

许冬梅, 沈菲菲, 闵锦忠, 等. 2018. 基于卫星辐射率资料的两种三维云反演方法对比研究 [J]. 大气科学, 42 (2): 411–420. Xu Dongmei, Shen Feifei, Min Jinzhong, et al. 2018. Comparison of two cloud detection schemes for high-spectral infrared radiance observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 411–420, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17157.

基于卫星辐射率资料的两种三维云反演方法对比研究

许冬梅¹ 沈菲菲¹ 闵锦忠¹ 张备²

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

摘 要 基于格点统计插值分析系统 (Gridpoint Statistical Interpolation analysis system, 简称 GSI), 利用粒子滤波 (Particle Filter, 简称 PF) 方法对卫星红外辐射率资料进行了云覆盖、云高等三维云图产品的反演研究。选取了具有高时空分辨率的静止卫星 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)-Imager 辐射率资料进行了云反演试验, 初步评估了 PF 云反演方法的可行性及其与多元极小残差 (Multivariate and Minimum Residual, 简称 MMR) 云反演方法的异同。结果表明: 两种方法反演得到的云覆盖和云顶气压与 NASA 基于 CO₂ 切片法反演得到的 GOES 云产品一致性较高。PF 和 MMR 方法反演产品的优点是云图信息是三维分布的, 相对于 NASA 提供的 GOES 云产品能提供更全方位立体的云信息。MMR 方法需要利用一维变分逐步拟合观测来反演三维云图产品; PF 方法采用不同模式垂直层的云覆盖比例作为不同粒子来近似后验概率分布, 计算效率大大提高。进一步提出了一种新的基于“扰动粒子”的粒子滤波云反演方法, 结果表明: 在滤波过程中采用足够多的粒子样本 (样本数量约为 250) 可以改进后验概率密度函数的估计, 有效地避免了粒子发散问题, 改善了云反演的结果。

关键词 地球静止卫星成像仪 (GOES-Imager) 格点统计插值分析系统 (GSI) 云反演方法 粒子滤波法
文章编号 1006-9895(2018)02-0411-10 **中图分类号** P412 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17157

Comparison of Two Cloud Detection Schemes for High-Spectral Infrared Radiance Observations

XU Dongmei¹, SHEN Feifei¹, MIN Jinzhong¹, and ZHANG Bei²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
2 Jiangsu Research Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009

Abstract The Particle Filter (PF) cloud retrieval method developed in the framework of GSI (Gridpoint Statistical Interpolation analysis system) is able to directly utilize the Infrared radiances to retrieve cloud masks and cloud profiles.

收稿日期 2017-04-21; 网络预出版日期 2017-09-22

作者简介 许冬梅, 1984 年出生, 女, 博士, 讲师, 主要从事卫星资料同化、卫星资料反演研究。E-mail: dmxu@nuist.edu.cn

资助项目 江苏省气象局北极阁基金项目 BJK201604、BJG201510, 江苏省自然科学基金项目 BK20160954、BK20170940, 国家重点研发计划项目 2017YFC1502102、2017YFC1502103, 国家自然科学基金项目 41375025, 南京信息工程大学人才启动基金项目 2016r27、2016r043

Funded by Bei Ji Ge Foundation of Jiangsu Provincial Meteorological Bureau (Grants BJK201604, BJK201510), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grants BK20160954, BK20170940), National Natural Science Foundation of China (Grant 41375025), the National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC1502102, 2017YFC1502103), Talent Start Foundation of NUIST (Nanjing University of Information Science & Technology) (Grants 2016r27, 2016r043)

Cloud retrieval experiments with GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)-Imager radiance are conducted with the PF and the Multivariate and Minimum Residual (MMR) methods respectively for comparison. The retrieved cloud properties from both methods show a good agreement with the cloud products from GOES. MMR retrieves cloud fractions on each individual model vertical levels by minimizing a cost function, while PF is an effective algorithm to treat those cloud fractions as different particles to gain recursive estimations of cloud distributions. To improve the PF method in terms of cloud retrieval application, this study perturbs the particles to better estimate cloud distributions. The advanced PF (with roughly 250 samples) is appropriate to ameliorate the problem of filter divergence caused by limited particles with better cloud retrievals efficiently.

Keywords Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)-Imager, Gridpoint Statistical Interpolation system (GSI), Cloud retrieval methods, Particle filter

1 引言

云对地气系统能量收支平衡具有调节作用, 云的时空变化和辐射性质是影响全球气候和各个尺度天气系统的重要因子。目前, 云顶气压和有效云量等云参数已被广泛应用于数值天气预报云初始化过程中 (Wu and Smith, 1992; Hu et al., 2006; Pangaud et al., 2009; 丁伟钰等, 2010; 刘瑞霞等, 2013; Zhu et al., 2016)。然而由于大气环流的作用, 云在水平和垂直方向瞬息万变, 在海洋和陆地的分布范围也有较大差异, 因此构建一个快速有效的实时云反演方法是提供实时云产品分析的关键 (Auligné et al., 2011)。当前极地轨道卫星和地球静止轨道卫星能联合提供高光谱分辨率和高水平分辨率的数据流 (董佩明等, 2008)。卫星测量到的云特性可以为有限的地面观测提供有益的补充, 进而实现云观测的连续性和全球性 (Rossow et al., 1993)。

有关卫星资料云反演研究, 国内外学者分别基于云图和卫星辐射率资料已经做了大量卓有成效的工作。关于云图识别, Goodman et al. (1998) 总结了三种基本的云检测方法: 阈值法、统计学方程以及辐射传输技术。王立志等 (1998) 和马芳等 (2007) 分别使用四通道和多通道的云图云检测方法对云量进行了识别。相对于云图资料, 卫星辐射率是更为原始的观测资料, 能提供细致的云量垂直分布信息。Chahine (1975) 提出了一种计算观测和模拟辐射率值之间的均方根误差来确定云顶高度、云量的方法。Menzel et al. (1983) 通过 CO₂ 切片法计算云顶气压和有效发射率, 进而来计算静止卫星云导风。Smith and Frey (1990) 通过 CO₂ 切片法计算云顶气压和有效发射率并对先进 TIROS 业务垂直探测器大气红外探测器进行云检测。官莉 (2007)

