

AMSR-E/2 观测辐射值反演水成物参数

官莉, 李依鸿, 张思勃

南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044

摘要: 基于先进的微波扫描辐射计 AMSR-E/2 观测的辐射值, 利用一维变分算法(1D-Var)反演各类水成物(云水、雨水和云冰)的垂直廓线, 并对其反演结果进行检验。以 2014 年 8 月台风“夏浪”为例, 分两步对变分反演的云微物理参数进行了检验。首先, 将反演的各类水成物含量补充到辐射传输模式的输入场, 观测算子模拟的 AMSR-2 各通道亮温与实况观测相比非常接近, 可以很好地模拟出台风外形、强度及螺旋结构。其次, 将反演的水成物廓线与载在 CloudSat 上的云雷达 CPR 同时段观测的雷达反射率因子进行对比, 发现反演出的云水、雨水含量大值区与毫米波云雷达观测的雷达反射率因子高值区一一对应, 进一步说明 1D-Var 反演的水成物参数精度很高。然而, 由于星载 AMSR-E/2 观测通道少且空间分辨率低, 对尺度较小、较薄的云不敏感, 同时对云层较厚的密闭云区和多层云区反演能力也有限。

关键词: AMSR-E/2, 1D-Var 反演, 水成物廓线, CloudSat, 精度检验

中图分类号: P407.6 文献标志码: A

引用格式: 官莉, 李依鸿, 张思勃. 2016. AMSR-E/2 观测辐射值反演水成物参数. 遥感学报, 20(1): 45-52

Guan L, Li Y H and Zhang S B. 2016. Inversion of hydrometeor profiles from AMSR-E/2 observations. Journal of Remote Sensing, 20(1): 45-52 [DOI: 10.11834/jrs.20165089]

1 引言

云中各种水成物的含量与云的辐射强迫紧密相关, 影响着整个地气系统的辐射收支平衡。研究表明, 暖云能反射 30% 的短波, 对整个地气系统起到辐射冷却效应(Borg 和 Bennartz 2007), 云水含量对降水的形成和发展也起着决定性的影响。与深对流活动有关的冰水含量能够反映对流的强度, 故也是决定降水的重要参数之一(Rutledge 和 Hobbs, 1984)。因此, 云中水成物含量的准确测量对于改进数值天气预报模式和气候模式, 理解天气过程和气候变化都十分重要。

目前大多数国家的业务数值预报系统只能同化晴空卫星观测, 其原因之一就是初始云结构难以获取, 而云结构是同化系统观测算子的重要输入参数, 缺乏云结构信息, 观测算子(对卫星资料同化而言就是辐射传输模式)无法模拟云中的辐射能量传输过程, 即有云环境下的亮度温度(丁伟钰等 2010)。董佩明等人(2009)、丁伟钰和万齐

林(2008) 分别在进行云区卫星微波和红外观测同化时, 不论观测算子选用的 CRTM (Community Radiative Transfer Model) 还是 RTTOV (Radiative Transfer for TIROS-N Operational Vertical Sounding) 都是以数值预报模式(如 WRF 模式) 预报场提供的水物质含量作为输入, 然而数值预报模式中, 影响辐射能量传输的云微物理过程参数化方案还不够精确。

一般说来, 可见/红外仪器仅对冰粒子较小、厚度更薄的非降水冰云(如卷云) 更加敏感, 而对较厚的冰水混合云无能为力。然而微波对云有穿透性, 传感器接收的辐射既来自大气也来自云体。因此, 云区的微波观测反映着云的微物理信息, 如: 各类水成物含量、粒子大小等。Weng 和 Grody (1994)、Weng 等人(2003) 在简化微波辐射传输方程的基础上用线性回归统计方法反演了垂直积分云中液水含量 CLW (Cloud Liquid Water) 和可降水含量 TPW (Total Precipitation Water)。Yang 等人(2012) 将该算法移植到 FY-3B 微波辐射成像仪 MWRI 反

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-08-12; 优先数字出版日期: 2015-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41175034, 41575029)

第一作者简介: 官莉(1973—), 女, 教授, 从事大气遥感与大气探测方面的研究, 已发表论文 40 余篇。E-mail: liguanlily@189.cn

演整层大气中云水和水汽含量。Liu 和 Curry (1999) 利用高频波段毫米波辐射计观测反演冰水路径 IWP (Ice Water Path), Weng 和 Grody (2000) 对该算法进行了改进, 利用两个高频通道同时反演 IWP 和粒子有效直径。基于星载微波仪器, Wang 等人 (2009) 设计了一套针对洋面环境的多参数反演算法, 能够对水汽、云水、海温和风速等大气和地表参数进行反演。但上述反演算法给出的都是整个垂直层的水汽、云水和云冰的总积分量, 并没有给出各类水成物垂直分布廓线。

