

文章编号: 1004-4965(2010)01-0022-09

有云环境下 MODIS 亮温资料的变分同化 II

——对暴雨预报的影响

丁伟钰, 万齐林, 黄燕燕, 陈子通, 张诚忠

(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080)

摘 要: 卫星资料提供了大量关于云和雨的观测信息, 在暴雨预报中可发挥巨大的作用, 然而在数值模式资料同化中的应用水平仍然不高, 特别是红外辐射资料的应用。由于有云环境下辐射传输过程的模拟难度很大, 因此通常只同化晴空环境下的红外辐射资料。基于 GRAPES-3DVAR (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System, 全球/区域同化预报系统), 根据 RTTOV 辐射传输模式 (fast radiative transfer model for TOVS, 快速辐射传输模式) 的特点, 增加云水含量、云冰水含量和云量作为同化系统控制变量, 在改进辐射传输模式对红外资料模拟的同时, 利用红外资料调整初始云参数和大气参数。针对 2007 年 5 月 26 日南海季风爆发后广东地区的一次暴雨过程, 选取 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪) 传感器水汽 (第 27) 和云顶观测 (第 36) 通道进行了同化试验, 利用 WRF (Weather Research and Forecasting Model, 天气研究和预报模式) 进行了数值模拟, 结果表明同化 MODIS 资料, 可以改进初始场水汽和温度分布, 间接调整高空风场, 调整趋势符合卫星观测, 对短时降水预报有正面影响。

关 键 词: MODIS 亮温资料; 同化; 暴雨

中图分类号: P412.27

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.01.004

1 引 言

卫星资料在暴雨监测和预报中发挥了重要作用, 其高时空分辨率的探测数据, 为连续观测云系的形成、探索天气系统的发展与降水的关系等提供了机会^[1-2]。暴雨和强对流等天气系统空间尺度小、时间尺度短, 用常规资料很难观测到, 但是利用卫星资料不仅可以观测到大范围的云系分布, 而且可以观测到中小尺度云系的发生、发展、成熟和消亡的全过程^[3]。众所周知, 南方暴雨天气系统具有明显的对流性质, 中尺度对流系统活跃。在对 1998 年长江流域特大暴雨研究过程中, 师春香等^[4]根据 TBB 的时间-经度剖面图可清楚地追踪到 3 段梅雨期中的主要降水过程及其上的中尺度云团活动, 通过逐时的卫星云图及云顶亮温分析, 指出了梅雨锋上的 β 中尺度云团在地形及环境场影响下, 可以自

东向西移动。王立琨等^[5]利用 GMS 卫星的逐时红外云图展示了天气尺度的暴雨云带, 发现降雨云带上频繁产生中 α 尺度的暴雨云团造成 1998 年 7 月下旬长江中游连续特大暴雨。卫星资料在华南地区暴雨的研究工作中也发挥了巨大作用, 卫星的亮温资料分析表明^[6], 华南暴雨与中尺度对流云团的反复发生有关, 其发生具有“后消前长”的规律, 这可能与中尺度低压前部不断触发对流有关, 与长江流域对流云团的发生具有“前消后长”的规律不同。熊文兵等^[7]利用 TBB 资料和其他常规资料对 2005 年 6 月华南特大暴雨的研究证实了对流云系上 MCS 的不断生消是造成此次强降雨持续的直接原因。

尽管卫星资料在南方暴雨的研究中发挥了巨大的作用, 但卫星资料在数值模式中的应用的难度很大, 其主要原因就是南方地区云比较多, 且暴雨天气伴随着对流云团和强降水。云对红外辐射传输过程有直接影响, 辐射传输模式中对于有云环境下的

收稿日期: 2008-07-07; 修订日期: 2008-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 (2009CB421500); 广东省自然科学基金项目 (7035011) 共同资助

通讯作者: 丁伟钰, 男, 湖南省人, 副研究员, 硕士, 主要从事热带气象预报技术的研究。E-mail: wyding@grmc.gov.cn

红外辐射过程的模拟难度比较大^[8], 大气中云参数的分布也很难获取。以往大量研究工作侧重于晴空环境下卫星资料或者受云影响较小的微波资料的同化, 例如 Andersson 等^[9]在三维和四维变分同化系统中只同化了没有云情况下的辐射资料, 改进了风场的预报。Derber 等^[10]只同化了晴空条件下 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder, TIROS 业务垂直探测仪) 辐射资料, 提高了模式的预报技巧。Kidder 等^[11]在台风过程的同化试验中同化了 AMSU 微波资料。然而卫星微波资料比红外资料少, 极轨卫星和静止卫星上都携带有红外观测仪器, 只同化微波资料无法满足数值预报业务模式的需要。另外红外通道和微波通道各有侧重, 红外通道观测的大量云的信息可以为预报提供有益的参考。