使用与 AIRS (the Advanced InfraRed Sounder) 同步的 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 二级云量产品来确定受云影响的视场。陈靖等 (2011) 基于 Goldberg et al. (2003) 的 AIRS 云检测方案, 结合我国的 GRAPES-三维变分系统和 AIRS 仪器特征, 分别对海洋、陆地的视场进行云检测。Huang et al. (2004) 提出了最小局地发射率方差方法, 通过计算背景场中特定气压层的云谱发射率的局地方差来得到单层云发射的最优估计。同样基于变分方法, Auligné et al. (2014a, 2014b) 和 Xu et al. (2013, 2015) 提出了多元极小残差 (Multivariate and Minimum Residual, 简称 MMR)。MMR 云检测方法通过构建代价函数, 采用极小化方法来拟合观测, 模拟得到各个模式层的云量参数。根据晴空下的辐射率和模拟的全天空条件下的辐射率值差异来确定通道是否被污染。Xu et al. (2015) 基于 WRFDA [Weather Research and Forecasting (WRF) model data assimilation system; Barker et al., 2012] 对 MMR 反演方法展开了系统地评估, 并验证了该方法的稳定性和合理性。近年来, 基于在状态空间传播的随机样本来近似得到概率密度函数的思想 [如粒子滤波 (Particle Filter, 简称 PF) 和集合卡尔曼滤波 (Kalman Filter, 简称 KF) 等] 已经被广泛应用到同化 (Hamill et al., 2011) 和反演大气波导 (盛峥等, 2012) 等多个气象领域。因此本文尝试把概率论中 PF 算法的思想应用到气象中的卫星资料的云反演领域中。本文基于格点统计插值分析系统 (Gridpoint Statistical Interpolation analysis system, 简称 GSI), 以 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)-Imager 资料为例, 采用 PF 算法进行了云反演数值试验, 初步评估了 PF 云反演方法的可行性及其与 MMR 云反演方法的异同。

2 反演方法、模式与数据

2.1 粒子滤波 (Particle Filter)

PF 方法 (Arulampalam et al., 2002) 的核心思想是基于蒙特卡洛方法, 即利用粒子样本来表示概率分布。粒子滤波方法通过从后验概率中抽取的随机状态粒子来表达其分布, 是一种顺序重要性采样方法。这里的样本即指粒子, 当样本数量 n 趋近于无穷大时可以逼近任何形式的概率密度分布。尽管算法中的概率分布只是对云真实分布的近似, 但由于其非参数化的特点, 有效避免了在处理非线性滤波问题时随机量必须满足高斯分布的条件制约, 进而能表达比高斯模型更广泛的分布, 也对变量参数的非线性特征有更强的建模能力。

在云反演中使用 PF 算法, 首先需要构建初始的云量廓线粒子。如图 1 所示, $c = c^1, c^2, \dots, c^n$ 代表一个视场中各个模式层的有效云覆盖比例 (cloud fraction), c^0 为晴空比例, n 为模式层数。针对某一个卫星视场, 所有模式层的云覆盖比例以及晴空区域所占比例之和应该为 1, 即 $c^1 + c^2 + \dots + c^n + c^0 = 1$ 。对于该视场的任意高度面, 云覆盖的区域

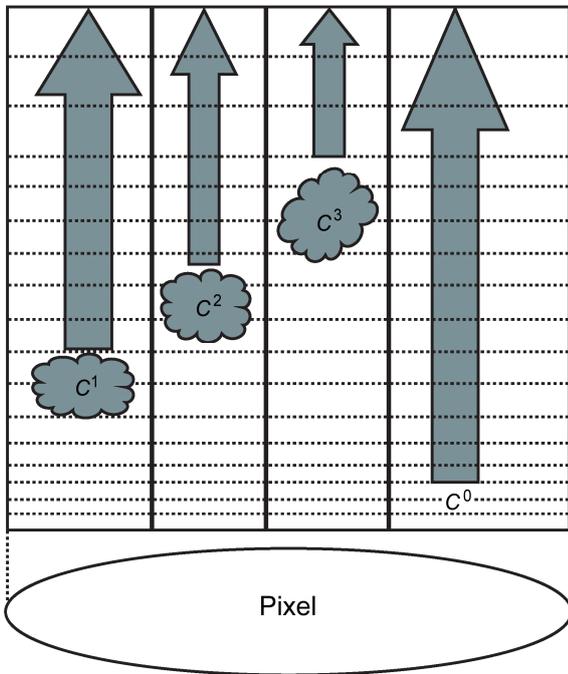


图 1 对于一个视场的示意图中 n 个模式层对应的云覆盖比例。 $c = c^1, c^2, \dots, c^n$; c^0 表示晴空比例

Fig. 1 The schematic representation of cloud retrievals on model levels for one pixel, where $c = c^1, c^2, \dots, c^n$ is the array of vertical cloud fractions for n models levels and c^0 is the fraction of clear sky

阻挡了来自该平面以下区域比例为 c^k 的向上辐射, 剩余的 $1 - c^k$ 的向上辐射有效。

在 PF 云反演过程中, 定义每个粒子为一组完整的 c^1, c^2, \dots, c^n 组合。首个时次反演所选用的粒子总数目为 $n + 1$ 。其中, 第一个粒子 $c^1 = 1$, 即所有云均在第一个模式层; 第二个粒子 $c^2 = 1$, 即所有云均在第二个模式层; 以此类推, 第 n 个粒子 $c^n = 1$, 而第 $n + 1$ 个粒子 $c^0 = 1$, 即完全晴空。某个模式层上的粒子 c^k 的后验概率为 $\exp(-(\frac{R_v^{obs} - R_v^k}{\sigma})^2)$, 因而粒子 c^k 的更新方程为

$$c^k = c^k \cdot \exp(-(\frac{R_v^{obs} - R_v^k}{\sigma})^2), \quad (1)$$

其中, $\forall k \in [1, n]$, σ 为观测误差, R_v^{obs} 为在波数 ν 处观测的辐射率, R_v^k 为假设在模式层第 k 层处放入黑体云时, 辐射传输模式在波数 ν 处模拟的辐射率值。 $\exp(-(\frac{R_v^{obs} - R_v^0}{\sigma})^2)$ 为晴空比例 c^0 的后验概率, 因此 c^0 的更新方程为

