

分类号 TP399

学号 14060053

U D C 004

密级 公 开

工学硕士学位论文

遥感卫星陆上微波探测资料同化研究

硕士生姓名 邢德

学 科 专 业 计算机科学与技术

研 究 方 向 遥感卫星资料同化

指 导 教 师 张卫民 研究员

国防科学技术大学研究生院

二〇一六年十一月

论文书脊

(此页只是书脊样式，学位论文不需要印刷本页。)

遥感卫星陆上微波探测资料同化研究

国防科学技术大学研究生院

The Study of Remote-Sensing Satellite Microwave Observation Data Assimilation Over Land

Candidate: Xing De

Advisor: Zhang Weimin

A dissertation

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, 2016

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：遥感卫星陆上微波探测资料同化研究

学位论文作者签名：邱德

日期：2016年11月2日

学位论文授权使用授权书

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：遥感卫星陆上微波探测资料同化研究

学位论文作者签名：邱德

日期：2016年11月2日

作者指导教师签名：杨志

日期：2016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 资料同化基本理论	2
1.3 卫星微波探测仪器概况	3
1.3.1 外国卫星微波仪器概况	3
1.3.2 中国卫星微波仪器概况	4
1.4 地表发射率反演研究现状	5
1.5 国内外陆上微波探测资料同化研究现状	7
1.6 本文研究内容	8
第二章 卫星大气遥感原理	11
2.1 大气辐射基本规律	11
2.2 大气辐射传输模式	11
2.2.1 逐线积分模式	11
2.2.2 快速辐射传输模式	12
2.3 RTTOV 快速辐射传输模式及 WRF 模式系统	13
2.3.1 RTTOV 快速辐射传输模式.....	13
2.3.2 WRF 模式及 WRFDA 同化系统	14
2.4 小结	16
第三章 微波观测反演地表发射率算法研究	17
3.1 地表发射率概述	17
3.2 地表发射率反演算法	17
3.2.1 经验统计方法	18
3.2.2 一维变分方法	18
3.2.3 机器学习方法	18
3.2.4 指数分析方法	19
3.3 使用 AMSU 卫星观测资料静态反演地表发射率.....	19
3.4 小结	22
第四章 AMSUA/MHS 陆上微波观测资料同化关键技术研究	23

4.1 AMSUA/MHS 仪器概述	23
4.2 发射率地图集接入 RTTOV 系统	24
4.3 AMSUA/MHS 观测资料偏差订正	27
4.4 小结	30
第五章 同化预报试验及分析	31
5.1 试验天气过程概述	31
5.2 具体试验设计	31
5.3 同化结果分析	32
5.4 台风个例预报效果分析	36
5.5 小结	40
结 束 语	41
论文总结	41
存在的问题及下步工作展望	42
致 谢	43
参考文献	44
作者在学期间取得的学术成果	49

目 录

表 4.1 AMSUA 各通道特性..... 23

表 4.2 MHS 各通道特性 24

表 5.1 试验所采用物理参数化方案 32

表 5.2 试验设计 32

图 目 录

图 2.1 RTTOV 运行流程.....	14
图 2.2 WRF 模式流程图	14
图 2.3 WRFDA 系统流程图.....	14
图 3.1 1 月、4 月、7 月、10 月的发射率地图集	21
图 3.2 中国大陆区域 1 月份发射率地图集	22
图 4.1 AMSUA 观测资料同化后系统输出地表发射率.....	26
图 4.2 MHS 观测资料同化后系统输出地表发射率	27
图 4.3 AMSUA 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差空间分布	28
图 4.4 AMSUA 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差统计柱状图	28
图 4.5 AMSUA 观测资料偏差订正前后拟合散点图.....	29
图 4.6 MHS 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差空间分布	29
图 4.7 MHS 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差统计柱状图	30
图 4.8 MHS 观测资料偏差订正前后拟合散点图	30
图 5.1 台风“麦德姆”运行路径图和卫星云图	31
图 5.2 分析场温度分布（900hPa）	33
图 5.3 分析场温度分布（750hPa）	34
图 5.4 分析场温度分布（500hPa）	34
图 5.5 分析场相对湿度分布（900hPa）	35
图 5.6 分析场相对湿度分布（750hPa）	36
图 5.7 分析场相对湿度分布（500hPa）	36
图 5.8 台风“麦德姆”预报路径对比图	38
图 5.9 预报台风位置与台风真实位置距离对比图	39
图 5.10 预报台风中心气压值与台风中心真实气压值差值对比图	40

摘 要

遥感卫星微波观测资料具有覆盖范围广, 观测密度高等特点, 已经成为了数值预报使用的全部探测资料中所占比例最高的观测资料。然而, 目前在使用遥感卫星资料进行同化时主要采用的是海面上空的观测资料以及高层通道的观测资料, 由于云和降水影响, 以及地表发射率的不确定性, 造成了大量陆面以及低层通道卫星观测资料被舍弃, 因此同化遥感卫星陆上微波探测资料的前提是获得复杂地表的发射率。本文在 WRF 模式系统的基础上, 研究分析遥感卫星陆上观测资料同化所需的关键技术, 研究分析了地表发射率的反演方法, 发射率地图集的接入技术以及 AMSUA/MHS 仪器的偏差订正技术, 实现了 AMSUA/MHS 陆上探测资料在 WRFDA 同化系统中的应用。最后, 针对具体台风个例设计同化预报试验, 检验 AMSUA 陆上探测资料对资料同化以及数值预报的影响。

本文的主要成果及结论如下:

(1) 研究使用卫星观测资料反演地表发射率的方法, 以及发射率地图集在 RTTOV 中的接入实现, 在 RTTOV 及 WRF 系统中验证使用了最新的全球月平均地表发射率, 并对地表发射率的时间变化和空间变化进行了分析。

(2) 针对 AMSUA/MHS 观测资料特点, 研究 AMSUA/MHS 陆上观测资料同化过程中的关键技术, 包括发射率地图集的接入方法、AMSUA/MHS 仪器的偏差订正技术, 实现了 WRFDA 系统对 AMSUA/MHS 陆上观测资料的同化应用。

(3) 针对具体台风个例“麦德姆”设计资料同化与数值预报试验, 对同化所得分析场温度、相对湿度及预报所得台风路径进行分析。试验结果显示, AMSUA 陆上探测资料可以对分析场的温度及相对湿度产生影响并产生积极效果, 且在加入地表发射率后, 其影响效果能够得到提高。同时使用 AMSUA 陆上观测资料以及地表发射率, 可以对台风路径的预报产生正效果。地表发射率的加入可以提高 AMSUA 陆上观测资料在台风路径预报上的准确度, 但是对于台风中心气压的模拟效果则无明显提高。

关键词: 卫星资料同化; 陆上微波探测资料; 地表发射率; WRF 模式

ABSTRACT

Owing to its wide coverage and high observation density, remote sensing satellite microwave observation data has become the most data used in numerical weather prediction system. However, most of the data collected from remote sensing satellites are the observations of higher-channels or data observed over sea. Due to the influence of clouds and precipitation, and the uncertainty of the surface emissivity, a large number of these observations are discarded, so the precondition of the assimilation of remote-sensing satellite microwave observation data over land is the calculation of complex surface emissivity. Based on the WRF model system, this paper analyzes the key technologies of assimilating remote sensing satellites observation over land, the inversion methods of surface emissivity, the access of atlas in RTTOV and the bias correction technology of AMSUA / MHS instruments, thus the application of AMSUA / MHS observation data over land in the WRFDA assimilation system is realized. Finally, the assimilation prediction experiment is designed for a specific typhoon case "Matmo" to test the effect of AMSUA observation data over land on data assimilation and numerical prediction.

The main results and conclusions of this paper are as follows:

(1) The method of retrieving the surface emissivity using satellite observations and the access of the atlas in RTTOV are studied. The latest global average monthly surface emissivity is validated in the RTTOV and WRF systems, and the changes of surface emissivity over time and spaces are analyzed.

(2) Based on the characteristics of AMSUA/MHS observations, the key technologies of AMSUA/MHS observation data assimilation are studied, and the application of AMSUA/MHS observation data over land to WRFDA system is realized.

(3) Based on the data assimilation and numerical prediction experiment of Typhoon "Matmo", the temperature, relative humidity and the typhoon path are analyzed. The results show that the AMSUA observation data over land can influence the temperature and relative humidity of the assimilation result and produce positive effects, and the effect can be improved after adding the surface emissivity. Using the AMSUA observations over land and the surface emissivity, the prediction of the typhoon track can be better. The addition of the surface emissivity can improve the accuracy of the AMSUA data on the typhoon track forecasting, but the simulated result of the typhoon center pressure is not significantly improved.

Key words: satellite data assimilation, microwave observations over land, land surface emissivity, WRF model

第一章 绪论

1.1 引言

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是在已知初始条件和边界条件的估计下, 用数值模拟的方式求解大气运动基本方程组, 利用初始时刻的大气状态对未来时刻的大气状态进行预报^[1]。对于数值天气预报而言, 初始场的准确度十分重要。然而, 由于地球 80% 以上的地区人类无法长期居住, 常规观测系统所提供的资料的数量严重不足, 不同区域的观测密度也相差巨大。因此, 在分析某一时刻的资料时, 仅仅依靠常规观测是不够的, 这势必对预报结果产生重要影响。

气象卫星在大气层外进行观测, 能够获得全球的信息, 其观测资料具有空间覆盖面广、分辨率较高、取样频率较高等特点, 在数值天气预报系统中获得了极大的应用。卫星能够获得海洋、陆地、高原等区域的观测数据, 极大弥补了传统观测资料的限制, 在真正意义上获得了实时的全球大气三维状态资料。然而, 卫星观测资料与常规观测资料相比, 其观测变量并不是常规模式变量, 而是与之相关的值, 例如微波探测仪器获得的不是温、压、风、湿等常规大气变量, 而是大气的辐射率。因此, 卫星观测资料需要采用与常规观测不同的同化方法, 通常分为间接同化与直接同化两种方式。间接同化方法将卫星获得的辐射值反演成大气垂直廓线引入同化系统中; 直接同化则使用辐射传输模式将大气状态模拟成大气层顶的向上辐射。在实际应用中, 通常采用间接同化的方式。

地表发射率指相同温度下地表发出的热辐射与黑体辐射能量的比值, 它能够反映地表的热辐射能力^[2]。微波地表发射率是表征地表特性的重要参数, 不仅是实现微波辐射资料直接同化的重要参数, 也是卫星微波反演地表大气参数的重要条件^[3]。遥感卫星陆上微波探测资料不被使用的直接原因在于地表发射率的不确定性。因此, 同化陆上探测资料的前提是获得准确的地表发射率。

目前, 在使用遥感卫星资料进行同化时, 主要采用的是海面上空的观测资料以及高层通道的观测资料。尽管 ECMWF 的统计数据显示在数值预报使用的全部探测资料中, 卫星探测资料所占比例已经超过 90%, 但由于云和降水的影响, 以及陆地、冰雪发射率的未知而导致的资料弃用已经达到了全部丢弃资料的 75% 以上^[4]。对微波遥感而言, 低层探测和云降水影响是资料弃用两大主因, 这造成了卫星资源的极大浪费。同时, 卫星陆上探测可以提供丰富的陆面信息。对云雨区的卫星观测包含有更多的大气信息, 针对陆上微波探测资料同化问题的研究以及对其同化方法的挖掘可以进一步增强卫星微波观测资料的利用率, 对资料同化以及

数值预报的效果具有积极意义。开展遥感卫星陆上微波探测资料的同化研究符合微波辐射资料同化的主流发展趋势，也符合我们的业务发展需要。

1.2 资料同化基本理论

数值天气预报问题是一个微分方程的初值、边值问题。在给定当前大气状态的初值和底边界以及侧边界条件的情况下，模式将能够预报出一段时间后的大气状态。目前，业务化的预报系统通常将短期预报的输出值作为背景场（ x^b ），结合观测值（ y^o ）来产生初值，这就是众所周知的资料同化。

资料同化技术经过多年的发展，先后产生了多项式拟合、逐步订正法、最优插值法、变分法以及卡尔曼滤波法等。

多项式拟合法^[5]是一种简单的插值算法，其获得的分析值是观测值的线性加权平均，故又称线性分析。多项式拟合法可分为单点插值、局部插值、全局插值三种方法。

逐步订正法^[6]的权重函数是经验给定的，为一个测站与分析点之间距离的单调下降函数。其分析场通过多次迭代获得。逐步订正法具有以下四个特点：（1）引入了背景场；（2）分析增量是观测增量的加权平均；（3）权重函数是经验给定的；（4）单点分析方案，只有在影响半径范围内的观测资料才对分析场产生作用。

最优插值法^[7]由逐步订正法发展而来，其不同在于最优差值的权重函数不是经验给定的，而是由最小方差确定的。基于背景误差协方差的最优插值方案通常比任意选择基函数进行的函数插值和逐步订正法中经验给定的权重函数更加合理，其能够得到统计意义上的最优解。最优插值产生的分析场比逐步订正法的更加准确，但代价是需要合理估计背景场误差协方差，还要求解背景场误差协方差矩阵的逆矩阵。

变分同化的主要思想是定义一个表征背景场和观测场之间距离的目标泛函，并找到使这个目标泛函达到最小的分析场，最早由 Sasaki 引入资料同化系统^[8]。变分法分为三维变分方法和四维变分方法。三维变分的目标函数定义为：

$$J(x) = \frac{1}{2} \{ (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + [y^a - H(x)]^T (O + F)^{-1} [y^a - H(x)] \} \quad (1.1)$$

其中 x 表示大气状态变量， x^b 为背景场， B 为背景误差协方差矩阵， y^a 为观测值， H 为观测算子， O 为观测误差协方差矩阵， F 为观测算子 H 的协方差矩阵。可以证明，在观测算子只是线性插值的情况下，并忽略观测算子的误差，最优插值和三维变分在形式上是等价的^[9]。变分法摆脱了观测值和分析值之间的线性关系，使得卫星观测资料等非常规观测得以直接同化，并且将模式作为强约束条件，可以得到与模式相协调的初始场。

在三维变分中，假定观测资料与模式控制变量都是在同一时间的。四维变分

中，不同时间的观测资料可以同时影响初始时间的模式控制变量。将数值天气预报模式 M 加入在三维变分目标函数定义式(1.1)的观测算子 H 中，即为四维变分的目标函数^[10]：

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2} \sum_{m=0}^M [y_m^o - H_m(M_m(x_0))]^T (O + F)^{-1} [y_m^o - H_m(M_m(x_0))] \quad (1.2)$$

四维变分同化可以有效使用在时间上比较密集的观测资料中所包含的大气动力场的信息。四维变分还保留了三维变分的以下优点：（1）可以将间接观测资料直接同化；（2）可以在全球范围内同时同化不同的观测资料；（3）可以相对灵活地加入附加约束条件。

数学家 Kalman 提出的卡尔曼滤波法是一种将分析误差的最小方差作为最优评价标准的方法，是一种递归资料处理的方法。在卡尔曼滤波中，向前模式每积分一步都要做一次资料同化以使用观测资料不断修正模式预报。

1.3 卫星微波探测仪器概况

根据仪器探测所使用的电磁波频段，大气卫星遥感可分为微波遥感、可见光遥感、红外遥感等类型。微波遥感除了具有观测范围广、资料分辨率高、观测频率高、资料一致性好、经济效益较高等大气遥感的共性外，还具有能够穿透水汽的特殊性质，从而可以获取云覆盖区域等红外和可见光遥感无法探测的位置的垂直大气参数信息^[11]。

目前所提供的观测数据加入预报系统的卫星微波探测仪包括先进的微波探测器（Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU），微波湿度探测仪（Microwave Humidity Sounder, MHS），云剖面雷达（Cloud Profiling Radar, CPR），高分辨率红外辐射探测仪（High-resolution Infrared Radiation Sounder, HIRS），FY-3 系列卫星搭载的微波温度计（MicroWave Temperature Sounder, MWTS），以及 FY-3 系列卫星搭载的微波湿度计（MicroWave Humidity Sounder, MWHS）等。

1.3.1 外国卫星微波仪器概况

除我国外，许多国家都发射了气象卫星用于科学研究以及天气预报，其中美国的历史最为悠久。美国于 1964 年发射了人类首颗气象卫星，也是最早将遥感技术应用于科学研究的国家。美国的气象卫星经历了一系列发展阶段，从试验卫星、第一代业务卫星艾萨 ESSA、第二代业务卫星 ITONS NOAA1-5、第三代业务卫星 TIPOS NOAA6-7 到第四代业务卫星 NOAA-15、16、17，目前已经发展至第五代

业务卫星 NOAA-18、19^[12]。

在第二代业务卫星的基础上，美国于第三代业务卫星上开始搭载大气垂直探测系统（TIROS Operational Vertical Sounder, TOVS）。TOVS 的仪器包括微波探测仪（Microwave Sounder Unit, MSU），HIRS 等。

美国自 1998 年开始研发第四代业务极轨卫星，这一代卫星的特点是将大气垂直探测系统升级至先进的大气垂直探测系统（Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, ATOVS）。ATOVS 系统主要由 AMSUA/B 以及 HIRS3/4 组成，其相对于 TOVS 的改进方面主要在于使用 15 通道的 AMSUA 和 5 通道的 AMSUB 代替了原先 4 通道的 MSU，且仪器的垂直分辨率得到了提高。同时，仪器的空间分辨率也得到了提高，相比于 MSU，AMSUA 的星下点分辨率提升至 45 千米，AMSUB 的星下点分辨率为 17 千米。在第五代业务卫星中，ATOVS 系统得到了进一步升级，用 MHS 替代了原有的 AMSUB。MHS 与 AMSUB 的功能相似，区别在于部分通道的极化方式以及中心频率有所区别，且 MHS 具有更高的探测精度。

除美国外，欧洲也发射了多颗气象卫星，其中 AMSU 仪器也搭载于欧洲发射的 METOP 系列卫星上。

1.3.2 中国卫星微波仪器概况

我国气象卫星的发射起步较晚，但发展迅速。首颗国产气象卫星风云 1 号(FY-1)于 1988 年 9 月发射，该卫星搭载了红外扫描仪等设备，但并未搭载大气微波探测仪器。风云 2 号气象卫星是地球同步卫星，其由两颗试验卫星（A、B 星）和四颗业务卫星（C、D、E、F 星）组成。其搭载扫描辐射计，通道相应频率在红外和可见光区域。

