

杨寅, 韩威, 董佩明. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述[J]. 气象, 2011, 37(11): 1395-1401.

AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述^{* 1}

杨 寅¹ 韩 威² 董佩明³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

3 北京航空气象研究所, 北京 100085

提 要: 微波相比红外、可见光等卫星探测方式有能够穿透薄云的优点, 同化微波探测资料能明显改进数值预报模式初始场。由于观测算子在云、降水粒子及性质复杂下垫面等因素影响下模拟辐射传输过程不准确, 以及资料的观测误差较大等原因, 实际同化应用时必须对微波探测资料加以认真筛选。为充分发挥探测资料作用并保证同化分析效果, 在同化 AMSU 微波探测的研究中, 很多机构和学者建立了散射指数、降水检测等质量控制方法, 用来剔除观测算子不能准确模拟的观测。研究表明, 资料同化过程中引入质量控制能起到改善同化效果, 提高数值天气预报准确率的作用。但是, 对于各种质量控制方法的原理和使用条件目前尚无完整的分析, 使得各业务研究单位使用的质量控制方案差别较大。文章针对 AMSU 微波探测资料同化, 在分析同化误差来源的基础上, 总结了散射指数、降水概率、下垫面类型检测等质量控制方法, 并简单讨论了质量控制的发展方向。

关键词: AMSU 微波探测资料, 资料同化, 观测算子, 误差, 质量控制

Overview on the Quality Control in Assimilation of AMSU Microwave Sounding Data

YANG Yin¹ HAN Wei² DONG Peiming³

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Center for Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085

Abstract: Comparing with infrared and visible radiation, microwave radiation has the advantage to penetrate into thin cloud. Satellite microwave sounding data make great contributions to numerical weather prediction (NWP). The main usage of satellite microwave sounding data in NWP is to assimilate into the initial field. However, the observation operator used in assimilation of satellite microwave sounding data has large simulation errors under the conditions of cloud, precipitation and complicated land surface. Besides, the error of some microwave sounding data is also very large. Therefore how to choose microwave sounding data is a crucial issue in data assimilation. To guarantee the result of assimilation and use more sounding data, in the research of AMSU sounding data assimilation, many institutions and scholars have invented quality control schemes such as scatter index and rain detection to remove data that not well simulated by observation operator. Research shows that after using quality control in data assimilation, the assimilated output is improved and the accuracy of NWP is increased. But there is no detailed analysis on the theory and using condition of quality control so far, which makes the quality control used in research institutions quite different. In this paper, the source of the assimilation error and the principle of quality control

* 国家自然科学基金项目 40775027 资助

2010 年 11 月 30 日收稿; 2011 年 3 月 29 日收修定稿

第一作者: 杨寅, 从事资料同化研究. Email: yy619441819@126.com

are analyzed firstly. Then the quality control schemes used at the main operational NWP center are summarized. Finally, the future development of quality control is discussed briefly.

Key words: AMSU microwave sounding data, data assimilation, observation operator, error, quality control

引 言

目前全球各数值预报研究和业务中心都已将多种卫星资料应用到数值天气预报中,并且卫星资料也已成为观测资料的主体。与红外、可见光等卫星探测方式相比,微波有能穿透薄云的优点。在红外和可见光因为薄云覆盖而失去探测能力的地区,微波仍能够透过云层测量垂直大气参数^[1]。卫星微波探测资料对数值天气预报的贡献不可忽视,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)曾根据其全球数值天气预报中各种观测资料对 500 hPa 位势高度距平相关系数预报效果的贡献进行过统计,结果发现不使用卫星资料会使预报准确率下降 23.4%,其中不使用卫星微波与红外探测资料时预报准确率下降的比率是 13.8%和 1%^[2]。

然而,由于云、降水粒子的辐射效应模拟困难以及性质复杂下垫面的辐射计算不精确,大量受云、降水及性质复杂下垫面等因素影响的微波观测同化误差较大。ECMWF 统计发现,虽然卫星观测占数值预报所用观测资料的 90%,但是通过预处理的卫星资料中超过 97%的观测因为云和降水影响而被同化系统丢弃^[3]。为充分发挥探测资料作用并保证同