因此, 本文基于星载微波扫描辐射计 AMSR-E/2 观测, 利用 1D-Var 算法反演各类水成物含量(云水、雨水和云冰)的垂直廓线, 并对其反演结果进行检验。

2 AMSR-E/2 仪器和资料介绍

先进微波扫描辐射计 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer on the Earth Observing System) 搭载在 2004 年 5 月 NASA 发射的 EOS 地球观测系统 Aqua 卫星上, 是圆锥型扫描微波成像仪, 天线圆锥扫描角为 47.4° , 扫描帧幅宽度为 1445 km。AMSR-E 分别测量 6.925 GHz、10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 水平极化和垂直极化的亮度温度, 共有 12 个通道, 空间分辨率从 89 GHz 的 5.4 km 下降为 6.9 GHz 的 56 km。成像仪主要使用的是窗区通道, 用于观测云和地表、反演各类水成物含量。18.7 GHz 及其以下频率是较透明的窗区通道, 受大气干扰小可以探测地表和云顶辐射; 23.8 GHz 通道是弱水汽吸收带, 对水汽敏感; 36.5 GHz 通道常用来识别云水、雨水含量, 而 89 GHz 通道则对云冰、雪和霰等固态水成物敏感 (Kidder 和 Vonder Haar, 1995)。AMSR-E 于 2011 年 10 月停止工作, 其后续仪器 AMSR-2 于 2012 年 5 月搭载在 GCOM-W1 (Global Change Observation Mission-Water) 上, 于 2012 年 5 月发射, 通道设置在 AMSR-E 基础上又增加了 7.3 GHz 的水平和垂直极化观测。

本文以 2014 年第 11 号台风“夏浪”(Halong) 为例, 选取 8 月 4 日前后 AMSR-2 在西太平洋的观测来进行云参数反演, 使用的是 AMSR-2 经过空间重采样的观测值, 即 Level 2A 级数据。Level 2A 资料中所有通道的空间分辨率都重新取样到了 6.925 GHz 频点即 56 km 的相同空间分辨率。

3 CRTM 辐射传输模式介绍

目前被广泛应用的由美国卫星资料同化联合中心 JCSDA 开发的快速通用辐射传输模式 CRTM 2.0 版本综合考虑了吸收气体的辐射、各种类型水成物和气溶胶粒子的吸收和散射(在计算水成物散射特性时输入的是不同高度层上各类水成物的垂直含量), 海洋、陆地及冰雪覆盖地表的发射和辐射效应, 因此可以快速、准确的模拟各种大气和地表条件下(包括云、雨区的模拟)微波和红外的卫星观测辐射值。该辐射传输模式除了常规的前向算子, 还具备相应的切线性算子及其伴随和 K 矩阵 (Chen 等 2008)。观测算子对云和降水、气溶胶粒子的吸收和散射效应的考虑将使全天候条件下卫星资料的同化应用成为可能。

4 1D-Var 反演算法介绍

一维变分(1D-Var)反演算法可以从卫星微波、红外观测资料中反演得到很多大气、地表状态和云参量, 如: 大气温度垂直廓线、湿度垂直廓线、云水含量、地表温度和地表发射率等 (Boukabara 等, 2011)。假设观测误差和背景场误差是无偏的、不相关的, 并都满足高斯分布, 那么 1D-Var 算法的最佳估计即为求解代价函数(目标函数)的最小值:

$$J(X) = \left[\frac{1}{2} (X - X_0)^T \times B^{-1} \times (X - X_0) \right] + \left[\frac{1}{2} (Y^m - H(X))^T \times (O + F)^{-1} \times (Y^m - H(X)) \right] \quad (1)$$

式中 X 表示大气状态变量, X_0 表示大气状态的先验信息(称作背景场), B 为背景场误差协方差矩阵, Y^m 是观测资料, H 为观测算子, O 为观测资料误差协方差矩阵, F 为观测算子的误差协方差矩阵。

一维变分产生的分析场 X^a 是使目标函数达到最小值时的解, 即

$$J(X^a) = \min_x J(X) \quad (2)$$

要使得代价函数最小, 可以通过对其求导, 并使导数为零来求解,

$$\frac{\partial J(X)}{\partial X} = J'(X) = 0 \quad (3)$$

可以得到,

$$(X - X_0) = \Delta X = \left\{ (B^{-1} + h^T (O + F)^{-1} h)^{-1} h^T (O + F)^{-1} \right\} \times$$

$$[Y^m - H(X_0)] \quad (4)$$

式中 $h = \frac{\partial H(X)}{\partial X} \Big|_{X=X_0}$ 为观测算子的切线性算子,

而 h^T 为观测算子的伴随算子。目标函数的极小值可以通过逐步迭代极小化方法得到,将式(4)用于迭代循环中,则可得到:

$$\Delta X_{n+1} = \{BK_n^T(K_nBK_n^T + (O + F))^{-1}\} \times [(Y^m - H(X_n)) + K_n\Delta X_n] \quad (5)$$

