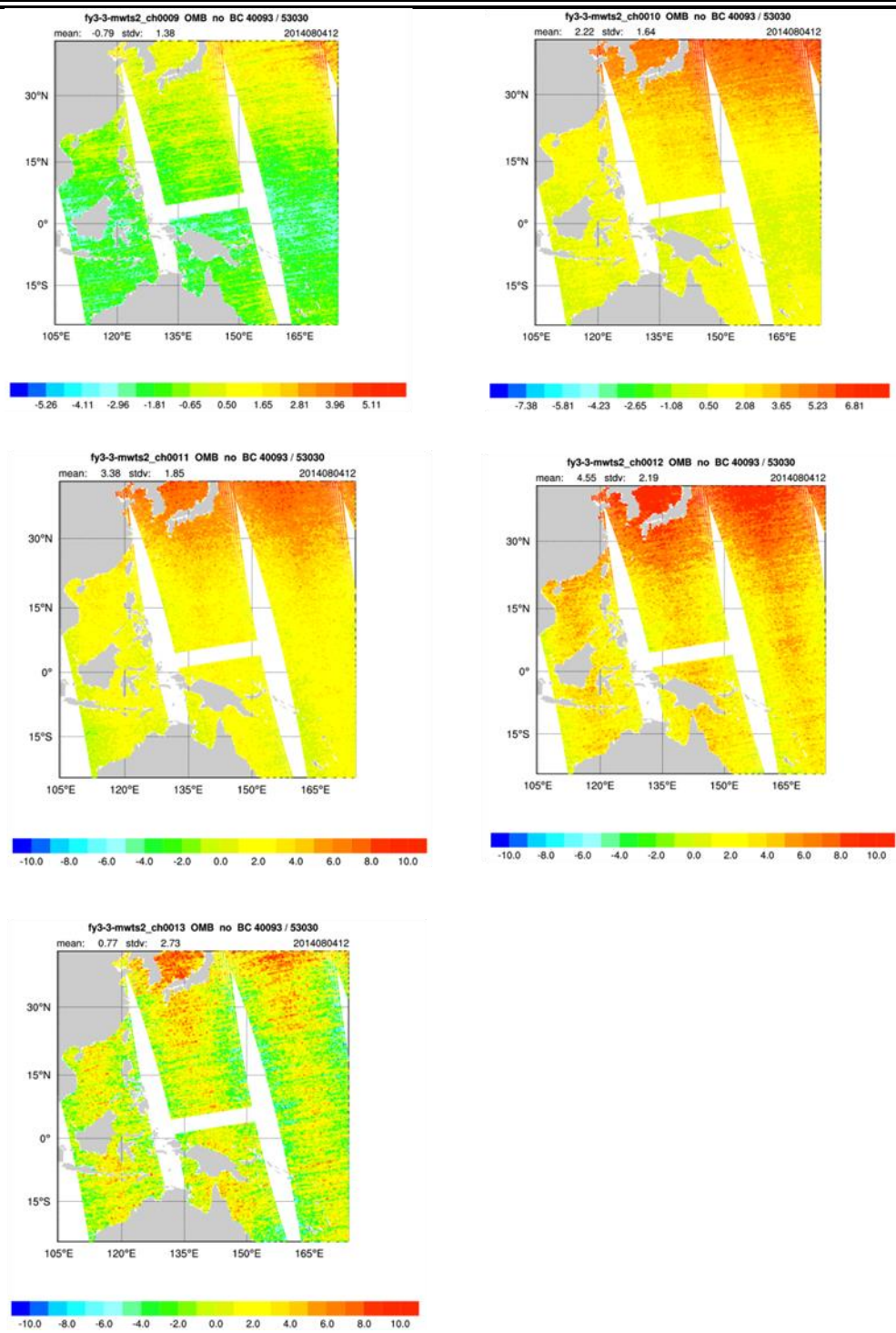


图 3.3 MWTS II 通道 9~13 观测亮温偏差值

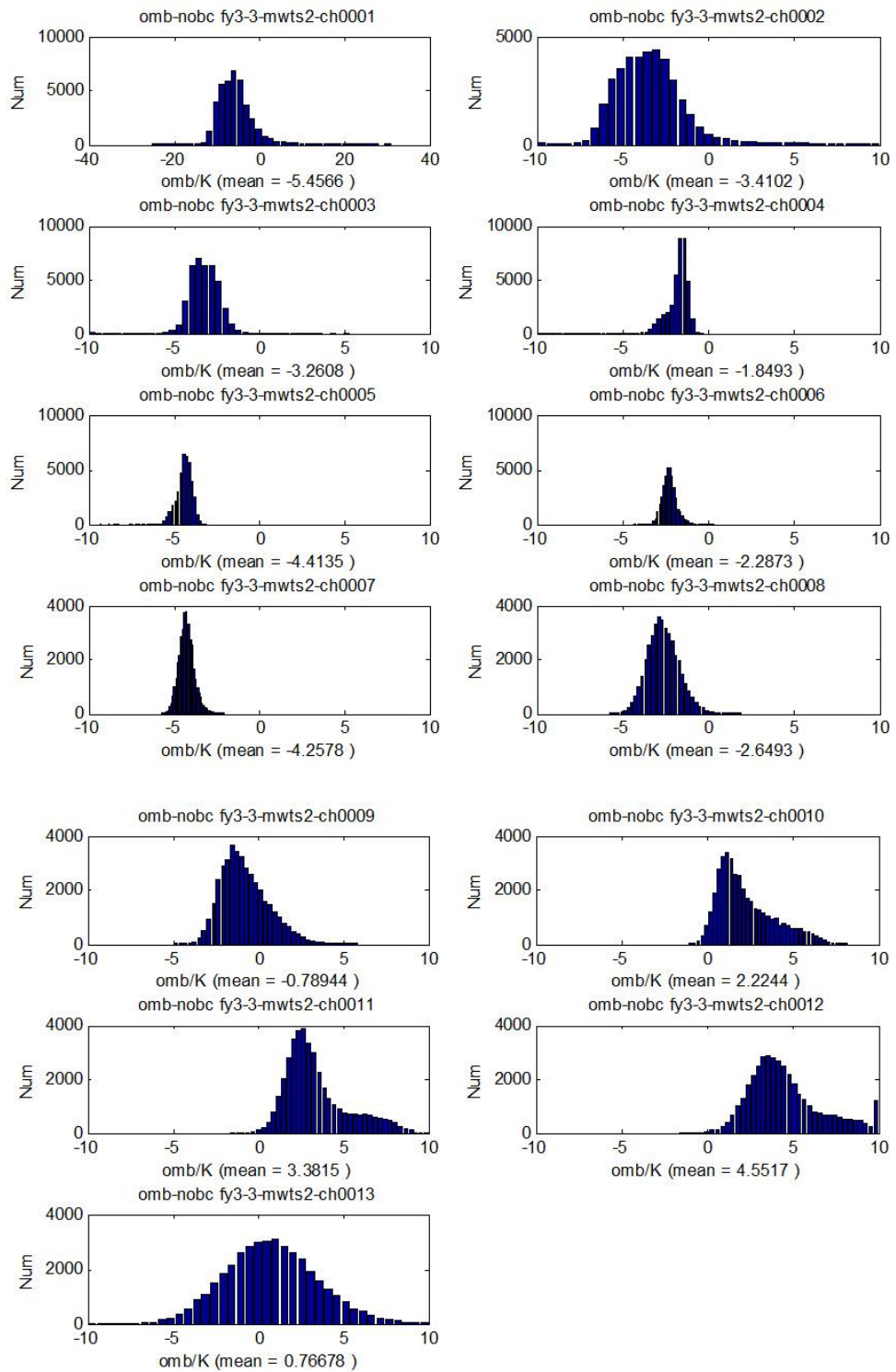


图 3.4 MWTS II 探测通道观测亮温偏差统计

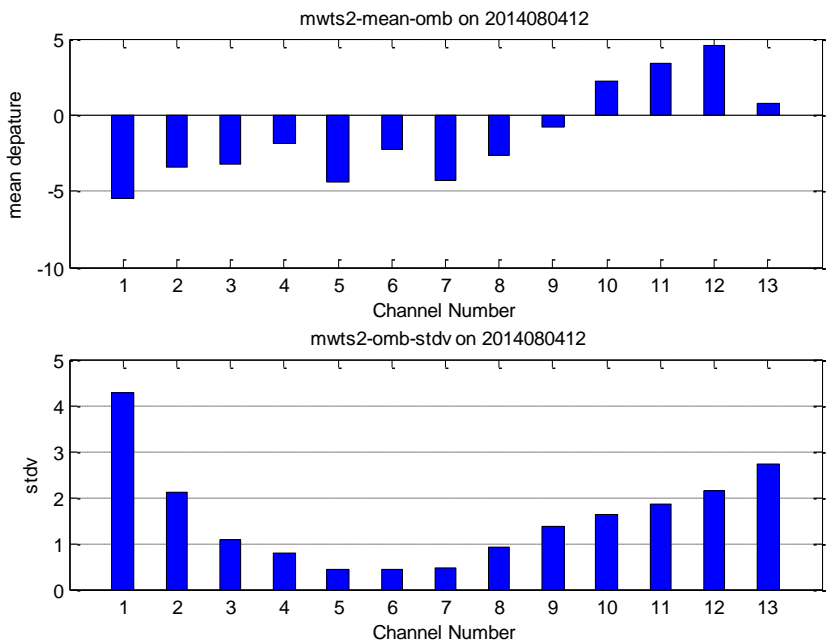


图 3.5 MWTS II 通道观测背景偏差统计均值和标准差

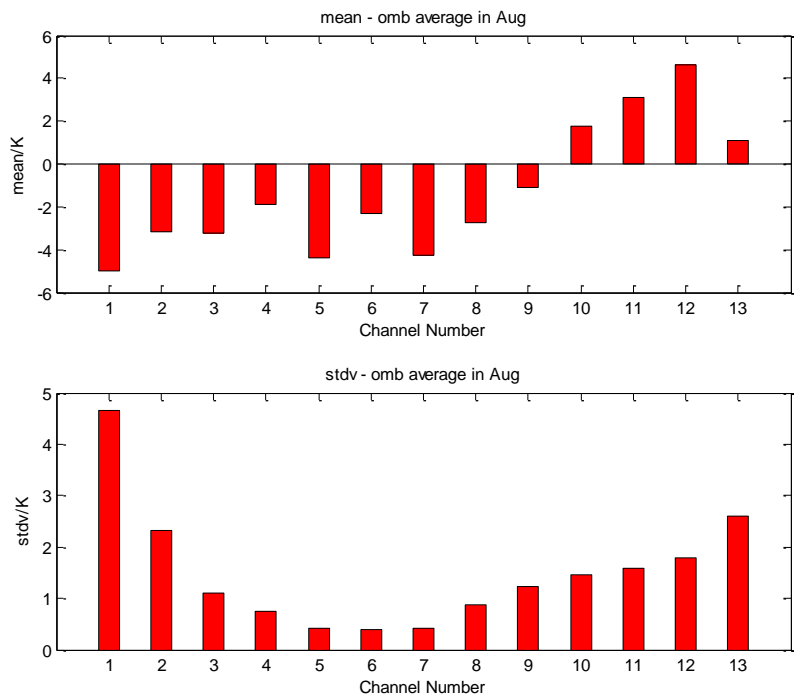


图 3.6 2014 年 8 月观测背景偏差各通道统计参数平均值

3.4 MWHS II 观测模拟偏差

如图 3.7 表示了 MWTS II 在模拟分析区域内卫星上行和下行扫描视场图。可以看出，在该区域内 MWHS II 每天上行扫描轨道有 3 条，下行扫描轨道 3 条。

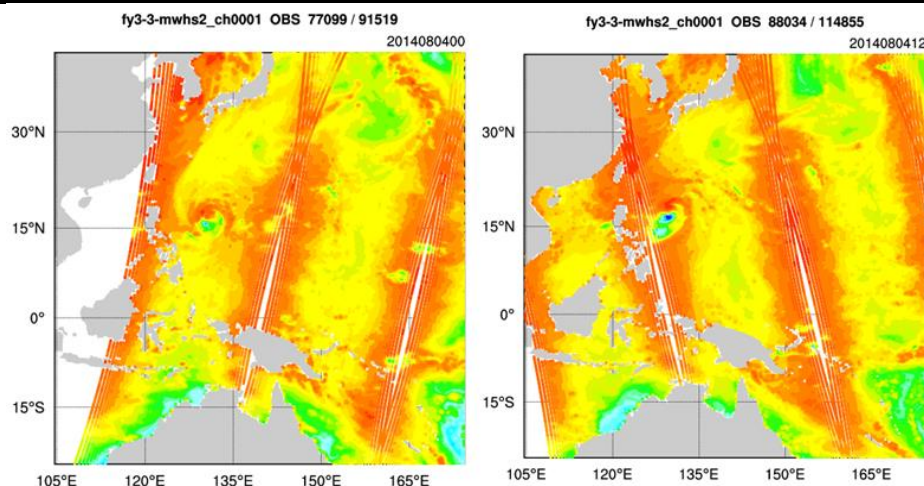


图 3.7 MWHS II 在统计区域扫描路径图 (左为上行扫描路径, 右为下行)

同对 MWTS II 观测分析方法一样, 我们首先以 2014 年 8 月 4 日的下行扫描轨道的观测背景偏差差值 (OMB) 进行分析。图 3.8 和图 3.9 显示了 MWHS II 的 15 个探测通道各观测视场在不经系统偏差订正前的各通道观测亮温和模拟亮温差值大小, 即原始观测和模拟亮温差, 同样只分析海面观测。图 3.10 则表示了 MWHS II 通道亮温观测背景偏差的分布情况。图 3.11 则统计了各通道观测背景偏差的平均值和标准差大小。通过以上统计结果可得出以下结论。

(1) 权重函数峰值高度不同的 MWHS II 的通道由于观测亮温受影响因素不同, 其系统偏差方向不一致。其中氧气吸收频点 118.75GHz 附近通道为大气温度探测通道, 表现出偏差方向与温度探测仪的系统偏差方向一致, 在高空探测通道的观测相对于背景模拟辐射亮温值偏大, 而中低空大气探测通道观测值一般偏小; 但是对于 183.31GHz 的湿度探测通道, 权重函数峰值高度普遍较低, 对水汽也更敏感, 其观测偏差方向则没有表现出明显分布规律。