化分析效果,卫星微波探测资料同化时需要质量控制来剔除使同化误差较大的观测。

目前的各种卫星微波探测仪器中,先进的微波探测器(AMSU)应用最为广泛。针对 AMSU,在分析同化误差来源的基础上,本文介绍了 AMSU 探测资料同化中常用的质量控制方案,并简要分析了质量控制的发展趋势。

1 AMSU 仪器介绍

AMSU 是先进的微波探测器(Advanced Microwave Sounding Unit)的简称,该仪器搭载于 NOAA15-19 和 METOP 系列极轨业务气象卫星上,在微波波段探测大气的温度和湿度结构。

AMSU 由 AMSU-A、AMSU-B 两部分组成,共 20 个探测通道,各个通道的特性各异。表 1 和表 2 为 AMSU 各通道的详细信息,由表可见 AMSU-A 包含 15 个通道,其中通道 4~14 主要用于探测大气温度结构,通道 1、2、3 和 15 主要用于地表和降水信息的探测;AMSU-B 包含 5 个通道,主要用于探测大气湿度场结构^[4]。为便于叙述,后文将以 ch1 代表第 1 个通道,chi 代表第 i 个通道。

表 1 AMSU-A 各通道特性

Table 1 Specifications of sounding channels of AMSU-A

通道号	中心频率/MHz	主要吸收成分	峰值能量贡献高度	主要探测目的
1	23800	窗区	地表	可降水、云中液态水
2	31400	窗区	地表	可降水、云中液态水
3	50300	窗区	地表	可降水、云中液态水
4	52800	O ₂	1000 hPa	大气温度
5	53596±115	O ₂	700 hPa	大气温度
6	54400	O ₂	400 hPa	大气温度
7	54940	O ₂	270 hPa	大气温度
8	55500	O ₂	180 hPa	大气温度
9	75290.344	O ₂	90 hPa	大气温度
10	75290.344±217	O ₂	50 hPa	大气温度
11	75290.344±322.2±48	O ₂	25 hPa	大气温度
12	75290.344±322.2±22	O ₂	12 hPa	大气温度
13	75290.344±322.2±10	O ₂	5 hPa	大气温度
14	75290.344±322.2±4.5	O ₂	2 hPa	大气温度
15	89000	窗区	地表	可降水、云中液态水

表 2 AMSU-B 各通道特性

Table 2 Specifications of sounding channels of AMSU-B

通道号	中心频率/MHz	主要吸收成分	峰值能量贡献高度	主要探测目的
1	89000	窗区	地表	可降水
2	15000	窗区	地表	可降水
3	183310±1000	窗区	440 hPa	大气湿度
4	183310±3000	H ₂ O	600 hPa	大气湿度
5	183310±7000	H ₂ O	800 hPa	大气湿度

2 辐射传输模式

AMSU 探测的是经过下垫面和大气发射、反射等辐射效应作用后到达大气层顶的分波辐射率。辐射率同化有间接和直接两种方式,间接同化先将辐射率信息反演为温度等模式变量,再将反演得到的温度信息同化。由于微波辐射率信息比模式变量的垂直层次少,反演过程中需要引入附加且有误差的信息,而这会给同化带来负面影响^[5]。与间接同化相比,直接同化不需要引入这些附加信息,避免了不必要的误差引入,所以直接同化是目前微波辐射率资料同化的主流方式。直接同化微波辐射率资料时需要辐射传输模式作为对应的观测算子来建立温度、湿度等模式变量与辐射率观测之间的转化关系^[6]。给定大气温度、湿度廓线以及表面状态等模式初始变量,辐射传输模式(也称观测算子)就能沿卫星扫描仪的观测方向,根据仪器探测通道的平均光谱响应函数模拟计算卫星观测值^[7]。观测算子模拟卫星辐射率观测的原理如公式(1)所示:

$$I(\tau, \mu) = I(\tau_b, \mu) e^{-\frac{\tau_b - \tau}{\mu}} + \int_{\tau}^{\tau_b} (1 - \omega) B(T) e^{-\frac{\tau_b - \tau'}{\mu}} \frac{d\tau'}{\mu} + \int_{\tau-1}^{\tau_b-1} d\mu' \frac{\omega}{2} P(\tau', \mu, \mu') I(\tau, \mu') e^{-\frac{\tau_b - \tau'}{\mu}} \frac{d\tau'}{\mu} \quad (1)$$