式中,下标 n 表示迭代次数。在每一次迭代中,计算一个新的增量 ΔX ,而将迭代增量与 X_0 相加,即为该次迭代获得的解。本文采用的收敛判断标准是用每次迭代获得的大气状态向量 X 模拟卫星辐射亮温,检验模拟亮温与观测亮温间的方差是否足够小,具体的收敛判断条件为

$$\frac{\varphi^2}{N} = \frac{(Y^m - H(x))^T \times (O + F)^{-1} \times (Y^m - H(x))}{N} \leq 1 \quad (6)$$

式中 N 表示参与反演的卫星观测资料的通道数。在依次迭代过程中,如果某次迭代满足上述判断条件则认为已求得最优解,停止迭代;或者达到迭代次数预设的最大值时也停止迭代。具体反演流程图见图1。

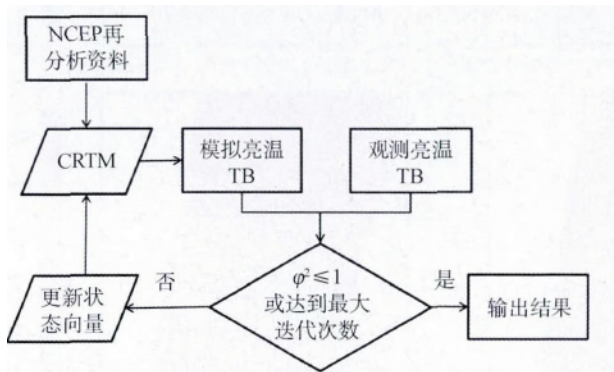


图1 1D-Var 反演的流程图

Fig. 1 Flow chart of 1D-Var retrieval

5 反演算法应用

本文以 NCEP (NOAA's National Centers for Environmental Prediction) 的 GDAS (Global Data Assimilation System) 客观分析场的温度垂直廓线、湿度垂直廓线、表面温度、地表发射率以及云中液水含量参数作为 1D-Var 反演的背景场,客观分析场水

平空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直高度分为 26 层。

1D-Var 算法将大气状态向量 X 作为一个整体进行反演,包括温度廓线、湿度廓线、各水物质参数(云液水、冰水和雨水)廓线、地表温度和地表发射率谱。基于这些反演的水成物廓线,经垂直积分、多元回归可以得到总量类反演产品:大气水汽总量、云中液水总量、雨水总量、冰水总量、地面降水率等。

由于陆地地表复杂、发射率难以估算,而本文重在研究反演算法的精度,分析一维变分反演云、雨参数的精度,以及辐射传输模式对云区微波辐射的模拟效果检验,所以选取 2014 年的典型台风“夏浪”为例,其下垫面为均匀的洋面。

2014 年第 11 号台风“夏浪”(Halong) 于 7 月 29 日 11 时(世界时,以下同)在美国关岛东偏南方约 360 km 的西北太平洋洋面上生成,位于 $(12.6^\circ N, 148.0^\circ E)$,风力 8 级(18 m/s),台风近中心最低气压 998 hPa,并以 15 km/h 左右的速度向西偏北方向移动,强度继续加强。2014 年 8 月 2 日凌晨加强为强台风级,之后以 10 km/h—15 km/h 的速度继续向西偏北转北偏西方向移动,直到 2014 年 8 月 8 日减弱为台风。2014 年 8 月 10 日在日本四国县附近登陆,登陆时中心最大风力 13 级(40 m/s)。2014 年 8 月 11 日 20 时,在俄罗斯远东地区变性为温带气旋。

2014 年 8 月 4 日 4 时左右台风“夏浪”中心位于西太平洋 $(16.8^\circ N, 130.4^\circ E)$ 附近,因此本文将研究范围选为 $(10^\circ N-25^\circ N, 120^\circ E-140^\circ E)$ 。图 2(a) 从上到下依次显示了台风“夏浪”上空 AMSR-2 升轨 10.65 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 垂直极化通道观测的亮度温度。洋面的发射率随着频率的增加,从约是陆地表面发射率的一半(0.5)逐渐增加大至与陆地表面发射率相当(0.9),因此 10.65 GHz 通道晴空洋面背景观测亮温很低(约 180 K),到 36.5 GHz 洋面温度升至约 220 K。而 23.8 GHz 通道为弱水汽吸收带,台风区域附近的洋面上水汽含量也相当丰沛,使得洋面观测亮温明显升高(约 240 K)。云在微波低频通道以吸收/发射辐射为主,云的发射率大于洋面的发射率,所以云在低的海洋背景上表现为较暖的亮温。89.0 GHz 为高频通道,洋面的发射率增加至 0.9,因此洋面观测亮温为超过 280 K 的暖背景,而在此频率云的散射效应占主导,导致云区观测亮温低于暖洋面。另外,水平极化通道的观测情况与垂直通道相似。