(2) MWHS II 观测背景偏差与 MWTS II 观测模拟偏差统计结果相比较, 可以看出, 大气温度探测通道的偏差一般要比大气湿度探测通道的观测偏差标准差较小, 这是由于湿度探测通道对大气中水汽等物质更敏感。同时可以看出地表探测通道由于受地表状态影响较大, 其观测偏差普遍较大, 因此在同化过程中一般不同化地表探测通道的观测资料。但是地表探测通道在其他地方发挥很大用处。

(2) 与同化 MWTS II 辐射资料类似, 在同化 MWHS II 辐射资料时, 需要满足观测背景无偏性的要求, 因此同化系统将对所使用观测资料进行偏差订正。在未进行偏差订正前, 对其观测背景偏差的分布形态以及标准差的统计结果就更为重要。从图 3.10 的偏差分布图和图 3.11 中各通道偏差均值大小和偏差标准差大小来看, 118.75GHz 探测频点附近通道表现比 183.31GHz 探测频点附近通道较好, 尤其 118.75GHz 探测频点处的通道 3、4、5、6 偏差标准差较小, 分析其观测偏差分布统计图可以看出, 偏差分布范围较小, 且很接近于高斯分布形态, 该探测频点

首次应用于业务上的卫星微波观测，表现出了很好的同化应用潜力。

(3) 在对该特例进行分析的基础上，分析了 MWHS II 观测偏差试验所进行的 60 次观测背景偏差统计结果，如图 3.12 所示，分别表示了 2014 年 8 月各通道观测背景偏差的偏差大小的平均值和偏差标准差平均值，可以看出，MWHS II 观测仪各通道观测偏差统计月平均结果与上述特例表现一致，因此通过一个月的统计，仍可得出上述分析结论。

(4) 经过以上分析，我们在对 MWHS II 观测同化应用过程中采取偏差分布范围较小、偏差标准差较小的通道，首先选择表现好的 118.GHz 探测频点附近的四个通道，即通道 3、4、5、6。而 183.31GHz 探测频点进行微波观测在 ATMS、AMSUB、MHS 等探测仪中都应用比较成熟，WRFDA 等同化系统在运行中接收 ATMS、MHS 等微波探测仪的 183.31GHz 探测通道的观测资料，同时 183.31GHz 探测频点为水汽吸收线，为了充分利用观测资料反应大气水汽情况，因此将 183.31GHz 探测频点附近通道观测资料也加入同化系统中。因此 MWHS II 探测仪用于同化的观测通道将选择通道 3~6 和通道 11~15 共 9 个通道。