风云 3 号气象卫星是我国新一代极轨气象卫星，首星 FY-3A 于 2008 年 5 月 27 日发射，其卫星高度为 836km，飞行周期约 102 分钟。其搭载了微波探测设备，主要包括微波温度计、微波湿度计和微波成像仪。其中微波温度计有 4 个通道，分辨率为 50-75km；微波湿度计有 5 个通道，分辨率为 15km。风云 3 号卫星的第二星 FY-3B 于 2010 年 11 月 5 日发射，搭载的仪器与 FY-3A 星相同。邹晓蕾等将 FY-3A 卫星的微波温度计、微波湿度计与 NOAA-18 星的先进微波探测仪的观测进行了对比试验，结果显示 FY-3A 的微波探测资料与 NOAA-18 的微波探测资料具有相近的精度^[13]。

风云 3 号系列卫星的最新星 FY-3C 于 2013 年 9 月 23 日发射，其搭载了多种探测仪，探测频段包括微波、红外、可见光、紫外线等范围。在微波探测仪器方面，FY-3C 搭载的新型微波温度探测仪和新型微波湿度探测仪在 FY-3A/B 搭载的微波温度计和微波湿度计的基础上进行了改进，增加了多个探测通道，尤其是首

次添加了 118.75GHz 的氧气吸收通道, 仪器的垂直分辨率也得到了提高。

风云三号气象卫星发射前, 我国的微波探测数据主要依赖国外的卫星平台提供, 这对国家安全等方面具有潜在的威胁。风云三号系列卫星发射以来, 我国已逐步开展了针对国产极轨卫星探测资料的应用研究。

1.4 地表发射率反演研究现状

卫星搭载的传感器种类是相当多的, 一般从探测频率上划分为可见光传感器、红外传感器与微波传感器三类。红外和可见光探测受云影响比较大, 不能提供云顶以外关于云和降水的情况。微波探测由于具备对云的穿透性, 是获取包括云和降水全天候条件下大气地表信息的有利手段。尽管如此, 如何在数值天气预报中最有效地同化卫星微波垂直探测资料至今仍然具有很大的挑战性。McNally^[14]就曾经指出, 在同化中需要考虑观测资料的偏差订正、地表发射率的修正以及对云的检测等。当利用微波遥感探测大气时, 某些探测通道会收到地表贡献的电磁信号, 如何分离地表和大气的影 响, 利用好观测信息就是一项重要的课题。目前的资料同化领域, 只有对地表不敏感的少数通道可以实现业务化, 大部分还处于不能充分应用的境地, 这也是世界上各大数值预报中心遭遇的同化困境, 具有同样难度的还有同化云和降水区微波辐射资料。

低层探测通道资料不能使用的直接原因在于地表发射率的不确定性。因此, 同化陆上探测资料的前提是研究复杂地表的发射率的计算^[15-17]。对海面发射率的模拟技术目前较为完善, 如 Ellison 和 English 2003^[18], Guillou 1998^[19], Prigent 和 Abba 1990^[20], 这些模型已经在很多预报中心得到使用, 例如 Met-Office, ECMWF。业务化运行的 FASTEM-3 模式包含了对海水的介电系数, 海面粗糙度及泡沫的模拟。NCEP 有两种模拟海表发射率的选项: 使用 FASTEM 或者使用 NESDIS 海洋模型。尽管还存在一些问题, 这些海表发射率模型的准确度已经可以满足预报系统的要求。然而, 对于地表发射率的反演, 还存在诸多难点。对地表发射率以及肤温的模拟对更好地利用卫星微波观测至关重要。在过去的几十年间, 多篇致力于估计以及模拟地表发射率的论文得以发表。多数的天气预报模式使用 Grody 1988^[21]和 Boukabara 等 2011^[22]提出的经验公式来确定微波频段的地表发射率。使用这种手段可以同化对地表较不敏感的观测资料。但是, 对于对地表敏感的观测资料则不能使用这种方法。国内外很多学者对微波地表发射率的反演计算做了大量的研究, 提出了一系列反演方法, 其中大多以物理算法为基础, 然后结合探空廓线统计反演得出。全球各种类型的微波地表发射率难以全部获取, 有的虽然可以从建立的发射率模型计算出来, 但是这些发射率模型往往是在有限的区域地表条件下建立的, 往往难以大范围使用。另外一种方法就是从卫星资料中直接估算

出来, 卫星观测所受的影响因素较少, 观测区域既可延伸到全球, 又可以进行多频段和多传感器交叉观测。目前常用的几种被动微波遥感地表发射率反演方法, 包括经验统计方法^[23]、辐射传输方程方法^[24]、指数分析方法^[25]、神经网络方法^[26]和一维变分方法^[27]。其中神经网络方法利用大量相互联系的神经元来逼近任意复杂的非线性关系, 不需要已知地表发射率与地表温度、亮度温度、地表特性等因素的相互作用机理, 只通过训练数据直接建立地表发射率和输入参数之间的关系。然而, 如果没有对第一次猜值良好的估计, 神经网络技术的效果不是太好^[26]。

从卫星观测资料直接反演出地表发射率, 其实质上是仪器视场合成的“平均发射率”。我们十分希望这种反演的发射率至少要能比得上原位测量的发射率, 但从全球尺度上来讲, 这是不可能的^[28]。因此, 需要先获取精确的地表发射率, 然后才能在辐射传输模式中精确模拟卫星亮温, 而利用好陆面发射率是补偿地表发射率误差的一个有效的途径。由此可见, 地表贡献对于某些卫星微波探测通道是不可忽视的部分, 而且不同地表类型具有不同的发射率特点。世界上有两大主流辐射传输模式 RTTOV^[29]和 CRTM^[30], 前者主要业务应用于法国气象局、英国气象局和 ECMWF 等机构, 后者主要业务应用于美国的 NCEP 等机构, 它们包含的海面微波发射率的物理模式发展得比较成熟, 已更新到了 FASTEM6 版本^[31]。卫星反演陆地地表发射机制所涉及的因素很多, 包括空间地表类型、频率、极化方式和观测天顶角等。English 等人的研究表明发射率和地表温度都会影响近地面及相关的探测通道, 利用陆地卫星资料的关键是地面温度和地表发射率。ECMWF 的 Prigent 等人于 2005 年实现了从 AMSU-A(Advanced Microwave Sounding Unit A)观测直接计算地表发射率, 其计算精度可以比得上 SSM/I(Special Sensor Microwave/Image)和经验模型的结果^[32]。英国气象局在一维变分系统(1D-Var)的敏感性研究也发现, 当给予地表发射率由 AMSU-A 窗区通道观测反演的发射率气候值时(原来只是赋予发射率一个常数值), 1D-Var 系统可以工作得更好, 即能同化进更多的陆表探测通道观测。随后法国气象局和 ECMWF 都做了进一步的研究和实验, 并在 4D-Var 业务系统实现了对微波地表发射率的计算, 其中大气要素利用 RTTOV 模式进行计算, 大气温度、湿度和地表温度由短期预报模式提供, 结果证明在无云情况下的效果是非常理想的。目前针对 AMSU-A 和 MHS 观测反演地表发射率主要有 3 种方法: 第一种方法是离线生成静态的月平均地表发射率地图集; 第二种方法是对卫星视场内的每个像元直接进行地表发射率计算, 在线生成动态发射率值; 第三种方法是前两种方法的结合, 并利用 AMSU-A/MHS(Microwave Humidity Sounding)的窗区通道增加表皮温度的动态计算。经过法国气象局、欧洲中心等机构的业务化, 发现动态变化的发射率(无论是否增加表皮温度的计算)或者平均发射率地图集的方法都能使更多资料通过质量控制, 均能明显改进业务模式

的观测模拟^[33]。ECMWF 的 Krzeminski 等人^[34]和法国气象局的 Karbou 等人^[35]直接应用晴空微波窗区通道反演得到的地表发射率, 试验同化卫星微波观测资料的结果显示对数值预报效果的进一步改善有正影响。另外, 日本亦在试验同化应用地表影响的卫星微波发射率资料^[36]。美国 NCEP 的应用表明, 在 Weng F 等人建立的地表发射率模式有效提高了各类复杂地表类型, 特别是冰、雪以及沙漠地表发射率计算精度的基础上, 受地表发射率影响通道卫星资料能够大量进入同化系统并改善数值预报效果^[37]。董佩明等人基于辐射传输模式 CRTM 也已建立了由卫星观测反演地表发射率的计算流程, 在东亚区域的应用表明对复杂陆地地表低层甚至到中层卫星资料的应用都有积极影响^[38]。在 FY-3C 卫星资料同化应用基础工作完成后, 低层探测通道的同化应用也就可以进一步地开展工作。

1.5 国内外陆上微波探测资料同化研究现状

AMSU-A 是目前是其全球观测系统中最重要传感器之一, 对业务数值预报贡献非常大, 同时微波湿度计 MHS 也发挥了很重要的作用, 它们也被同化在国际上许多数值预报业务系统中。ECMWF 已经于 2012 年将微波湿度探测仪 MHS 的通道 5 在陆地上进行主动同化。而湿度计 MHS 的通道 5 是其最低峰值通道, 对低层湿度敏感, 只能实现海面同化, 原因就在于地表发射计算的不确定性^[39]。

针对地表敏感通道的同化, 欧空局与 ECMWF 合作提出了一种新的筛选标准, 能够筛选出地表对其有过大贡献的辐射率观测, 结果表明每个通道的全球单阈值并不能很完美地筛选出难以模拟的观测, 需要针对地表敏感微波探测观测当前所用的筛选标准, 在观测误差中将加入地表特征(如肤温和发射率误差)。但是, 目前 AMSU-A 和 MHS 的每个通道都使用一个全球平均的单值作为观测误差^[40]。因此, Lawrence 等提出了一种新的状态依赖观测误差模型。状态依赖的观测误差以更加精确的方式表示, 并且有利于在高地形、南极和云区引入更多的资料, 新的状态依赖观测误差对全球预报评分有一个中性的影响, 但是给我们展现了一个非常好的处理观测误差的前景^[41]。

中国新一代极轨气象卫星 FY-3 系列前两颗试验星 FY-3A 和 FY-3B 上搭载的微波探测器分别为 4 通道微波温度计(Microwave Temperature Sounder, MWTS)和 5 通道微波湿度计(Microwave Humidity Sounder, MWHS), FY-3C 对这两个仪器进行了升级, 替换为微波温度计-2(Microwave Temperature Sounder-2, MWTS-2)和微波湿度计-2(Microwave Humidity Temperature Sounder-2, MWHS-2), 通道数目分别增加为 13 和 15。MWHS-2 同时拥有 183.31GHz 探测通道和 118.75GHz 探测通道。其中 183.31GHz 探测通道与原微波湿度计的主探测通道一致, 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

探测通道位于氧气吸收线，是世界上第一个在业务上使用该探测通道的微波探测仪，细分有 8 个探测通道，用于大气温度的高空间探测；这是其它微波探测器所没有的，可以提供温度、湿度的联合探测信息，使得传统的微波湿度探测仪 MWHS 升级成为微波湿度温度探测仪 MWHS-2。辅助探测通道则位于大气窗区的 89GHz 和 150GHz，用于背景微波辐射探测和降水检测等^[42]。由于 MWHS-2 同时拥有温度和湿度探测通道，又被称为微波湿温探测仪。

FY-3C 于 2013 年 9 月 23 日发射成功，虽然国家卫星气象中心的陆其峰已赴欧洲中期数值预报中心开展了 FY-3C 资料在 ECMWF 数值预报模式中的应用和检验，但是现在相关 FY-3C 仪器资料的应用等工作仍然显著滞后。国内外关于 FY 系列卫星的资料同化主要工作如下：陆其峰基于 ECMWF 数值天气预报系统平台定量评价了 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^[43]。陈科艺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，并且 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^[44]。Lawrence 等人在 ECMWF 对 MWHS-2 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^[45]。近期，陆其峰重新回到 ECMWF 工作了一段时间，将 FY-3C 卫星资料初步实现在了 ECMWF 的同化系统中，并评估了数据质量，发现 FY-3C 的 MWTS-2 和 MWHS-2 提供了良好的数据质量，但是 118GHz 通道表现出了气团偏差的特性，需要进一步研究^[46]。同时，中国国家气象局(CMA)、欧洲中心和英国气象局(UKMO)针对 FY-3C 的资料应用开展了联合合作，建立了专家交流机制，Katie 和 Heather 访问了 CMA/NSMC，为将 FY-3C 引入 UKMO 的 UM 系统和 ECMWF 的 IFS 系统做好了前期的准备工作，Nigel 访问 CMA/NSMC 交流了关于卫星定标的工作^[47]。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^[48]。在中国研发的新一代数值同化预报系统 GRAPES 中，卫星资料的应用也是一个重点，同化的卫星资料量已占进入同化系统的总资料量的 40%左右，并对数值预报的效果产生了明显改进^[49]。Juan Li 在 GRAPES 中试验了 FY-3A MWTS 资料的同化应用，结果表明对台风路径预报效果具有积极的改善作用^[50]。

1.6 本文研究内容

遥感卫星陆上探测资料的使用对提高可用的卫星观测数量至关重要，然而，由于地表发射率的不确定性，使得卫星获得的陆上观测数据不能得到有效使用。如何充分利用陆上微波观测资料以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，发展陆上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 AMSUA/MHS 微波观测资料的特性，评价其观测资料质量；在 WRF3.8 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，并使用静态月平均地图集，实现 WRFDA 同化系统对 AMSUA/MHS 陆上微波观测资料的同化，并对其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。

本文结构安排如下：

第一章：绪论。本章主要介绍文章的研究背景及意义。首先对资料同化的基本理论进行梳理，之后简要介绍了国内外卫星微波探测仪器的基本情况。本章还着重介绍了地表发射率反演的研究现状，以及国内外针对遥感卫星陆上观测资料同化的研究现状，为针对 AMSUA/MHS 陆上观测资料的同化研究提供技术参考。最后，对本文的主要工作以及文章结构进行了概括。

第二章：卫星大气遥感原理。本章对卫星大气遥感原理进行介绍，包括大气辐射的基本规律以及常用的大气辐射传输模式。之后对课题研究所使用到的 RTTOV 快速辐射传输模式的主要特点、运行流程以及 WRF3.8 模式的架构进行了详细分析，并对 WRFDA 三维变分同化系统的资料处理流程进行了介绍。通过本章的分析，实现了对卫星大气遥感原理以及业务系统的结构的理解与掌握，为同化技术的实现打下基础。

第三章：微波观测反演地表发射率算法研究。本章主要内容为对地表发射率的反演算法进行研究，并对得到的全球月平均地表发射率进行分析。首先对地表发射率的概念及其应用进行了阐述，之后介绍了部分较为成熟的地表发射率反演算法。最后，对使用 AMSU 卫星观测资料反演地表发射率的方法进行了深入研究，并利用得到的发射率地图集进行可视化检验，对获得的全球月平均地表发射率进行了分析。

第四章：AMSUA/MHS 陆上微波观测资料同化关键技术研究。本章首先详细介绍了 AMSUA/MHS 各通道的设计指标，之后对 RTTOV 中对于发射率地图集的接口进行了分析研究，实现了发射率地图集在 RTTOV 中的接入，并对其接入效果进行了分析验证。最后，研究了 AMSUA/MHS 观测资料的偏差订正方法，并对订正效果进行了评估。实现了 AMSUA/MHS 陆上微波探测资料以及地表发射率在同化系统中的接入与使用。

第五章：同化预报试验及分析。本章针对具体台风个例设计设置三组试验，对同化所得温度场及相对湿度场，以及预报所得的台风路径进行分析，并根据分析结果来评估 AMSUA 陆上微波探测资料对于同化系统及预报效果的影响。

文章最后为结束语。本部分对论文的主要内容以及工作进行总结，并对研究

中存在的不足进行分析，最后针对下步工作进行展望。

第二章 卫星大气遥感原理

自然界中的一切物质都在吸收并发射电磁辐射。遥感卫星所获得的亮温值，是由大气层发射、反射以及散射电磁辐射综合而成的结果^[51]。电磁辐射规律是大气遥感的基础，了解大气辐射原理对了解卫星观测至关重要。本章将对大气辐射传输规律和快速辐射传输模式进行介绍，最后介绍试验所用到的相关软件平台。

2.1 大气辐射基本规律

普朗克定律描述了吸收率和发射率均恒等于 1 的黑体在温度 T 、波长 λ 上的辐射效应：

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} = \frac{c_1}{\lambda^5(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.1)$$

其中 $B_{\lambda}(T)$ 表示黑体的分谱辐射出射度， k 为玻尔兹曼常数， h 为普朗克常数， c_1 、 c_2 分别分第一和第二辐射常数。普朗克定律描述了黑体温度与辐射能力的关系，但这是一个理想化的模型。在自然界中，除了极少数的物体在特定条件下能够被视为黑体外，绝大多数物体均不能被视为黑体。

为了解决这个问题，基尔霍夫建立了黑体辐射与非黑体辐射之间的关系，即基尔霍夫定律，其表述为：对于任何物体，在热力平衡条件下，其发射和吸收的辐射强度之比均为一个常数，等于该温度下的黑体辐射强度^[52]。表达式为：

$$\frac{B(T)}{\alpha} = B_f(T_B) \quad (2.2)$$

其中 α 为物体的吸收率， $B(T)$ 为物体在温度 T 下的辐射强度。如果已知物体的吸收率，并计算出了相同温度下的黑体辐射强度，就可以利用基尔霍夫定律计算出该物体的辐射强度。

2.2 大气辐射传输模式

2.2.1 逐线积分模式

大气原子和分子的各条吸收谱线组合形成了地球大气光谱。逐线积分，即依次、逐条地计算各条大气谱线的贡献。在谱线为 Lorentz 线性的假设下，平均透过率的逐线积分 $\bar{T}(u)$ 可表示为：

$$\bar{T}(u) = \frac{1}{\Delta v} \int_{\Delta v} \exp \left\{ - \sum_l^{line} \frac{\alpha_{Ll} S_l u}{\pi [(v - v_{0l})^2 + \alpha_{Ll}^2]} \right\} dv \quad (2.3)$$

其中 S_l 是第 l 条线的线强， u 为物质吸收量， v_{0l} 为第 l 条线的谱线中心的波数， α_{Ll} 为

第 l 条线的 Lorentz 加宽的半宽度。在实际计算中,逐线积分模式要考虑两个部分:

(1)对吸收物质质量 du 的积分部分,用于计算整个吸收路径的贡献;(2)对频率 dv 的积分部分,用于计算光谱间隔 $\Delta\nu$ 中的所有吸收峰贡献。其中对路径的积分可以将大气的吸收路径看做多个均匀薄层,并用求和代替积分,而对频率的积分则选用合适的数值积分公式来实现。

由于很多实际中的因素,大气的吸收谱线并不是单色的,而是具有一定的宽度和形状^[53]。但是大气吸收谱线的频率只能够描述谱线的中心位置,因此,在计算大气气体吸收时,谱线的强度、线型、半宽等参数也是至关重要的。谱线的强度定义为谱线的吸收系数对频率的积分,谱线的线型指谱线的形状因子函数,谱线的半宽指线型函数极大值一半处的宽度。在逐线积分模式中,只要知道每一条谱线的光谱参数、大气吸收路径参数以及两者间的函数关系,就可以计算出实际大气各层的吸收率以及透过率。