$$c^0 = c^0 \cdot \exp(-(\frac{R_v^{obs} - R_v^0}{\sigma})^2), \quad (2)$$

其中, R_v^0 是晴空条件下, 辐射传输模式计算得到的辐射率值。为了使各个模式层的云覆盖比例和晴空比例总和为 1, 在对粒子进行更新后, 对所有粒子采用如下公式进行归一化处理:

$$c^k = \frac{c^k}{\sum_{k=1}^n c^k R_v^k}, \quad (3)$$

其中, $\forall k \in [0, n]$ 。对于首个时次的反演 (同化的背景场中没有前一个时次的云反演结果, 即冷启动), 设置云等概率均匀地分布在各个模式层, 即

$$c^k = \frac{1}{n + 1}, \quad (4)$$

其中, $\forall k \in [0, n]$ 。试验其他时次的背景场由前一个时次反演结果经过模式动力模块中的平流扩散过程得到。

PF 反演方法是解决概率问题的有效手段, 然而该算法仍然存在着一些问题。其中最主要的问题是需要采用大量的样本数量才能很好地近似系统的后验概率密度。概率问题越复杂, 描述后验概率分布所需要的样本数量就越多, 算法的复杂程度就越高。另外, 重采样阶段会造成样本有效性和多样性的损失, 导致样本贫化现象的发生。如何保持粒子

的有效性和多样性,克服样本贫化,也是该算法研究重点。前面介绍的粒子滤波的云反演方法采用的粒子数目为模式的垂直层数加 1。试验中粒子样本数目为 40 (模式的层次),故粒子数为 41。粒子滤波容易出现滤波发散问题。针对 PF 反演方法有限粒子样本数的缺陷,进一步提出并设计了一种新的基于扰动的 PF 方法。即考虑在云反演过程中在背景场的云量廓线的基础上,通过上下移动和增大缩小云覆盖比例等扰动方法得到更多的粒子样本。其中, q 和 p 分别表示上下移动幅度和缩小或放大的系数,如:

$$c^k(p, q) = p \cdot c^{k \pm q}, \quad (5)$$

其中, $\forall k \in [1, n]$ 。因此扰动后的新样本数目为 $n+1+2p \cdot q$ 。本文试验中移动幅度 q 为上下 5 个模式层, p 为缩小到 50%、55%、...、95%,一直到扩大到 150% (以 5%为间隔)。增加样本后的粒子数目为 251。这种通过上下移动和缩放云量的粒子滤波方法,以下简称为 APF (Advanced Particle Filter)。

2.2 MMR 多元极小残差法

多元极小残差云检测方法 MMR (Auligné, 2014a, 2014b; Xu et al., 2015), 通过逐步拟合辐射率观测值来得到每个模式层 (假定 n 个模式层) 的有效云覆盖比例,其拟合的全天空辐射率值 R_v^{cloud} 为

$$R_v^{\text{cloud}}(c^0, c^1, c^2, \dots, c^n) = c^0 R_v^0 + \sum_{k=1}^n c^k R_v^k, \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} 0 \leq c^k \leq 1, \forall k \in [0, n] \\ c^0 + \sum_{k=1}^n c^k = 1 \end{cases}$$

可见,公式 (6) 是基于云参数 c^0, c^1, \dots, c^n 线性化的全天空辐射率观测算子。通过构建以下代价函数,采用极小化变分方法,逐步拟合辐射率观测值来得到 n 个模式层的云参数信息 $\mathbf{c} = c^1, c^2, \dots, c^n$:

$$J(\mathbf{c}^0, \mathbf{c}) = \frac{1}{2} \sum_v \left[\frac{R_v^{\text{cloud}} - R_v^{\text{obs}}}{R_v^0} \right]^2. \quad (7)$$

2.3 模式介绍

本文采用一个完全可压缩、非静力中尺度模式 WRF (Skamarock et al., 2008) 作为系统预报模式。该模式水平方向采用荒川 C 网格,垂直方向采用随地形的质量坐标。同化系统为格点统计插值 (Gridpoint Statistical Interpolation, 简称 GSI) 分析系统。该分析系统最初由美国国家海洋和大气局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric

Administration)、国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 在其早期业务运行的波谱统计插值分析系统的基础上研发的下一代区域及全球数值预报分析系统。GSI 分析系统于 2006 年 6 月和 2007 年 5 月分别被应用在 NOAA 的北美区域资料同化系统 (NDAS) 和全球资料同化系统 (GDAS) 中,并实现了业务化运行。GSI 数值模式自带辐射传输模式 CRTM (the Community Radiative Transfer Model; Han et al., 2006; Liu and Weng, 2006), 使用的版本为 CRTM2.2.3, 具有很好的开发性、兼容性和稳定性。由于 CRTM 模式是从 0.1~1013 hPa, 而预报模式是从 10~1000 hPa, 对于预报模式顶层以上 (<10 hPa) 及底层以下 (>1000 hPa), 用线性外推法,试验中采用辐射传输模式自带参数文件提供的参考值。对于臭氧廓线采用气候值,地面参数也取自背景场,地面温度取与 2 m 温度值相同。

2.4 数据介绍

美国 NOAA 静止轨道业务卫星系列 GOES, 采用双星运行体制。GOES-East 卫星和 GOES-West 卫星分别定点在 75°W 和 135°W 赤道上空,覆盖范围为 20°W~165°E, 占近地球 1/3 的面积。GOES 卫星有 5 个通道 (一个可见,四个红外), 5 个通道的中心波长分别为 0.62、3.9、6.5、10.6 和 13.3 μm 。通道 2、4、5 的分辨率为 4 km, 而通道 1 和 3 的分辨率为 8 km。本文使用美国国家航空航天局 NASA 兰利研究中心发布的 GOES 产品 (<http://www-angler.larc.nasa.gov> [2016-01-10]) 中的辐射率资料作为反演的输入资料。选取 2013 年 12 月 15 日 00:00 (协调世界时,下同) 至 2013 年 12 月 15 日 06:00 进行逐小时的云反演试验。云反演试验中 2013 年 12 月 15 日 00:00 的气象场由 1°×1°分辨率的 NCEP 再分析资料启动,背景场中云均匀分布在各个模式层上,初始的粒子数为 $n+1$ (包含由 2.1 节中介绍的各个模式层的单层云以及全晴空状态)。其他时次的气象场由前一个时刻的气象场经过 1 h 预报得到,云图背景信息由前一个时次反演结果经过模式的平流扩散过程得到,初始粒子构造方法同前。具体流程如图 2 所示。