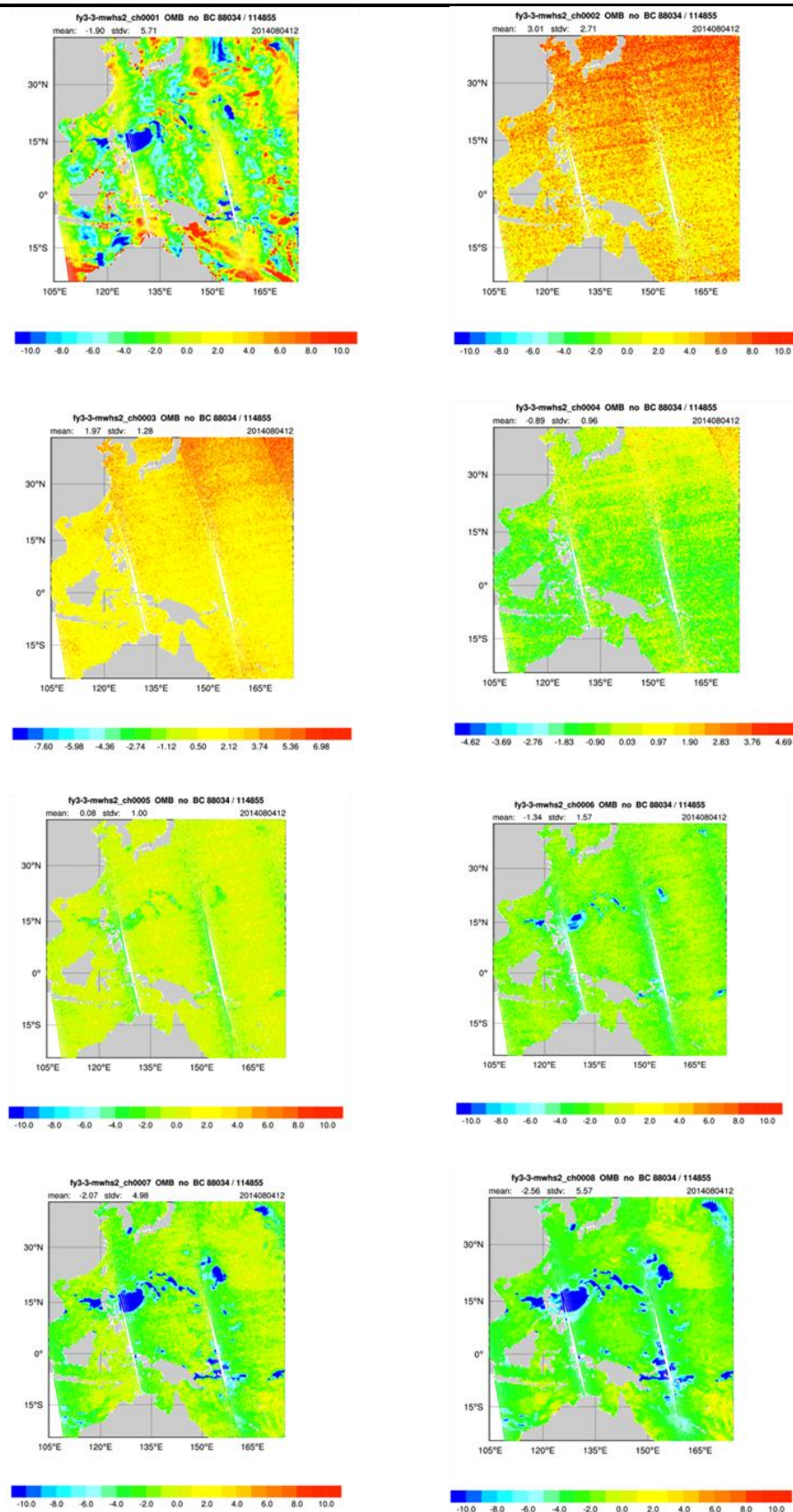


图 3.8 MWHS II 通道 1~8 观测偏差值

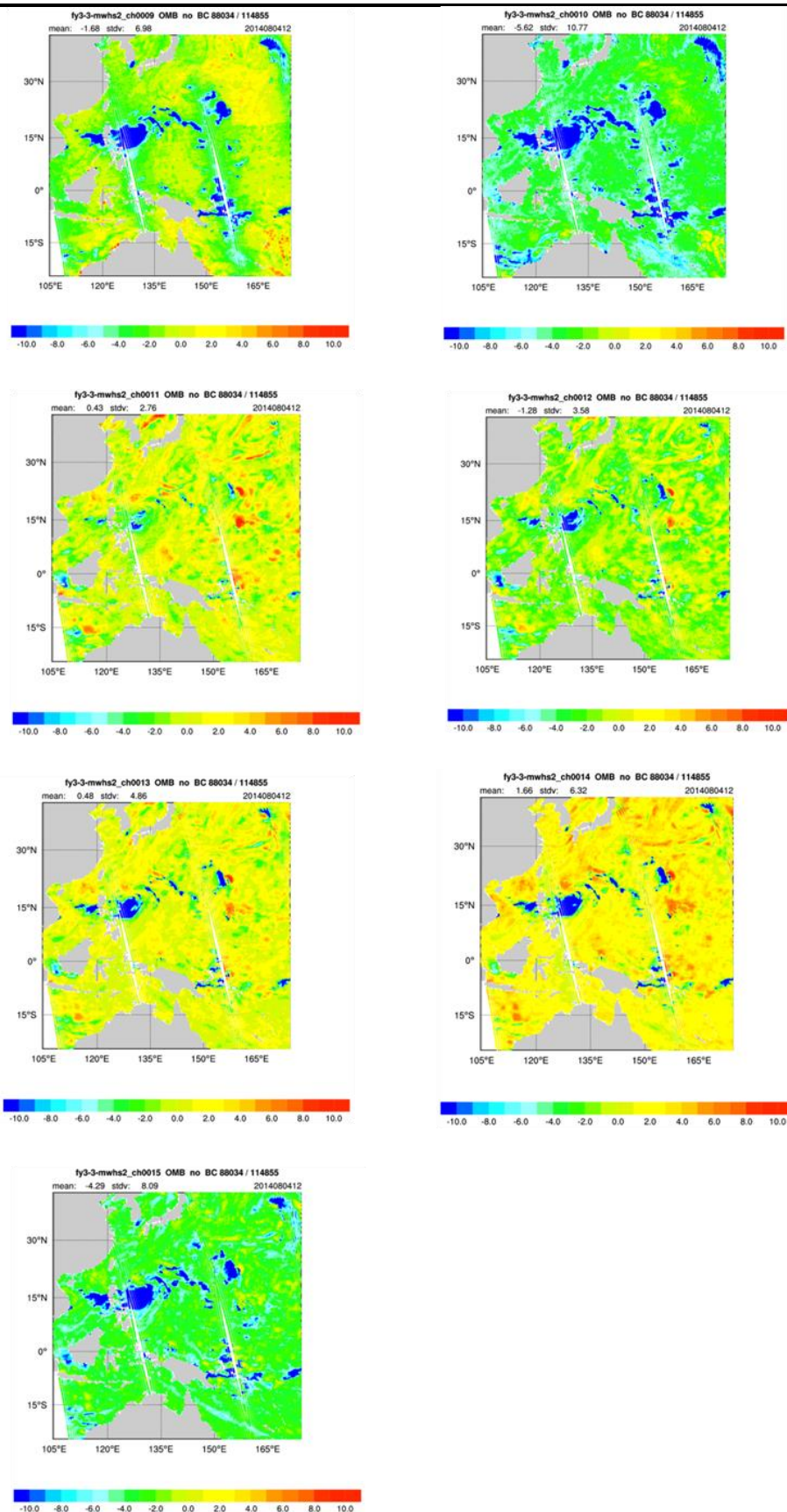


图 3.9 MWHS II 通道 9~15 观测偏差值

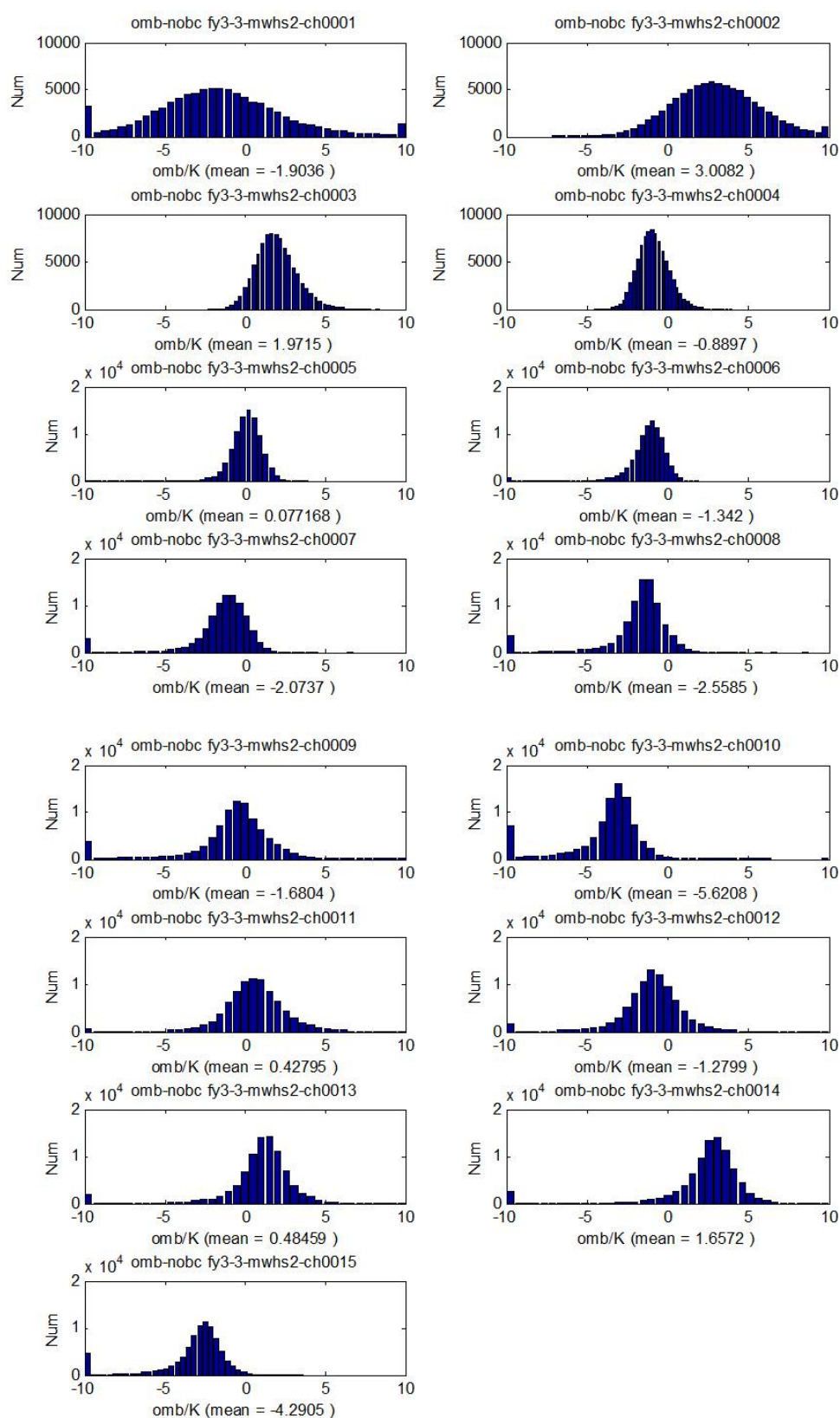


图 3. 10 MWHS II 探测通道观测亮温偏差统计

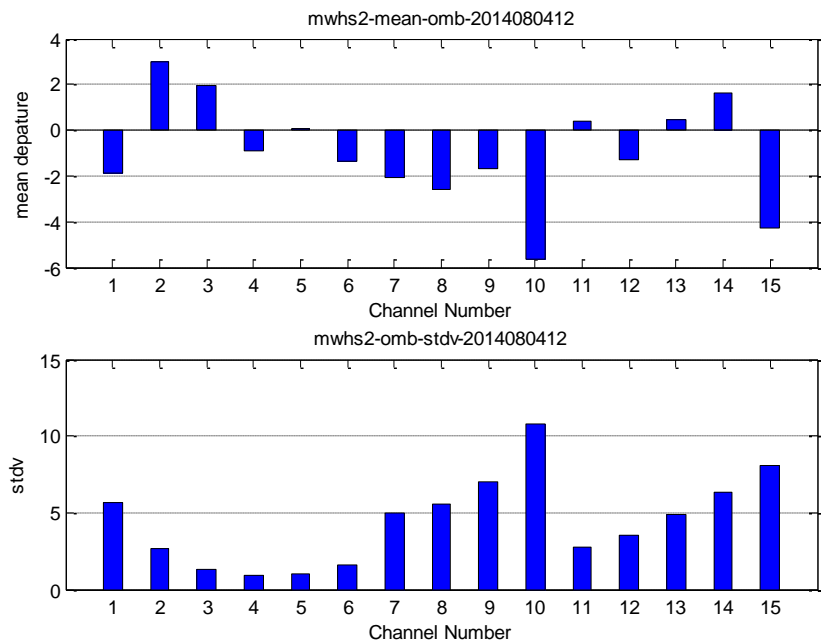


图 3.11 MWHS II 探测通道观测背景偏差均值和标准差

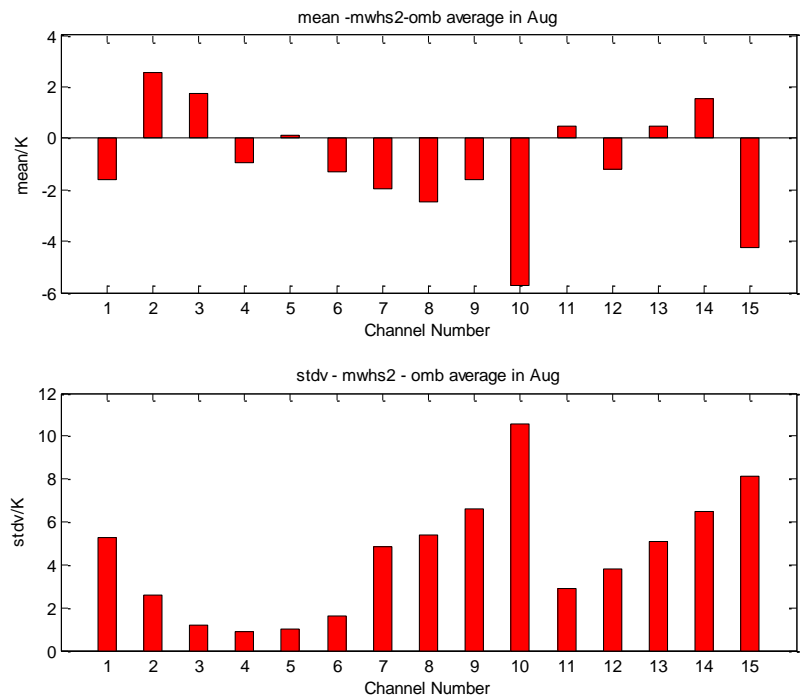


图 3.12 2014 年 8 月 MWHS II 探测通道背景偏差统计平均结果

3.5 本章小结

本章采用对 MWTS II 和 MWHS II 探测通道的观测模拟亮温差值的统计分析，评估了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料质量，统计结果表明，MWTS II

探测仪的中层探测通道观测质量较好，可用于同化系统进行同化，MWTS II 探测仪氧气探测频点的探测通道观测资料的质量明显好于水汽探测通道观测资料质量。经过以上分析确定同化的通道选取 MWTS II 的第 3~8 通道，MWHS II 的 3~6 通道和 11~15 通道。之后着重分析了同化系统使用资料的质量。

第四章 FY-3C 微波观测资料同化关键技术研究

WRF3.6.1 模式三维变分同化系统比较成熟，模块化的设计使得新的卫星资料的加入该同化系统相对比较简单。在之前学者研究的卫星微波辐射资料同化技术的基础上，针对 FY-3C MWTS II 和 MWHS II 观测资料，选择合适的同化过程所需的偏差订正、质量控制、云检测等关键技术，并以 WRF3.6.1 模式三维变分同化系统为基础，实现对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化。

4.1 FY-3C 卫星微波观测资料偏差订正

卫星观测资料由于仪器本身等存在系统偏差，使得卫星观测辐射亮温结果与模拟计算辐射值之间会产生一定偏差，因此必须对其进行有效偏差订正^[52]。系统偏差的订正是保证卫星辐射率资料质量和同化效果的关键技术之一。

4.1.1 偏差订正方法

现在卫星资料偏差订正技术方案主要有变分自适应偏差订正以及离线偏差订正两种方案。两种偏差订正各有特点，主要技术思想在于采用卫星观测值与背景场模拟值的差值对观测进行订正。其中离线偏差订正技术基于 Harris 和 Kelly 的理论发展而来^[53]，首先根据每个扫描角测值相对于天底测值的偏差，进行扫描订正，然后采用回归方法进行气团偏差订正；变分自适应偏差订正方法则在目标函数中引入偏差订正因子，在极小化循环计算过程中使其订正值达到最优^[54]。崔丽梅等通过采用两种偏差订正方法对 ATOVS 辐射资料的订正效果进行对比，详细分析比较了两种偏差订正方法^[55]。本研究采用变分偏差订正方法。变分偏差订正技术计算过程分为以下几步：

- (1) 通过设置 n 个订正预报因子 $P_i(x)$ 及其对应的订正系数 β_i 的线性组合形成偏差订正量 BC 。

$$BC(x, \beta) = \sum_{i=1}^n \beta_i P_i(x); \quad (4.1)$$

- (2) 偏差订正最终效果在于修正观测辐射增量，相当于在原观测算子上增加了一个增量算子，形成一个新的观测算子。

$$H(x, \beta) = H(x) + BC(x, \beta); \quad (4.2)$$

- (3) 将新形成的观测算子应用于方程 4.3 中的目标函数中，即可得到适应于观测场 y 和背景场 x 的最优订正系数。

$$J(\beta) = \frac{1}{2} [y - H(x, \beta)]^T [y - H(x, \beta)]; \quad (4.3)$$

4.1.2 偏差订正模块效果分析

在研究中, 采用自适应偏差订正方案对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料进行偏差订正, 参考对 AMSUA、MHS、ATMS 等仪器偏差订正初始系数, 设置 MWTS II 和 MWHS II 的偏差订正统计系数。

为了检验所使用偏差订正性能, 通过试验检验 MWTS II 和 MWHS II 观测资料在偏差订正前后的特征统计。偏差订正试验使用 2014 年 9 月 10 日 12 时 (UTC, 世界时, 若未作特殊说明, 本文试验设置所用时间均为世界时) 的 NCEP 的 fnl 全球预报再分析资料作为背景场, 用来订正同时段 MWTS II 和 MWHS II 的观测资料, 分别以 MWTS II 通道 6 和 MWHS II 通道 6 进行分析。

MWTS II 通道 6 在观测资料在偏差订正前后观测象元分布图和观测模拟偏差 (OMB) 的频率分布柱状图如下图所示。其中图 4.1 为其观测模拟偏差频率分布在偏差订正前后的变化, 图 4.2 则为观测象元在偏差订正前后分布散点图。可以得出, 经过偏差订正, MWTS II 通道 6 的观测象元分布基本位于主对角线上, 偏差平均值接近于 0, 均方根的大小也大幅减小。结果表明, 变分偏差订正使得 MWTS II 观测亮温资料与模拟亮温分布趋于合理, 偏差得到很大程度的降低。

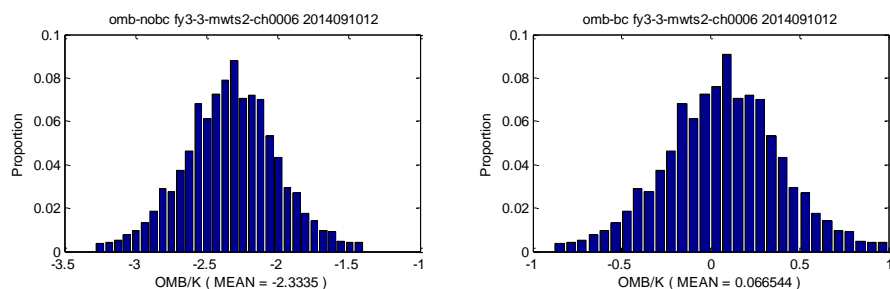


图 4.1 MWTS II 观测资料偏差订正前 (左图) 后 (右图) 观测背景偏差分布

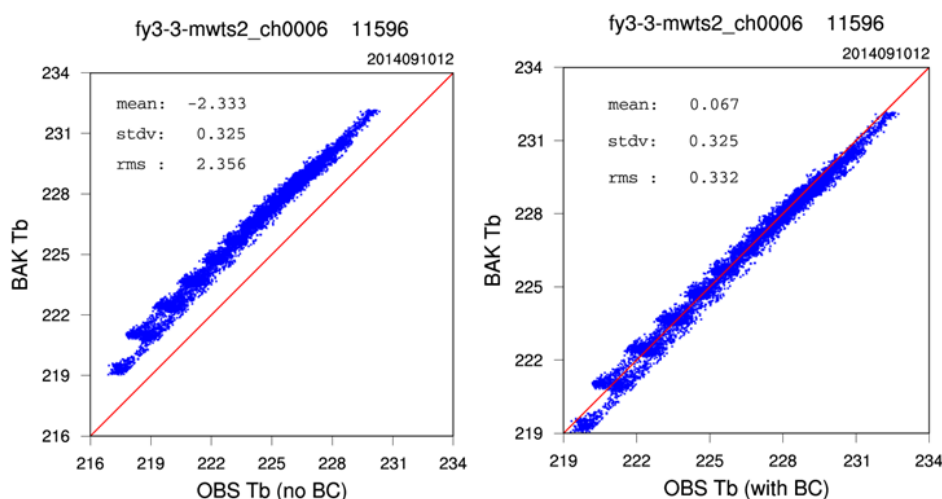


图 4.2 MWTS II 观测资料偏差订正前 (左图) 后 (右图) 拟合散点图

MWHS II 通道 6 在观测资料在偏差订正前后观测象元分布图和观测模拟偏差

(OMB) 的频率分布柱状图如下图所示。其中图 4.3 为其观测模拟偏差频率分布在偏差订正前后的变化, 图 4.4 则为观测象元在偏差订正前后分布散点图。可以得出, 经过偏差订正, MWHS II 通道 6 的观测象元分布基本位于主对角线上, 偏差平均值接近于 0, 均方根的大小也大幅减小。结果表明, 变分偏差订正使得 MWHS II 观测亮温值与模拟亮温分布趋于合理, 研究所采用偏差订正方法能有效减少观测系统偏差。

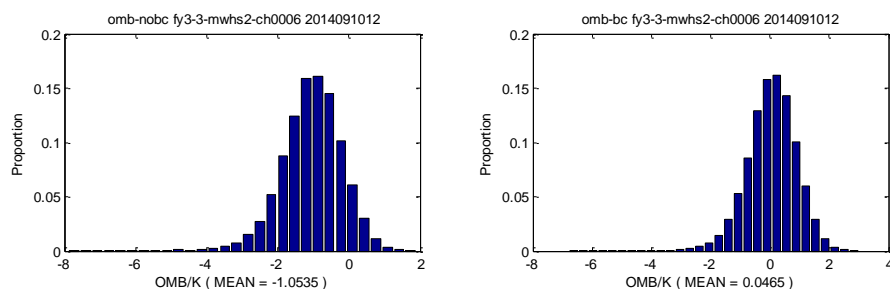


图 4.3 MWTS II 观测资料偏差订正前 (左图) 后 (右图) 观测背景偏差分布

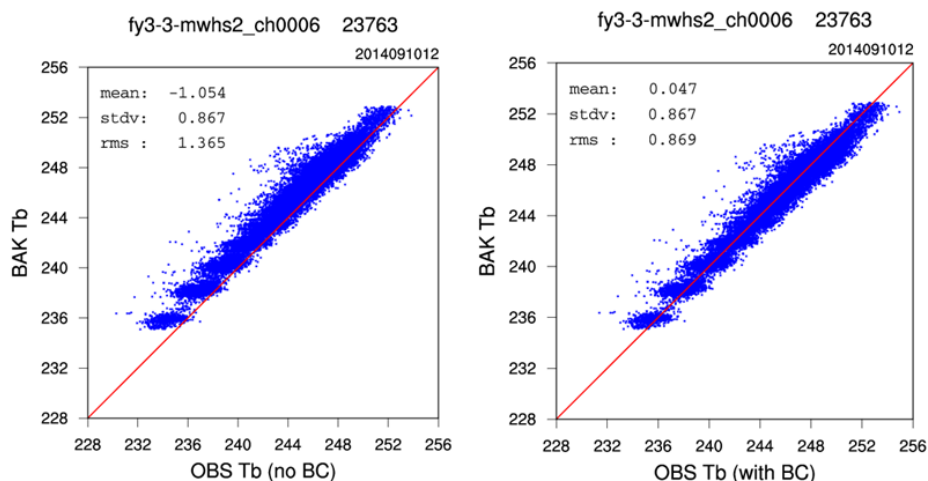


图 4.4 MWTS II 观测资料偏差订正前 (左图) 后 (右图) 拟合散点图

4.2 FY-3C 卫星微波观测资料质量控制

卫星观测资料虽然为数值预报模式的初始条件的确立提供了很大的资料, 但是由于卫星仪器本身和大气环境等影响, 卫星探测过程中会产生误差, 部分资料误差较大, 对于有些较大误差资料在偏差订正后不能去除其误差。而这些错误的资料用于同化系统会影响初始值的准确性, 因此在将卫星观测资料接入同化系统直接同化之前, 对其进行质量控制, 去除坏的资料, 保留有效资料是非常必要的。