逐线积分模式需要对每条吸收谱线的贡献进行考虑,并且对积分步长有严格限制,其不能够超过吸收谱线的最小半宽。因此,逐线积分模式只能在光谱分辨率非常高的条件下才能够使用,而且其需要占用大量的计算资源。

2.2.2 快速辐射传输模式

采用逐线积分模式可以获得高精度的单色大气透过率,但是这样做的代价是需要占用大量的计算资源以及存储空间,这是业务化的系统所难以承受的。同时,逐线积分模式通常只应用于高光谱遥感资料,其需要处理的通道成百上千,这所带来的庞大的计算量更是让逐线积分模式雪上加霜。因此,提出一种既能够满足精度要求,又能够在较短时间内完成运算的简化的大气辐射传输模式势在必行。目前,多种相对快速的大气辐射传输模式已经成功应用于业务运行。通常情况下,可以将快速大气辐射传输模式分为以下几种类型:

(1)伪逐线积分模式。这种模式使用高精度的逐线积分模式预先计算了任意层大气到大气层顶的单色透过率,并将其作为数据集查表使用。这样在计算大气透过率时,可以在数据集中通过查表找到与当前大气状态最接近的数值,而不用每次都重新计算,从而可以节省计算资源。

(2)物理辐射传输模式。这种模式的探测通道使用的是平均的分光参数,模式中每一模式层到大气层顶的光学厚度由这些分光参数计算而来。物理辐射传输模式的优点主要有(1)可以适用于任意垂直坐标系;(2)对某些特定气体,其计算精度较高;(3)模式只需简单调整就可以适应通道分光参数的变化。但是这种模式的缺陷也很明显,主要是计算速度相对逐线积分模式并不能明显提高,因此在对于计算性能要求较高的同化系统中难以被采用。

(3) 用回归方程定义光学厚度计算系数的模式。这种模式中, 任意模式层到大气层顶的光学厚度可以用多个光学厚度计算系数与预报因子的乘积的累加的形式来表示, 而光学厚度计算系数是由预先计算好的任意模式层到大气层顶的透过率通过回归方程得到的。由于用于计算大气透过率系数的廓线集包含了实际大气中吸收气体含量及温度的变化范围, 表征了大气的基本状态, 因此使用回归方程定义光学厚度计算系数的模式能够计算出任何输入的大气廓线。一般来讲, 用回归方程定义光学厚度计算系数的模式在计算时采用较为简单的线性方程组, 这种方式便于书写模式的切线性以及伴随模式, 从而便于计算模式相对于初始场的 jacobians 矩阵。

(4) 基于神经网络的辐射传输模式。这种模式采用机器学习、深度神经网络的原理对通道探测辐射值进行模拟。这种方式正在发展之中。

2.3 RTTOV 快速辐射传输模式及 WRF 模式系统

2.3.1 RTTOV 快速辐射传输模式

卫星观测所获得的数据是星载仪器所接收到的亮温值, 而不是常规的大气状态变量信息。因此, 需要辐射传输模式来进行二者间的转换。RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) 就是一种业务化的快速辐射传输模式。其辐射传输方程如下:

在假设大气为局地热力, 动力平衡的平面平行大气的条件下, 并不考虑散射, 卫星观测到的亮温值 $L(\nu, \theta)$ 可由下式表示:

$$L(\nu, \theta) = (1 - N)L^{clr}(\nu, \theta) + NL^{cld}(\nu, \theta) \quad (2.4)$$

其中 ν 为观测通道的中心波数, θ 为卫星扫描角, N 为云量, $L^{clr}(\nu, \theta)$ 为晴空条件下大气层顶的向上辐射, $L^{cld}(\nu, \theta)$ 为有云条件下的大气层顶的向上辐射。而 $L^{clr}(\nu, \theta)$ 又可以被分为三部分, 分别为地表的出射辐射、地表的镜面反射以及大气辐射, 即:

$$L^{clr}(\nu, \theta) = \varepsilon \cdot T_s \cdot \tau + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot T(\downarrow) + T(\uparrow) \quad (2.5)$$

其中 ε 为地表发射率, T_s 为肤温, τ 为大气透过率, $T(\downarrow)$ 、 $T(\uparrow)$ 分别为大气的下行和上行辐射。

RTTOV 快速辐射传输模式是在 20 世纪 90 年代初由欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 开发的用于模拟 TIROS 业务垂直探测仪 (NOAA's TIROS Operational Vertical Sounder, TOVS) 卫星观测的的辐射传输模式, 经过了多年的发展, 目前已经能够对全世界多种气象卫星的观测资料进行模拟。RTTOV 将大气的温度、湿度、臭氧含量等垂直廓线作为模式输入, 利用不同探测仪通道的权重函数来对相应的辐射值进行计算。在计

算光学厚度时, RTTOV 使用 83 条不同的大气廓线作为训练样本, 每条廓线有来自 6 个不同的天顶角的数据, 总训练样本数为 498。模式层由 54 个固定的气压等级分为 53 层。RTTOV 现已更新至 11.3 版本, 该版本支持了对国产卫星 FY-3C 微波温度计及微波湿度计观测资料的模拟。

RTTOV 的运行流程如图 2.1 所示:

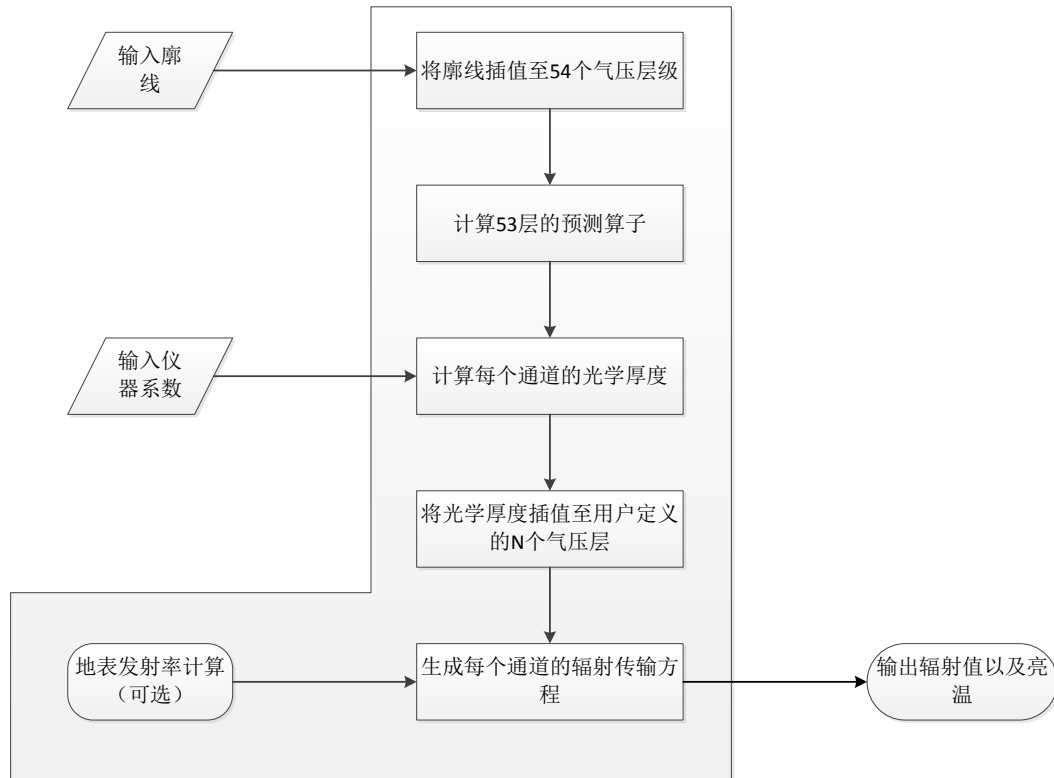


图 2.1 RTTOV 运行流程

RTTOV 所需要的模式参量包括肤温、水汽含量、气压以及从地面到模式层顶的大气廓线等参数。同时, 为了满足对臭氧的探测需求, RTTOV 也将臭氧作为模式的初始变量进行输入。在 RTTOV8 及以后的版本中, 加入了云散射模块, 使得 RTTOV 对云区域的模拟更加精确, 同时也增加了对大气水凝物含量等输入变量的需求。

2.3.2 WRF 模式及 WRFDA 同化系统

WRF (the Weather Research and Forecast) 模式是由美国国家大气研究中心 (National Center of Atmospheric Research, NCAR)、美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 等多个科研机构共同开发的业务预报系统, 在中尺度数值天气预报领域应用较为广泛。WRFDA 是 WRF 配套的资料同化系统。WRF 模式是一种完全可压非静力模式, 其包含大气模拟和数值天气预报的模式系统, 并具有配套的资料同化系统, 在对中尺度天气过程的预报

和模拟中展示出了良好的效果^[54]。

WRF 模式在运行时，分为预处理、模式运行以及后处理和可视化三大部分，其中模式运行部分又可分为动力框架部分和资料同化部分。输入系统的地形数据和格点数据需要先经过 WRF 预处理系统(WRF Preprocessing System, WPS)处理，之后通过真实数据初始化程序 real 生成 WRF 系统能够读取的初始场和边界条件。WRFDA 同化系统使用 real 程序生成的初始场、边界条件以及观测资料进行资料同化，并将生成的结果输入 WRF 模式进行预报。之后通过 NCL 等软件对输出结果进行后处理，包括可视化等操作。WRF 模式的具体结构流程图如图 2.2 所示^[55]：

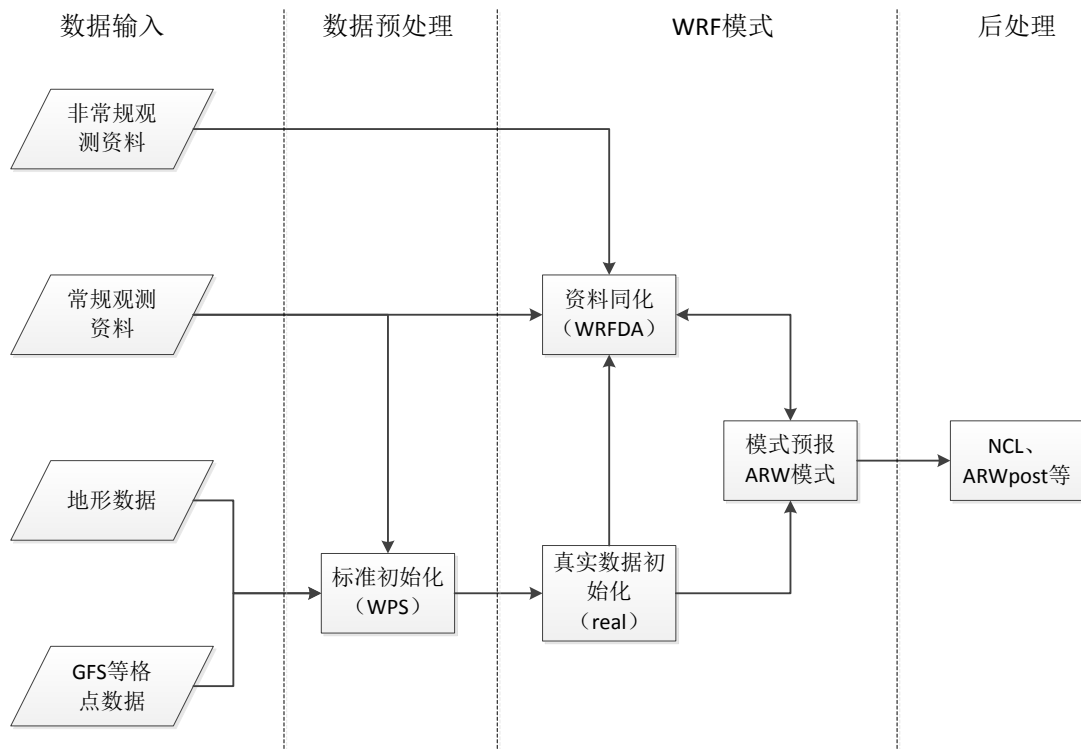


图 2.2 WRF 模式流程图

WRF 模式采用模块化、标准化的编程方式，便于用户对其进行阅读、修改以及维护。同时，WRF 模式对运行的并行性进行优化，支持分布式并行和共享式并行，从而使系统可以在具有分布式内存共享内存或有共享内存节点的机群上运行，因此具有很好的可移植性。

WRFDA 是 WRF 配套的资料同化系统，其三维变分同化模块 3DVAR 于 2003 年 6 月首次发布，第二版于 2004 年 5 月发布。2004 年，WRF 将四维变分技术(Four Dimensional Variational, 4DVAR)引入其同化模块，并将其同化模块更名为 WRF-VAR。2008 年，混合变分集合算法加入 WRF 同化模块，同时其被更名为 WRFDA。三维变分技术在单次运算时不需考虑时间的推移，因此其较四维变分技术在计算资源有限的情况下性价比更高，并且其理论较为成熟，在业务系统上得到了普遍的使用。WRFDA 系统的流程图如图 2.3 所示^[55]：

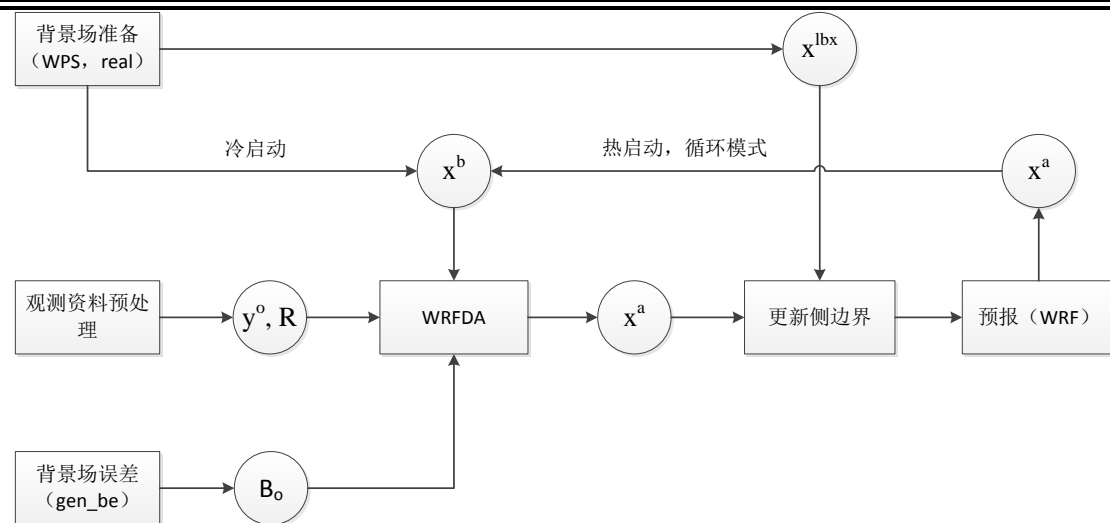


图 2.3 WRFDA 系统流程图

图中矩形表示处理步骤，圆圈表示数据。**WRFDA** 系统所需的背景场 x^b 以及初始边界条件需要由 **WRF** 模式的 **WPS** 系统以及 **real** 程序提供,其中 x^{lbx} 为侧边界条件。在非全球预报条件下, **WRFDA** 系统需要在同化前更新底边界, 同化后更新侧边界。 y^o 为输入的观测资料, R 为观测误差协方差, B_o 为背景误差协方差。 x^a 为预报所得的分析场, 在循环同化-预报下将其作为下次同化的背景场输入。

由于三维变分技术较为成熟, 且在业务系统中得到了广泛使用, 本文选用三维变分技术进行同化试验。

2.4 小结

本章首先介绍了大气辐射传输规律和快速辐射传输模式, 之后对业务化运行的快速辐射传输模式 **RTTOV** 和模式系统 **WRF** 进行了介绍, 并对 **RTTOV**、**WRF**、**WRFDA** 系统的流程结构进行了详细的分析和介绍, 为在 **WRFDA** 中实现遥感卫星陆上微波探测资料的同化打下基础。

第三章 微波观测反演地表发射率算法研究

微波地表发射率是表征地表特性的重要参数，不仅是实现微波辐射资料直接同化的重要参数，也是卫星微波反演地表大气参数的重要条件。本章对微波观测反演地表发射率算法进行研究。

3.1 地表发射率概述

地表发射率的定义是在相同温度下地表发出的热辐射与黑体辐射能量之比，它能够反映地表的热辐射能力，是我们了解支配地表能量收支和地表辐射的生物物理过程的重要参数。近年来，地表发射率受到持续关注，它会随时间和空间的改变而发生变化，不仅依赖于土壤的化学组成、结构和纹理，而且也会随和地表植被类型、季节、地表起伏状况等因素的变化而变化。地表发射率与植被覆盖、土壤水分等密切相关，可以用于表示地表类型的变化情况，也可作为陆面信息进入同化系统。

随着大气微波遥感技术的发展，卫星观测已经成为了获取大气信息的重要手段。搭载于低轨道卫星的微波探测仪器提供的观测数据能够提高短期预报初始场的精确度，但是这些观测数据在天气预报系统中并没有得到充分的使用。尤其是陆地上空的观测资料，往往只选取对地表不敏感的通道进行同化，这导致陆地上空观测资料的利用率远低于海上观测资料的利用率。造成这种现象的原因是地表发射率较海面发射率具有更大的不确定性。海面发射率较低，通常在 0.5 左右，而陆地发射率接近于 1。与海面发射率不同，地表微波发射率相对较高，且不同地表类型的发射率相差较大。因此，如果不能精确地描述地表发射率，就不能够从观测值中区分出地表发射率成分和大气辐射成分。此外，从荒漠草原等干旱区域至雨林、湖泊等水量充沛地区，决定微波地表发射率的参数多且差异较大，导致地表发射率产生显著的区别，这对于模型而言非常复杂。目前，对微波发射率频谱的模拟和探测只是局限于有限的频率范围和地表类型。准确的计算地表发射率是精确确定来自地表的长波能量辐射的必要条件，也是同化遥感卫星陆上探测资料的前提。因此，地表发射率对于研究地表辐射收支、大气辐射传输模式和资料同化来说都非常重要。

3.2 地表发射率反演算法

全球各种地表类型的微波发射率难以直接获取，对于陆面，只能在有限的地表条件下导出微波发射率模式。而对于发射率模式不够准确的陆面区域，必须采

用卫星资料反演的方法。很多国内外学者针对地表发射率的反演方法进行了深入研究，并产生了一系列成果。当前较为常用的被动微波遥感地表发射率反演方法包括经验统计方法、一维变分方法、辐射传输方程方法、指数分析方法以及神经网络方法等。辐射传输方程方法是本章的重点，在 3.3 节对其进行详述和应用。本小节针对其他几种反演算法进行简要概括。