3 反演试验与结果分析

红外辐射率观测资料的预处理、质量控制以及云反演试验均基于 GSI 系统展开。本文选取 2013 年 12 月 15 日 00:00 至 2013 年 12 月 15 日 06:00 7

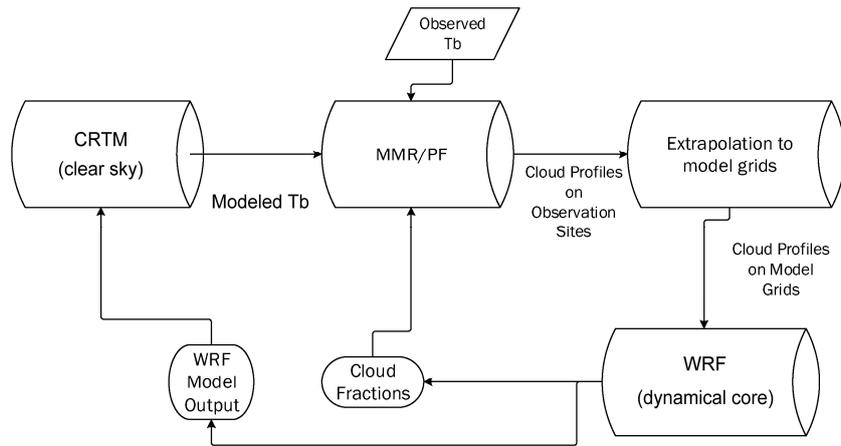


图 2 云反演流程图

Fig. 2 The flow chart for the cloud retrieval system

个时刻的不同类型的云天个例进行反演试验。试验的背景场由 WRF 模式预报得到，网格分辨率为 15 km，水平格点数为 415×325，模式垂直层数为 40 层，模式顶层气压为 50 hPa。Xu et al. (2013) 的研究结果发现大气辐射传输模式基于 WRF 模式的背景场对长波 CO₂ 波段的辐射值的模拟效果较好，同时 15 μm 长波波段通道的卫星观测也是云顶高度反演的主要通道。因而本文选取各种辐射率资料的长波波段通道（波长约 15 μm）来反演云参数。

使用 NASA 兰利研究中心发布的 1°×1° 的 GOES 云顶气压和云底气压作为参考场来检验反演的云图产品质量。尽管 NASA-GOES 云产品并不是云分布的实况，但是该产品是基于发展较为成熟的 CO₂ 切片法 (Menzel et al., 1983) 得到了的，且已被各大业务部门广泛使用。因而 NASA-GOES 云产品在一定程度上反应了检验时刻的云分布形势，为验证反演结果提供了参考依据。标记 NASA-GOES 云产品中存在云顶气压和云底气压记录的区域为有云区域为 1，标记本文试验反演的整层存在大于 1% 云覆盖比例的区域为 1。NASA-GOES 云产品和本文试验反演的云产品同时插值到 0.1°×0.1° 的网格上（有云标记为 1，晴空处为 0），再进行评分。

3.1 云掩膜结果

图 3 给出了 NASA-GOES 云产品和本文中 MMR 方法（或 PF 方法）反演云产品插值到统一网格点后的云掩膜 (Cloud mask)，其中红色为有云（标记为 1 的区域），晴空为白色（标记为 0 的区域）。通过逐点对比 NASA-GOES 云产品和本文试验反演的云掩膜进而得到最终统计结果。图 4 显示了基于

GOES-Imager 辐射率资料反演得到的云覆盖量相对于 GOES 云产品的反演正确 (Hits)，误报 (False alarms) 和漏报 (Misses) 的分布形势。可以发现，两种方法基于 GOES-Imager 辐射率资料反演的云产品和 GOES 反演的云产品在大部分地区保持较好的一致性 (Hits 在整个区域中占的分布最大)。MMR 方法辐射率资料得到的云产品高估了云的反演，而 PF 反演方法由于较少的粒子样本数，漏报区域较多。

图 4 为 MMR 方法、PF 方法以及 APF 方法基于 GOES-Imager 辐射率资料反演得到的云覆盖量相对于 GOES 云产品的反演正确 (Hits)，误报 (False alarms) 和漏报 (Misses) 的分布形势。由图 4a 和 b 可见，MMR 方法相对于 PF 方法，辐射率资料得到的云产品存在较多的误报区域。从图 4b、c 可以发现，而 PF 反演方法由于较少的粒子样本数，漏报区域较多。APF 方法基于 GOES-Imager 辐射率资料反演的云产品和 GOES 反演的云产品在大部分地区有很好的 consistency。APF 方法基于充足的粒子样本，较大程度改善了 PF 反演方法漏报现象，反演正确的区域增多（如椭圆区域）。

3.2 评分结果

图 5 为 2013 年 12 月 15 日 00:00 至 2013 年 12 月 15 日 06:00，3 种云反演方法基于 GOES-Imager 资料反演的云覆盖量相对于 GOES 云产品的 ETS 评分 (Equitable Threat Scores; Schaefer, 1990)。可见，MMR 方法反演产品得到的评分随着反演次数的增多，评分逐步提高；PF 方法在第一个时次的评分高于 MMR 方法，但是由于有限的样本数，经过多个时次后出现滤波发散问题，评分逐渐降低。