正是考虑到质量控制的重要性, 许多学者在研究过程中专门研究了卫星观测资料的质量控制的方法。在本研究中, 针对 FY-3C 卫星的 MWTS II 和 MWHS II 探测仪辐射率资料, 主要采用以下质量控制方法。

4.2.1 极值检测

微波探测仪在设计过程中会有一个设定的探测辐射值范围，对于超出所设定范围的辐射率资料则可认为是错误的，在同化之前应将其去除。根据 FY-3C 卫星微波探测设计方案，确定辐射率阈值大小，进行极值检测，MWTS II 探测辐射值在 50K~350K 之间，MWHS II 探测辐射值在 80K~340K 之间。

4.2.2 地表类型检测

微波探测仪在探测辐射过程中，复杂地表发射辐射率变化较大，也很复杂，因此对于复杂地表的观测辐射值的模拟也很复杂，在同化过程中会产生较大误差，因此复杂地表观测点的辐射资料的同化复杂度较高，产生误差也较大。在同化过程中，为了使复杂地表情况不影响同化效果，将采取去除复杂地表观测，只同化海洋面上的辐射值。根据 MWTS II 和 MWHS II 观测资料保存格式，在用 WRFDA 同化过程中，只保留陆象元海陆掩码数据 LandSeaMask 参数为 3 的数据，该数据表明所在观测点在海面上。

4.2.3 临边检测

在 MWTS II 和 MWHS II 探测仪扫描探测过程中，扫描线边缘的探测点由于探测视角倾斜严重，扫描点到探测仪通道之间经过的大气辐射路径比星下点到探测仪通道之间的大气辐射路径较长，观测辐射量降低，产生临边效应。可以根据扫描线长度及扫描点个数去除部分扫描边缘点，减少临边效应。在本研究中，对 MWTS II 探测辐射资料每条扫描线两端各去除 6 个扫描点；MWHS II 探测辐射资料则将每条扫描线两端去除 8 个扫描点。

4.2.4 通道选择

由于不同探测通道所探测辐射波长不同，权重函数高度也不同，不同通道观测误差特征分布和特性不同。对于偏差订正系统偏差后，总体误差还是很大的通道，应该不使用该通道资料，以免影响初始值的准确性。在实际选择过程中，从以下两个方面考虑：

地表探测通道辐射主要来自地面辐射，其受地表状态影响很大，其次对权重函数高度比较低，而大气中对微波探测影响较大的水汽等主要集中在底层，因此，对于权重函数高度太低的通道不选择接入同化系统，以免产生较大误差。

在理论上，变分同化要求观测背景偏差均值为 0，服从高斯分布，观测偏差范围越小、均方根越小则通道质量越好，一般来说在实际选择通道过程中也需遵循

该原则。

在第三章对微波探测资料特性研究过程中，采取上述方法，同时对部分通道进行特别考虑，最终选取 WRFDA 接收的观测通道为 MWTS II 探测仪的通道 3~8；MWHS II 探测仪的通道 3~6 和通道 11~15。

4.2.5 离群资料筛选

在 MWTS II 和 MWHS II 探测过程中，由于其他某些原因还会使部分观测产生较大误差，这些误差产生原因不太明确，但是最终会使其与通道的平均观测产生较大偏差，称为离群值。去除离群值的方法主要采用对观测资料和模拟值之间差值的特征分布和统计特性进行分析确认。邹晓蕾^[56]在试验中采用双权重算法筛选 GPS 掩星资料的离群值，取得了很好的效果，因此本研究也采用双权重算法筛选 MWTS II 和 MWHS II 探测辐射资料的离群值。

双权重算法可用于筛选离群资料，该算法采用双权重平均值 \bar{X}_{bw} 和双权重标准差 BSTD 两个参数进行离群资料的筛选，在一系列资料样本 $x_i (i=1,2,3\cdots n)$ 中， \bar{X}_{bw} 和 BSTD 的定义如公式 4.4 和 4.5 所示。

$$\bar{X}_{bw} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)(1 - \omega_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - \omega_i^2)^2}; \quad (4.4)$$

$$BSTD(x) = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2 (1 - \omega_i^2)^2 \right]^{0.5}}{\left| \sum_{i=1}^n (1 - \omega_i^2)(1 - 5\omega_i^2) \right|}; \quad (4.5)$$

其中 M 是样本中位数， ω_i 是权重函数，权重函数定义为：

$$\omega_i = \frac{x_i - M}{C \times MAD}; \quad (4.6)$$

MAD 为样本与中位数的偏差的绝对值的中位数，称为绝对偏差中位数，C 为选定参数，在这里选用 C=7.5。 ω_i 范围在 -1 到 1 之间，超出范围则将其置为 -1 或 1。在此基础上，离群资料的筛选则采用下面定义的 Z_i 值进行确定：

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_{bw}}{BSTD(X)}; \quad (4.7)$$

根据实际情况设置阈值 Z 的大小，如果 Z_i 大于阈值 Z 则认为资料是离群点，将其去除，否则认为是有效的，保留。其中阈值 Z 如果太小，则保留的有效资料太小，而 Z 太大，则保留的资料中部分资料误差增大。通过多个试验验证，将 Z 值设定为 2.5，此时能够保留足够多的有效值，且有效去除错误观测。

4.3 云监测

4.3.1 云检测方法

微波虽然对云有穿透性，但是大气中云和水汽对辐射的散射等作用，使得受云影响的卫星微波观测资料仍不能使用。在同化系统中，通过云检测方案去除受云影响的微波辐射资料是保证同化效果的关键技术之一。但是大气中水汽和云对微波探测影响比较复杂，云检测方案也比较复杂。现在同化系统中采用的云检测方法主要有两种，一种为直接依靠观测通道的亮温求解 **Bennartz** 散射因子 (SI)，用散射因子值判断观测是否受云影响；另一种采用基于云中液态水含量 (CLW) 大小来判定^[57]。

本研究的云检测方案拟采用上述两种方法结合。根据 MWTS II 和 MWHS II 探测通道特性，设计合适的 SI 计算方法，并设置适当的阈值。

由于 MWTS II 探测通道频点绝大部分与 AMSUA、ATMS 探测频点一致，因此 MWTS II 的散射因子计算方法参考了之前学者对 AMSUA、ATMS 云检测散射因子计算方法。ECMWF 直接选用 ATMS 的通道 3 观测模拟亮温差进行云检测，并将 AMSUA 的云检测也改为单通道观测模拟亮温差^[58]。参考此方法，对 MWTS II 云检测的散射因子计算也采用单通道的观测模拟亮温差值得到，在 MWTS II 各通道中，通道 1、2 是探测地面辐射的，因此选用通道 1、2 进行计算，并设定不同阈值判断采用通道 1 或者 2 下的云检测效果，通过对比分析，选用通道 2 并设定 SI 阈值为 3.0K 时，云检测效果最好。因此 MWTS II 云检测的散射因子计算方法如 4.7 式所示， $TB_{51.76\text{GHz}}^{obs}$ 表示探测频率为 51.76GHz 通道（即 MWTS II 的通道 2）的观测辐射亮温， $TB_{51.76\text{GHz}}^{bg}$ 为探测频率为 51.76GHz 的背景模拟亮温。并设定 SI 阈值为 3.0K。

$$SI = TB_{51.76\text{GHz}}^{obs} - TB_{51.76\text{GHz}}^{bg} \quad (4.8)$$

MWHS II 云检测散射因子可选取通道 1 和通道 10 两个窗区通道的双通道亮温值计算而来，其计算方法如下所示。Heather Lawrence 等人采用此方法，并确定 MWHS II 云检测散射因子 SI 阈值为 5.0K 时云检测效果最好^[43]。

$$SI = TB_{89\text{GHz}}^{obs} - TB_{150\text{GHz}}^{obs} \quad (4.9)$$

而基于 CLW 含量的判断中，CLW 判断值阈值设置为 0.2。

4.3.2 云检测效果分析

在试验中，为了检验所采用云检测方法是否有效，将 FY-3C 微波资料观测资料的云检测结果与实际云进行对比。设置检测区域为第三章中亮温模拟试验区域

一致，对 2014 年 8 月 4 日该区域内对 MWTS II 和 MWHS II 能产生影响的云水污染视场进行分析。为了便于比较，选取了 FY-3C 卫星的 MWRSI 和 VIRR 探测仪在 2014 年 8 月 4 日在该区域拍摄的云图进行对比。如图 4.5 为 FY-3C 的 MWRSI 和 VIRR 探测器于 2014 年 8 月 4 日在该区域所探测的云图，并通过查询天气记录 and 该云图可知，当天在西北太平洋地区有一台风生成并移动，台风区域云水含量比较多，对微波探测影响很大，在微波资料同化时，必须要考虑该地区云水对微波探测的影响。

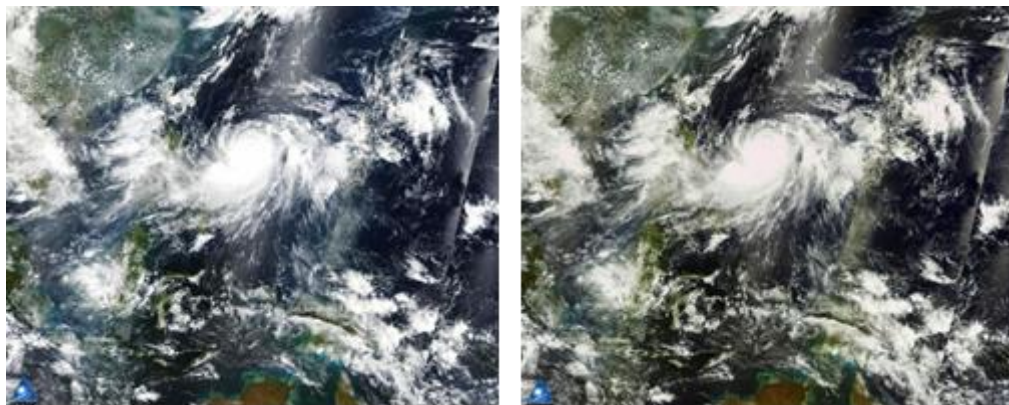


图 4.5 2014 年 8 月 4 日卫星云图

（左图为 MWRSI 观测云图，右为 VIRR 观测云图，来自国家气象卫星中心官网）

采用上述云检测方法对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料视场进行云检测，检测时刻为 2014 年 8 月 4 日 00 时，如图 4.6 为 MWTS II 和 MWHS II 的云检测结果。本文只考虑海面检测，图中扫描轨道上空白地方为检测出来的受云影响的视场，扫描轨道外空白点不在仪器观测范围内，因此只考虑观测视场内的云水情况。并且对比 WRFDA 中对 MHS 探测仪的云检测效果，如图 4.7 所示。可以看出 MWTS II 和 MWHS II 能够检测出大部分有云区域，尤其云水较多台风区域，被明显检测出来，其他的云水区域也能够较好的检测出来，并与 MHS 云检测所检测云水视场位置进行对比，MWTS II 和 MWHS II 云检测结果与 MHS 云检测结果基本一致。

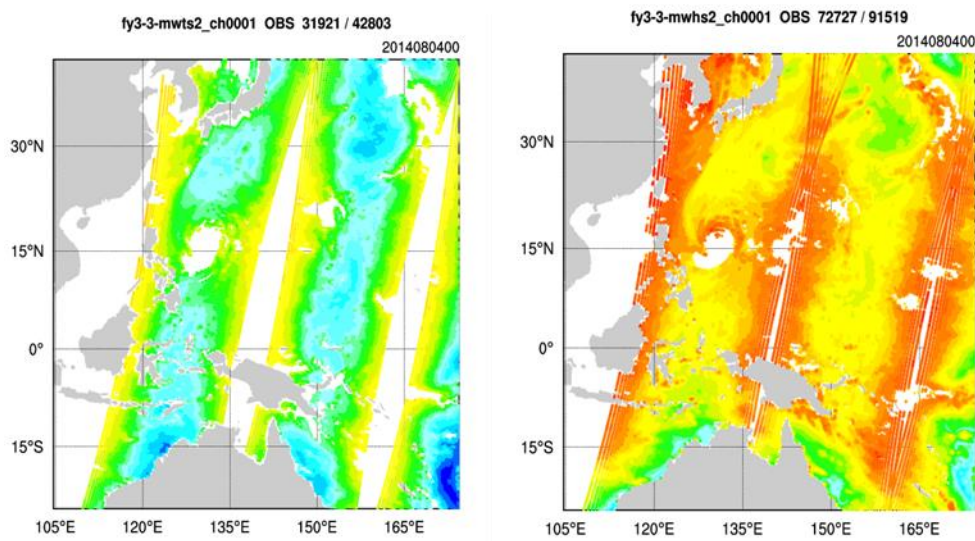


图 4.6 MWTS II (左) 和 MWHS II (右) 云检测结果

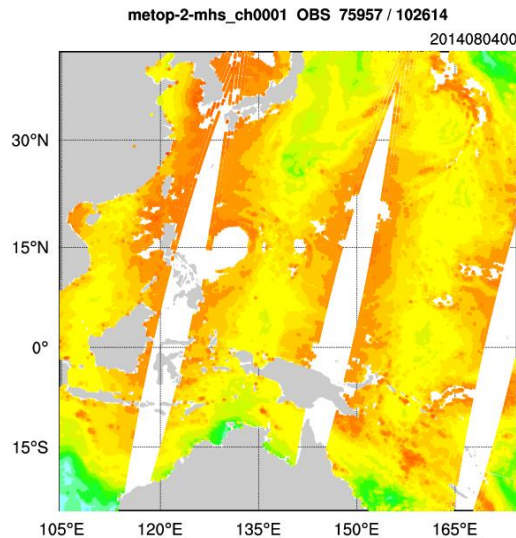


图 4.7 MHS 观测在 WRFDA 中云检测效果

4.4 微波辐射资料处理

FY-3C 微波观测资料由国家气象卫星中心提供, MWTS II 和 MWHS II 数据集均为 HDF5 (层次式文件格式) 格式的 L1 级别的全球数据, 该数据在发布前经过国家气象卫星中心进行预处理的微波温度计科学数据或微波湿度计科学数据, 该数据还包含了探测仪定标定位及预处理等辅助信息。该数据可用于图像分析、大气温度或湿度廓线的反演以及数值预报中的同化研究。将 FY-3C 卫星的 MWTS II 数据和 MWHS II 数据接入同化系统中, 需要先对其进行进一步的预处理, 并在 WRFDA 同化系统中加入数据输入接口, 使 WRFDA 同化系统能够接收 MWTS II 和 MWHS II 的数据。其数据分辨率 MWTS II 为 33km, MWHS II 为 15km。卫星