式中: I 表示辐射强度, P 表示相函数, $B(T)$ 则表示温度 T 对应的普朗克辐射; τ 表示大气光学厚度, μ 表示方位角的余弦值, ω 则表示单散射反照率。由上式可见,卫星辐射率探测结果由三部分组成:右边第一项代表下垫面的微波辐射效应;第二项代表大气的微波辐射效应;第三项则表示大气对微波的散射效应^[8]。

目前卫星辐射率资料同化时使用的观测算子主要是 RTTOV(Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder) 和 CRTM(Community Radiative Transfer Model)。

3 AMSU 辐射率资料同化的误差来源

AMSU 各通道因探测频率不同而特性各异。AMSU 的窗区通道(如 AMSU-A 的 ch1~ch4)对下垫面辐射很敏感,而目前许多性质复杂下垫面(如陆地和海冰)的微波辐射计算不准确,使得观测算子在这些对下垫面敏感的通道上模拟的误差很大。此外,陆地一般具有地形高度,当下垫面因地形起伏而接近探测通道权重函数的峰值层次高度时,在这些通道上观测算子的模拟误差也很大。法国气象局发现,当下垫面地形高于 500 m 时 AMSU-A 的 ch5 观测受下垫面辐射影响很大;当地形高于 1500 m 时 ch6 受下垫面辐射影响很大^[9]。

大气中的氧气、臭氧、云和降水粒子等多种介质在微波波段都有发射辐射效应,云和降水粒子对微波还有很强的散射效应。由于目前云和降水粒子的微波辐射效应认识不够完全,观测算子对它们微波辐射效应的模拟误差很大。

AMSU 在观测时会有观测误差,观测数据在编码和传输中还可能存在错误,误差过大的探测数据会影响同化效果。

总之,AMSU 微波辐射率资料同化的误差主要来自两方面:一是观测算子模拟不精确产生的误差;二是 AMSU 观测的误差。

4 微波辐射率资料同化的质量控制方法

由于观测算子模拟不精确,以及观测存在误差等原因,微波辐射率资料同化的误差有时很大。因此资料同化时常需要使用一些方法来剔除使同化误差大的观测,这些方法就是质量控制。根据 AMSU 微波辐射率资料同化的误差来源,质量控制可以分为两类。

4.1 针对观测算子的模拟误差

AMSU-A 的 ch1~ch4 和 ch15 以及 AMSU-B 的 ch1、ch2 对下垫面敏感,当下垫面是陆地、海冰等性质复杂的类型时,在这些通道上观测算子的模拟误差很大。为避免过大模拟误差影响同化结果,同化时不考虑这些对下垫面敏感的通道。当陆地的地形高度接近探测通道的权重函数峰值层次高度时,这些通道的观测也应该被剔除。

AMSU 各通道的探测特性不同,对云和降水粒子散射微波效应的敏感程度也不同。云和降水粒子存在时 AMSU 各通道的观测结果将发生不同的变化,所以根据 AMSU 观测变化可以判断大气中是否含有云和降水粒子。以下是一些区分大气中是否含有云和降水粒子的方法,这些方法可以作为质量控制来鉴别微波辐射率观测是否受云和降水粒子影响。

散射指数检测:云和降水粒子对微波的散射强度随频率增加而增强。统计发现云和降水粒子存在时 AMSU-A 的 ch1~ch3 通道观测的线性组合值会与 ch15 通道的观测产生较大差异。这种差异大小可以表征大气中云和降水粒子对微波的散射强度: $I_s = TB - TB_{15}$, $TB = a + bTB_1 - cTB_2 + dTB_3$ 其中 a 、 b 、 c 、 d 分别是扫描角正切的多项式, TB_1 、 TB_2 、 TB_3 、 TB_{15} 分别指 AMSU-A 的 ch1、ch2、ch3、ch15 的观测亮温^[10]。当散射指数超过阈值时认为观测包含云和降水粒子。