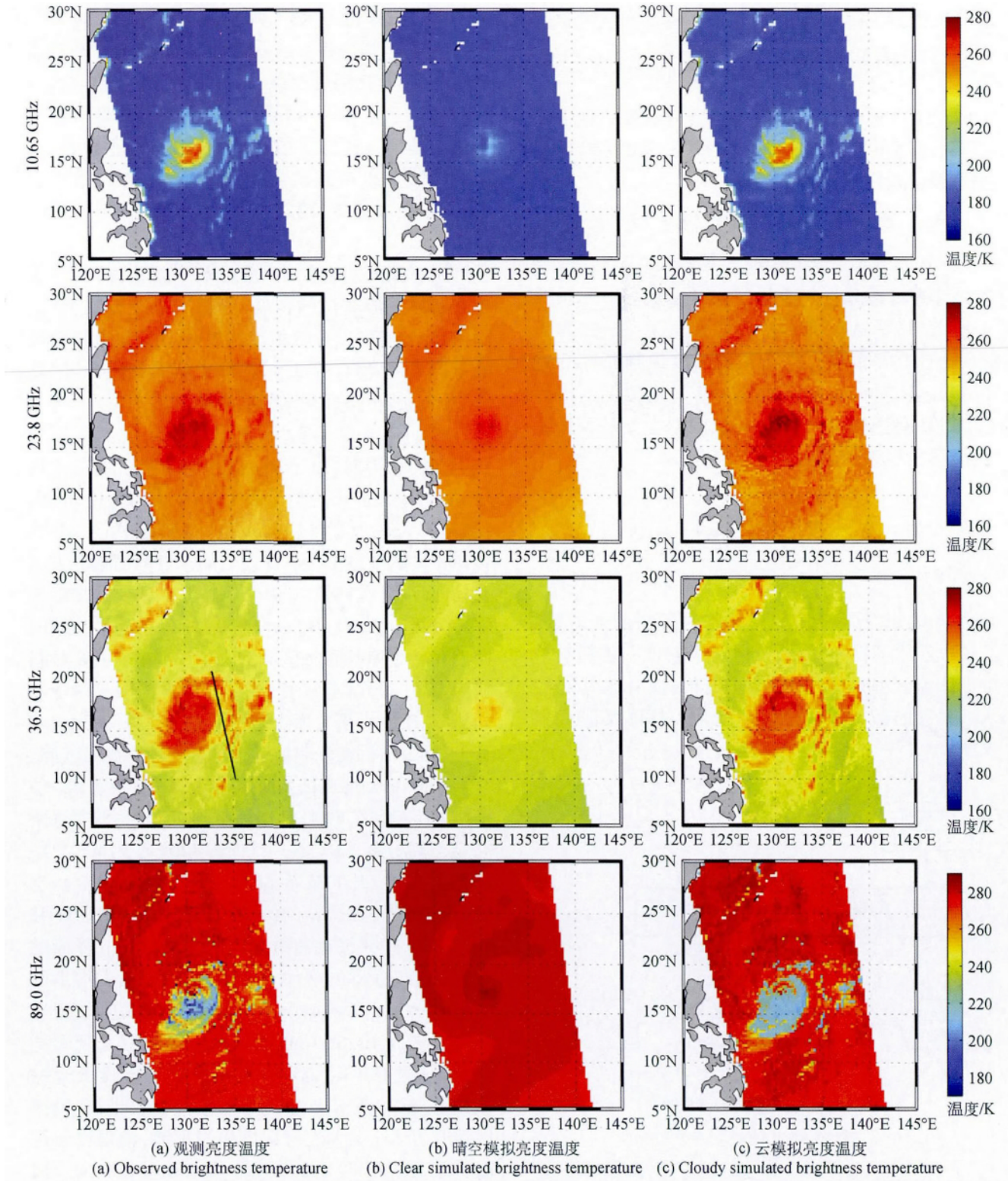


图2 2014年8月4日 AMSR-2 升轨 10.65 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 通道
垂直极化观测亮度温度、晴空模拟亮度温度及云模拟亮度温度

Fig. 2 AMSR-2 at 10.65 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz and 89.0 GHz with vertical polarization on
August 4, 2014 observed, clear simulated, cloudy simulated brightness temperature