每运行一圈更新一个数据文件，FY-3C 每天运行 14 圈，一天数据量有 14 个数据文件。而在同化试验中，同化时间窗一般为 6h，以每天 00 时、06 时、12 时、18 时为同化时间点，同化时间点前后三小时资料加入同一个时间窗，因此在同化之前需要先对所发布的 MWTS II 和 MWHS II 数据进行处理，并在 WRFDA 中设置合适的数据输入接口。

在该过程中，由于原始数据文件处理和数据接口都要自己实现，因此，我们选择一种比较简单的二进制数据文件格式为中间数据文件格式，作为原始数据处理后的输出数据格式和 WRFDA 同化系统读取格式。

HDF 格式文件是一种可扩展的、自我组织性的、具有自由描述性的数据格式文件，存储绝大多数研究数据。HDF5 文件中有两种基本对象，分别为组（Group）和数据集（Dataset），其中 Group 包含 0 个或多个 HDF5 对象以及支持的元数据的一个群组结构，Dataset 则为数据元素的一个多维数组，并且能支持元数据。其他对象类型还包括属性（Attribute）、数据类型（Datatype）和数据空间（Dataspace）。表 4.1 和 4.2 分别描述了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 探测仪 L1 数据 HDF5 结构以及各科学数据集变量。从表中可以看出 MWTS II 和 MWHS II 数据文件结构相似，除了少许数据集类型不一致，如包含时间的数据集，在两种文件中提供的方式是不一样的。则可设置通用的 MWTS II 和 MWHS II 在 WRFDA 中的数据输入接口，因此还需要对该数据进行前处理，使两者文件格式和变量一致，便于数据输入。

表 4.1 MWTS II 数据文件 HDF5 结构

全局文件属性			
私有文件属性			
科学数据集			
分组名称	科学数据集		描述
GeoLocation	SDS1	Latitude	逐像元纬度数据
	SDS2	Longitude	逐像元经度数据
	SDS3	DEM	逐像元高程数据
	SDS4	LandSeaMask	逐像元海陆掩码数据
	SDS5	LandCover	逐像元陆地分类信息
	SDS6	SolarAzimuth	逐像元太阳方位角数据
	SDS7	SolarZenith	逐像元太阳天顶角数据
	SDS8	SensorAzimuth	逐像元传感器方位角数据
	SDS9	SensorZenith	逐像元传感器天顶角数据
Data	SDS10	ScnlinNumber	扫描线序号
	SDS11	Time	逐扫描线时间信息: year, month, dayOfMonth, hour,

			minute, second, millSecond, dayOfYear
	SDS12	Earth_Obs_BT	13 通道逐像元观测地球亮 温
	SDS13	Earth_Obs_Angle	地球观测角度
	SDS14	Quality_Flag_Scnlin	扫描线质量标识
	SDS15	Quality_Flag_Channel	通道完整性质量标识

表 4.2 MWHS II 数据文件 HDF5 结构

全局文件属性			
私有文件属性			
科学数据集			
分组名称	科学数据集		描述
GeoLocation	SDS1	Latitude	逐像元纬度数据
	SDS2	Longitude	逐像元经度数据
	SDS3	SolarAzimuth	逐像元太阳方位角数据
	SDS4	SolarZenith	逐像元太阳天顶角数据
	SDS5	SensorAzimuth	逐像元传感器方位角数据
	SDS6	SensorZenith	逐像元传感器天顶角数据
	SDS7	Scn_daycnt	扫描线日计数
	SDS8	Scn_mscnt	扫描线毫秒计数
Data	SDS9	Earth_Obs_BT	15 通道逐像元观测地球亮温
	SDS10	Pixel_View_Angle	观测时序角编码数据
	SDS11	DEM	逐像元高程数据
	SDS12	LandSeaMask	逐像元海陆掩码数据
	SDS13	LandCover	逐像元陆地分类信息
	SDS14	Scnlin	扫描线序号
QA	SDS15	QA_Scan_Flag	扫描线质量标识
	SDS16	QA_Cn_Flag	通道完整性质量标识
	SDS17	scnlin_qc	扫描线质量标识

前处理过程就是将 HDF5 格式的 MWTS II 和 MWHS II 数据转换为数据集变量的统一格式文件，并且便于程序读取，我们将以二进制格式文件为其将要变换的格式。分为两个过程：首先将同一时间窗的数据合并为同一个文件，原始发布数据文件每个文件的数据包含 FY-3C 绕地球一圈所得资料，每天有 14 个文件，但同化中每天一般设置 4 个时间窗。根据 MWTS II 和 MWHS II 中关于时间的数据集进行分块，每个时间窗内的数据归并到一个文件中；其次设置统一的数据集名称和变量，尤其对于原文件中数据集不一致如时间等，需要先转换成一致的时间格式。并将对应数据集按照二进制格式写入中间格式数据文件中，该数据文件可作为 WRFDA 同化系统的输入数据格式。

4.5 系统构建和程序实现

针对以上所述,在同化系统中主要开发的程序有 MWTS II 和 MWHS II 同化所需的数据输入模块、偏差订正模块、质量控制、云检测模块,并设置 RTTOV 辐射传输模式使 WRFDA 接入的 RTTOV 能处理 MWTS II 和 MWHS II 资料。

其中数据输入模块将辐射亮温资料经过前处理后的二进制格式的文件数据输入同化系统中,具体实现过程如下:

- (1) 设计专门读取二进制格式的 MWTS II 和 MWHS II 资料的子程序 `da_read_obs_fy3`,对 MWTS II 和 MWHS II 二进制文件逐条读取。
- (2) 在读取过程中,对观测资料进行初步检验,主要进行区域检验和时间检验,去除不在设置的模拟区域和同化时间窗内的 MWTS II 和 MWHS II 观测资料,由于不 MWTS II 和 MWHS II 观测资料为全球观测资料,而模拟区域相对于全球来说一般比较小,经过此检测后只保留在设定模拟区域和同化时间窗内的观测资料,可大量减少观测资料的存储量和同化观测的计算。
- (3) 调用 `da_initialize_rad_iv` 子程序对卫星资料 `iv` 向量进行赋值,将读取的有效的 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的亮温、位置等信息赋值给 `iv` 向量中对应的元素变量。

MWTS II 和 MWHS II 质量控制分别在子程序 `da_qc_mwts2` 和 `da_qc_mwts2` 中实现,按第三章质量控制的方法依次进行极值检测、临边检测、地表类型检测、通道筛选以及离群资料筛选等过程。云检测和质量控制一样,在于去除观测资料中受环境影响太大或错误的观测,因此将云检测过程嵌入质量控制模块中,根据 `SI` 值大小和 `CLWP` 大小确定受云影响的视场。在上述检测过程中,除了离群资料筛选,其余的是对扫描视场位置的检验,因此如果检测出该视场被检测出来,所有通道在该观测视场的观测点都是不可用的,而离群资料的筛选则是去除某一通道的离群值,对每个通道都要进行单独检测。在质量控制后,对所有资料的质量进行标记,标记变量为 `iv%instid(i)%tb_qc(k,n)`,该变量表示第 `i` 个探测仪的第 `k` 个通道中的第 `n` 个观测量,对于要去除的坏的观测标记为 `qc_bad`,好的观测标记为 `qc_good`。

在 RTTOV 和 WRFDA 中,不同探测仪有通用的编号,以便进行处理时能够正确的找到要处理的仪器,探测仪通过卫星和仪器编号组合确定。本文研究使用的 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 对应的 `id` 编号序列如表 4.3 所示。由于 MWTS II 和 MWHS II 是新加入 WRFDA 的探测仪,因此需要在 WRFDA 中的 `module_radiance.f90` 模块中的 `rttov_inst_name` 列表中加入 `mwts2` 和 `mwts2`,以便

WRFDA 链接 RTTOV 库后能处理 MWTS II 和 MWHS II 观测资料。

表 4.3 MWTS II 和 MWHS II 仪器编号序列

	MWTS II	MWHS II
platform id	23	23
satellite id	3	3
sensor id	72	73

WRFDA 程序流程和修改程序如下图 4.8 所示，红色表示的文件为添加的新的子程序或主要修改的文件。其中 `da_read_obs_fy3` 用于读取经过上述辐射数据处理后的 ASCII 格式的 FY-3C 微波观测资料，并进行初步筛选；设置 `VARBC.in` 初始化文件，实现 WRFDA 系统对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料进行变分偏差订正的初始化；RTTOV 设置则实现辐射传输模式接口，使 RTTOV v11.2 对 MWTS II 和 MWHS II 的模拟过程接入 WRFDA 系统中；在 `da_qc_mwts2` 和 `da_qc_mwhs2` 子程序中，实现对 MWTS II 和 MWHS II 的质量控制方案，剔除不合格的观测资料，并将云检测方案嵌入该子程序中，即在该子程序中同时实现质量控制和云检测。

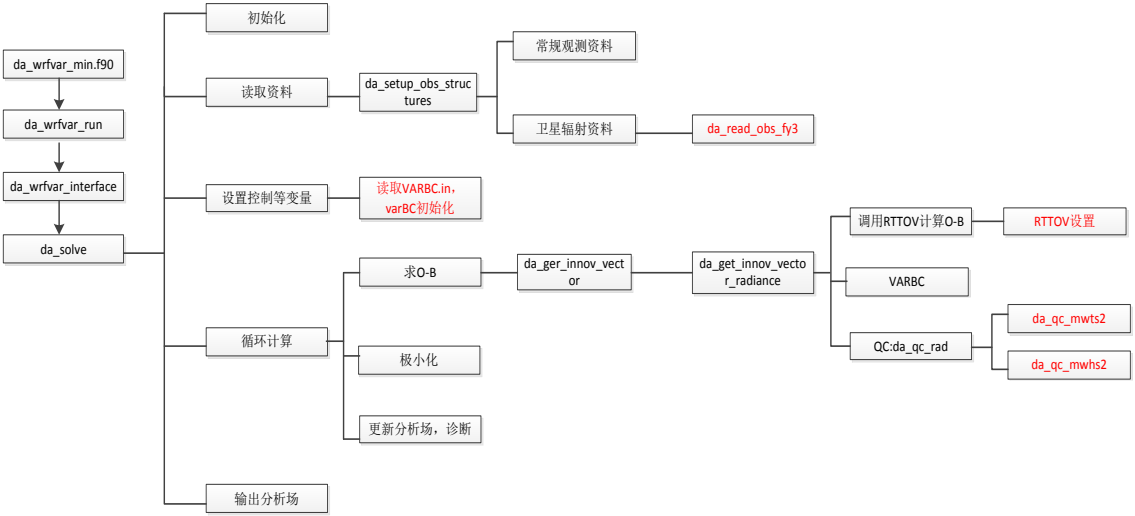


图 4.8 WRFDA 程序设计和修改示意图

4.6 同化系统“使用资料”质量特性分析

在第三章已经详细研究了 FY-3C MWTS II 和 MWHS II 各通道观测资料的质量及分布特性。然后在实际同化过程中，所选观测资料并不是直接进入同化中，需要进行一系列资料选择过程，选择方法即本章所采取的各项同化技术。经过此选择后的资料才是同化过程所使用的观测资料，在本文中，我们将该资料成为“使用资料”，即同化系统中最终使用的各通道的辐射率资料。而使用资料才直接影响同化分析结果。本节将详细分析所选取的 MWTS II 和 MWHS II 观测资料中“使

用资料”的特性。为了更好的进行对比，统计采用区域与第三章中试验一致，并以 2014 年 8 月 4 日下行轨道扫描观测进行试验，研究方法采用研究“使用资料”的观测背景偏差大小的方法进行。

MWTS II 所选取通道的“使用资料”观测背景偏差统计结果如下表 4.4 所示。可以看出，相对于第三章中原始观测资料的偏差统计结果，“使用资料”的标准差大幅减小；而本研究采用的偏差订正，能使用资料偏差大幅减小。

表 4.4 MWTS II “使用资料”的观测背景偏差统计

通道	偏差订正前			偏差订正后		
	mean	stdv	rms	mean	stdv	rms
3	-3.541	0.724	3.615	0.459	0.724	0.857
4	-1.772	0.389	1.815	-0.072	0.389	0.396
5	-4.475	0.395	4.492	0.025	0.395	0.396
6	-2.493	0.321	2.514	0.007	0.321	0.321
7	-4.474	0.427	4.494	0.026	0.427	0.428
8	-0.390	0.484	3.128	0.010	0.484	0.484

而表 4.5 显示了 MWHS II 所选取通道的“使用资料”观测背景偏差统计结果，可的到与 MWTS II 资料质量一致的变化情况。

表 4.5 MWHS II “使用资料”的观测背景偏差统计

通道	偏差订正前			偏差订正后		
	mean	stdv	rms	mean	stdv	rms
3	1.458	0.720	1.626	-0.042	0.720	0.721
4	-1.058	0.551	1.193	-0.058	0.551	0.554
5	0.253	0.515	0.574	-0.047	0.515	0.517
6	-1.063	0.509	1.178	-0.063	0.509	0.513
11	0.832	2.464	2.600	-0.569	2.464	2.528
12	-0.790	2.273	2.407	-0.490	2.274	2.326
13	0.845	2.175	2.333	-0.855	2.175	2.337
14	2.198	2.055	3.009	-0.902	2.055	2.245
15	-3.238	1.848	3.728	-0.738	1.848	1.990