3.2.1 经验统计方法

经验统计方法是一种使用线性回归等统计方法建立卫星观测到的亮温值和对像元地表发射率之间的关系的算法，其通常基于地表发射率和卫星观测亮温之间的强相关性，并将求解到的回归方程应用于卫星观测亮温，从而得到地表发射率。简单的经验统计方法使用卫星观测亮温作为影响地表发射率的唯一变量，依此建立卫星观测亮温与地表发射率之间的回归方程^[23]。

3.2.2 一维变分方法

变分方法通常定义一个代价函数，然后寻找使这个代价函数达到最小值时的大气状态。Lorenz 提出，假定误差和背景误差均服从高斯分布，通过极小化代价函数，可以得到最小误差的分析场。一维变分方法的代价函数可表示为：

$$J(X) = \frac{1}{2}(X - X_0)^T B^{-1}(X - X_0) + \frac{1}{2}(Y^0 - H(X))^T E^{-1}(Y^0 - H(X)) \quad (3.1)$$

其中 X 为要被反演的状态向量， X_0 为背景场， Y^0 为观测向量， H 为观测算子， E 为观测误差协方差矩阵， B 为背景误差协方差矩阵。求解这个方程的前提是要有一个偏差较小的正向模式，即辐射传输模式，且模拟到的辐射值在观测误差协方差矩阵 E 中具有较好的统计结果^[27]。

3.2.3 机器学习方法

神经网络方法是一种机器学习方法，其使用大量的互相关联的神经元来逼近复杂的非线性关系，这种算法通过训练样本直接建立输入参数与地表发射率的关系，而不需要了解辐射传输模式等物理过程。然而，这种方法对第一猜值精确度要求较高，如果精确度较差，则神经网络方法的效果不是很好^[26]。

深度学习是机器学习领域一个新的研究方向，其动机在于建立模型模拟人类大脑的神经连接结构，在处理图像、声音和文本这些信号时，通过多个变换阶段分层对数据特征进行描述，进而给出数据的解释。深度学习通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示，给出数据的分层特征表示。极限学习机 (Extreme Learning Machine, ELM) 是一种深度学习算法，它随机地选取隐藏节点并解析地确定单隐

层前向神经网络 (SLFN) 的输出权重。一个经典的 ELM 具有三层结构: 输入层, 隐藏层和输出层。与传统的前向神经网络算法 (例如反向传播 (Back Propagation, BP) 算法) 相比, ELM 具有更快的学习速度和更好的性能。目前, 深度学习已在 ECMWF 业务系统中得到了初步应用, 在反演地表发射率方面起到了良好的效果。

3.2.4 指数分析方法

在已知地表温度和大气湿状况的条件下, 使用辐射传输方程可以求得地表发射率。然而在业务运行时, 大气状态和地表状况参数大多是未知的, 这就要求构造一个对地表发射率敏感, 而对大气参数以及地表温度相对不敏感的参数, 并建立此参数与地表发射率之间的统计关系。使用这样的参数进行地表发射率反演的方法被称为指数分析方法^[25]。

针对不同的应用目的, 在反演地表发射率时, 可以定义多种形式的特征参数, 如极化比、微波植被指数、土壤湿度指数、综合亮温指数等^[56]。

3.3 使用 AMSU 卫星观测资料静态反演地表发射率

为了使用卫星观测计算地表发射率, 通常需要在地表是平面镜面的假设下。在没有地表的先验信息的条件下, 这种假设是有效的。Mazler (2005) 指出这种假设对于低空观测的传感器并不适用, 原因是在特定的状态下, 兰伯特成分较为显著, 所带来的误差较大。Karbou 和 Prigent (2005) 证明了在非冰雪覆盖地表, 这种假设所获得的地表发射率的误差小于 1%。Mazler (2005) 提出, 通过对特定参数的调整, 可以将这个误差控制地更小。

先进微波探测器 (Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU) A 和 B 搭载于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的极轨卫星以及 Metop 卫星上^[57]。AMSU 包括 AMSU-A 与 AMSU-B。AMSU-A 由 15 个通道组成, 扫描带宽 2228 km, 星下点空间分辨率 48 km, 每条扫描线有 30 个视场, 扫描周期为 8 s, 用于改进温度廓线产品, 尤其是云区的温度廓线。AMSU-B 是一个 5 通道扫描探测器, 扫描宽度 2228 km, 其星下点分辨率为 16 km, 每条扫描视场 90 个, 扫描周期为 2.67 s。AMSU-B 是首次搭载在 NOAA 极轨卫星上的微波湿度探测器。AMSU-B 除提供高分辨率大气湿度廓线外, 两个窗区通道可用于监测积雪、水体等。从发射于 2005 年的 NOAA-18 卫星开始, AMSU-B 被微波湿度计 (Microwave Humidity Sounder, MHS) 取代。MHS 的 5 个通道的特点与 AMSU-B 的通道基本相似, 只在中心频率和部分通道的极化方式有所不同。本节介绍的地表发射率反演算法使用 AMSU 卫星数据。

在非散射平行平面大气假设下, 给定 AMSU 卫星天顶角、光谱频率, 卫星传

传感器所接收到的亮温值 $T_b(\nu, \theta)$ 能够表达为^[35]:

$$T_b(\nu, \theta) = T_s \varepsilon(\nu, \theta) \Gamma + [1 - \varepsilon(\nu, \theta)] \Gamma T_a^\downarrow(\nu, \theta) + T_a^\uparrow(\nu, \theta) \quad (3.1)$$

$$\Gamma = \exp \left[\frac{-\tau(0, H)}{\cos \theta} \right] \quad (3.2)$$

其中 $\varepsilon(\nu, \theta)$ 为在频率 ν 、卫星观测天顶角 θ 的地表发射率。 T_s 为肤温， $T_a^\downarrow(\nu, \theta)$ 、 $T_a^\uparrow(\nu, \theta)$ 分别为大气的下行和上行辐射。 Γ 是大气的净透过率，其可以表征为一个大气不透明度 $\tau(0, H)$ 和观测天顶角 θ 的函数。 H 是大气层顶高度。

由式 (3.1) 可得反演出的地表发射率表达式为:

$$\varepsilon(\nu, \theta) = \frac{T_b(\nu, \theta) - T_a^\uparrow(\nu, \theta) - T_a^\downarrow(\nu, \theta) \Gamma}{[T_s - T_a^\downarrow(\nu, \theta)] \Gamma} \quad (3.3)$$

AMSU 观测是通过一个转动天线系统接收的，因此其计算得的地表发射率的极化方向是水平极化和垂直极化的混合，这两种成分的关系如式 (3.4)、(3.5) 所示:

$$\varepsilon(\nu, \theta) = \varepsilon_p(\nu, \theta) \cos^2 \varphi + \varepsilon_q(\nu, \theta) \sin^2 \varphi \quad (3.4)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{R}{R + H_{sat}} \sin \theta \right) \quad (3.5)$$

这里 θ 为卫星天顶角， φ 为卫星扫描角。 φ 能够以一个有关观测天顶角 θ 、地球半径 R 和卫星高度 H_{sat} 的函数表示。

$\varepsilon_p(\nu, \theta)$ 和 $\varepsilon_q(\nu, \theta)$ 是两个相互正交的极化方向上的地表发射率。对于 AMSU 的窗区通道，认为在天底点的极化方向为垂直的。在这样的条件下，式 (3.4) 能被改写为:

$$\varepsilon(\nu, \theta) = \varepsilon_v(\nu, \theta) \cos^2 \varphi + \varepsilon_h(\nu, \theta) \sin^2 \varphi \quad (3.5)$$

其中 $\varepsilon_v(\nu, \theta)$ 和 $\varepsilon_h(\nu, \theta)$ 分别为极化方向为垂直和水平方向的地表发射率。

通过 AMSU 卫星观测，结合上述算法，就可以获得静态的月平均地表发射率。将这个全球的月平均地表发射率称为发射率地图集。发射率地图集包含了全球陆面部分的发射率信息，包括经纬度信息、地表发射率以及地表类型，其网格精度为 0.25 度乘 0.25 度。图 3.1 (a-d) 分别为 1 月、4 月、7 月、10 月的发射率地图集经 matlab 可视化处理后的结果。两极区域人烟罕至，其地表发射率对我们关心的台风现象影响较小，因此在计算时剔除了大部分两级的观测信息，在图中以灰色表示。内海区域，如黑海，虽然其紧邻陆地，但其所谓的地表发射率并无意义，因此也将之表示为灰色。

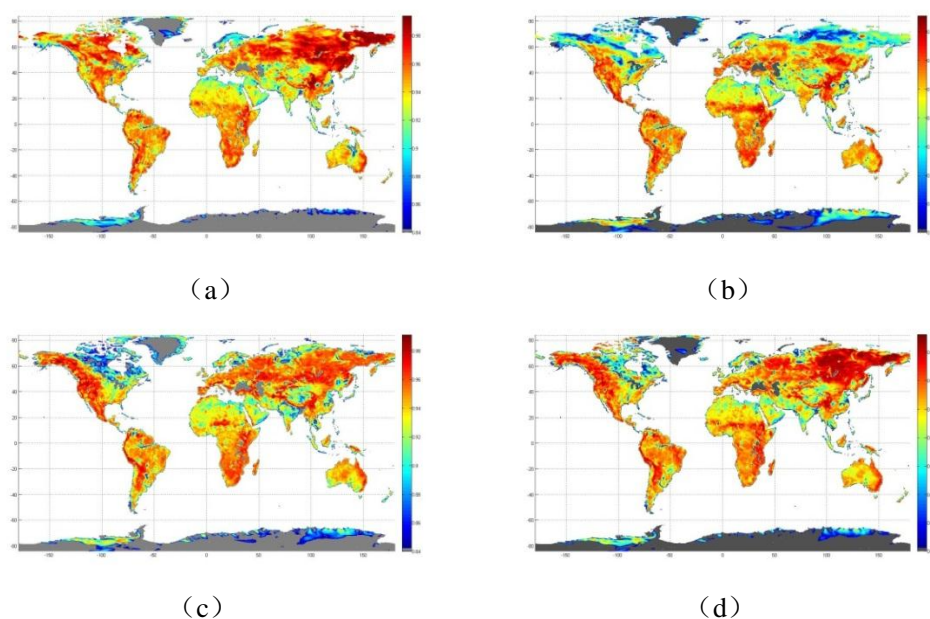


图 3.1 1 月、4 月、7 月、10 月的发射率地图集

从获得的发射率地图集数据来看，可以得到以下几点结论：

(1) 同一时间、不同位置的地表发射率相差巨大，这显示了地表类型对地表发射率的影响。例如，可以明显看到，湖泊、河流等区域具有较低的地表发射率，如美国-加拿大的五大湖区，巴西的亚马逊河流域；而林区则具有较高的地表发射率，如巴西的热带雨林。一般来说，植被的密度能够影响地表发射率，在植被密度降低时，裸土对地表发射率的贡献提高，从而使像元的发射率降低。地表类型的巨大差异性显示了地表发射率反演的重要性。

(2) 不同时间、同一位置的地表发射率也会发生变化。这显示了季节变化对地表发射率的影响。一般来说，植被在夏季生长旺盛，发射率相对稳定，而在冬季植物落叶，再加上降雪的影响，使发射率波动较大。例如，在 (a) 图中，加拿大和西伯利亚区域的地表发射率，在冬季明显偏高，这是由于冬季积雪造成的；春季冰雪消融，而植被覆盖并不完全，这又导致了 (b) 图中西伯利亚区域的地表发射率降低。在非洲亚热带地区，由于雨季和旱季的交替出现，也使其地表发射率产生周期性的变化。而赤道区域的地表发射率几乎不随时间变化，这是由于赤道区域的季节变化对气候的影响不明显所造成的。

为了更加清晰地显示地表发射率的信息以及对其进行分析，选取 1 月份的发射率地图集中中国大陆区域进行放大，其结果如图 3.2 所示。

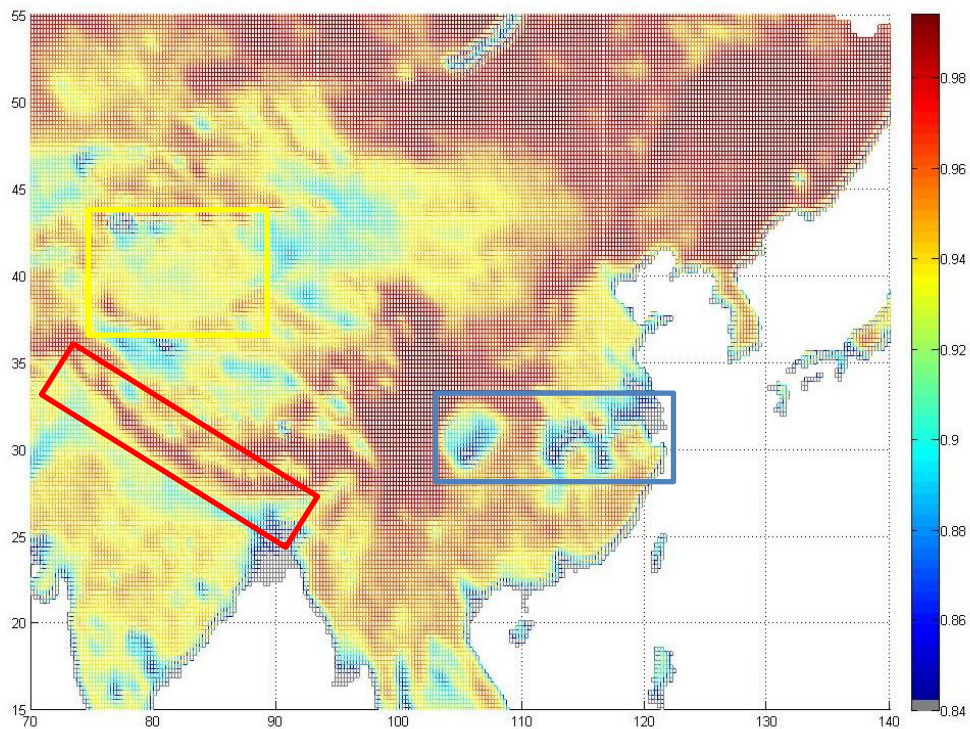


图 3.2 中国大陆区域 1 月份发射率地图集

可以看到,发射率地图集信息对于地表类型具有很直观的反映。例如,在图中蓝框内,有大量的低发射率区域,这是中国的湖区位置,包括洞庭湖、鄱阳湖、太湖等区域,由于水面的发射率大大低于陆面,这些区域具有显著较低的地表发射率值。而对于黄框所标注的塔里木盆地区域,其主要由沙漠覆盖,地表发射率维持在一个较低的值,且整体的发射率较为平均。喜马拉雅山脉,如红框所示,由于其常年由冰雪覆盖,且地形崎岖不平,其发射率显著高于周围地区。通过对发射率地图集的可视化分析,可以认为其能够正确反映地表发射率的变化情况,能够作为输入进入同化系统。

3.4 小结

本章对地表发射率的反演算法进行研究。首先介绍了地表发射率,之后列举了目前常用的地表发射率反演算法。最后针对使用 AMSU 卫星观测数据反演微波地表发射率的方法进行了详细研究,并对获取到的静态月平均地表发射率进行了分析,为之后将反演得的地表发射率加入 RTTOV,以及分析其对遥感卫星陆上观测资料同化的影响打下基础。

第四章 AMSUA/MHS 陆上微波观测资料同化关键技术研究

在对 AMSUA/MHS 陆上观测资料进行同化前,需要将地表发射率接入 RTTOV 系统,并实现观测资料的偏差订正技术。本章对 AMSUA/MHS 陆上微波观测资料同化关键技术进行研究,主要包括发射率地图集在 RTTOV 中的接入设置, AMSUA/MHS 观测资料的偏差订正等。

4.1 AMSUA/MHS 仪器概述

AMSU 是先进微波探测仪 (Advanced Microwave Sounding Unit) 的简称,是先进大气垂直探测系统 ATOVS 中微波频段的组件。AMSU 仪器搭载在美国极轨气象卫星 NOAA-15/16/17/18/19 和欧洲 METOP 系列卫星上。

AMSU 分为 AMSUA 和 AMSUB 两个组件。其中 AMSUA 的扫描带宽为 2228 km,星下点的分辨率为 48 km,每条扫描线视场数为 30,扫描周期为 8 s,可用于改进温度廓线产品,尤其是云区的温度廓线。AMSUA 由 15 个通道组成,其中 1、2 通道的频率为 23.8GHz 和 31.4GHz,属于大气窗区通道;3-14 通道的频率包括 50-60GHz,是氧分子的微波吸收带,以及 89GHz 的大气窗区通道,可以用反演大气垂直温度廓线;15 号通道由于高出模式层顶,基本上不使用。1-4 通道由于对地表过于敏感,导致其误差较大,在业务系统中也不使用。5-7 号通道为对流层通道,其对数值天气预报非常重要,同时对云污染以及地表敏感,是考虑地表发射率影响的首选通道。目前,5 号通道为业务化使用的最低通道。本文重点考察加入地表发射率后对 5-7 通道的影响。

AMSUA 的通道特性如表 4.1 所示。

表 4.1 AMSUA 各通道特性

通道 编号	中心频率 (MHz)	波段数	标称带宽 (MHz)	NEDT (K)	定标精度 (K)	极化方向
1	23800	1	270	0.3	2.0	V
2	31400	1	180	0.3	2.0	V
3	50300	1	180	0.4	1.5	V
4	52800	1	400	0.25	1.5	V
5	53596±115	2	170	0.25	1.5	H
6	54400	1	400	0.25	1.5	H

7	54940	1	400	0.25	1.5	V
8	55500	1	330	0.25	1.5	H
9	57290.344	1	330	0.25	1.5	H
10	57290.344±217	2	78	0.4	1.5	H
11	57290.344±322.2 ±48	4	36	0.4	1.5	H
12	57290.344±322.2 ±22	4	16	0.6	1.5	H
13	57290.344±322.2 ±10	4	8	0.80	1.5	H
14	57290.344±322.2 ±4.5	4	3	1.20	1.5	H
15	89000	1	<6000	0.5	2.0	V

MHS 是微波湿度探测仪（Microwave Humidity Sounder）的简称，其 5 个通道与 AMSUB 的 5 个通道基本相似，但是中心频率和部分通道的极化方向略有不同。其扫面带宽为 2250km，每条扫描线上的视场数为 90，视场宽度为 1.1 度，最大扫描角为 49.4 度。MHS 的通道特性如表 4.2 所示。