图3(a) — (c) 分别为基于2014年8月4日研究区域内 AMSR-2 观测反演的云水、云冰和雨水总

量图,反演的云冰(图3(b))多分布在台风外围的螺旋云带中,螺旋云带多由比较高的、半透明的冰

卷云组成;大的雨滴分布在台风眼壁的密闭云区如图 3(c) 在观测亮温(图 2(a)) 表现为低频的高亮温区和高频的低亮温区;而反演的云中液态水含量较少(图 3(a)) ,多在螺旋云区。反演的各类水成物分布与每个通道观测亮温特征一致。图 3(d) (1D-Var 反演的初始场) 与图 3(a) 反演的云水相比相差很大。定量统计反演的云水总量与 NCEP 初始

场相比的平均偏差为 0.56 kg/m^2 ,标准差为 1.48 kg/m^2 ,NCEP 分析场的云水比反演场整体偏高。根据图 2(a) 不同通道观测亮温可看出 ,NCEP 再分析场中将所有水成物(不论固态、液态,不论粒子大小) 都认为是液态云水,这是不合理的。而该初始场经过变分调整后将水成物细分成云水、云冰和雨水,与观测更接近。

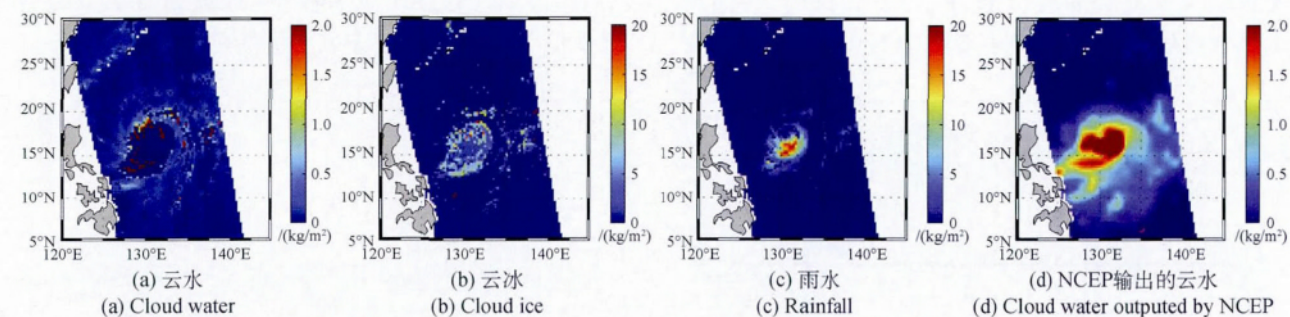


图 3 2014 年 8 月 4 日 AMSR-2 反演的水成物总量图

Fig. 3 Integrated amount of retrieved hydrometeor on August 4, 2014

图 2(b) 中从上到下依次为 10.65 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 垂直极化通道晴空模拟的亮度温度分布。晴空辐射模拟即为在辐射传输模式的输入场中不输入所有水成物的量,卫星接收到的辐射是来自地表和大气吸收气体的发射,目前大多数资料同化系统对气象卫星资料吸收采用的就是这种晴空辐射模拟。从图 2(b) 中可看出,所有通道对晴空下垫面(尤其是下垫面比较均匀的洋面)的模拟与图 2(a) 观测值都吻合的很好,而对于云区只是模拟的亮温相对周围海洋背景略高一点点,基本都没有模拟出云区的范围、结构和强度。将上述 1D-Var 反演的水成物含量垂直廓线增加到辐射传输模式的输入场中、启动观测算子的散射模块模拟的亮度温度,称之为云模拟(图 2(c))。从图 2(c) 中可以看出增加水成物参数后模拟的亮温温度与图 2(a) 观测的亮温非常接近,连云区的位置和强度都模拟的很好,只有高频 89.0 GHz 云模拟的亮温在台风眼壁的密闭云区比实况观测稍稍偏高。这也说明,在辐射传输模式模拟云区亮温精确的基础上,反演的各类水成物含量与实况分布吻合较好。

为进一步检验 1D-Var 反演的水成物垂直廓线精度,将反演的云水、雨水等垂直廓线与 CloudSat 卫星上搭载的云雷达 CPR(Cloud Profiling Radar)的雷达反射率因子(2B-GEOPROF) 产品进行比较。CloudSat 为极轨卫星,其搭载的云雷达采用 94 GHz

毫米波观测,可以探测云的垂直结构,共有 125 个垂直层,每层厚度 240 m,每个像素点沿轨分辨率是 2.5 km,横轨分辨率是 1.4 km(周毓荃和赵姝慧,2008)。