4.6 本章小结

本章在 WRFDA 系统研究和 FY-3C 微波观测通道和辐射资料特性研究基础上，首先研究了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料所需的偏差订正、质量控制、云检测等关键技术，并针对 WRFDA 同化系统结构和 FY-3C 微波观测资料特性选择合适技术方案，在程序中实现，完成 MWTS II 和 MWHS II 观测资料在

WRFDA 中的同化。针对偏差订正、云检测等技术方案,设计试验验证其有效性,试验结果表明所选的变分变差订正能有效消除探测通道观测系统偏差,所选用的散射因子和 CLWP 大小检测相结合的云检测方法能够有效检测出受云影响的微波观测区域。

第五章 同化预报试验分析

为了验证 FY-3C 微波观测资料加入同化系统后同化系统和数值预报的影响。本章通过设计数值试验进行验证。试验主要包括两个方面：分析场影响试验和预报试验。其中分析场影响试验用于验证同化系统中加入 FY-3C 微波观测资料后对同化结果的影响，通过分析分析场的位势高度、温度场等气象变量的变化；预报试验对台风天气预报进行模拟预报，分析 FY-3C 微波观测资料的加入对台风天气预报的影响。

5.1 验天气过程介绍

2014 年第 15 号台风“海鸥”（Kalmaegi）于 2014 年 12 日下午在西北太平洋海域形成，向西北方向快速移动。于 14 日晚 19 时左右在菲律宾吕宋岛东北部登陆，之后继续向西北方向移动，9 月 16 日在我国南海文昌、广东徐闻以及越南北部等地多次登陆，随后强度减弱为热带低压，并持续减弱至消亡。图 5.1 为中国天气网提供的台风“海鸥”运行路径和卫星云图。这次台风给菲律宾、中国等地造成了人员伤亡、房屋倒塌、农作物受损，造成大量损失。

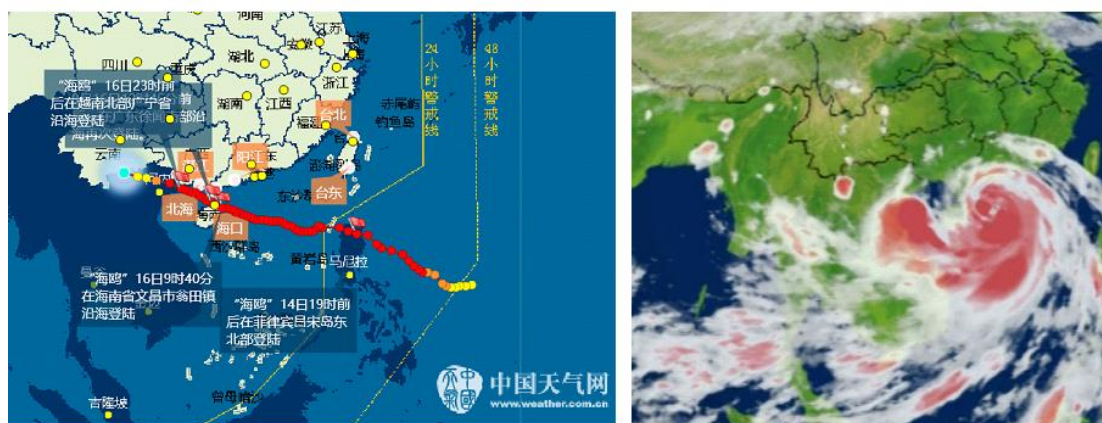


图 5.1 台风“海鸥”运行路径（左）和卫星云图（右）

5.2 试验设计

研究使用 NCEP 网站的 fnl 全球再分析资料提供初始场和边界条件，对台风“海鸥”的进行预报，预报初始时间定为 2014 年 9 月 14 日 12 时，首先经过 2014 年 9 月 14 日 00 时至 2014 年 9 月 14 日 12 时的预报，将 2014 年 9 月 14 日 12 时的预报场作为同化初始场。

该实验主要分为两个方面，一是同化过程，其次是数值预报模拟过程。WRF 模式在进行模拟时，需设定合理的网格和物理参数化方案等参数。台风“海鸥”在西北太平洋生成并经过中国南海地区，因此同化区域设定为太平洋西北部地区，具体纬度范围为 $15^{\circ}\text{S}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 。在本研究中，模式运行设置为单重网格，模式区域水平网格格点数为 177×177 ，水平格点距 36km ，区域中心经纬度设置为 16.5°N ， 120°E 。垂直分层为 36 层。模式预报积分步长 60s 。在模式预报中，物理参数化方案的选择对预报效果影响很大，根据具体天气和模式格点设置情况，本试验物理过程参数化方案如表 5.1 所示。

表 5.1 试验采用模式物理过程参数化方案设计

物理过程	选择方案
微物理过程	WRF 单参数—6 类方案
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch 方案
短波辐射过程	Dudhia 方案
长波辐射过程	RRTM 方案
地表过程	修正 MM5 Monin-Obukhov 方案
陆面过程	Noah 路面过程模式
行星边界层方案	YSU 方案

同化过程采用 6 小时时间窗，选取 2014 年 9 月 14 日 12 时前后各 3h 资料加入同化窗内。根据加入同化系统中观测资料的不同设置三组试验，试验名称和设置如下表 5.2 所示。

表 5.2 试验过程设置

试验序号	试验名称	同化资料	模式预报时长
1	CNTL	常规观测	54h
2	MWTS II 试验	常规观测+MWTS II 观测资料	54h
3	MWHS II 试验	常规观测+MWHS II 观测资料	54h

5.3 同化结果分析

5.3.1 目标函数极小化结果

同化系统最小化迭代过程设计为外循环次数为 1，最大内循环次数为 100。下图 5.1 为目标函数 J 及其梯度迭代下降过程，而对目标函数极小化结果进行分析，得到如表 5.3 统计结果。

从结果上分析，在常规观测资料上加上 MWTS II 和 MWHS II 观测资料后，随着资料增多，极小化目标函数值增大，而 MWHS II 试验观测资料的同化极小化迭代过程中，目标函数梯度的下降过程出现了短暂的震荡，原因在于误差统计文

件的不协调影响了目标函数的态性，因此在进一步的研究中对误差文件需要进一步调整。梯度下降震荡的结果减缓了目标函数极小化过程的收敛速度，从图中也可以看出，MWHS II 试验的目标函数极小化迭代步数明显要大于另外两个试验。而从表 5.3 的统计结果可以看出，MWHS II 观测资料的加入使得每个观测引起的平均偏差 Jo/N_obs 明显增大。

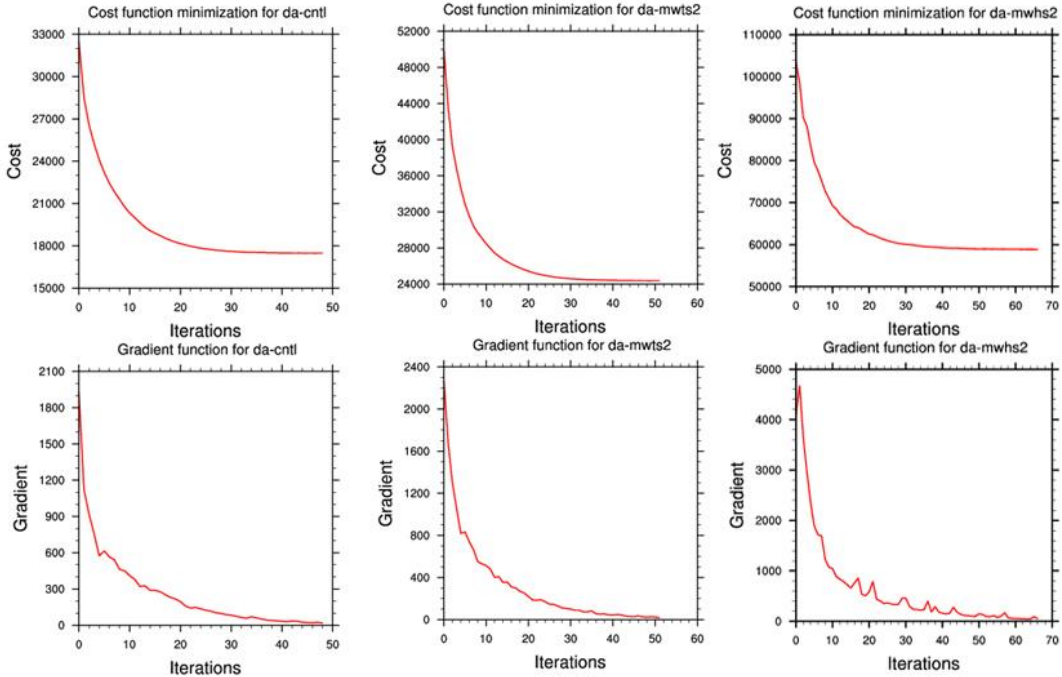


图 5.2 三组试验同化目标函数极小化过程

(左图为 CNTL 试验，中间图为 MWTS II 同化试验，右图为 MSH II 同化试验；上面三个为目标函数，下面三图为目标函数梯度)

表 5.3 对比试验目标函数极小化结果及观测量平均值

试验	N_obs	J	Jo	J/N_obs	Jo/N_obs
cntl	73050	17475.6	15030.3	0.239	0.2057
mwts2 试验	97083	24365.6	21107.8	0.251	0.2174
mwsh2 试验	148445	58825.3	54185.2	0.396	0.3650

5.3.2 分析要素场比较

研究以对流层的温度 T 和相对湿度 RH 两个要素场对不同试验所得分析场进行分析，分别以 750hPa、500hPa 和 250hPa 三个等压面高度的要素场为研究对象。其中图 5.3 为不同试验分析场的相对湿度 RH 的要素分布，图 5.4 为不同试验结果分析场温度 T 的要素分布场。

可以看出，在常规观测资料中加入 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对分析场要素分布有所影响，其中对相对湿度场的影响结果表明，MWTS II 和 MWHS II 观

测资料的加入使得分析场相对湿度普遍增大, 尤其 MWHS II 观测资料的加入对相对湿度影响较大, 这是由于 MWHS II 观测资料对水汽影响较大; 而对相对湿度不同高度上分布进行分析发现, 250hPa 高度上相对湿度影响最大, 这是由于底层观测资料受环境影响较大, 而在质量控制中大部分去除了, 因此对中层大气影响较大。而对温度场的分析发现, MWTS II 和 MWHS II 观测资料的加入对温度场影响比相对湿度较小, 而不同高度的影响上, 对流层上层的 250hPa 影响较大。

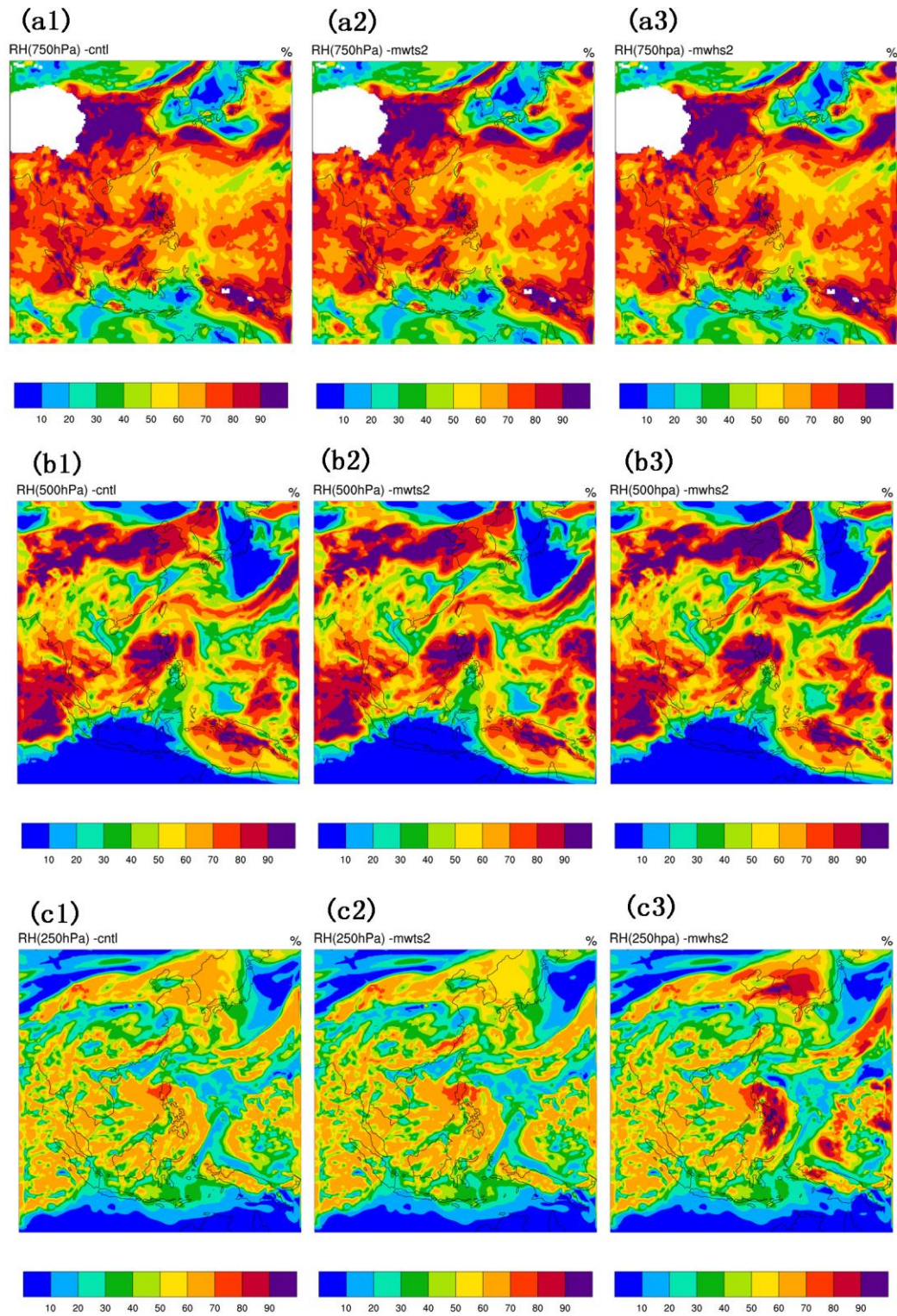


图 5.3 分析场相对湿度的分布场

(其中 a 行代表 750hPa, b 行代表 500hPa, c 行代表 250hPa;
第 1 列为 CNTL 试验结果, 第 2 列为 MWTS II 试验结果, 第 3 列为 MWHS II 试验结果.)