表 4.2 MHS 各通道特性

通道编号	中心频率 (GHz)	星下点分辨率 (km)	通频带 (MHz)	NEDT (K)	定标精度 (K)	极化方向
1	89.0	15	3000	0.23	1.5	V
2	157.0	15	2000	0.37	1.5	V
3	183.31±1.00	15	2x500	0.55	1.5	H
4	183.31±3.00	15	2x1000	0.42	1.5	H
5	190.31	15	2x2000	0.35	1.5	V

4.2 发射率地图集接入 RTTOV 系统

在 RTTOV 中，若不指定地表发射率的具体值，则会将其统一设为默认值。因此，使用 AMSUA 陆上的探测资料，必须将静态月平均地表发射率，即发射率地图集接入 RTTOV。发射率地图集描述了全球的月平均陆面微波发射率，其数据包含经纬度、对应位置的地表发射率以及地表类型等，网格精度为 0.25 度乘 0.25 度。

因此，需要对 RTTOV 中发射率地图集接口函数进行分析。其中，主要涉及的程序为 RTTOV_SETUP_EMIS_ATLAS，RTTOV_GET_EMIS 以及 MOD_CNRM_MW_ALTAS。

RTTOV_SETUP_EMIS_ATLAS 程序根据仪器观测波段（微波或是近红外）来初始化发射率地图集。可以使用 path 变量来自定义发射率地图集的存储位置。对于微波观测，支持读取两种发射率地图集，分别为 CNRM 微波地图集和 TELSEM 微波地图集。TELSEM 是微波地表发射率评估工具（a Tool to Estimate Land Surface Emissivities at Microwave frequencies），它能够提供地表发射率以及给定通道的误差协方差矩阵。CNRM 微波发射率地图集能够支持 AMSUA/B 以及 MHS 仪器。对于近红外波段，只支持读取一种地图集。在初始近红外地图集时，可以选择只对一个仪器进行初始化。

RTTOV_GET_EMIS 程序将参数向量作为输入。对于近红外和微波发射率地图集，RTTOV_GET_EMIS 程序给出了不同的处理流程。程序输出的发射率向量可以作为 rtov 正向模式 rtov_direct，切线性模式 rtov_tl，伴随模式 rtov_ad 以及 k 模式 rtov_k 的输入。如果在调用 RTTOV_SETUP_EMIS_ATLAS 时开启了天顶角订正选项，则需要提供卫星天顶角和太阳高度角：太阳高度角用于确定应该使用日间还是夜间的偏差订正规则。程序将返回陆面和海冰的发射率，且在陆面部分会根据雪含量确定的权重函数返回陆面发射率和积雪发射率的线性组合，如果雪含量为零，则只返回陆面发射率。近红外发射率地图集能够返回发射率误差的标准差。除此之外，发射率地图集中的每个陆面点都可以返回一个标记值，用户可以根据这个标记值来进行质量控制。如果在调用 RTTOV_SETUP_EMIS_ATLAS 时不指明微波探测仪器，则默认会使用 TELSEM 发射率地图集。TELSEM 发射率地图集包含发射率地图集以及一个插值算子，这个算子对发射率地图集进行空间和频率上的插值。TELSEM 发射率地图集的格点宽度为 0.25 度。与近红外发射率地图集一样，TELSEM 微波发射率地图集可以返回发射率误差的标准差，它还能够返回各个通道的发射率协方差矩阵。CNRM 微波发射率地图集只适用于特定的仪器（AMSUA/B，MHS），因此不需要针对仪器通道进行频率插值。它不提供发射率误差的统计信息。

上述两个文件实现了对发射率地图集的读入，然而，发射率地图集中数据值的位置和卫星的观测点所在位置并不能够完全对应，因此，还需要一个插值算法，将地表发射率信息插值至卫星观测所在位置。在 MOD_CNRM_MW_ALTAS.F90 文件中，加入针对 AMSUA/MHS 观测资料的发射率地图集插值算法。算法的基本原理为：对于每个观测点，选取以其经纬度为中心的 1 度乘 1 度的小正方形区域内的地表发射率的均值作为该观测点位置的地表发射率。具体实现为，对于每个

观测点，以其经纬度 (PLON, PLAT) 为基准，遍历发射率地图集，计算发射率地图集中每个数据点与该观测点的精度差绝对值 $|dx|$ 和纬度差绝对值 $|dy|$ ，并将 $|dx|$ 与 $|dy|$ 均小于 0.5 的数据做均值处理，作为该观测点的地表发射率值。

设置好发射率地图集的接口后，为了检验发射率地图集的接入效果，通过试验检验同化后的地表发射率。采用 CNRM 微波地图集作为初始发射率。试验使用 2014 年 7 月 24 日 12 时 (UTC, 世界时，若无特殊说明，本试验及之后试验所使用的时间均为世界时) 的 AMSUA/MHS 的观测资料，以 AMSU 以及 MHS 进行分析。

图 4.1 显示了 AMSUA 观测资料经同化后，WRFDA 系统输出的地表发射率信息。其中左图为将地表发射率接入 RTTOV 的结果，右图为不接入地表发射率的结果。在左图中，陆面区域的发射率存在差异，为了将其表现的更为清晰，将局部区域进行了放大。可以看到，在放大区域，地表发射率存在差异，证明地表发射率进入了同化系统。而右图，陆面区域的地表发射率均为 0.8，并无任何变化，这是由于没有地表发射率接入，统一使用 RTTOV 的默认值而造成的。这可以证明，反演得到的地表发射率信息已经成功地接入了 RTTOV 系统，并可为 AMSUA 观测所使用。

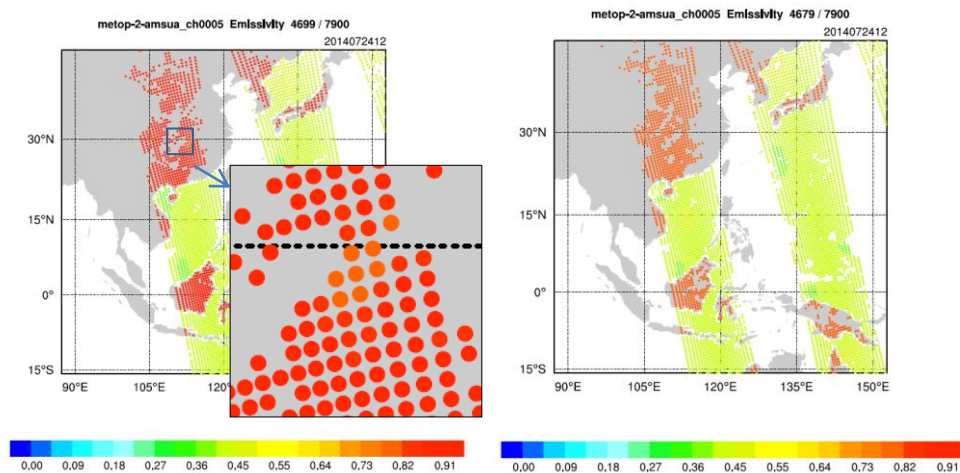


图 4.1 AMSUA 观测资料同化后系统输出地表发射率

图 4.2 显示了 MHS 观测资料经同化后，WRFDA 系统输出的地表发射率信息。其中左图为将地表发射率接入 RTTOV 的结果，右图为不接入地表发射率的结果。在左图中，陆面区域的发射率存在差异，为了将其表现的更为清晰，将局部区域进行了放大。可以看到，在放大区域，地表发射率存在差异，证明地表发射率进入了同化系统。而右图，陆面区域的地表发射率除少数湖区被标为 0.5 (水面默认值) 外，其余均为 0.8，陆地上的发射率并无任何变化，这是由于没有地表发射率接入，统一使用 RTTOV 的默认值而造成的。这可以验证，反演得到的地表发射率信息已经成功地接入了 RTTOV 系统，并可为 MHS 观测所使用。

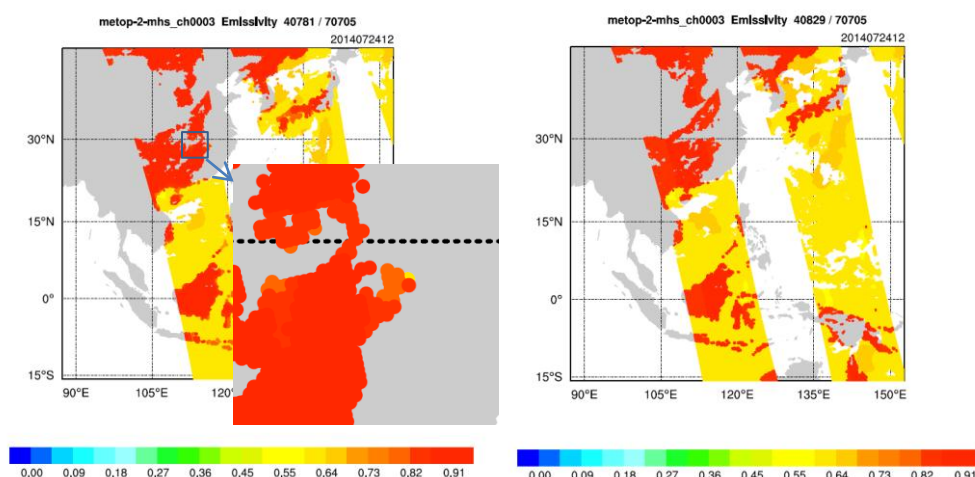


图 4.2 MHS 观测资料同化后系统输出地表发射率

4.3 AMSUA/MHS 观测资料偏差订正

目前，对卫星资料的偏差订正方法主要有变分自适应偏差订正和离线偏差订正两种。其中离线偏差订正最早由 Eyre^[58]提出，由 Harris 和 Kelly^[59]进行了改进。这种方法主要包括依赖于扫描位置的偏差订正和依赖于气团的偏差订正，其订正方案分为两步，首先进行扫描偏差订正；然后使用回归方法来对气团偏差进行订正。变分偏差订正则是将偏差订正因子引入目标函数，通过极小化计算的循环过程使订正值达到最优^[60]。本研究采用的偏差订正技术为变分偏差订正方法，其计算过程的主要步骤为：

(1) 设置偏差订正量 BC ，其为订正预报因子 $P_i(x)$ 以及与之对应的订正系数 β_i 的线性组合。

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

(2) 偏差订正会对观测辐射增量进行修正，使得观测算子 $H(x)$ 在原基础上加入了一个增量 $BC(x, \beta)$ ，形成了新的观测算子。

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

(3) 把这个新的观测算子引入目标函数，就能得到与背景场 x 和观测 y 相适应的最优订正系数 $J(\beta)$ 。

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

在研究中，利用自适应的变分偏差订正方案对 AMSUA/MHS 观测资料进行偏差订正。

为了检验使用的偏差订正技术的性能，通过试验检验 AMSUA/MHS 观测偏差订正前后的特征统计。试验使用 2014 年 7 月 24 日 12 时 (UTC，世界时，若无特

殊说明，本试验及之后试验所使用的时间均为世界时)的 **fnl** 再分析数据作为背景场，用来订正同时段的 **AMSUA/MHS** 的观测资料，以 **AMSUA** 的 5 号通道以及 **MHS** 的 3 号通道进行分析。

AMSUA 的 5 号通道在偏差订正前和偏差订正后观测与背景场间的差值(**OMB**)的空间分布图、统计柱状图以及观测亮温的统计散点图如下所示。图 4.3 为 **AMSUA5** 号通道观测象元与背景场的差值在偏差订正前和偏差订正后的空间分布图。图 4.4 为 **AMSUA5** 号通道观测象元与背景场的差值在偏差订正前和偏差订正后的统计柱状图。图 4.5 为 **AMSUA5** 号通道观测亮温在偏差订正前和偏差订正后的统计散点图。图 4.3 至 4.5 中左图为偏差订正前，右图为偏差订正后。从空间分布图的色标表可以看到，**OMB** 在偏差订正前明显偏向负值，而在偏差订正后均值趋于零，这一点在柱状图中表现的更为明显。而对于观测亮温，可以看到其在偏差订正前偏差较大，而经过偏差订正后观测象元基本位于对角线上。结果表明，使用变分偏差订正技术可以使 **AMSUA** 观测资料与模拟亮温分布趋于合理，有效地降低了偏差。

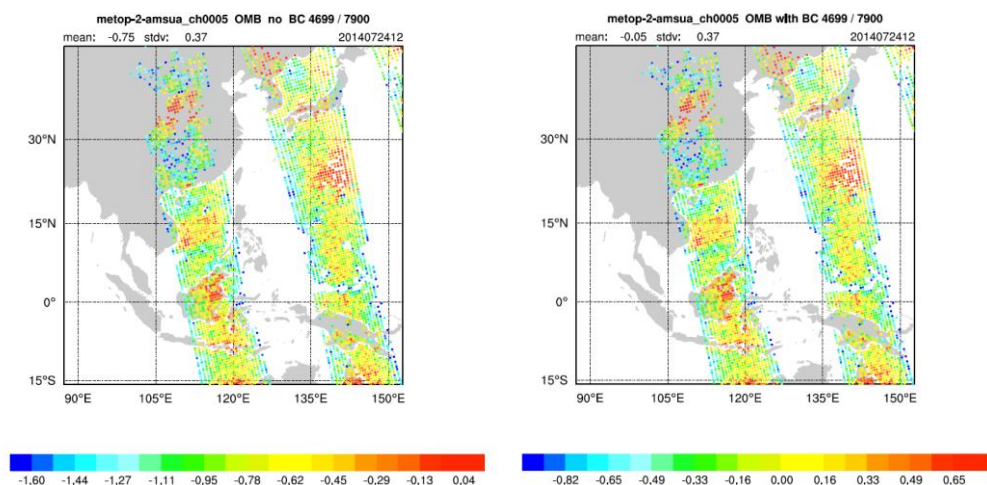


图 4.3 AMSUA 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差空间分布

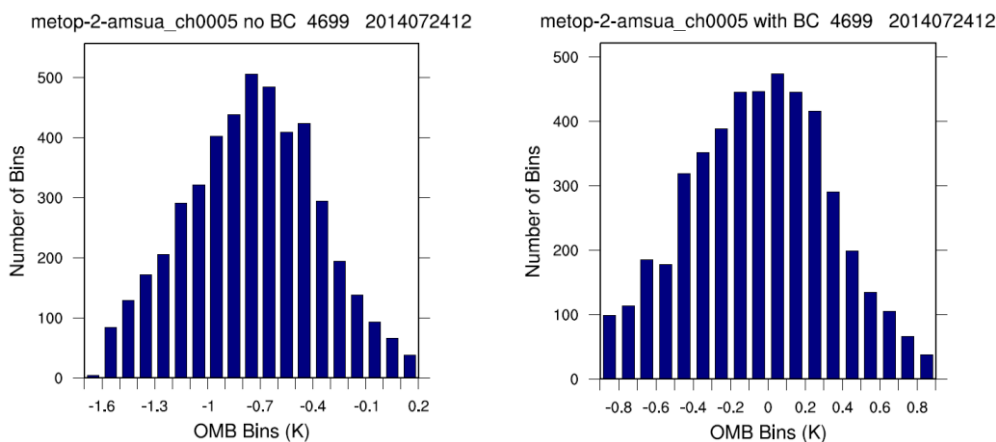


图 4.4 AMSUA 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差统计柱状图

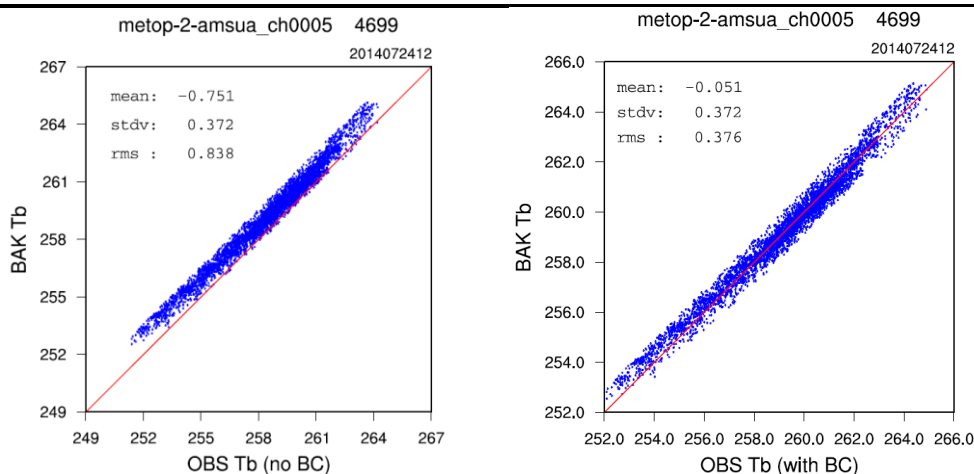


图 4.5 AMSUA 观测资料偏差订正前后拟合散点图

MHS 的 3 号通道在偏差订正前和偏差订正后观测与背景场间的差值 (OMB) 的空间分布图、统计柱状图以及观测亮温的统计散点图如下所示。图 4.6 为 MHS 的 3 号通道观测象元与背景场的差值在偏差订正前和偏差订正后的空间分布图。图 4.7 为 MHS 的 3 号通道观测象元与背景场的差值在偏差订正前和偏差订正后的统计柱状图。图 4.8 为 MHS 的 3 号通道观测亮温在偏差订正前和偏差订正后的统计散点图。图 4.6 至 4.8 中左图为偏差订正前，右图为偏差订正后。从空间分布图的色标表可以看到,OMB 在偏差订正略微偏向正值,而在偏差订正后均值趋于零,这一点在柱状图中表现的较为明显,可以看到在偏差订正前,OMB 的均值在接近于 1 的位置,经过偏差订正,其均值趋于 0。而对于观测亮温,可以看到其在偏差订正前偏向对角线右下方,而经过偏差订正后观测象元基本位于对角线上。结果表明,使用变分偏差订正技术可以使 MHS 观测资料与模拟亮温分布趋于合理,有效地降低了偏差。