图 2(a) 36.5 GHz 观测中黑色线段标注了 CloudSat 卫星飞行轨迹图,此时段 CloudSat 飞过台风外围螺旋云带。图 4(a) 显示了此轨迹段云雷达观测的雷达反射率因子垂直剖面。从雷达回波强度图可看出在 CloudSat 飞过上空基本全部被云覆盖,很多区域都是多层云。云层较厚、回波较强区域与 AMSR-2 观测台风外围螺旋云带对应。图 4(b)(c) 分别显示了在该段反演的雨水和云水剖面图,反演的雨水多集中在 3—6 km 高度处,而云水高度约在 6—9 km;反演出的云水、雨水区与毫米波云雷达观测的高值区($>10 \text{ dBz}$) 一一对应。但是同时也可看出反演的云、雨区分布没有云雷达观测到的范围大、结构完整清晰。可能原因:AMSR-2 观测资料和 CPR 观测资料的观测时间并不完全一样,AMSR-2 升轨观测资料在 2014 年 8 月 4 日覆盖研究范围的时间约为 4:05,而 CPR 观测时间约为 3:47,二者相差约 18 min;另外两种资料的空间分辨率也不相同,本文反演使用的重新采样过的 AMSR-2 所有通道观测的水平分辨率在 $62 \times 35 \text{ km}$ 左右,远远粗于 CPR 资料的分辨率 $2.5 \times 1.4 \text{ km}$,反演的垂直分辨率也远远低于 CPR 观测垂直分辨率。两种观测资料在时间、空间上的差异给二者的比较

带来一定的误差。由于云雷达 CPR 使用频率较高的毫米波长,对很小的云滴都很敏感,所有回波图分布连续且面积大,而星载微波成像仪不具备反演很小云滴和冰晶的能力,说明 1D-Var 算法还不能反演出尺度较小、云层发展较浅薄区域的云、雨参数。从图 4(b)(c)可以看出在台风区 800 hPa 以下高度基于卫星观测几乎反演不出云水、雨水,这是因为尽管微波对云有穿透作用,但在云层较厚区、密闭云区和多层云区微波的穿透能力有限,表现为卫星

微波不同通道观测的亮温饱和,因而不再含有较低层的云、雨信息。自从 2012 年 1 月 CloudSat 业务产品中不再有降水产品(2C-RAIN-PROFILE),因此图 4(d)(e)分别显示了 CloudSat 反演的云水和云冰廓线,对照图 4(d)(e)与雷达回波图 4(a)可发现 CloudSat 将 7 km 以上所有回波较强区都反演成固态的云冰,只有在纬度 20°N — 20.8°N 一段中云中反演出云水,这是不太合理的,即使是在大气层结温度低于零度的云层中也不可能全是固态的冰。