与此类似,AMSU-A 的 ch1 与 ch15、AMSU-B 的 ch1 与 ch2 通道观测亮温的差值也能够表征大气散射强度,当两通道间观测亮温的差值大于一定程度则意味着观测受云和降水粒子影响^[11]。

AMSU-A 的第 4 通道 ch4 属于窗区通道,对下垫面辐射比较敏感。当大气中存在云和降水粒子时, ch4 观测到的辐射会因云和降水粒子发射、散射辐射作用而与晴空不同。因此可以利用 ch4 通道辐射率的变化来判定观测是否受云和降水粒子影响。当 ch4 的实际观测与观测算子模拟的观测之间差值的绝对值 $|TB_{4_ob} - TB_{4_fg}|$ 超过阈值时,意味着 AMSU 辐射率探测受到云和降水粒子影响,其中 TB_{4_ob} 和 TB_{4_fg} 分别表示 ch4 的观测与模拟亮温^[12]。

小雨检测: $R = ETB_1 - TB_1$, $ETB_1 = 38 - 0.88 \times TB_2$, 其中 TB_1 和 TB_2 分别是 AMSU-A 的 ch1 与

ch2 通道观测亮温^[13]。降水概率检测: $P = 1 / (1 + E^{-f}) \times 100\%$, $f = 10.5 + 0.184 \times TB_1 - 0.221 \times TB_{15}$, 其中 TB_1 和 TB_{15} 分别是 AMSU-A 通道 ch1 和 ch15 的观测亮温^[14]。

Bennartz 散射指数: Bennartz 发展了一个散射指数来衡量大气中云和降水粒子对微波散射作用的大小: $I_s = (TB_1 - TB_2) - (-39.2010 + 0.1140\theta)$, 其中 TB_1 、 TB_2 分别是 AMSU-B 的 ch1、ch2 通道观测亮温, θ 为局地天顶角^[15]。

卷云检测: AMSU-B 的 183 GHz 高频通道对冰相粒子(多存在于卷云中)的散射效应十分敏感。可以使用函数 $J = (y - y^b)^T R^{-1} (y - y^b)$ 的大小来判定观测中是否存在卷云, 其中 y 与 y^b 分别是 183 GHz 通道的观测与模拟亮温^[16]。

云和降水基本上只存在于对流层中,当检测认为大气中存在云和降水粒子时,剔除权重函数峰值高度在对流层的通道(如 AMSU-A 的 ch5~ch8, AMSU-B 的 ch3~ch5),以免受云和降水粒子影响的观测进入同化过程降低分析质量。

4.2 针对 AMSU 辐射率的观测误差

大气亮温值有一定的范围, AMSU 微波探测的亮温在 150~350 K 内比较合理。如果观测误差过大,探测值则会超过这个界限,此时这些观测应该被剔除^[17]。此外,极值检测法也能发现并剔除观测误差过大的资料。极值检测法是指若观测与平均状态的差值大于标准差的一定倍数时,可以认为该观测的误差过大应该被剔除^[18]。

AMSU 的探测结果在卫星编码和传输过程中是否出现错误,可以通过一致性检验方法来检测,一致性检验是指研究探测数据的经纬度、天顶角等参数是否合理一致。如果检测发现异常,则辐射率探测数据应该被剔除^[19]。

5 各数值预报中心的质量控制方案

目前各数值预报中心同化 AMSU 辐射率探测资料时采用的质量控制方案并不完全相同^[20], 表 3—4 是各中心同化 AMSU 观测时的质量控制方案。

各数值天气预报研究机构和学者都发现,同化 AMSU 微波探测资料时实施质量控制,能够剔除观测算子不能准确模拟的观测,起到改善同化效果,提

高数值天气预报准确率的作用。ECMWF、NCEP 等研究机构指出,业务同化 AMSU 晴空探测资料时采取质量控制,能剔除受云和降水影响的探测,起到提高同化效果的作用。李娟等^[18]在同化 AMSU 微波探测模拟暴雨的研究中,采用质量控制剔除了观测误差过大的探测,得到了更好的暴雨模拟结果。张华等^[14]在同化 AMSU 对 0205 号西北太平洋台