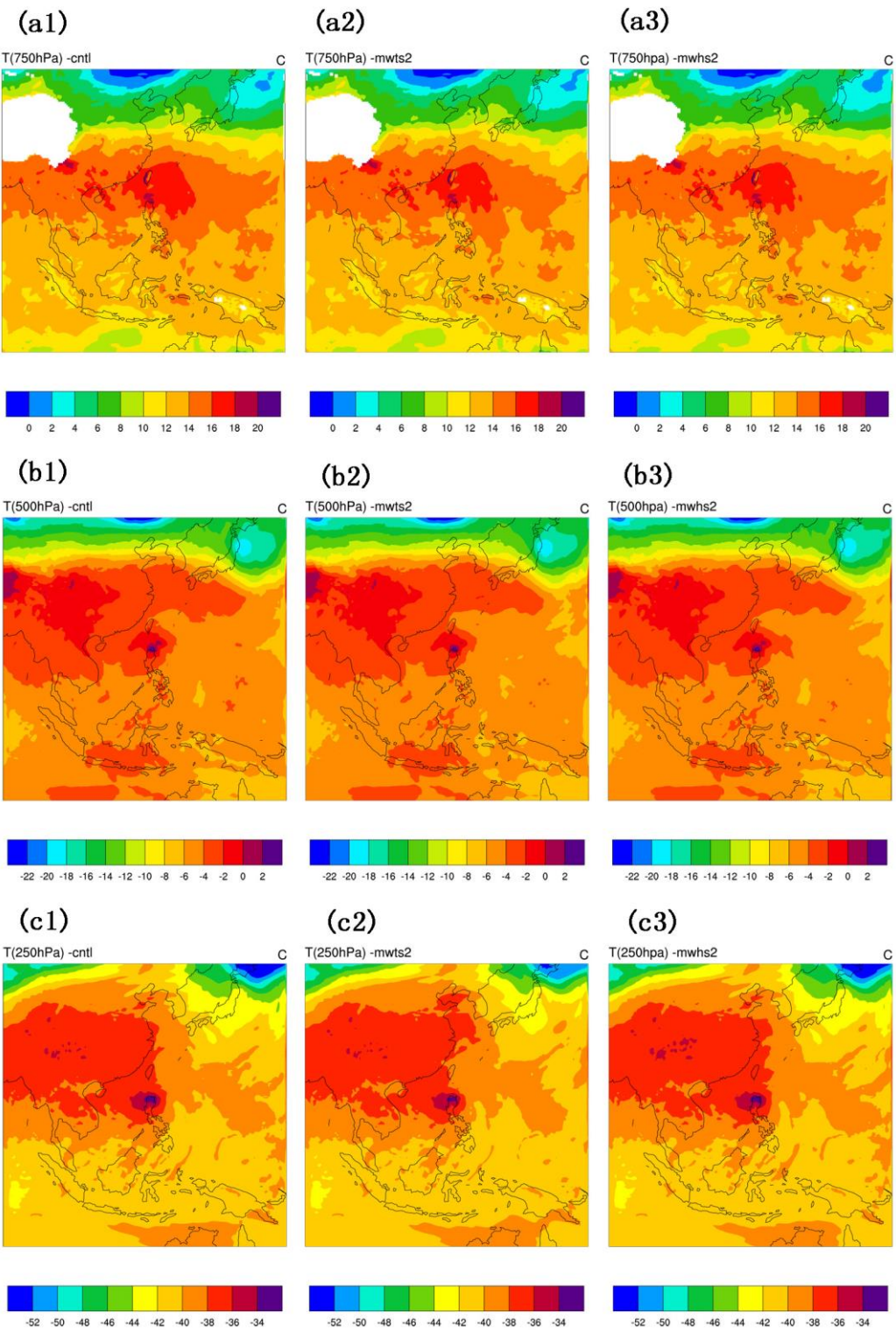


图 5.4 分析场温度要素分布场

(其中 a 行代表 750hPa, b 行代表 500hPa, c 行代表 250hPa;
第 1 列为 CNTL 试验结果, 第 2 列为 MWTS II 试验结果, 第 3 列为 MWHS II 试验结果.)

5.4 台风预报效果

台风路径和强度的预报是台风预报的重要内容，从中可以检测出台风影响区域和影响力大小，对台风的预报也采用路径和强度两个方面的预报进行分析。图 5.3 显示了台风“海鸥”的运动轨迹和采用上述三个试验所得的台风路径的 72 小时预报结果。其中，蓝色路径 1 为台风实际观测最佳路径，绿色路径 2 为只同化常规观测的“海鸥”台风路径预报结果，黄色路径 3 为在常规观测基础上加上 FY-3C 卫星 MWTS II 观测资料进行同化后的台风路径预报结果，红色路径 4 为常规观测资料加上 MWHS II 观测资料进行同化后的台风路径预报结果。从图中可以很直观看出，三组试验所得台风路径与实际路径运动方向一致，但台风预报路径与实际路径相比都偏北。在预报初期，三个试验分析场所得台风位置区别不大，根据上述分析场要素分析结果，同样可得这样结论，MWTS II 和 MWHS II 的加入对台风初始位置的确定没有影响，但分析场要素的不同对随后预报产生了较大影响，从图中可以看出，在常规观测资料上加入 MWTS II 和 MWHS II 观测资料同化后台风路径预报明显好于只有常规观测资料同化预报结果。

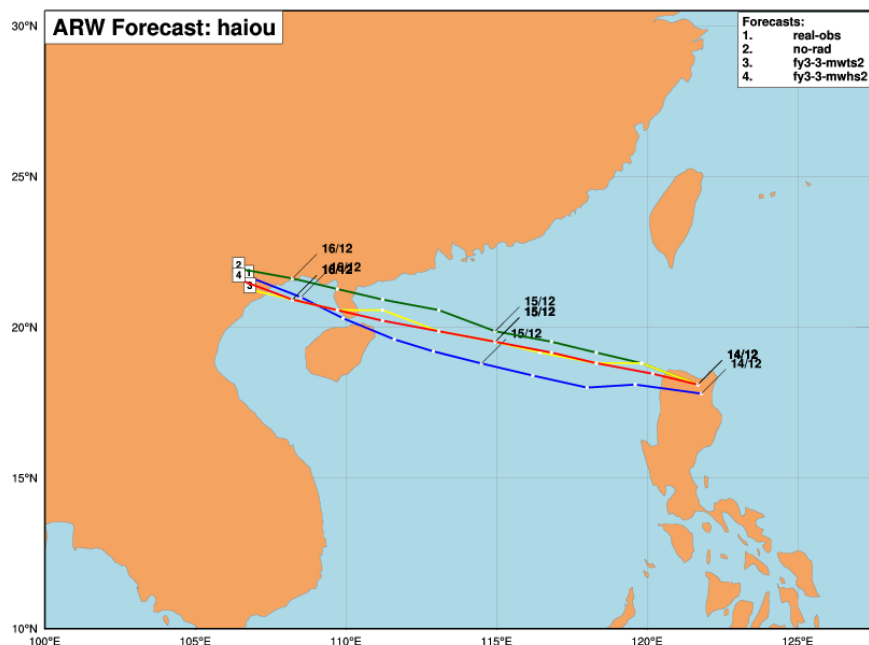


图 5.5 台风“海鸥”路径对比图

(1、蓝线代表真实最佳路径，2、绿线为 CNTL 试验预报路径，3、黄线为 MWTS II 试验预报路径，4、红线为 MWHS II 试验预报路径)

对不同试验的台风预报效果进行量化分析，图 5.4 显示了以台风真实路径和强度为参考，三个试验台风预报的路径和强度偏差大小。其中图 A 为路径预报偏差，横坐标为预报时间序列，每 6h 输出一次，纵坐标为路径偏差大小，表示前台风预报中心与实际台风位置之间的距离，以 km 为单位。图 B 表示了台风强度偏差，

横坐标与图 A 一致，纵坐标表示台风预报强度与实际台风强度大小的差值，并以台风中心最低气压代表台风强度大小。图中绿线代表只同化了常规观测资料的预报结果偏差，红线表示同化了常规资料和 MWTS II 观测资料的台风预报结果偏差，蓝线表示同化了常规观测和 MWHS II 观测资料的台风预报结果偏差。可以得出，在台风路径预报偏差上，只同化常规观测资料的试验结果偏差最大，而在常规观测资料上加上 MWTS II 观测资料或 MWHS II 观测资料都对台风路径预报产生了正影响。而强度偏差上，三个试验预报的台风中心最小压强大小值都比实际台风最小压强要大，表示三个试验的台风预报强度都比实际台风强度要弱，但是三个试验之间进行对比，可以得出，在常规观测资料上加上 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对强度预报没有较好的正影响，而加上 MWHS II 观测资料后部分强度预报偏差反而比只同化常规观测资料有所变大。

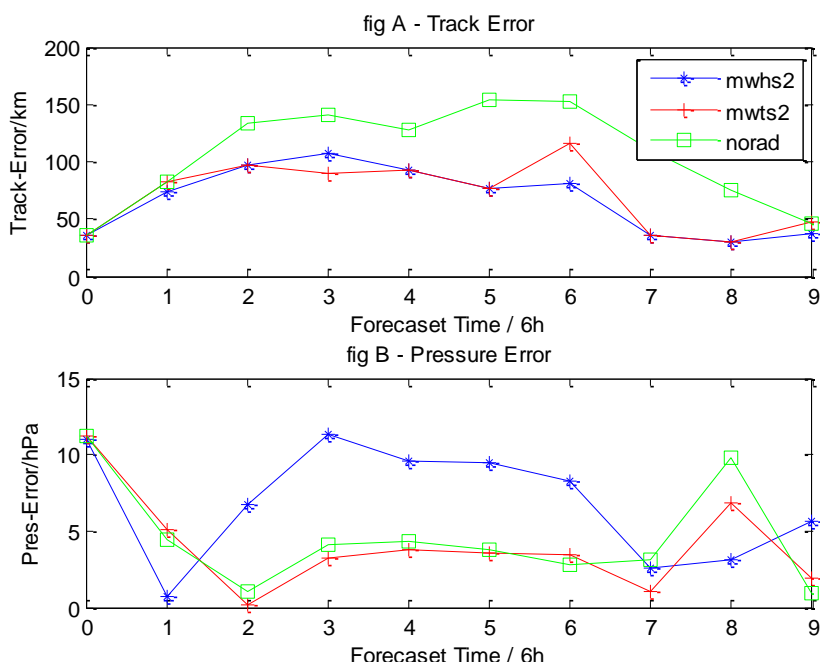


图 5.6 台风预报试验路径偏差和强度偏差大小

5.5 本章小结

本章基于 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对台风“海鸥”的预报效果，检验了 MWTS II 和 MWHS II 对同化系统和数值天气预报效果的影响。首先设置了三个对比试验，试验流程为 WRFDA 同化、WRF 模式预报及后处理过程检验预报效果。首先对试验分析场进行分析，在常规观测资料中加入 MWTS II 和 MWHS II 观测资料比只同化常规观测资料对相对湿度的影响比温度场的影响要大，而分析场要素的变化在对流层高层的影响比对流层底层的影响要大；而从数值预报效果

上分析，在常规观测资料上加入 MWTS II 和 MWHS II 观测资料进行同化后对台风预报中，台风路径预报比只同化常规观测资料的预报结果得到了明显改善，而台风强度的预报没有明显的正影响。

第六章 总结与展望

6.1 论文总结

卫星观测由于具有全球、全天候、全天候的特性，卫星观测资料很好的弥补了常规观测在区域分布不均匀、资料量不足等缺点，卫星观测资料成为了确定数值预报初始场的主要资料来源。我国新一代极轨气象卫星的发射成功，标志着我国气象卫星发展的新高度，其中 FY-3C 卫星上所搭载的新型微波湿度计和新型微波温度计能够高精度探测大气湿度和温度垂直分布。如何充分利用 FY-3C 卫星的微波观测资料成为我国卫星资料同化发展的迫切需要。然而微波观测资料的同化面临一系列问题，观测资料的质量是使该资料能有效利用的基础，同时针对 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 不同观测资料选择合适的同化技术。本文采用 RTTOV v11.2 作为辐射资料观测算子，根据所研究分析出的 MWTS II 和 MWHS II 观测资料特点，选择合适的偏差订正、质量控制、云检测方法，在 WRF3.6.1 模式同化系统中，实现了对 MWTS II 和 MWHS II 资料的同化应用。并通过试验验证了所采用同化技术的可能性和 MWTS II、MWHS II 观测资料对数值预报的影响。

本文首先介绍了数值天气预报尤其资料同化的方法和发展，然后通过卫星资料同化的发展说明了卫星观测资料已经成为了资料同化观测资料的主要来源，我国气象卫星的快速发展为我国数值预报的发展提供资料来源，但是我国自主卫星观测资料利用能力还有待提高。通过本章的介绍，我们了解到了 FY-3C 卫星微波观测资料利用的急迫性，然后通过了解之前学者对卫星观测资料的同化所采用技术手段，为 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化提供有价值的参考。

卫星探测不是直接探测气象要素变量，因此卫星观测资料的直接同化需要额外的观测算子，该观测算子作为辐射传输模式和同化系统接口。在文章中充分分析了 RTTOV v11.2 快速辐射传输模式和 WRF3.6.1 模式及其同化系统，通过分析，可以得出，RTTOV v11.2 能够模拟 MWTS II 和 MWHS II 观测辐射值，因此采用 RTTOV v11.2 接入 WRF3.6.1 同化系统对 MWTS II 和 MWHS II 进行同化是可行的。

第三章和第四章是本文核心部分，首先采用统计 MWTS II 和 MWHS II 观测亮温和背景模拟亮温偏差的方法，评估 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的质量。结果表明，MWTS II 中层探测通道和 MWHS II 的 118.75GHz 频点的探测通道观测资料质量较好，有很大的应用潜力。

第四章则具体实现了 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化方案。采取的关键技术方案如下：偏差订正采用自适应变分偏差订正，并通过试验统计得出该偏差订正方案能有效减少观测系统偏差；质量控制针对 MWTS II 和 MWHS II 资料