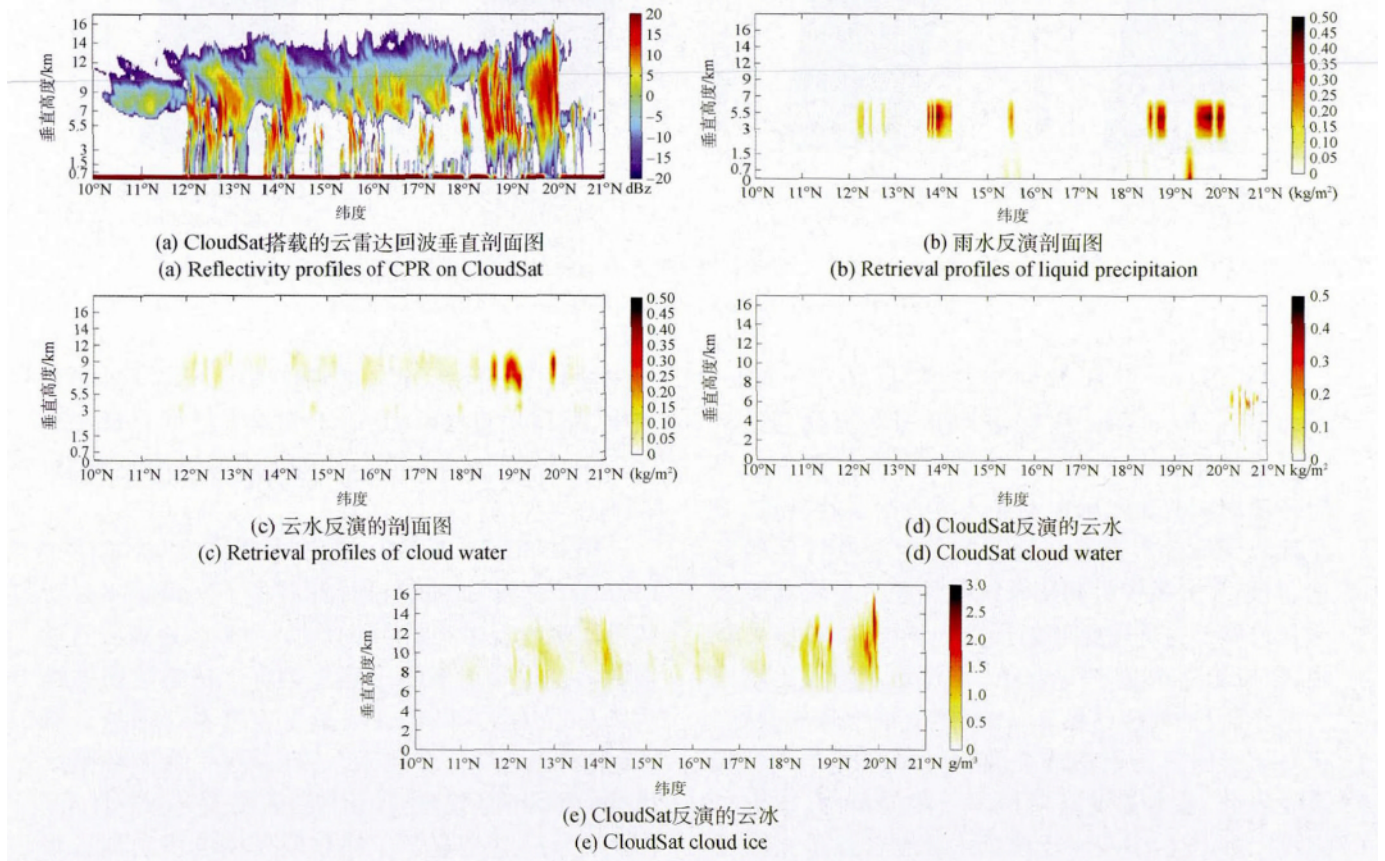


图 4 水成物剖面图(2014 年 8 月 4 日)

Fig. 4 Profiles of hydrometeor on August 4, 2014

6 结论

本文基于微波扫描辐射计 AMSR-E/2 观测辐射值,用 1D-Var 算法反演各类水成物(云水、雨水和冰水)的垂直廓线。以 2014 年 8 月台风“夏浪”为例对反演的云微物理参数进行了检验,初步结论如下:

(1) 将反演的各类水成物含量补充到辐射传输模式的输入场,观测算子模拟的 AMSR-2 各通道亮温与实况观测非常接近,可以很好地模拟出台风外形、强度及螺旋结构。

(2) 将反演的水成物廓线与载在 CloudSat 上的云雷达 CPR 同时段观测的雷达反射率因子进行对比,发现反演出的云水、雨水含量大值区与毫米波云雷达观测的雷达反射率因子高值区一一对应,进一步说明 1D-Var 反演的水成物参数精度很高。

(3) 由于星载微波扫描辐射计 AMSR-E/2 观测通道少且空间分辨率低,因此相对空间分辨率较高的云雷达而言,1D-Var 算法还不能反演出尺度较小、云层发展较浅薄区域的云、雨参数。

(4) 在云层较厚区、密闭云区和多层云区微波的穿透能力有限,表现为 AMSR-E/2 观测亮温饱和,

因此反演能力也有限。

下一步,使用 CloudSat CPR 大量观测个例继续检验 1D-Var 算法反演云、雨参数的精度。利用其他非常规观测,比如飞机下投式 GPS-drosondes 传感器实况探测的台风区水汽、云水等垂直廓线,进行更细致的云微物理反演参数检验。

参考文献(References)