风威马逊的微波探测时,采用降水概率质量控制方法剔除了受降水影响的探测。结果发现同化的结果能更加合理地反映台风三维结构。张利红等^[21]在变分同化 AMSU 探测预报暴雨的研究中,采用散射指数质量控制方法剔除了受云和降水影响的微波观测,发现变分同化能够调整背景场变量分布,改进暴雨强度和位置预报。

表 3 各中心同化 AMSU-A 观测时的质量控制方案

Table 3 Schemes of quality control in assimilation of AMSU-A data

数值预报业务中心	中国气象局	ECMWF	英国气象局	日本气象厅
下垫面以及地形高度	超过 500 m 不使用 ch5; 超过 1500 m 不使用 ch6; 海冰则剔除 ch5、ch6	超过 500 m 不使用 ch5; 超过 1500 m 不使用 ch6		陆地上不使用 ch4、ch5; 海冰上不使用 ch5、ch6
ch4 观测增量 TB _{4_ob} - TB _{4_fg}	大于 1.0 K 则剔除 ch5~ ch7 观测	海上大于 0.7 K,陆地上 大于 1.2 K 则剔除 ch5~ ch7	大于 1.0 K 则剔除 ch5~ ch7	
其他方案	任意通道的观测亮温小 于 150 K 或大于 350 K 则剔除	背景场模拟的瞬时视场 (FOV)内 CLW* > 0.03 kg · m ⁻² 则不使用 ch5~ ch7	小雨检测发现降水则剔 除 ch4 ~ ch8; LWP* > 100 g · m ⁻² 时剔除 ch4、 ch5	散射指数大于 3 K 则不 使用 ch5~ch7

* CLW 指云中液态水, LWP 指液态水路径

表 4 各中心同化 AMSU-B 观测时的质量控制方案

Table 4 Schemes of quality control in assimilation of AMSU-B data

数值预报业务中心	中国气象局	ECMWF	英国气象局	日本气象厅
下垫面和地形高度	超过 1000 m 不使用 ch5; 超过 2000 m 不使用 ch4; 超过 2500 m 不使用 ch3。 海冰则剔除所有观测	超过 500 m 不使用 ch5; 超过 1500 m 不使用 ch6	陆地则不使用 ch3~ch5	海冰上不使用所有观测
Ch2 观测增量 TB _{2_ob} - TB _{2_fg}	大于 5 K 则剔除所有通 道观测	大于 5 K 则剔除 ch3 ~ ch5		
其他方案	Bennartz 散射指数在陆 地上大于 0;海上大于 15 K;海冰上大于 40 K,则 剔除所有观测	模拟观测瞬时视场内 CLW>0.03 kg · m ⁻² 则 不使用 ch3~ch5	小雨检测发现降水则不 使用 ch1~ch5;卷云检测 发现冰晶则不使用 ch4、 ch5	ch1 与 ch2 通道间亮温观 测的差值大于 3 K 则剔 除 ch3~ch5

由表 3~4 可以发现,各数值预报中心同化 AMSU 微波探测资料时采用了不同的质量控制方案,如散射指数、下垫面地形等;对于同样的质量控制方案,不同中心的判定阈值也不同,如 AMSU-A 的 ch4 观测增量方案,欧洲中期天气预报中心采用的阈值为海洋 0.7 K 和陆地 1.2 K,英国和中国气象局则是所有下垫面均为 1.0 K。

同化 AMSU 微波观测时采用不同的质量控制方案和判断阈值,是各中心在大量试验的基础上不断发展和完善起来的。任强等^[22]利用 CRTM 辐射传输方程结合 GRAPES 3D-var 同化台风碧丽丝的微波 AMSU 探测,通过一系列对比试验发现:在 GRAPES