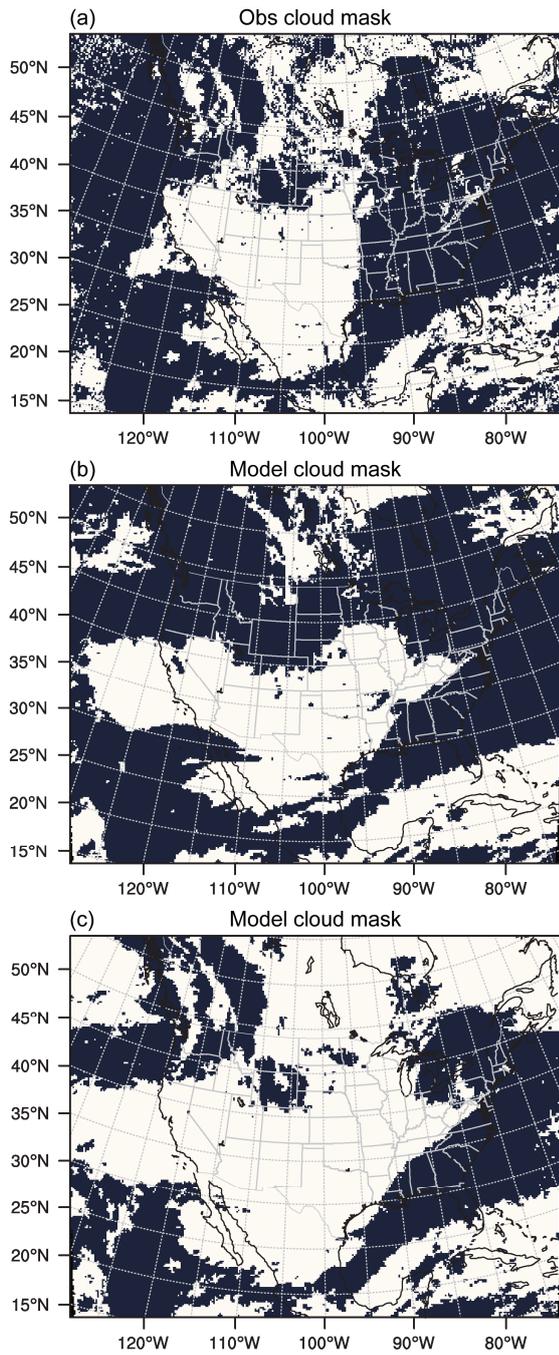


图3 2013年12月15日01:00不同云反演方法得到云掩膜结果:(a) NASA-GOES云产品参照场;(b) MMR反演方法;(c) PF反演方法
Fig. 3 Cloud masks from (a) the NASA GOES retrieval, (b) MMR (Multivariate and Minimum Residual), and (c) PF (Particle Filter) valid at 0100 UTC 15 December 2013

APF方法则通过增加粒子样本数目,在整个反演区间的ETS评分要普遍高于MMR反演方法和PF反演方法得到的ETS评分。

3.3 云量廓线结果

图6a显示的是生成图6b、c、d中剖面的剖面线

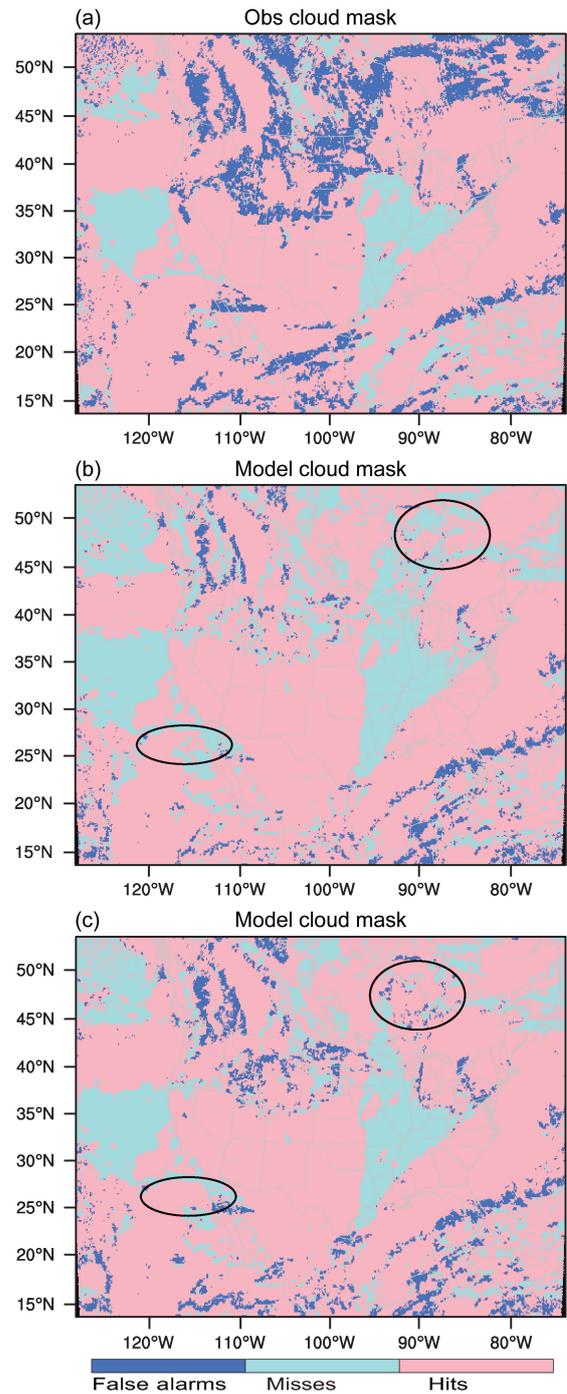


图4 2013年12月15日01:00各方法得到的误报、漏报以及反演正确的结果分布:(a) MMR方法;(b) PF方法;(c) APF方法。椭圆区域为APF较PF效果显著的区域

Fig. 4 The false alarms, misses, and hits for clear and cloudy event locations from (a) MMR (Multivariate and Minimum Residual), (b) PF (Particle Filter), and (c) APF (Advanced Particle Filter) valid at 0100 UTC 15 December 2013. The ellipse regions show the areas where the retrievals from APF are better than those from PF