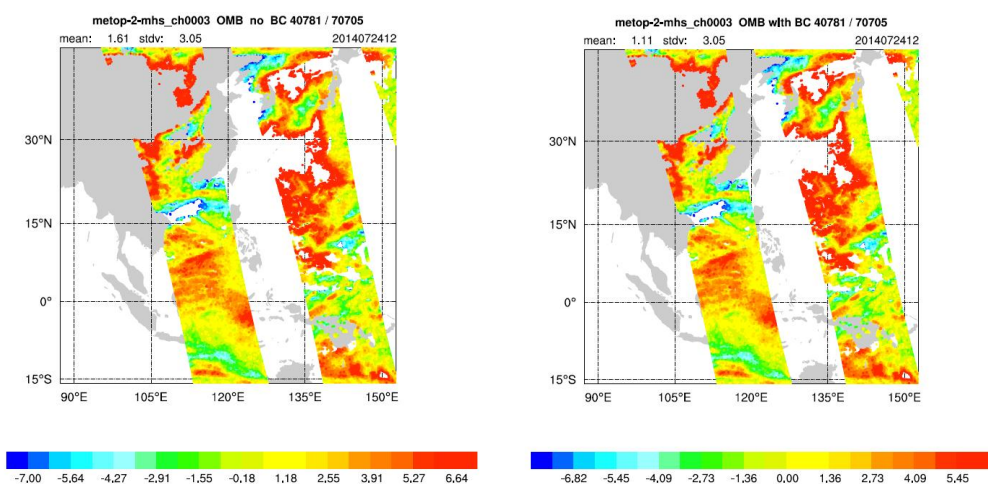


图 4.6 MHS 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差空间分布

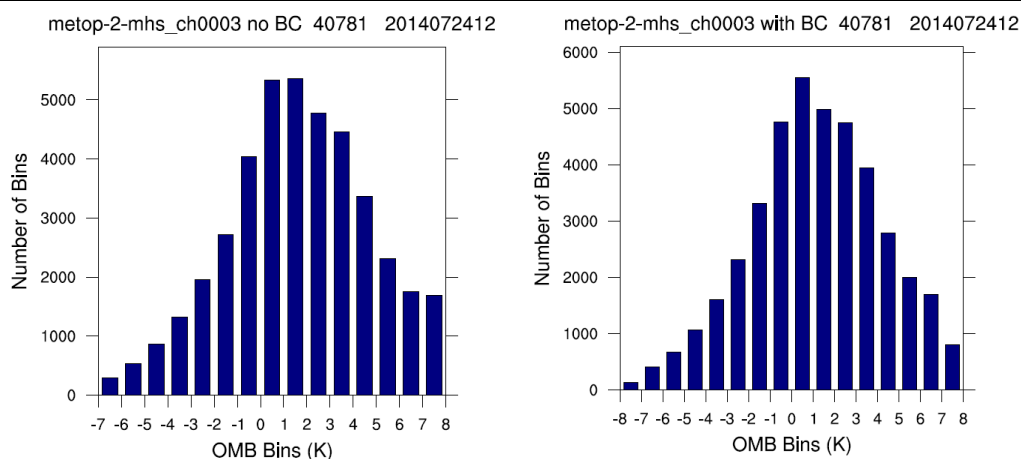


图 4.7 MHS 观测资料偏差订正前后观测-背景偏差统计柱状图

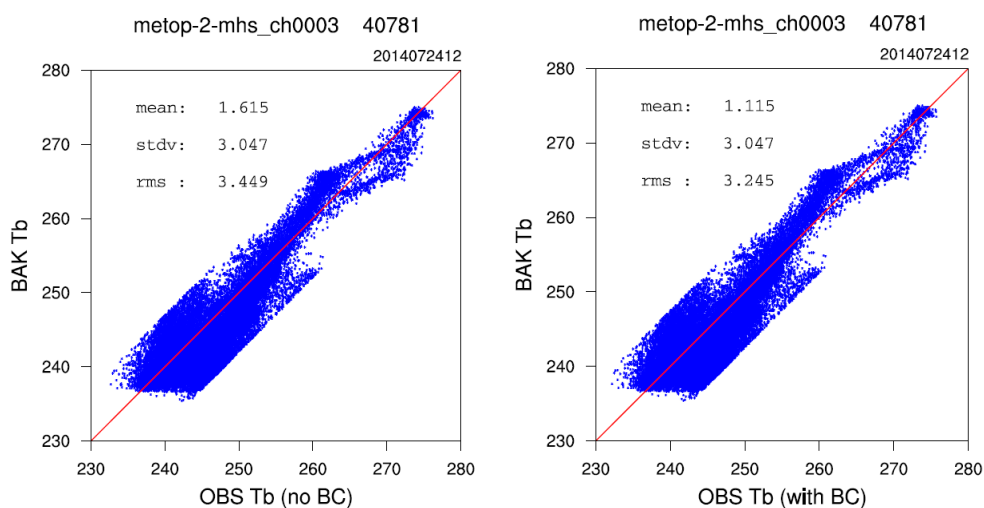


图 4.8 MHS 观测资料偏差订正前后拟合散点图

4.4 小结

本章进行了 AMSUA/MHS 陆上微波观测资料同化关键技术进行研究，首先对 AMSUA/MHS 仪器的性能进行了分析，之后对发射率地图集在 RTTOV 中的接入设置进行了研究，并对 AMSUA/MHS 观测资料偏差订正技术进行了验证，完成了 AMSUA/MHS 陆上观测资料在 WRFDA 中的同化。试验表明，RTTOV 能够成功地将发射率地图集读入系统，所选用的变分偏差技术也能够有效地降低观测系统偏差。

第五章 同化预报试验及分析

为了验证 AMSUA 陆上微波观测资料加入同化系统后对同化结果以及数值预报结果的影响,本章设计数值试验来对其影响进行验证。试验主要由两方面构成,

(1) 分析场影响试验。此实验的目的是为了验证同化系统中加入 AMSUA 陆上微波观测资料后对同化效果的影响,主要包括分析场的温度及相对湿度等变量的变化情况。(2) 具体台风个例的预报效果。通过试验检测利用 AMSUA 观测资料,在加入发射率地图集和不加入发射率地图集时对预报效果的影响,分析地表发射率对遥感卫星陆上微波探测资料同化效果的影响。

5.1 试验天气过程概述

2014 年第 10 号台风“麦德姆”(Matmo)的胚胎于 2014 年 7 月 14 日在帕劳东北部海面生成,7 月 17 日升级为热带低气压,7 月 18 日上午 2 时,中央气象台将其升级为热带风暴,上午 3 时 30 分,日本气象厅将其命名为“麦德姆”。其于 7 月 23 日 0 时 15 分前后在台湾省台东县沿海登陆,同日 15 时 30 分前后在福建省福清市沿海登陆。其在中国大陆登陆后,先后经过福建、江西、安徽、江苏等省份,在陆地停留时间超过 48 小时。7 月 25 日 13 时,中央气象台对其停止编号。图 5.1 为台风“麦德姆”的运行路径以及卫星云图。“麦德姆”带来了一系列严重后果,包括 13 人死亡,以及大量房屋倒塌,农作物受损等。由于此台风在陆地停留时间较长,适合用于验证地表发射率对遥感卫星陆上微波观测资料同化效果的影响,因此选用其作为试验天气过程。

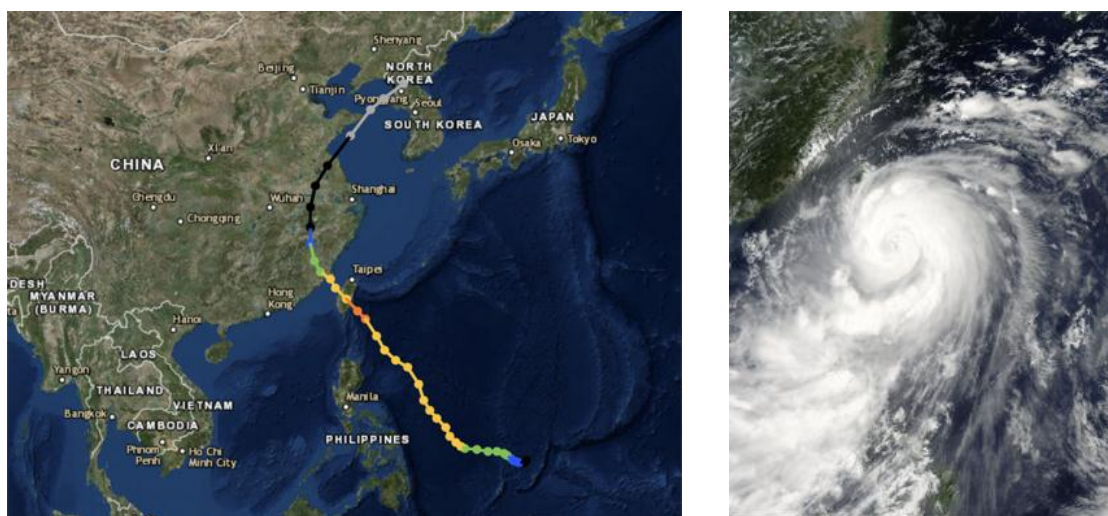


图 5.1 台风“麦德姆”运行路径图和卫星云图

5.2 具体试验设计

试验选用 2014 年 7 月 22 日 18 时 NCEP 的 fnl 全球再分析数据经 WRF 系统预报 6 小时后的结果作为初始场,之后进行 48 小时的循环预报,预报时长为 6 小时。具体的循环预报方式为:每次同化时,将上一次预报所得结果作为背景场,结合观测值得到同化后的分析场,之后将该分析场进行预报,并将此预报结果作为下一次同化所需的背景场。

试验是由多次同化过程和多次数值预报模拟过程的结合。在进行试验时,需要对物理参数化方案以及模拟区域进行设置,以达到良好的模拟效果。由于台风“麦德姆”在西太平洋生成,其海上路径也位于西太平洋海区,陆上区域经过台湾省、福建省、江西省、安徽省、江苏省,因此将同化区域设定为太平洋西北部区域以及中国中部及南部,具体经纬度范围南纬 15 度至北纬 45 度,东经 90 度至东经 150 度。在试验中,模式的具体设置为:预报积分步长为 60 秒,采用单层网格,试验区域水平网格数为 177x177,格点水平间距为 36km,区域中心位置经纬度坐标为北纬 16.5 度,东经 120 度。模式的垂直分层为 36 层。

物理参数化方案的选取会对预报的结果产生重要影响,因此在进行预报时,需要对参数化方案进行慎重选择。根据本天气过程的具体情况,结合模式区域的格点设置,决定采用如表 5.1 所示的物理参数化方案。

表 5.1 试验所采用物理参数化方案

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

同化过程采用的时间窗设置为 6 小时,选取每次同化时刻前 3 小时和后 3 小时之内的观测资料加入同化窗口。为了比较地表发射率对陆上微波观测资料同化效果的影响,采用以下三组试验设置。试验的具体名称和设置见表 5.2。

表 5.2 试验设计

试验编号	实验名称	同化资料
1	控制实验 (cntl)	常规观测资料
2	引入地表发射率试验	常规观测+AMSUA 陆上观测资料+发射率地图集
3	不引入地表发射率试验	常规观测+AMSUA 陆上观测资料

5.3 同化结果分析

采用 2014 年 7 月 24 日 12 时的分析场作为待分析数据，研究对流层和近地面区域的温度 T 和相对湿度 RH ，针对 900hPa, 750hPa 和 500hPa 三个等压面高度的要素场进行研究。

图 5.2 显示了 900hPa 处分析场的温度分布，此高度为近地面高度，受地表影响较大，适合检验 AMSUA 陆上探测资料的同化效果。图中从左至右分别为控制实验、引入地表发射率试验和不引入地表发射率试验的结果。可以看出，在加入 AMSUA 陆上观测资料后，分析场在近地面区域的温度值有显著提高，尤其是在日本区域（蓝框），较控制实验有明显改进。同时，对比中图和右图可以发现，在引入了地表发射率后，系统对于近地面区域的温度同化结果更加精确，尤其是在中国渤海（红框），可以看到一个明显的冷区域。

在加入 AMSUA 陆上探测资料后，在引入地表发射率和不引入地表发射率的情况下，900hPa 处分析场的温度普遍上升。这是由于 AMSUA 陆上观测资料对近地面高度温度的影响较大。这表现出地表发射率对于遥感卫星陆上观测资料的同化具有积极效果。

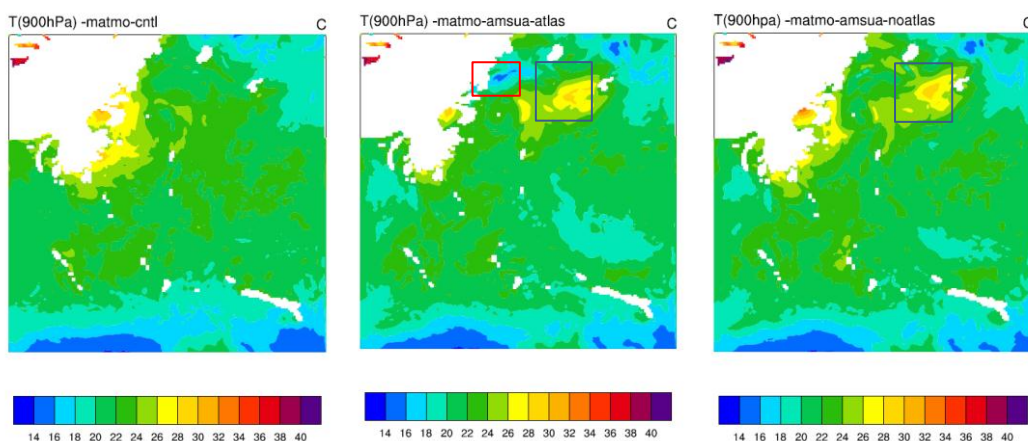


图 5.2 分析场温度分布（900hPa）

图 5.3 为 750hPa 处分析场的温度分布，图 5.4 为 500hPa 处分析场的温度分布，此高度属于平流层区域，对于地表也较为敏感，适合检验 AMSUA 陆上探测资料的同化效果。图中从左至右分别为控制实验、引入地表发射率试验和不引入地表发射率试验的结果。可以看出，在加入 AMSUA 陆上观测资料后，对于平流层区域的温度模拟效果有明显区别，对于中国大部，分析场温度较控制试验均有所降低。同时，对比中图和右图可以发现，在引入了地表发射率后，系统对于平流层区域的温度同化结果较不引入地表发射率时有所降低，尤其是在中国渤海及黄海区域以及日本大部。这显示 AMSUA 观测资料的加入对平流层温度影响较大，能够对同化效果产生影响。

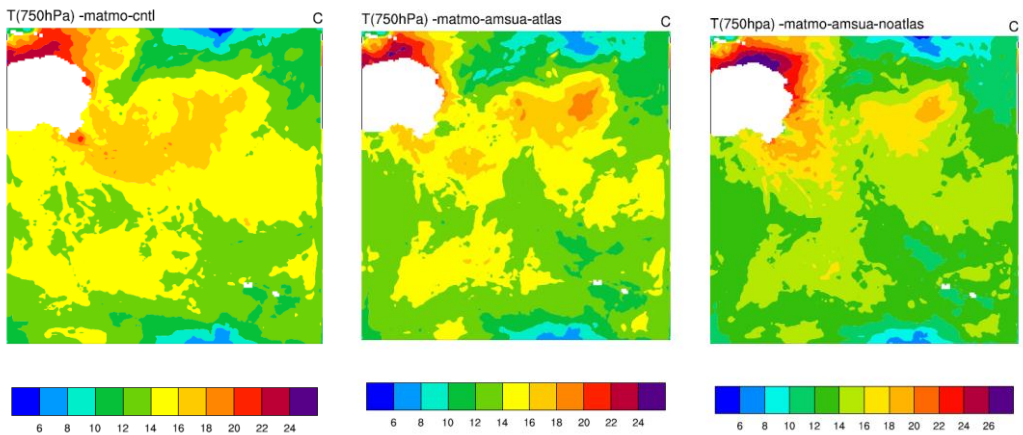


图 5.3 分析场温度分布（750hPa）

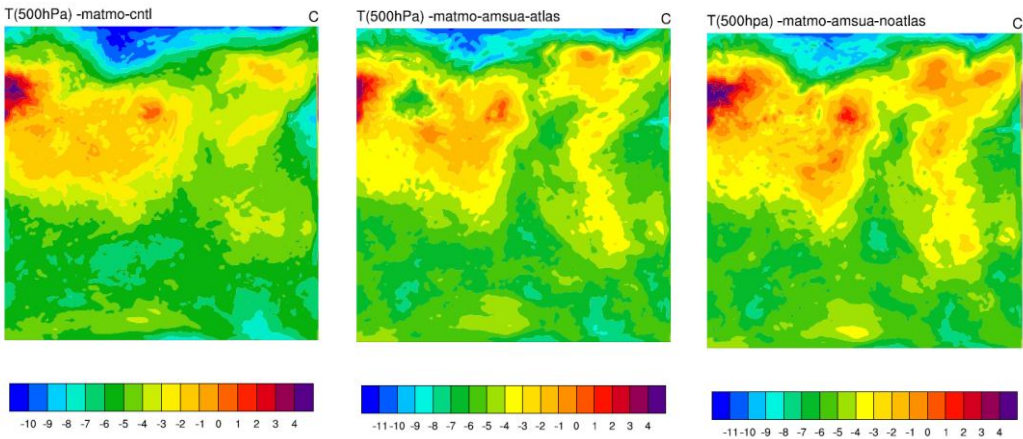


图 5.4 分析场温度分布（500hPa）

图 5.5 显示了 900hPa 处分析场的相对湿度分布，此高度为近地面高度，受地面影响加大，适合检验 AMSUA 陆上探测资料的同化效果。图中从左至右分别为控制实验、引入地表发射率试验和不引入地表发射率试验的结果。结果显示，在加入 AMSUA 陆上观测资料后，分析场在黄海区域以及日本东部海域的相对湿度模拟结果有所上升。可以看到，在中图和右图中，台风区域的形状以及台风眼的模拟效果均较左图有所提高。这显示 AMSUA 观测资料的加入对近地面高度相对湿度影响较大，这表现出地表发射率对于 AMSUA 陆上观测资料的同化具有积极效果。

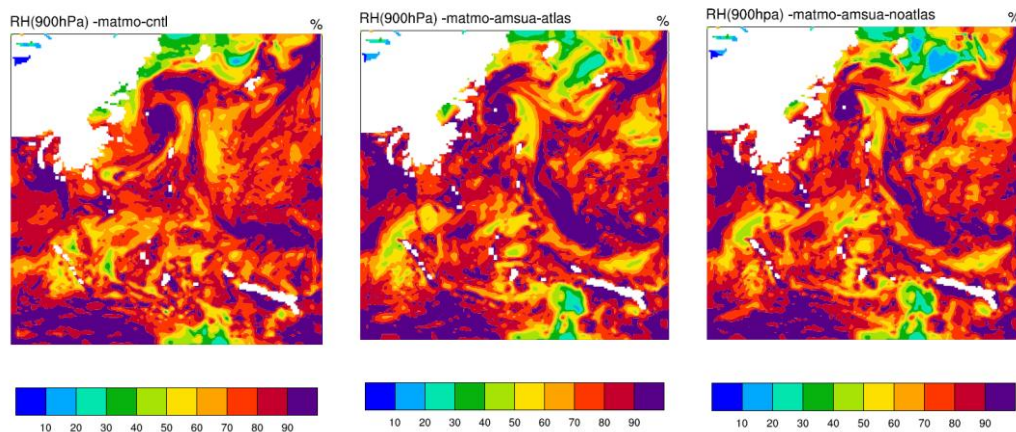


图 5.5 分析场相对湿度分布 (900hPa)