3D-var 同化系统中,相对于降水概率检测和降水检测,散射指数方案会剔除更多云和降水影响的 AMSU-A 探测;对于 GRAPES 区域模式同化 AMSU-A 探测资料,在海上散射指数阈值为 15 时效果最好;对于 AMSU-B, ch2 通道观测增量方案要优于 Bennartz 散射指数方案。因此,同化卫星微波观测时应根据实际情况选择适合的质量控制方案和判断阈值。

除各数值预报研究和业务中心外,不少研究者同化微波辐射率观测时也采用质量控制。如郭锐等^[23]同化 AMSU 观测时直接剔除所有对下垫面敏感的通道;陶士伟等^[24]使用极值检测法剔除误差过大的 AMSU 辐射率资料。

6 质量控制的发展方向

微波辐射率资料同化时之所以采用质量控制,主要是因为观测算子在云和降水等因素影响下模拟误差大。所以,想要改进质量控制,就应该从提高观测算子模拟的精确度入手。

观测算子计算下垫面辐射精确度的增加对提高辐射率资料同化效果有很大意义,针对下垫面微波辐射模拟精度的改进一直以来有很多的研究。EC-MWF 同化微波观测时采用新的经验公式来计算地表辐射率,结果发现相对于旧方法,新的经验公式能提高下垫面辐射率计算精度^[25];从 FASTEM1 到 FASTEM4, CRTM 等快速辐射传输模式都在不断发展更精确的下垫面辐射出射率计算模块。相对于过去剔除所有对下垫面敏感通道的观测,目前 CRTM 新版本中以陆地、海冰为下垫面的 AMSU 窗区通道大都可以被同化利用。

同化时大量的受云和降水粒子影响的微波观测由于观测算子模拟不准确而被质量控制剔除。要改进微波辐射率资料同化效果并增大数据利用率,需要提高观测算子对云和降水粒子微波辐射效应(主要是散射效应)模拟的精确度。而根据观测算子模拟精度的提高不断调整质量控制实现精细化,是质量控制发展的重点所在。

CRTM 和 RTTOV 都在积极发展和完善模拟大气散射效应的模块,目前 CRTM 已经初步包含计算大气散射的模块。美国国家环境预报中心(NCEP)同化卫星观测时采用的观测算子就是 CRTM。同化 AMSU 观测时 NCEP 使用 factch4 和 factch6 指数来判断辐射率观测是否包含非降水性薄云或降水。其中, $factch4 = d\tau^2 + [(TB_{ob}^{ch4} - TB_{ig}^{ch4}) \times 3]^2$, $factch6 = dsval^2 + [(TB_{ob}^{ch6} - TB_{ig}^{ch6}) \times 0.1]^2$, TB_{ob}^{ch4} 、 TB_{ig}^{ch4} 分别表示 ch4 通道的观测与模拟亮温, $dsval$ 则是一个与下垫面类型有关的数。当 $factch4 > 0.5$ 时表示观测中含有非降水性厚云;当 $factch6 \geq 1$ 时观测中包含降水。试验中 NCEP 发现考虑散射的 CRTM 观测算子结合 factch 指数这种细化的质量控制方法可以同化受非降水性薄云影响的 AMSU 探测。

此外,针对新的质量控制方法目前还有不少研究,如方翔等发现 AMSU-B 的 ch3、ch4、ch5 间观测亮温的差值能够指示观测中是否含有对流云^[26];邱

红等发现 AMSU-B 的 ch2 与 ch3 之间观测亮温差值能够揭示云雨含量大小^[27]。这些新方法都可以用来更精细地区分 AMSU 观测,实现质量控制精细化。

7 总 结

观测算子在云、降水粒子及性质复杂下垫面等因素影响下模拟不准确以及探测资料自身存在误差,为充分发挥资料作用并保证同化分析效果,需要质量控制来剔除使同化误差大的探测。

针对 AMSU 微波辐射率资料同化,各数值预报研究和业务中心发展了散射指数、降水概率、小雨检测等质量控制方案和判断阈值。质量控制方案及判断阈值与具体的同化系统有关,同化卫星微波辐射率观测时应根据具体同化系统慎重选取。