和模式区域地形高度的示意图,图6b、c、d给出了2013年12月15日06:00 MMR、PF和APF这3

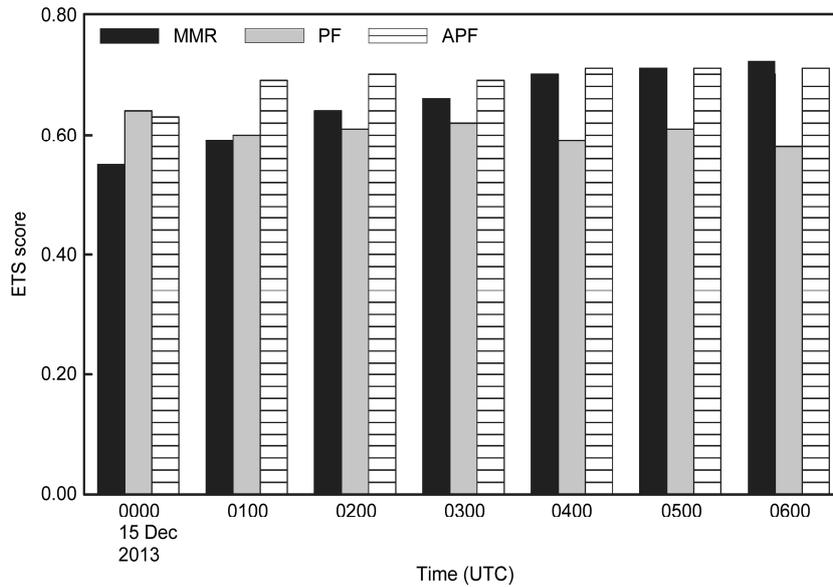


图 5 2013 年 12 月 15 日 00:00 至 06:00 相对于 GOES 云产品参考场的 ETS 评分

Fig. 5 ETS (Equitable Threat Scores) scores versus the NASA GOES retrievals from 0000 UTC to 0600 UTC 15 December 2013

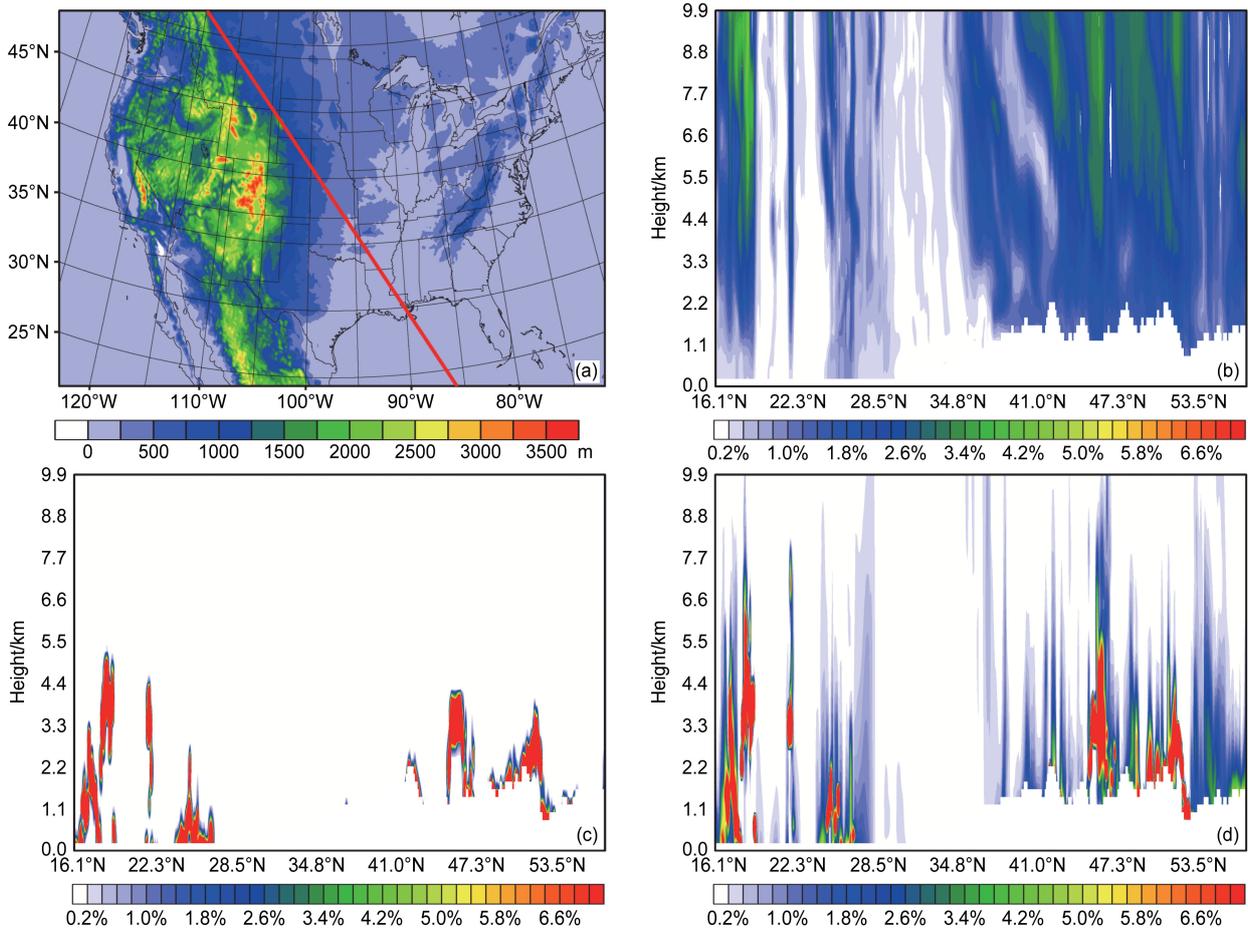


图 6 (a) 生成剖面的剖面线和模式区域地形高度示意图 (单位: m); 2013 年 12 月 15 日 06:00 (b) MMR 反演方法、(c) PF 反演方法; (d) APF 反演方法得到的云量廓线

Fig. 6 (a) Cross section line and terrain height of the model domain (units: m), and retrieved cloud fraction cross sections from (b) MMR (Multivariate and Minimum Residual) and (c) PF (Particle Filter), and (d) APF (Advanced Particle Filter) valid at 0600 UTC 15 December 2013