目前, 越来越多的研究开始注重于全天气条件下的卫星资料同化。有云环境下, 同化系统的观测算子是否可以模拟出红外通道的亮温, 成为红外通道是否可以被同化的关键。Chevallier 等^[12]利用数值模式输出的云物理量信息及 RTTOV 快速辐射传输模式成功模拟了有云条件下静止卫星 11 μm 通道亮温。丁伟钰等^[13]利用数值模式模拟的三维云参数和 RTTOV 辐射传输模式, 对“珍珠”台风的 HIRS/3 红外亮温进行模拟, 结果表明, 结合三维云特征的模拟量, RTTOV 模式可较好地模拟出 HIRS/3 部分通道的亮温。这些研究工作表明, 红外辐射资料在有云及极端天气条件下具有潜在的应用前景。

近年来针对全天候条件下卫星资料同化已受到越来越多的重视, 2005 年在美国召开了数值天气预报模式中卫星观测的云和降水同化的国际会议, Ronald 等^[14]介绍了针对全天候条件下卫星资料同化, 在卫星资料、辐射传输模式、同化系统和数值模式等多方面进展情况。Thomas 等^[15]利用辐射传输模式、气体消光模式和云模式构造全天气条件下的辐射资料同化的观测算子, 由云模式来提供辐射传输模式需要的云物理量信息, 通过四维变分同化系统, 对 GOES-9 亮温进行同化, 改进了陆地层状云系统的模拟。在国内, 丁伟钰等^[16]在 GRAPES-3DVAR 基础上将云参数作为常数对 HIRS 资料进行同化, 结果表明这些依照常规同化方法无法被同化的红外资料信息, 可引入到数值模式之中, 对短时降水预报有正面影响。

美国 EOS/MODIS 仪器具有观测通道多、频谱宽的特点, 其反演资料在资料同化领域已经发挥了

重要作用^[17], 但有云环境下其亮温资料的直接同化工作尚没有开展。本文的前期工作^[18]在 GRAPES-3DVAR 同化系统基础上, 增加云水含量、云冰水含量和云量作为同化系统控制变量, 在晴空、完全云覆盖和部分云覆盖等情况下, 对 MODIS 仪器的 16 个气象通道分别进行了理想同化试验, 证实了在红外辐射资料同化过程中将云参数和大气参数同时作为同化系统控制变量, 可以改进观测算子的正演模拟, 利用红外资料调整云参数和常规气象要素场。本文选取 2007 年 5 月季风爆发后, 在南海季风和低压槽的共同作用下的广东地区暴雨过程。在此个例中, 背景场对水汽和对流层高层风场的描述与卫星观测相比存在一定偏差, 本文通过对 MODIS 部分通道的同化, 分析其对大气参数和云参数的调整, 及对华南暴雨预报的影响。

2 天气过程分析

2007 年 5 月 25—27 日广东省连续出现了范围小、强度大的降水, 有些地方还出现 8 级以上的雷雨大风。其中 25 日夜间强降水出现在佛冈和从化, 雨量均达到 100 mm 以上; 26 日强降水主要出现在广州的花都、从化和黄埔区以及粤西的高州、信宜一带, 清远和肇庆部分地区也出现了大雨到暴雨, 黄埔区降水量达到 173.4 mm, 花都、高州等地雨量也超过 100 mm; 27 日强降水主要出现在广州的番禺、越秀区和顺德、中山、珠海一带, 番禺有多个镇雨量超过 100 mm, 灵山达 150.3 mm。