随着观测算子模拟精度的不断提高,质量控制应该越来越精细化,达到充分利用微波探测资料并保证同化分析效果的目的。

参考文献

- [1] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 89-91.
- [2] 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发展[J]. 气象科技, 2008, 36(1): 1-7.
- [3] Dong Peiming, Ren Qiang, Xue Jishan. Experiment of the use of satellite microwave data affected by cloud in numerical prediction[C]. ITSC, 2005.
- [4] 王新, 方翔, 邱红, 等. 应用 AMSU-B 微波资料分析 0509 号 Matsa 台风水汽场分布特征[J]. 气象, 2009, 35(12): 30-36.
- [5] Engenia Kalnay. 大气模式、资料同化和可预报性[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 125-126.
- [6] 薛纪善. 气象卫星资料同化的科学问题与前景[J]. 气象学报, 2009, 67(6): 903-911.
- [7] 马刚, 方宗义, 张凤英. 云参数对 RTTOV 模式模拟误差的影响分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 387-392.
- [8] Liu Quanhua, Weng Fuzhong. One-dimensional variation retrieval of temperature, water vapor, and cloud water profiles from Advanced Microwave Sounding Unit(AMSU)[J]. Geos Remo Sen, 2005, 43(5): 1087-1095.
- [9] Gérard, Rabier F, Lacroix D, et al. Use of ATOVS raw radiances in the operational assimilation system at Météo-France [C]. 13th International TOVS Study Conference, Canada, 2003.
- [10] English S J, Renshaw R J, Dibben P C, et al. The AAPP Model for Identifying Precipitation, Ice Cloud, Liquid Cloud and Surface Type on the AMSU-A Grid[C]. Process of the 9th International

- TOVS Conference, Igls, Austria, 1997.
- [11] Brett Candy, Steve English, Richard Renshaw, et al. Use of AMSU data in the UK Meso-scale Model[C]. ITSC 13th, Sainte Adele, Canada, 2004.
- [12] Masahiro Kazumori, Kozo Okamoto, Hiromi Owada. Operational use of the ATOVS radiances in global data assimilation at the JMA[C]. ITSC 13th, Sainte Adele, Canada, 2004.
- [13] Tiphaine L, Nigel A, Pascal B. AAPP Documentation Software Description Document [G]. NWPS-AF-MF-UD-002, 2006:1-142.
- [14] 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.
- [15] Bennartz R, Dybbro A, Michelson D B, et al. Precipitation Analysis from AMSU [R]. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Visiting Scientist Report, November 1999.
- [16] Candy B, English S, Renshaw R, et al. Use of AMSU Data in the MetOffice UK Mesoscale Model[C]. ITSC 13th, Canada, 2003.
- [17] 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.
- [18] 李娟, 朱国富. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨研究中的运用[J]. 气象, 2008, 34(12): 36-43.
- [19] Chouianard C, Halle J. The assimilation of AMSU-B radiances in the CMC global data assimilation system: Difficulties and impacts relatives to AMSU-A Radiances[C]. ITSC 13th, 2005.
- [20] Min-Jeong Kim, Steve English, Peter Bauer, et al. Comparison of progress in assimilation cloud affected microwave radiances at NCEP, ECMWF, JMA and the Met Office [C]. NWP SAF 23th, Oct 2008.
- [21] 张利红, 沈桐立, 王鸿利. AMSU 资料变分同化及在暴雨数值模拟中的应用研究[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1004-1012.
- [22] 任强, 董佩明, 薛纪善. 台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 137-146.
- [23] 郭锐, 李泽椿, 张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 1-12.
- [24] 陶士伟, 张跃堂, 陈卫红, 等. 全球观测资料监视评估[J]. 气象, 2006, 32(6): 53-58.
- [25] Blazej Krzeminski, Niels Bormann, Fatima Karbou, et al. Towards a better use of AMSU over land at ECMWF [J]. ITSC 14th. 2006.
- [26] 方翔, 邱红, 曹志强, 等. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 23-29.
- [27] 邱红, 方翔, 谷松岩, 等. 利用 AMSU-B 分析热带气旋结构特征[J]. 应用气象学报, 2007, 18(6): 810-819.