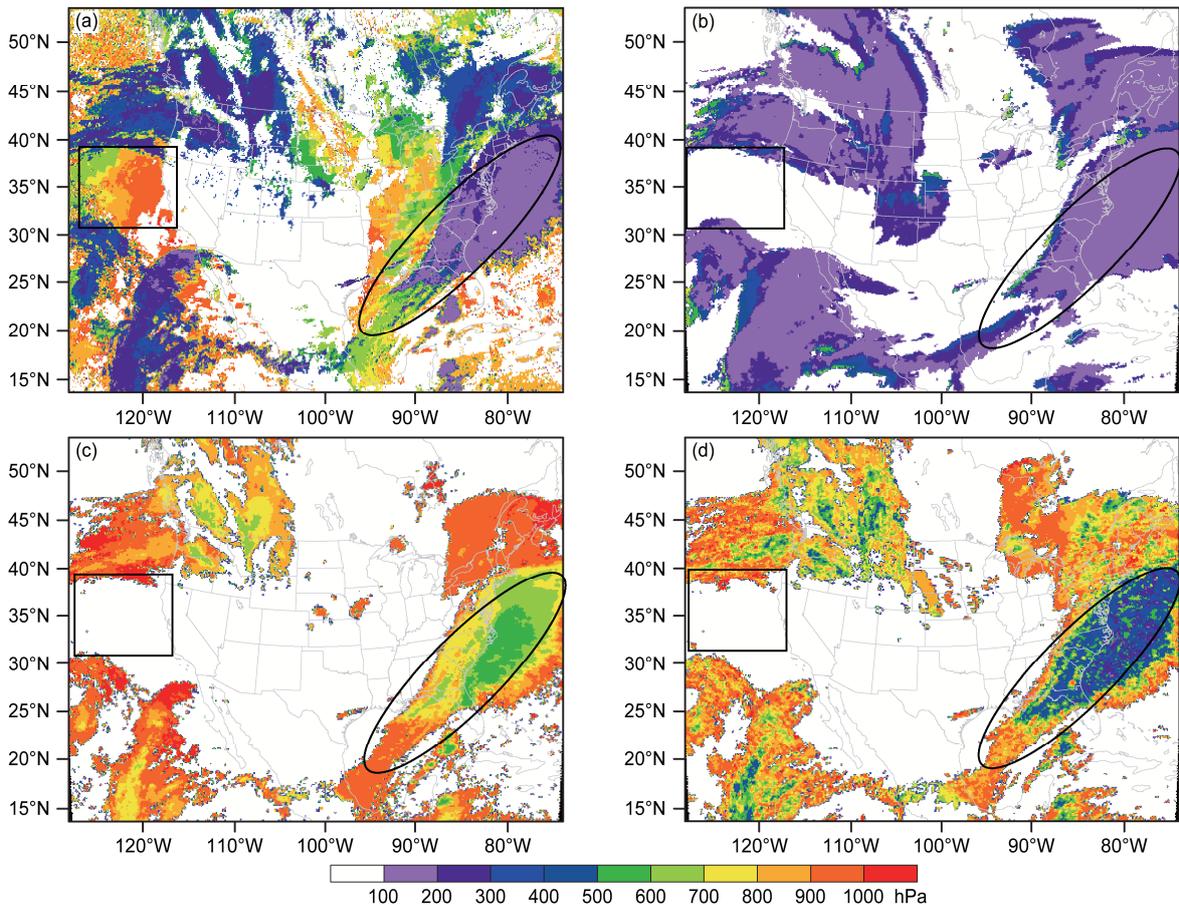


图7 在2013年12月15日06:00 (a) NASA的GOES云产品参照场、(b) MMR反演方法、(c) PF反演方法和(d) APF反演方法的云顶气压(单位: hPa)。方框和椭圆分别为低云和高云分布的主要区域

Fig. 7 The cloud top pressure at 0600 UTC 15 December 2013 from the (a) GOES NASA retrieval as a reference, (b) MMR (Multivariate and Minimum Residual), (c) PF (Particle Filter), and (d) APF (Advanced Particle Filter). The square regions and the ellipse regions show the main areas with low clouds and high clouds respectively

种方法云反演产品的剖面图。MMR方法的云反演产品普遍存在云顶过高的现象。PF反演方法相对于MMR反演方法则能更加清晰地反演出云量的廓线。随着有效样本数目的增加,APF反演方法相对于PF反演方法则能更好地捕捉微小的云信息,进而有效避免了滤波发散问题。

3.4 云顶气压结果

图7给出了2013年12月15日06:00 GOES云产品参考场以及分别利用MMR、PF以及APF方法反演得到的云顶气压。云顶气压由存在大于1%的云覆盖比例的最高模式层的气压值得到。由图7a可见,GOES云产品的在美国西部海域和东部海岸(如图中方框中所示)有较多低云(如950 hPa)。而MMR方法、PF方法以及APF方法反演的结果均存在漏报低云的现象,这与Auligné(2014a)检

测出低云较差的观点相一致。MMR反演方法利用大多数传感器辐射率资料得到的云反演产品与GOES云产品,整体对应较差,整场存在云顶过高的现象,这与Xu et al.(2015)基于GOES-Imager资料反演云高结果较差的结论相一致。PF反演方法相对于MMR反演方法反演的云顶气压更加接近参考场。由于粒子数目的增加,APF方法反演的云顶气压整体反演结果最好。另一方面,对于高云的反演(图中椭圆中所示),PF方法整体较差。APF反演方法对于高云的反演的云高要优于PF反演方法。

4 结论

基于GSI设计了PF云反演方法,并与MMR云反演方法进行了对比研究试验,结果表明:

(1)两种方法利用静止卫星GOES-Imager辐射

率资料反演得到云的分布和云顶高度和现有的 NASA 利用 CO₂ 切片法得到的 GOES 云产品较为一致。两种方法的反演产品的优点是云图信息是三维分布的, 相对于现有的大多数云产品能提供更全方位立体的云信息。其中粒子滤波 PF 方法通过近似云分布的后验概率来更新云背景, 相对于多元残差 MMR 反演方法, 其计算效率提高了 80%~90%, 为未来的准业务化运行奠定了良好基础。

(2) 针对 PF 反演方法样本匮乏的问题, 进一步提出并设计了 APF 反演方法, 通过扰动云覆盖比例值的方式来增加现有的粒子样本数目, 从而更好地接近后验概率密度, 有效避免粒子滤波发散问题。

(3) PF 方法相对于多元残差方法对于云顶气压的反演结果更加接近参考场。增加粒子样本后(样本数量约为 250), APF 方法反演的云顶气压整体反演结果最好。3 种方法均有漏报低云现象, 对于高云的反演, MMR 方法和 PF 方法整体较差, APF 方法效果最好。

参考文献 (References)

- Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. 2002. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50 (2): 174–188, doi:10.1109/78.978374.
- Auligné T, Lorenc A, Michel Y, et al. 2011. Toward a new cloud analysis and prediction system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92:207.
- Auligné T. 2014a. Multivariate minimum residual method for cloud retrieval. Part I: Theoretical aspects and simulated observation experiments [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (12): 4383–4398, doi:10.1175/MWR-D-13-00172.1.
- Auligné T. 2014b. Multivariate minimum residual method for cloud retrieval. Part II: Real observations experiments [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (12): 4399–4415, doi:10.1175/MWR-D-13-00173.1.
- Barker D, Huang X Y, Liu Z Q, et al. 2012. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (6): 831–843, doi:10.1175/BAMS-D-11-00167.1.
- Chahine M T. 1975. An analytical transformation for remote sensing of clear-column atmospheric temperature profiles [J]. *J. Atmos. Sci.*, 32 (10): 1946–1952, doi:10.1175/1520-0469(1975)032<1946:AATFRS>2.0.CO;2.
- 陈靖, 李刚, 张华. 2011. 云检测在高光谱大气红外探测器辐射率资料直接同化中的应用研究 [J]. *气象*, 37 (5): 555–563. Chen Jing, Li Gang, Zhang Hua. 2011. Application of cloud detection to assimilation of AIRS radiance data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37 (5): 555–563.
- 丁伟钰, 万齐林, 黄燕燕, 等. 2010. 有云环境下 MODIS 亮温资料的变分同化 II——对暴雨预报的影响 [J]. *热带气象学报*, 26 (1): 22–30. Ding Weiyu, Wan Qilin, Huang Yanyan, et al. 2010. MODIS brightness temperature data assimilation under cloudy conditions II—Impact on rainstorm forecasting [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 22–30, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.01.004.
- 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 2008. 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*, 36 (1): 1–7. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. 2008. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 36 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.001.
- Goldberg M D, Qu Y, McMillin L M, et al. 2003. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (2): 379–389, doi:10.1109/TGRS.2002.808307.
- Goodman A H, Henderson-Sellers A. Cloud detection and analysis: A review of recent progress [J]. *Atmospheric Research*, 1988, 21 (3): 203–228.
- 官莉. 2007. 星载红外高光谱资料的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 19. Guan Li. 2007. *The Application of Satellite Infrared Radiance Observations (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 19.
- Hamill T M, Whitaker J S, Fiorino M, et al. 2011. Global ensemble predictions of 2009's tropical cyclones initialized with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (2): 668–688, doi:10.1175/2010MWR3456.1.
- Han Y, van Delst P, Liu Q H, et al. 2006. JCSDA community radiative transfer model (CRTM)-version 1 [R]. NOAA Technical Report NESDIS No.122, 33pp.
- Hu M, Xue M, Gao J D, et al. 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (2): 699–721, doi:10.1175/MWR3093.1.
- Huang H L, Smith W L, Li J, et al. 2004. Minimum local emissivity variance retrieval of cloud altitude and effective spectral emissivity-simulation and initial verification [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (5): 795–809, doi:10.1175/2090.1.
- Liu Q H, Weng F Z. 2006. Advanced doubling-adding method for radiative transfer in planetary atmospheres [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (12): 3459–3465, doi:10.1175/JAS3808.1.
- 刘瑞霞, 徐祥德, 刘玉洁. 2013. JICA 综合观测与卫星数据在高原地区三维云和水汽场构建中的应用 [J]. *高原气象*, 32 (6): 1589–1596. Liu Ruixia, Xu Xiangde, Liu Yujie. 2013. Application of JICA comprehensive observation and satellite data in three-dimensional cloud and humidity construction over Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (6): 1589–1596, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00154.
- 马芳, 张强, 郭锐, 等. 2007. 多通道卫星云图云检测方法的研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 119–128. Ma Fang, Zhang Qiang, Guo Ni, et al. 2007. The study of cloud detection with multi-channel data of satellite [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 119–128, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.12.
- Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. 1983. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22 (3): 377–384, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<0377:ICMWWA>2.0.CO;2.
- Pangaud T, Fourrie N, Guidard V, et al. 2009. Assimilation of AIRS radiances affected by mid- to low-level clouds [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137

- (12): 4276–4292, doi:10.1175/2009MWR3020.1.
- Rossow W B, Walker A W, Garder L C. 1993. Comparison of ISCCP and other cloud amounts [J]. *J. Climate*, 6 (12): 2394–2418, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2394:COIAOC>2.0.CO;2.
- Schaefer J T. 1990. The critical success index as an indicator of warning skill [J]. *Wea. Forecasting*, 5 (4): 570–575, doi:10.1175/1520-0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2.
- 盛峥, 陈加清, 徐如海. 2012. 利用粒子滤波从雷达回波实时跟踪反演大气波导 [J]. *物理学报*, 61 (6): 069301. Sheng Zheng, Chen Jiaqing, Xu Ruhai. 2012. Tracking refractivity from radar clutter using particle filter [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 069301, doi:10.7498/aps.61.069301.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, doi:10.5065/D68S4MVH.
- Smith W L, Frey R. 1990. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder (HIS) observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29 (7): 658–662, doi:10.1175/1520-0450(1990)029<0658:OCADFH>2.0.CO;2.
- 王立志, 李俊, 周凤仙. 1998. GMS-5 四通道云图的自动分类及其在定量降水估算中的应用 [J]. *大气科学*, 22 (3): 371–378. Wang Lizhi, Li Jun, Zhou Fengxian. 1998. Cloud classification of GMS-5 data and its application in rainfall estimation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (3): 371–378, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.03.13.
- Wu X Q, Smith W L. 1992. Assimilation of ERBE data with a nonlinear programming technique to improve cloud-cover diagnostics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (9): 2009–2024, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<2009:AOEDWA>2.0.CO;2.
- Xu D M, Liu Z Q, Huang X Y, et al. 2013. Erratum to: Impact of assimilating IASI radiance observations on forecasts of two tropical cyclones [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 122 (3–4): 227, doi:10.1007/s00703-013-0295-z.
- Xu D M, Auligné T, Huang X Y. 2015. A validation of the multivariate and minimum residual method for cloud retrieval using radiance from multiple satellites [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (3): 349–362, doi:10.1007/s00376-014-3258-5.
- Zhu Y Q, Liu E, Mahajan R, et al. 2016. All-sky microwave radiance assimilation in NCEP's GSI analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144 (12): 4709–4735, doi:10.1175/MWR-D-15-0445.1.