图 5.6 为 750hPa 处分析场的相对湿度分布, 图 5.7 为 500hPa 处分析场的相对湿度分布, 此高度属于平流层区域, 对于地表也较为敏感, 适合检验 AMSUA 陆上探测资料的同化效果。图中从左至右分别为控制实验、引入地表发射率试验和不引入地表发射率试验的结果。对图 5.6 分析可以看出, 在加入 AMSUA 陆上观测资料后, 对于平流层区域的温度模拟效果有明显区别, 模拟出的台风位置较控制实验均向西南方向有所偏移。对于青藏高原东部, 分析场相对湿度较控制试验均有所提高。这显示 AMSUA 观测资料对于同化效果产生了影响。同时, 对比中图和右图可以发现, 在引入了地表发射率后, 系统对于平流层区域的相对湿度同化结果较不引入地表发射率时有所升高, 尤其是在中国东南部, 不引入地表发射率时存在一个明显的湿度较低区域(右图), 在引入地表发射率后则不明显(中图)。对图 5.7 分析可以得出, 在加入 AMSUA 陆上观测资料后, 中国大部的平流层相对湿度有所提高。这显示 AMSUA 观测资料对于同化效果产生了影响。对比中图和右图可以发现, 在引入了地表发射率后, 系统对于平流层区域的相对湿度同化结果较不引入地表发射率时也产生了变化, 例如青藏高原南部, 其相对湿度较不引入地表发射率时有明显提高。这显示 AMSUA 观测资料的加入对平流层相对湿度影响较大, 能够对同化效果产生影响。

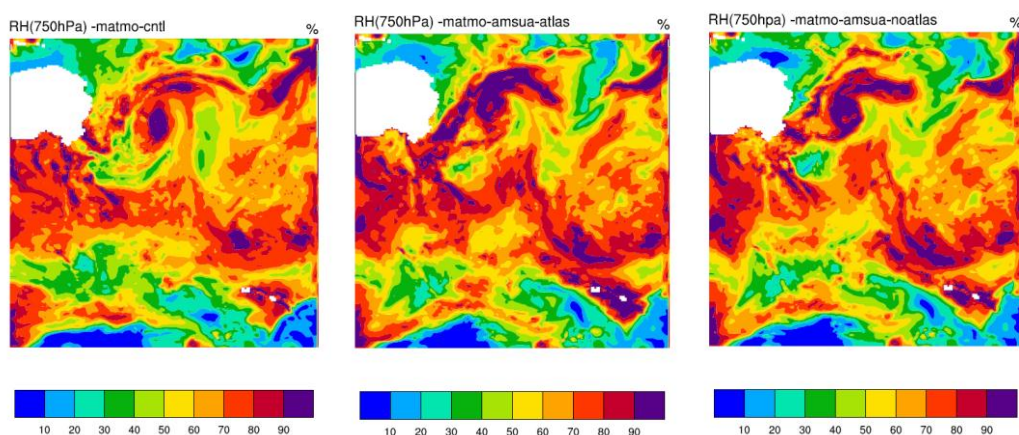


图 5.6 分析场相对湿度分布 (750hPa)

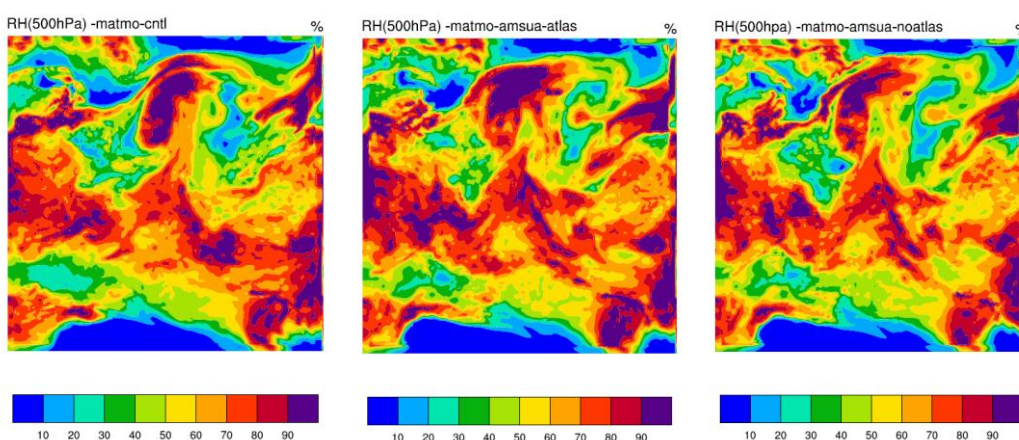


图 5.7 分析场相对湿度分布 (500hPa)

5.4 台风个例预报效果分析

在 5.3 节, 针对是否引入地表发射率对 AMSUA 陆上探测资料的同化效果进行了分析, 并分别进行了对比。但是, 仅通过对同化结果进行分析比较, 只能定性的得出陆上探测资料对同化系统产生了影响, 却很难定量地说明其带来的影响效果是正面的还是负面的。因此, 还需要进行台风个例的预报试验, 直观地分析陆上观测资料对于台风路径预报效果的影响, 从而更好地说明陆上探测资料对同化系统的作用。

图 5.8 为台风“麦德姆”的预报路径对比图, 试验的具体设置见 5.2 节。图中共有四条路径, 按编号 1 至 4 分别为: 1 号, 蓝色线, 为台风“麦德姆”的真实路径, 此路径来源于中国气象局网站; 2 号, 绿色线, 为台风“麦德姆”控制实验的预报路径; 3 号, 黄色线, 为使用 AMSUA 陆上观测资料, 并引入地表发射率的台风“麦德姆”预报路径; 4 号, 红色线, 为使用 AMSUA 陆上观测资料, 不引入地表发射率的台风“麦德姆”预报路径。台风的起报时间为 2014 年 7 月 23 日 00

时，预报间隔为 6 小时，总预报时长为 48 小时。

由图中可以看出，在预报起始阶段，各个试验结果之间的差别不明显。在预报时长为 6 小时时，即图中第一组点，所有三组试验的预报结果均较真实路径偏西南。随着预报时长的加长，在不使用 AMSUA 陆上观测资料时（即控制试验），预报得到的台风路径逐渐开始接近真实路径，在 23 日 13 时左右与台风真实路径交汇，之后开始较真实路径偏东，并一直保持在真实路径东部，直到预报结束。

对于加入 AMSUA 陆上观测资料的两组试验，对于使用地表发射率的试验，其预报所得台风路径（3 号线）在预报的前 24 小时内与台风的真实路径差异较小，并存在多次交汇，这显示了良好的预报效果。在预报时间 24 小时后，3 号线逐渐开始较台风真实路径西偏，两者间的距离也逐渐增大。这是由于在台风后期由于其气团强度逐渐衰弱，预报准确度会有所降低，但是使用 AMSUA 观测资料并使用地表发射率的试验已经具备了良好的模拟效果。而对于不使用地表发射率的试验，其预报所得台风路径（4 号线）始终较真实路径偏西。在预报过程的 24 小时中，4 号线虽然位于真实路径西侧，但是与真实路径间的距离差并不是很远。从 24 日 6 日开始，其预报效果突然变差，预报路径大幅向西北方向移动，虽然在预报最后其效果有所改善，但仍然与真实路径相距甚远。对于 3 号线和 4 号线可以看出，在使用 AMSUA 陆上观测资料时，使用地表发射率对于改善预报效果具有明显的正效果。

对比控制实验所得结果（2 号线）和使用 AMSUA 观测资料的试验（3、4 号线），可以看到使用 AMSUA 观测资料预报得到的台风路径较控制试验有所西移，但是同时较台风的真实路径也偏西。

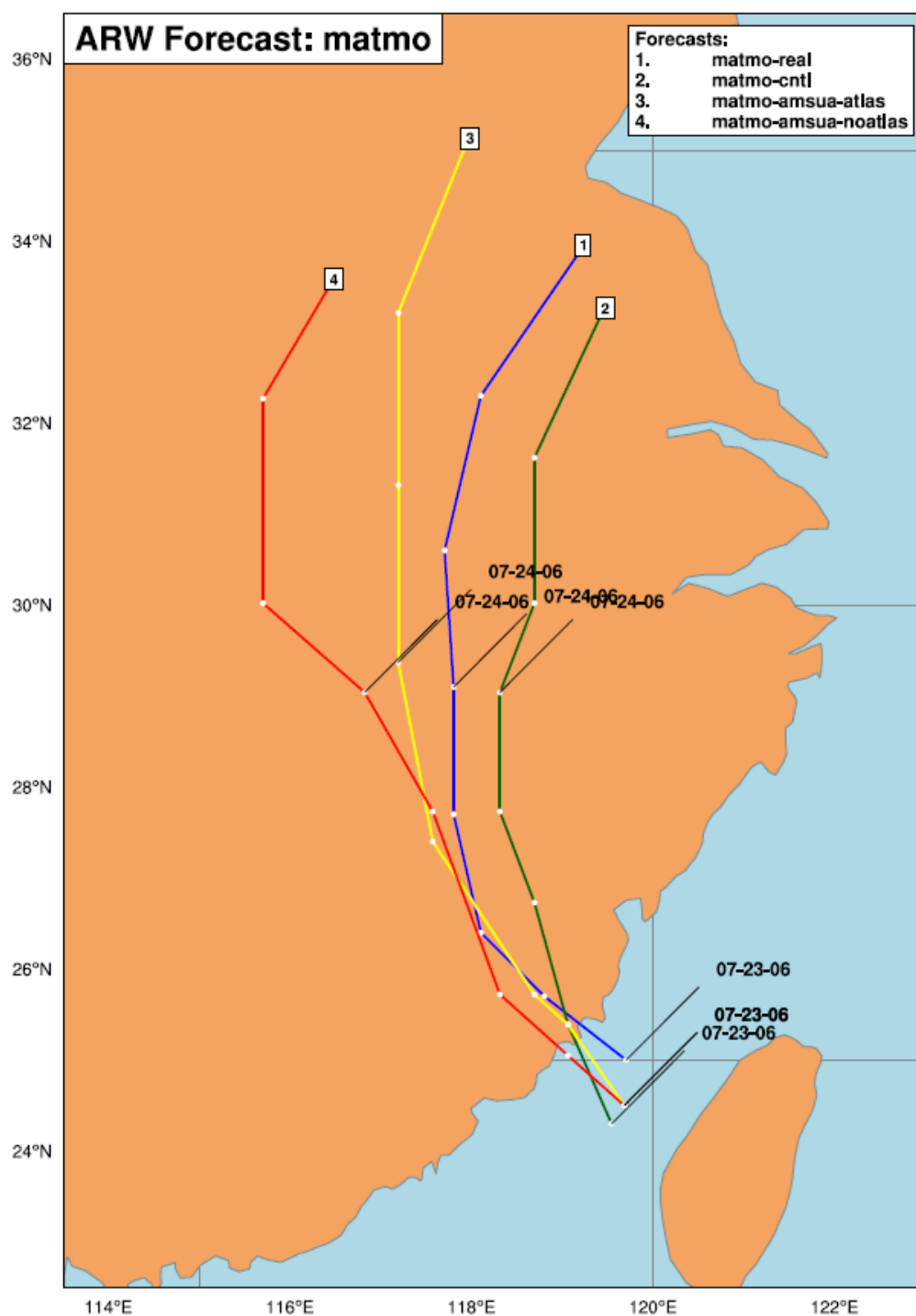


图 5.8 台风“麦德姆”预报路径对比图

为了定量地分析三组试验对台风路径的预报效果，对各预报时间点输出的台风位置与真实位置的距离进行计算并绘图，结果如图 5.9 所示。同时，对三组试验各预报时间点输出的台风中心气压值与对应时间台风中心的真实气压值的差值进行绘图表示，结果如图 5.10 所示。

图 5.9 显示了预报台风位置与台风真实位置的距离。可以看到，控制实验（蓝线）以及同时使用 AMSUA 观测资料以及地表发射率的试验（红线）都获得了良好的试验效果，除最后一个预报点外，所预报台风位置和台风真实位置的差值均小于 150km，保持在 50km 至 100km 的区间内震荡。两者的区别是预报台风位置与真实台风位置偏离的方向不同，这一点在图 5.8 中有所体现。而对于使用 AMSUA 观测资料，但不使用地表发射率的试验，其预报所得的台风位置与真实位置的差值（绿线）在预报时间前 24h 内保持在一个较低值，自预报时长 24h 后显著上升，之后保持在一个较高值，最大偏差超过了 300km。这证明，在使用 AMSUA 陆上观测资料时，对于地表发射率获取是必要的，在引入地表发射率后，AMSUA 陆上观测资料可以有效地改善台风路径的预报效果。

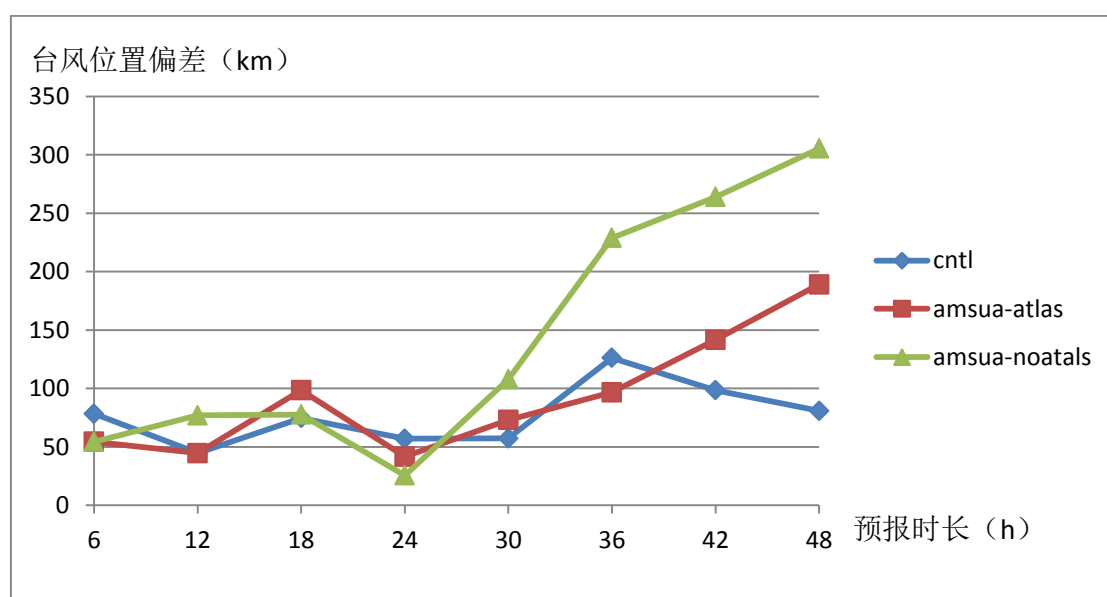


图 5.9 预报台风位置与台风真实位置距离对比图

图 5.10 显示了预报台风中心气压值与台风中心真实气压值之间的差值。图中三条线分别为：蓝线：控制实验所得结果，使用常规观测资料；红线，同时使用 AMSUA 陆上观测资料以及地表发射率的试验所得结果；绿线，使用 AMSUA 陆上观测资料，不使用地表发射率的试验所得结果。在预报开始时，三组试验模拟得的台风中心气压值均较真实台风中心气压值偏高。随着预报过程的持续，控制试验所模拟得到的台风中心气压值在预报时长 12h 时开始低于真实台风中心气压值，并保持此趋势，在此之后其所模拟的台风中心气压值与台风中心真实气压值的差值的绝对值的最大值达到了 10hPa。而对于使用 AMSUA 观测资料的试验，其模拟所得的台风中心气压值与台风中心真实气压值间的差值始终为正值，且始终保持在一个较低的区间内。使用 AMSUA 观测资料，不使用发射率地图集的试验的预报结果最好，在预报时长 12h 后，其台风中心气压差的最大值的绝对值小于 5hPa，同时使用 AMSUA 观测资料和地表发射率的试验的预报结果稍差，但仍然

具有良好的准确度，其台风中心气压差的最大值的绝对值小于 7hPa。从图中可以得出结论，在加入了 AMSUA 陆上探测资料后，系统对于台风中心气压值的模拟效果较控制实验得到明显提高，而加入地表发射率对于提高台风中心气压值模拟准确度的效果并不明显。

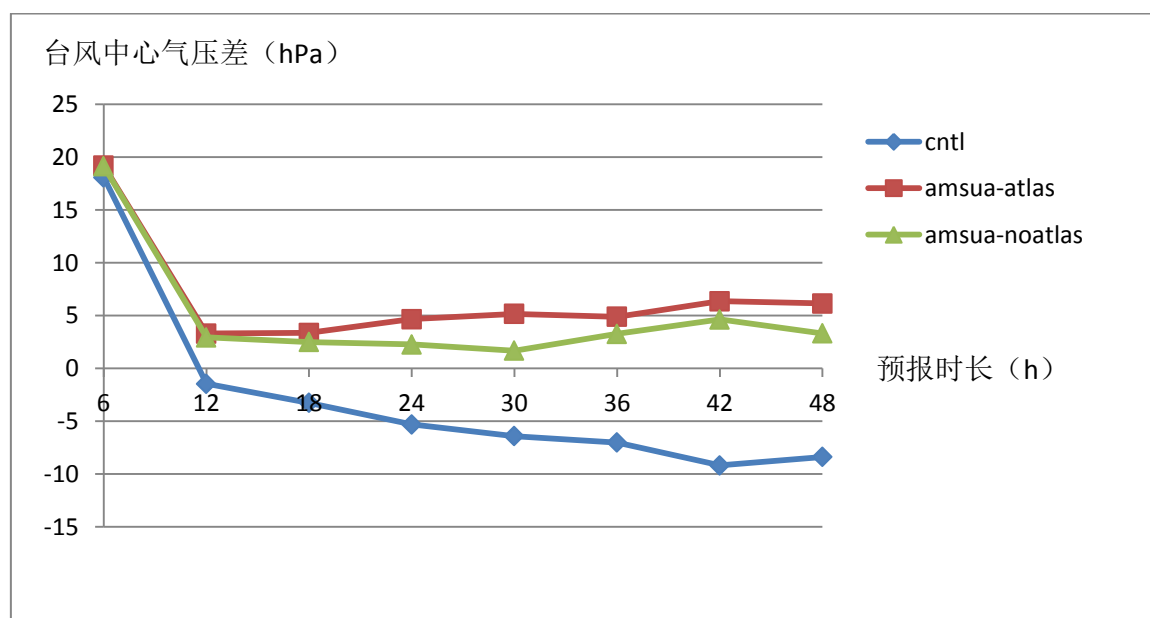


图 5.10 预报台风中心气压值与台风中心真实气压值差值对比图

5.5 小结

本章设计了数值试验，对 AMSUA 陆上微波观测资料对于同化及预报系统的影响进行了验证，主要包括对加入 AMSUA 陆上观测资料后同化所得分析场的温度和相对湿度的模拟及分析，以及针对具体台风个例“麦德姆”的路径预报效果的分析及检验。实验结果显示，AMSUA 陆上探测资料可以对分析场的温度及相对湿度产生影响并产生积极效果，且在加入地表发射率后，其影响效果较不加入地表发射率时能够得到提高。同时，使用 AMSUA 陆上观测资料以及地表发射率，可以对台风路径的预报产生正效果。地表发射率的加入可以提高 AMSUA 陆上观测资料在台风路径预报上的准确度，但是对于台风中心气压的模拟效果则无明显提高。