- Borg L A and Bennartz R. 2007. Vertical structure of stratiform marine boundary layer clouds and its impact on cloud albedo. *Geophysical Research Letters*, 34(5): L05807 [DOI: 10.1029/2006GL028713]
- Boukabara S A, Garrett K, Chen W C, Iturbide-Sanchez F, Grassotti C, Kongoli C, Chen R Y, Liu Q H, Yan B H, Weng F Z, Ferraro R, Kleespies T J and Meng H. 2011. MiRS: an all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3249–3272 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2158438]
- Chen Y, Weng F Z, Han Y and Liu Q H. 2008. Validation of the community radiative transfer model by using CloudSat data. *Journal of Geophysical Research*, 113(D8): D00A03 [DOI: 10.1029/2007JD009561]
- Ding W Y and Wan Q L. 2008. The simulation of typhoon Chanchu infrared channels brightness temperature. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32(3): 572–580 (丁伟钰, 万齐林. 2008. “珍珠”台风卫星红外通道亮温的数值模拟. *大气科学*, 32(3): 572–580)
- Ding W Y, Wan Q L, Zhang C Z, Huang Y Y and Chen Z T. 2010. Assimilation of HIRS/3 brightness temperature in cloud condition and its impact on Typhoon Chanchu forecast. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(1): 70–78 (丁伟钰, 万齐林, 张诚忠, 黄燕燕, 陈子通. 2010. 有云条件下 HIRS/3 资料的同化及其对“珍珠”台风的影响. *气象学报*, 68(1): 70–78) [DOI: 10.11676/qxb2010.008]
- Dong P M, Wang H J, Han W and Wang D Y. 2009. The effect of water content on the simulation of satellite microwave observation in cloudy and rainy area. *Journal of Applied Meteorological Science*, 20(6): 682–691 (董佩明, 王海军, 韩威, 王德英. 2009. 水物质对云雨区卫星微波观测模拟影响. *应用气象学报*, 20(6): 682–691)
- Kidder S Q and Vonder Haar T H. 1995. *Satellite Meteorology: An Introduction*. New York: Academic Press: 151–154
- Liu G S and Curry J A. 1999. Tropical ice water amount and its relations to other atmospheric hydrological parameters as inferred from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 38(8): 1182–1194 [DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<1182:TIWAAI>2.0.CO;2]
- Rutledge S A and Hobbs P V. 1984. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(20): 2949–2972 [DOI: 10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2]
- Wang Y, Fu Y F, Liu G S, Liu Q and Sun L. 2009. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship. *Journal of Geophysical Research*, 114(D21): D21304 [DOI: 10.1029/2008JD011057]
- Weng F Z and Grody N C. 1994. Retrieval of cloud liquid water using the special sensor microwave imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research*, 99(D12): 25535–25551 [DOI: 10.1029/94JD02304]
- Weng F Z and Grody N C. 2000. Retrieval of ice cloud parameters using a microwave imaging radiometer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(8): 1069–1081 [DOI: 10.1175/1520-0469(2000)057<1069:ROICPU>2.0.CO;2]
- Weng F Z, Zhao L M, Ferraro R R, Poe G, Li X F and Grody N C. 2003. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Science*, 38(4): 8068 [DOI: 10.1029/2002RS002679]
- Yang H, Zou X L, Li X Q and You R. 2012. Environmental data records from FengYun-3B microwave radiation imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4986–4993 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2197003]
- Zou Y Q and Zhao S H. 2008. CloudSat satellite and its application in weather and cloud observation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 31(5): 603–614 (周毓荃, 赵姝慧. 2008. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用. *南京气象学院学报*, 31(5): 603–614)

Inversion of hydrometeor profiles from AMSR-E/2 observations

GUAN Li, LI Yihong, ZHANG Sibao

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: The amount of hydrometeors in clouds plays an important role in the Earth's radiation balance. It is also an important parameter in representing clouds in global circulation models used for climate study and weather forecasting. Satellite data have been widely used to estimate global atmospheric parameters. In this study, we introduce in detail a 1D-Var retrieval algorithm and

assess the quality of the derived hydrometeor products. This algorithm could provide an estimate of the geophysical state, especially hydrometeor profiles, which are used as first guess and/or background before starting data assimilation. This algorithm is beneficial to the assimilation of satellite measurements under cloudy and rainy conditions.

A one-dimensional variational retrieval algorithm is developed to retrieve hydrometeor parameters (profiles of liquid cloud, liquid precipitation, and ice cloud) from spaceborne microwave AMSR-E/2 measurements. The algorithm is an iterative physical inversion system that finds a consistent geophysical solution to fit all radiometric measurements simultaneously. It inverts the radiative transfer equation by finding radiometrically appropriate profiles of geophysical parameters. In addition, the retrieved parameters include a set of derived products that are a simple vertical integration of fundamental profiles, such as total precipitable water, cloud liquid water, ice water path, and rainfall rate.

AMSR-2 measurements from Halong Typhoon in 2014 were used as examples, and all of the retrieved products were assessed. These hydrometeor profiles were integrated into the radiative transfer model (observation operators), in which cloud absorption and scattering effect were measured. The simulated and observed brightness temperatures were consistent in all microwave channels. The retrieved hydrometeor profiles were validated using the observed reflectivities of the Cloud Profiling Radar uploaded on CloudSat satellite. Comparison results showed that areas with high radar reflectivity matched the cloud water content and liquid precipitation regions at high amounts, proving the high precision of hydrometeor retrievals from the 1D-Var algorithm. However, the AMSR-E/2 observations were not sensitive to small-scale shallow clouds because of its few channels and poor spatial resolution. In addition, the inversion ability of satellite microwave measurements was limited to overcast or layered clouds with a high optical thickness.

These hydrometeor parameters are extremely difficult to assess because of the lack of effective ways to measure these quantities (either from ground-based or satellite sensors). Mutual validation of these hydrometeor products from different sensors for long periods of time is still needed.

Key words: AMSR-E/2, 1D-Var retrieval, hydrometeor profile, CloudSat, precision validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41175034)