特征选取了极值检测、临边检测、地表类型检测，之后进行有效的离群资料筛选；云检测方法则采用散射因子和云中液态水大小联合检测的方法，有效检测除了 MWTS II 和 MWHS II 观测对受云影响视场。并对 MWTS II 和 MWHS II 资料数据编码格式和 WRFDA 数据输入系统进行比较，完成了资料在 WRFDA 同化系统中的输入，从而实现 WRFDA 对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化。

最后，研究采用台风“海鸥”作为天气实例，根据同化所加入观测资料的不同设计了三组试验进行对比。最后对试验的统计结果和台风预报结果进行分析。试验结果表明，在常规观测资料的基础上加上 MWTS II 观测资料或 MWHS II 观测资料同化后进行预报，相对于只同化常规观测资料，对台风路径的预报产生了正效果，但是对其强度的预报没有正效果。

6.2 工作分析和下一步工作展望

本文以 WRF3.6.1 模式同化系统为基础，以 RTTOV v11.2 快速辐射传输模式为观测算子，在评估了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料质量基础上，实现了 FY-3C 卫星 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化应用，并进行了试验检验。从中也可看出该工作中出现的一些问题，还需进一步工作来完善对 MWTS II 和 MWHS II 的同化应用。

- (1) 本文实现的对 MWTS II 和 MWHS II 观测资料的同化还比较初步，而对极小化目标函数大小的分析可看出，对 MWHS II 的观测的误差文件还需进一步调整。
- (2) 本文只采取了一个综合试验验证 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对同化系统和数值预报的影响，为了进一步分析 MWTS II 和 MWHS II 观测资料对数值预报带来的影响，还需进行长时间的同化分析和数值预报结果分析。
- (3) 本文采用三维变分同化方法进行同化，下一步工作需要将其应用于四维变分同化系统中。

致 谢

短暂而充实的硕士生活即将结束。时间很短暂，也走得很快，短得刚入学报到那天仿佛还在眼前，快得这期间相识的好友又要各奔东西。但这两年半的硕士生涯给了我很多感触，幸运得在这里结识了诸多良师益友，给予我帮助，科大的生活、学习也让我成长。在这里，有太多的人和事，值得我去感谢。

首先要把诚挚的谢意和崇高的敬意献给我的导师——张卫民老师。张老师渊博的专业知识，严谨的态度，勤恳的工作作风，深深感染我。想我初次接触数值预报、资料同化方向，毫无头绪，是张老师在該学科上为我引路；在生活上也给我们无微不至的关怀，让我们在实验室的生活和工作更加顺利。这几年，张老师对我的谆谆教导将让我受益终生。

其次，我要感谢教研室的赵军老师、吴建平老师、王舒畅老师、曹小群老师、赵延来老师、张理论老师以及冷洪泽老师等老师对我在学习和研究上的困难答疑解惑。他们平易近人，乐于为学生解惑，在自己专业上精益求精，他们的治学精神值得我学习。

再次，我要感谢我所有同门好友，帮助我在這個团队中能不断提高和成长。实验室这地方也是硕士学习中所待的时间的最长的地方，在如此优秀的团体中，如此和谐的实验室环境，对我们的学习、研究和生活都产生积极作用。感谢余意师姐、朱孟斌师兄、皇群博师兄、方民权师兄、段博恒师兄以及已经毕业了的刘航师兄、程海林师兄等，在交流中，用自己的人生阅历为我提供帮助、提出自己的建议，在学习研究上，乐于与我们分享传授知识，让我受益匪浅；感谢跟我同级的张泽、孙敬泽、邢威、吴茂永、徐婧，我们在许多课程上一起学习，在实验室研究工作中，帮我解决了许多专业方面问题，在共同学习和讨论过程中给我带来启迪，加快了我对气象知识的了解；还有新来到实验室的师弟师妹们，朱祥茹、林世伟、邢德、邢翔、赵盼盼等，为实验室添加了活力。

我还要感谢科大为我提供学习平台，科大厚德博学、强军兴国的校训鼓舞着我在學習研究、生活上不断前进。感谢六院五队这一个优秀的集体，为我们在硕士期间的生活提供保障。

感谢这几年的新朋旧友，为我的生活添加更多的欢声笑语，给予我鼓励和帮助，感谢前七班的厉俊男、郑林涛、王鑫、刘志雄、孟亚龙、刘松、胡照明在我手术住院期间来医院陪护给予我帮助。

感谢我父母对我学习和生活的支持，自从外出求学，每年回家的时间越来越少，陪伴的时间也变少。是你们在背后辛勤付出和大力支持，让我不断前进。感谢他们对我不断的支持和鼓励，养育之恩，无以为报。

最后感谢在百忙之中抽出时间审阅本文的专家，感谢各位老师对我论文提出的宝贵建议，为我本文的完善以及今后的学习和研究提供建议。

参考文献

- [1] 官元红, 周广庆, 陆维松等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 2007,30(4):1-8.
- [2] Richardson L. F. Weather Prediction by Numerical Process[M]. Cambridge University Press. Cambridge. 1922.
- [3] Charney J. G., Fjörtoft and von Neuman. Numerical integration of the barotropic vorticity equation[J]. Tellus. 1950(2):237 – 354.
- [4] Bergthorsson P., Döös B. R., Frykland S. et al. Routine forecasting with the barotropics model[J]. Tellus, 1955(7):329-340.
- [5] Panofsky H A. Objective weather- map analysis[J]. J Appl Meteor, 1949, (6) : 386-392.
- [6] Gilchrist B, Cressman G P. An experiment in objective analysis[J]. Tellus, 1954, 6(4):309- 318.
- [7] Gandin L. S. Objective analysis of meteorology files[M]. erusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965.
- [8] Sasaki Y. Some basic formalism in numerical variational analysis [J]. Mon. Wea. Rev., 1970, 98(12): 875-883.
- [9] Parrish D. F., Derber J. C. The National Meteorological Center’s spectral statistical interpolation analysis system[J]. Mon. Wea. Rev, 1992(120):1747-1763.
- [10] Lorenc A.C.. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc, 1986,112(474):1177-1194.
- [11] Thompson, Philip D. Reduction of analysis error through constraints of dynamical consistency [J]. J. Appl. Meteor., 1969, 8(5) : 738- 742.
- [12] Kalman R E. A new approach to linear filter and prediction problems[J]. J. Basic. Eng., 1960, 82(3) : 35- 45.
- [13] Ide Kd, Courtier P., Ghil M. et al. Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 1997(75):181-189.
- [14] 董佩明, 薛纪善, 黄兵等. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和法则[J]. 气象科技, 2008,36(1):1-7.
- [15] Stephene English, et al. The Global Observing System[R]. UK: ECMWF, 2012.
- [16] Errco R. M., Ohring G., Derber J. et al. NOAA-NASA-DoD workshop on satellite data assimilation[J]. Bull, Amer. Meter. Soc., 2000,81(10):2457-2462.
- [17] Eyre J. R., Kelly G. A., McNally A.P. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis[J]. Quart. J. R. Meteor. Soc, 1993,119(514):1427-1463.
- [18] Anderson E. J., Paillenx J. N. Use of cloud-cleared radiances in

- three/four-dimensional variational data assimilation[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1994,120(517): 627-653.
- [19]Derber J. C., Wu W. S.. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system[J]. Mon. Wea. Rev., 1998,126(8): 2287-2299.
- [20]Zhiquan Liu, Dale Barker. Radiance assimilation in WRF-Var: Implementation and initial results. 7th WRF Users Workshop, Boulder, Colorado, 19-22 June 2006.
- [21]Polkinghome R., Vukicevic T., Evans K. F.. Validation of cloud-resolving model background data for cloud data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 2010,138(3):781-795.
- [22]Polkinghome R,Vukicevic T. Data assimilation of cloud-affected radiances in a cloud -resolving model[J]. Mon. Wea. Rev., 2011,139(3):755-773.
- [23]蒲朝霞, 丑纪范.对中尺度遥感资料进行四维同化共轭方法及其数值研究[J]. 高原气象, 1994,13(4):419-429.
- [24]王子厚,王宗皓,张凤英.HIRS/2 亮温直接应用与数值预报的试验研究[J].应用气象学报, 1995,6(3):273-180.
- [25]沈桐立, 闵锦忠等.有限区域卫星云图资料变分分析的试验研究[J]. 高原气象, 1996,15(1): 58-67.
- [26]闵锦忠, 沈桐立, 陈海山等. 卫星云图资料反演的质量控制及变分同化数值实验[J]. 应用气象学报, 2000,11(4): 410-418.
- [27]潘宁, 董超华, 张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究[J]. 气象学报, 2003,61(2):226-236.
- [28]Xue Jishan. Progresses of researches on numerical weather prediction in China: 1999–2002[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(3): 467-474.
- [29]薛纪善,庄世宇,朱国富等. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究[J]. 科学通报, 2008, 53(20):2408-2417.
- [30]Xue Jishan, Zhang Hua, Zhu Guofu, et al. Development of a 3D Variational Assimilation System for Atovs Data in China[C]. Proceeding of 13th International TOVS Study Conference(ITSC-XIII),2003:30-36.
- [31]Dong Peiming, Liu Zhiquan, Xue Jishan. The Use of ATOVS Microwave Data in the GRAPES-3Dvar System[C]. Proceeding of 14th International TOVS Study Conference. 2005:274-280.
- [32]朱国富,薛纪善,张华等. GRAPES 变分同化系统中卫星辐射率资料的直接同化 [J]. 科学通报, 2008, 53(20):2424-2427.
- [33]徐建平. 国内外气象卫星发展[J]. 空间科学学报, 2000,20(Supp):104-115.
- [34]许健民, 杨军, 张志清等.我国气象卫星的发展与应用 [J]. 气象, 2010, 36(7):94-100.
- [35]杨军, 董超华, 卢乃锰等. 中国新一代极轨气象卫星—风云三号[J]. 气象学

- 报,2009, 67(4):501-509.
- [36]Lu Q., Bell W., Bauer P., et al. An Initial Evaluation of FY-3A Satellite Data[M]. ECMWF Technical Memoranda No.631, ECMWF , Jul. 2010.
- [37]Lu Q., Bell W., Bauer P., et al. Characterizing the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the ECMWF Model [M]. ECMWF Technical Memoranda No.641, ECMWF , Feb. 2011 .
- [38]Lu Q., Bell W., Bauer P., et al. Improved Assimilation of Data from China's FY-3A Microwave Temperature Sounder [M]. ECMWF Technical Memoranda No.642, ECMWF, Feb. 2011 .
- [39]Keyi Chen, Stephen English, Niels Bormann, et al. Assessment of FY-3A and FY-3B MWS observations[M]. ECMWF Technical Memoranda No.734, ECMWF, Sep. 2014.
- [40]杨引明,杜明斌,张洁. FY-3A 微波资料在“莫拉克”台风预报中的同化试验[J]. 热带气象学报,2012,28(1):23-30.
- [41]董佩明,黄江平,刘桂青等. FY-3A 微波探测资料的直接同化应用及云雨条件下的亮温模拟[J]. 热带气象学报,2014,30(2):302-310.
- [42]Dong P., Huang J., Huang X. Y. et al. Implement and preliminary experiment of FY-3 and NPP microwave satellite data assimilation in WRFDA. 2013 WRF user workshop, Boulder, USA. 2013.
- [43]Heather L., Niels B., Lu Q. et al. An evaluation of FY-3C MWS-2 at ECMWF[R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme, Research Report No. 37. June 2015.
- [44]Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A description of the advanced research WRF Version 3[Z]. Ncar Technical Note, NCAR / TN-475 + STR, 2008.
- [45]Wang Wei, Bruyere C, Duha M, et al. ARW version 3 modeling system User's guide[R]. Jan. 2014, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.5/ARWUsersGuideV3.pdf.
- [46]Barker D.M., Huang W., Guo Y. R., et al. A Three-Dimensional(3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results[J]. Mon. Wea. Rev., 2004,132, 897-914.
- [47]Huang X.Y., Xiao Q., Barker D. M., et al. Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results[J]. Mon. Wea. Rev. 2009,137, 299-314.
- [48]Barker, D., Huang X. Y., Liu Z., et al. The Weather Research and Forecasting Model's Community Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA. Bull. Amer.Meteor. Soc., 2012,93, 831-843.
- [49]Eyer J. R. A fast radiative transfer model for satellite sounding systems[M].

ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 176, Mar. 1991.

- [50] James H., Peter R., David R. et al. RTTOV v11 Users Guide[R]. EUMETSAT, Jun. 2014.
- [51] 郭杨, 卢乃锰, 谷松岩等. FY-3C 微波湿温探测仪辐射测量特性. 应用气象学报, 2014, 25(4): 436-444.
- [52] Eyre J R. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures [M]. Technical Memoranda No.186, ECMWF, Oct. 1992.
- [53] Harris B. A., Kelly G. A satellite radiance bias correction scheme for data assimilation [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2001, 127: 1453-1468.
- [54] Dee D.P. Bias and data assimilation. Q. J. R. Meteorol. Soc, 2006, 131: 3323-3343.
- [55] CUI L., SUN J. QI L. TWO BIAS CORRECTION SCHEMES FOR ATOVS RADIANCE DATA[J]. JOURNAL OF TROPICAL METEOROLOGY, 2010, 16(1): 71-76.
- [56] Zou X, Zeng Z. A quality control procedure for GPS radio occultation data [J]. J. Geophys. Res.: Atmospheres (1984–2012), 2006, 111(D2): 237-253.
- [57] Li J., Zou X.. Impact of FY-3A MWTS radiance on prediction in GRAPES with comparison of two quality control schemes[J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(2): 251-263.
- [58] Bormann N., Anne F., William B.. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system[J]. J. Geophys. Res.: ATMOSPHERES, 2013, 118(12): 970-980.

作者在学习期间取得的学术成果

- [1] 吴应昂, 张卫民. FY-3C 卫星 MWHS-2 资料在 WRF-3DVar 中的同化研究[C]. 第 32 届中国气象学会年会. 2015.
- [2] 吴应昂, 朱孟斌, 张卫民. GNSS 无线电掩星二维弯曲角算子同化研究[C]. 2014 年数值天气预报技术交流会. 2014.