结 束 语

论文总结

尽管 ECMWF 统计表明卫星资料在数值预报使用的全部观探测料中所占比率已经超过 90-95%，因受云和降水及未知的陆地、冰雪发射率影响而不能被同化系统使用的卫星资料占了全部丢弃资料的 75% 以上。对微波遥感而言，低层探测和云降水影响是两大主因。资料的弃用造成了卫星资源的极大浪费，同时卫星陆上探测可以提供丰富的大气低层信息、云雨区卫星观测包含有更多天气意义的内容，这些资料同化问题的突破和能力的挖掘将可以进一步增强卫星微波观测资料对数值预报效果改善的贡献作用。然而，实现遥感卫星陆上探测资料同化的前提是获得地表发射率的信息。全球各种类型陆地表面直接的微波发射率很难获取，陆地表面只能在有限的地表条件下导出微波发射率。以往的同化过程中只将地表发射率设定为一个固定的常数，并通过陆地-海洋掩码剔除复杂地表上的卫星观测。如果要提高地表影响的卫星观测应用比例，关键是要得到高精度的地表发射率和表皮温度等大气场变量。本文针对 AMSUA/MHS 观测设备，研究其发射率反演算法，并对最新的发射率地图集进行了验证及使用。对 RTTOV 中发射率地图集相关的接口进行了研究与分析，实现了 RTTOV 对于发射率地图集的接入，实现了将地表发射率信息引入同化系统。同时，针对 AMSUA/MHS 观测资料的特点，选择合适的偏差订正方法，并在 WRF3.8 模式中进行了验证。在 WRF3.8 模式系统中，实现了对 AMSUA 陆上观测资料的同化应用，并设计试验验证了所采用同化技术的可用性以及 AMSUA 陆上观测资料及地表发射率信息对同化效果以及数值预报效果的影响。

本文首先对资料同化的基本理论进行介绍，之后通过对国内外遥感卫星观测资料的使用现状以及地表发射率的研究现状，说明目前对于卫星观测资料，因受云和降水及未知的陆地、冰雪发射率影响，绝大部分资料都不能进入同化系统。造成这一现象的原因是地表发射率难以获取，说明同化陆上观测资料的前提是复杂地表发射率的反演。这一部分主要对应本文第一章的内容，通过本章的分析，对目前同化遥感卫星陆上微波探测资料的难点以及意义进行了阐述，也说明了本文的研究意义。

卫星获得的观测数据不是常规大气变量，而是卫星搭载仪器所接收到的大气辐射亮温值。建立大气辐射与大气参数之间的关系，需要大气辐射传输模式。因此，本文第二章对卫星大气遥感原理进行介绍，包括大气辐射的基本规律以及常用的大气辐射传输模式。本章还对所使用的软件平台进行了详细介绍，为实现

AMSUA/MHS 陆上探测资料的同化打下基础。

本文的核心部分在第三章和第四章。第三章针对微波观测反演地表发射率的算法进行研究,首先阐述了地表发射率的概念及其应用,之后针对使用 AMSU 卫星观测资料反演地表发射率的方法进行了深入研究。根据发射率地图集的可视化结果进行了分析,体现了地表发射率变化的空间特性和时间特性,验证了地表发射率反演效果。第四章针对 AMSUA/MHS 陆上微波探测资料同化的关键技术展开研究,分析研究了 RTTOV 对发射率地图集的接口,实现了其对于发射率地图集的读取与应用,并研究了 AMSUA/MHS 观测资料的偏差订正方法,对订正效果进行了评估,结果显示偏差订正技术起到了良好的效果。实现了 AMSUA/MHS 陆上微波探测资料以及地表发射率在同化系统中的接入与使用。

为了检验 AMSUA 陆上探测资料对于同化结果和预报效果的影响,在第五章针对具体台风个例设计试验,对同化所得温度场及相对湿度场,以及预报所得的台风路径进行分析。结果显示,AMSUA 陆上探测资料可以对分析场的温度及相对湿度产生影响并产生积极效果,且在加入地表发射率后,其影响效果较不加入地表发射率时能够得到提高。同时,使用 AMSUA 陆上观测资料以及地表发射率,可以对台风路径的预报产生正效果。地表发射率的加入可以提高 AMSUA 陆上观测资料在台风路径预报上的准确度,但是对于台风中心气压的模拟效果则无明显提高。

存在的问题及下步工作展望

本文以 WRF3.8 模式同化系统为基础,以 RTTOV11.2 作为辐射传输模式,针对 AMSUA/MHS 陆上探测资料的同化方法展开研究,重点关注地表发射率的反演算法,以及发射率地图集在 RTTOV 中的接入以及应用,实现了 WRFDA3.8 系统对于 AMSUA 陆上观测资料的同化,并针对具体台风个例设计试验验证同化效果以及预报准确度。论文还存在一些问题,还需要进一步的工作来完善对遥感卫星陆上探测资料的同化研究。

(1) 论文中所应用的发射率地图集来自对 AMSU 卫星观测亮温的静态反演,是一个全球的月平均地表发射率,其精度还有待提高。下步工作可以着眼于针对地表发射率的动态反演,以获得实时的地表发射率,提高同化效果。

(2) 在地表发射率反演方面,下步可以利用一维变分的方法,对单个观测点的地表发射率进行反演,以获得更精确的地表发射率信息。

(3) 论文主要针对 AMSUA/MHS 探测资料的发射率地图集反演算法进行研究,下步可以将研究范围扩充至其他卫星平台的更多设备。

致 谢

两年半的硕士生活有如白驹过隙。回想硕士时光，受到了很多人的帮助，没有这些帮助我无法走到今天。下面就说一并进行感谢吧。

首先要感谢我的导师张卫民老师。在硕士生活期间，张老师给了我很大的关心指导，让我从这个对气象领域以及资料同化完全不懂的小白入了门。张老师待我十分宽厚，虽然我学的很慢，也曾经对自己失望过，可还是愿意对我耐心指导，而不是对我失去信心。一路走来，非常感谢张老师给予的耐心和支持，让我可以最终走完硕士生涯，并且成功地做出了些许成绩。

感谢父母的支持，硕士期间回家回的少，也给你们添了不少麻烦，让你们费心了。

感谢皇群博师兄对我的耐心指导。在我硕士期间最困难的时刻，皇师兄为我指明了小论文的切入点，让我能够及时发表小论文。在大论文的平台搭建期，皇师兄与我一同看论文看代码，帮我解决了很多困惑。在毕业论文撰写期间，皇师兄帮忙提出了很多修改意见以及技术指导，让我少走了很多弯路。没有皇师兄的帮助就没有我的今天。实在是非常的感谢。

感谢实验室的师兄师姐对我的帮助。感谢朱孟斌师兄、余意师姐、方民权师兄、段博恒师兄、孙敬哲师兄、张泽师姐、邢威师兄、吴应昂师兄在硕士期间的帮助与指导，让我在遇到困惑时可以寻求解答。

感谢实验室同级的小伙伴林士伟、赵盼盼、邢翔、朱祥茹，以及可爱的师弟李松，为生活带来了腐败（并不），为实验室带来了欢声笑语。

感谢从本科一路走来好兄弟陈英杰、包涵、邓皓文、尹路珈、徐叶茂、甘少多、陈惠，大家同甘共苦，一起度过了一言难尽的六年半的时光。

感谢五队的全体同学们，让我能够感受到集体的温暖。感谢宋浩队长、胡浩政委、陈治国政委、邓正秋队长，让我在五队的生活紧张有序。感谢郑勇辉教员一直以来的关心。

最后感谢哔哩哔哩弹幕视频网、网易云音乐，让我度过了每个月总有那么几天的沮丧时光。

参考文献

- [1] Richardson L. F. Weather Prediction by Numerical Process[M]. Cambridge University Press. Cambridge. 1922.
- [2] Felde G W, Pickle J D. Retrieval of 91 and 151GHz Earth Surface Emissivities [J]. J Geophys Res, 1995, 100(D10): 20855-20866.
- [3] Weng F Z, Yan B H, Grody N C. A Microwave Land Emissivity Model [J]. J Geophys Res, 2001, 106(D17): 20115-20123
- [4] Bauer P, Geer A J, Lopez P, Salmond D. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I: Implementation [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2010, 136:1868-1885
- [5] Panofsky H A. Objective weather-map analysis [J]. J Appl Meteor, 1949, (6): 386-392.
- [6] Gilchrist B, Cressman G P. An experience 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):875-833
- [9] Lorenc A.C.. Analysis methods for numerical weather prediction [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc, 1986,112(474): 1177-1194
- [10]Anderson. E. J Pailleux, J N thepaut, etc. Use of cleared radiances in 3D/4D variational data assimilation. Technical proceedings of the tenth international ATOVS study conference, p11-25
- [11]周秀骥, 大气微波辐射及遥感原理.[M]. 科学出版社, 1986.
- [12]陈渭民, 沈桐立, 马革兰, 等. 气象资料同化的研究进展[J]. 南京气象学院学报. 2004.08.27 卷第四期, 550-564
- [13]邹晓蕾,风云 FY-3A 卫星微波温度湿度计探测误差分析.[C].2011 年 3 月
- [14]McNally A P. The direct assimilation of cloud affected satellite infrared radiances in the ECMWF 4D-Var [J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 2009, 135:1214-1229
- [15]Grody N C. Surface identification using satellite microwave radiometers[J]. IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing, 1988, 26:850-859.
- [16]Isaacs R G, Jin Y Q, Worsham R D, Deblonde G and Falcone V G. The RADTRAN microwave surface emission models[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote sensing, 1989, 27:433-440.

-
- [17]Weng F,Yan B and Grody N C. A microwave land emissivity model[J]. J. Geophys. Res. 2001, 106(D17): 20115-20123.
- [18]Ellison, W. J., English, S. J., Lamkaouchi, K., Balana, A., Obligis, E., & Deblonde. A comparison of ocean emissivity models using the advanced microwave sounding unit, the special sensor microwave sounding unit, the special sensor microwave imager, the trmm microwave imager and airborne radiometer observations. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003,108(D21)
- [19]Guillou C, Ellison W. Eymard L, et al. Impact of new permittivity measurements on sea surface emissivity modeling in microwaves[J]. Radio Science, 1998, 33 (3):649-668
- [20]Prigent C, Abba P, Scott N A, et al. Modeling Radiative Transfer Above 60GHz: Application To SSM/I 85.5GHz Channels[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium,1990.
- [21]Grody N C. Surface identification using satellite microwave radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1988,26(6):850-859
- [22]Boudabara S A, Garrett K, Chen W, et al. MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(9):3249-3272
- [23]Grody N C. Severe storm observations using the microwave sound unit[J]. Journal of Climate Applied Meteorology, 1983, 22(2): 609-625.
- [24]Jones A S and Haar T H V. Retrieval of microwave surface emittance over land using coincident microwave and infrared satellite measurements[J]. J. Geophys. Res, 1997, 102(D12):13609-13626.
- [25]Morland J C, Grimes D I F, Dugdale G and Hewison T J. The Estimation of Land Surface Emissivities at 24 GHz to 157 GHz Using Remotely Sensed Aircraft Data[J]. Remote Sens. Environ., 2000, 73(3):323-336.
- [26]Aires F, Prigent C, Rossow W B, et al. A new neural network approach including first-guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature and emissivities over land from satellite microwave observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D14):14887-14907
- [27]Eyre J. R., Kelly G. A., McNally A. P. et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis[J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 1993, 119:1427-1463.
- [28]Karbou F. Treatment of surface emissivity in satellite data assimilation[R]. Proceeding of the ECMWF seminar on Recent Developments in the Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction. Shinfield Park, Reading. Sep 3-7,2007, 167-185.
-

-
- [29] Eyre J R. A fast radiative transfer model for satellite sounding systems[M]. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 176, Mar. 1991.
- [30] Han Yong, Paul van Delst, Liu Quanhua, et al. JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM) [R]. NOAA Technical Report NESDIS 122, Washington, DC, Dec 2005.
- [31] Kazumori M and English S J. Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation[J]. Q.J.Royal Met. Soc., 2015, 141(689):1354–1375.
- [32] Prigent C., Chevallier F., Karbou F., Bauer P. and Kelly G. AMSU-A Land Surface Emissivity Estimation for Numerical Weather Prediction Assimilation Schemes[J]. J. Applied Meteorology, 2005, 44(4):16-426.
- [33] Karbou F, Gerard E, Rabier F. Microwave Land Emissivity and Skin Temperature for AMSU-A and AMSU-B assimilation over land[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005, 132: 2333-2355.
- [34] Krzeminski B., Bormann N., Karbou F., et al. The use of surface-sensitive microwave radiances over land at ECMWF[R]. 2nd Workshop on Remote Sensing and Modeling of Surface Properties. Toulouse, France, June 9-11,2009.
- [35] Karbou F., Gérard E. and Rabier F. Global 4DVAR Assimilation and Forecast Experiments Using AMSU Observations over Land. Part I: Impacts of Various Land Surface Emissivity Parameterizations[J]. Wea. Forecasting, 2010, 25:5-19.
- [36] Kazumori M. Assimilation experiments of surface-sensitive microwave radiances in JMA global data assimilation system[R]. The Third Workshop on Remote Sensing and Modeling of Surface Properties, Beijing, China, Oct 18-20, 2011
- [37] Weng F, Zhu T and Yan B. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part II: Uses of rain-affected radiances from microwave observations for hurricane vortex analysis[J]. J. Atmos. Sci., 2007, 64: 3910-3925
- [38] 董佩明, 王海军, 韩威等. 水物质对云雨区卫星微波观测模拟影响[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6):682-691.
- [39] Tomaso D E. and Bormann N. Assimilation of ATOVS radiances at ECMWF: second year EUMETSAT fellowship report[R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No. 26. 2012,
- [40] Lawrence H and Bormann N. Assimilation of ATOVS radiances at ECMWF: third year EUMETSAT fellowship report: The impact of HIRS on ECMWF forecasts, adding ATMS data over land and sea-ice and new observation errors for AMSU-A[R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No. 34., 2014.
-

-
- [41]Lawrence H, Bormann N, Tomaso D E and English S. Situation-dependent observation errors for AMSU-A tropospheric channels in the ECMWF forecasting system[R]. ECMWF Report, 2013.
- [42]郭杨, 卢乃锰, 谷松岩等. FY-3C 微波湿温探测仪辐射测量特性[J]. 应用气象学报, 2014,25(4):436-444.
- [43]Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. An initial evaluation of FY-3A satellite dataImproved Assimilation of Data from China's FY-3A Microwave Temperature Sounder (MWTS)[R]. ECMWF Reprot tm642, 2011.
- [44]Keyi Chen, Stephen English, Niels Bormann, et al. Assessment of FY-3A and FY-3B MWS observations[R]. ECMWF Technical Memoranda No.734, ECMWF, Sep. 2014.
- [45]Lawrence H., Bormann N., Lu Q. F., Geer A .and Englishet S. An evaluation of FY-3C MWS-2 at ECMWF[R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No. 37, 2015.
- [46]Lu Q. F., Lawrence H., Bormann N, et al. An evaluation of FY-3C satellite data quality at ECMWF and the Met Office[R]. ECMWF Technical Memoranda No.767, 2015.
- [47]Atkinson N, Bell B, Carminati F et al. The FY-3C evaluation project: microwave sounder calibration and direct broadcast experiences[R]. The 20th International TOVS Study Conference (ITSC-20), Lake Geneva, Wisconsin, USA, Oct 27-Nov 3, 2015.
- [48]Dong P M, Huang J, Huang X Y, et al. Implement and preliminary experiment of FY-3 and NPP microwave satellite data assimilation in WRFDA[R]. 2013 WRF user workshop, Boulder, USA. 2013.
- [49]张华, 丑纪范, 邱崇践. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析[J]. 科学通报, 2004,49(5):493-498.
- [50]Juan Li and Xiaolei Zou. Impact of FY -3A MWTS radiances on prediction in GRAPES with comparison of two quality control schemes[J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(2): 251-263.
- [51]郭锐, 李泽椿, 张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用[J]. 气象. 2010 年 2 月第 36 卷第 2 期. 1-12.
- [52]Pan G D, Wang H M, et al. Microwave Emissivity Retrieval from SSM/I Data over Land in China[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE, 2000. 923-925. Chi:10.1109/IGARSS. 2000.861745.
-

- [53]Smith W.L. An Improved Method for calculation tropospheric temperature and moisture from satellites radiance measurements. Proc. Monthly Weather Rev., 96:387-396.
- [54]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.
- [55]Wang Wei, Bruyere C, Duha M, et al. ARW version 3 modeling system User's guide[R]. Apr. 2016.
http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.8/ARWUsersGuideV3.pdf.
- [56]谷松岩, 邱红, 张文建先进微波探测器资料反演地表微波辐射率试验电波科学学报, 2004,19(4):452-457
- [57]Chalfant, M W, A S Allegrino, 2000: Advanced TOVS (ATOS) experimental cloud products using HIRS/3 and AMSU-A measurements. Technical proceedings of the eleventh international ATOVS study conference, p29-40
- [58]Eyre J R. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures. Technical Memorandum, ECMWF, 1992,186: 28
- [59]Harris B A, Kelly G. A satellite radiance bias correction scheme for radiance assimilation. Quart J Roy Meteorol Soc, 2001,127:1453-1468.
- [60]Dee.D.P. Bias and data assimilation. Q. J. R. Meteorol. Soc, 2006, 131: 3323-3343.

作者在学期间取得的学术成果

- [1] De Xing, Weimin Zhang, Qunbo Huang, Bainian Liu. Research on Extreme Learning Machine Algorithm and Its Application to El-Nino/La-Nina Southern Oscillation Model. 2016 IHMSC:208-211(EI Index)