2007 年季风监测^[19]表明从 5 月 20 日开始, 西太平洋副高东撤, 来自孟加拉湾的暖湿气流从低层由南向北推进, 高层南亚高压脊线北抬, 南海夏季风建立。这次降水过程正值南海季风爆发期间, 广东省区域内大气层结非常不稳定, 从 26 日 00 时(世界时, 下同)FY2C 卫星 IR1 通道云图和云导风分布图(图 1a, 见 25 页)可看出, 广东省受南海季风的西南气流控制, 在广东中东部和北部有对流系统发展, 之后对流系统继续在广东地区停留并发展, 从 06 时卫星云图(图 1b)来看, 对流系统的范围进一步扩大, 广东大部分都在云团控制之下, 对流层高层有明显反气旋环流存在, 这加强了该层的辐散流出, 有利于暴雨出现, 这种环流系统在华南前汛期暴雨系统中较为常见。并且从 FY2C 卫星反演的相对湿度分布(图 1c)可以看出, 广东地区是水汽大值区。NCEP 再分析资料表明 500 hPa 亚洲中高纬度以高

空槽东移为主,中南半岛上空的南支槽分裂东移影响华南,广东处于副热带高压边缘的西南流场之中,主要受偏西流场控制,850 hPa 华中到贵州南部的切变线存在并南压影响华南,地面受锋面低槽影响。由于南海季风和低压槽的共同作用,导致了此次强降水过程。但是 NCEP 资料没有反映出广东地区高层反气旋性环流,且从 500 hPa 比湿分布来看,其描述的湿度中心位置相对于卫星云图偏向东北方(图 2a),这可能与资料的网格分辨率较粗有关。

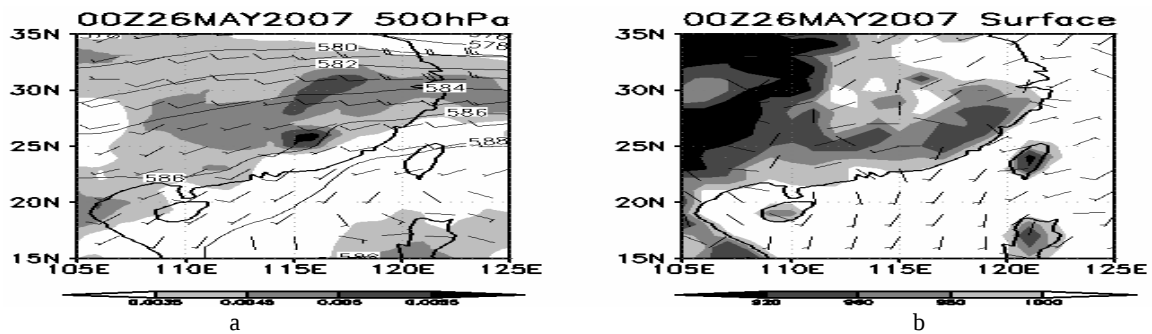


图 2 2007 年 5 月 26 日 00 时 NCEP 再分析场 500 hPa 高度场(等值线)、比湿(阴影)和风场(a)及地面气压(阴影)和风场(b)

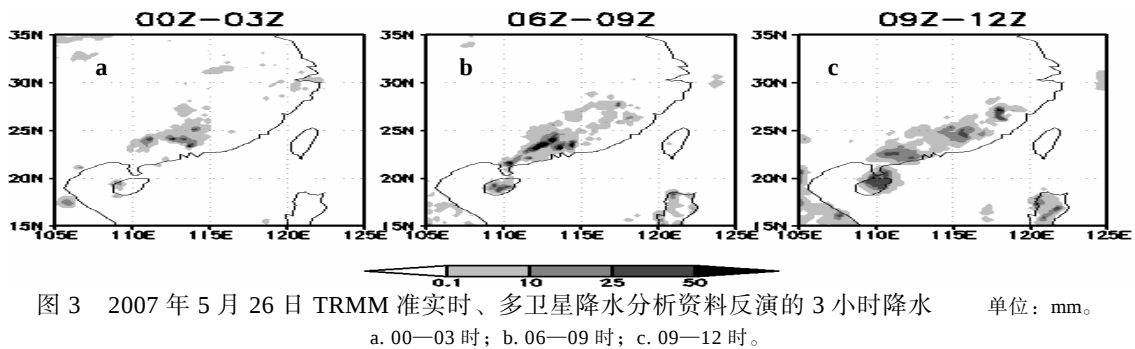


图 3 2007 年 5 月 26 日 TRMM 准实时、多卫星降水分析资料反演的 3 小时降水 单位: mm。
a. 00—03 时; b. 06—09 时; c. 09—12 时。

3 资料及方案介绍

MODIS 仪器有 36 个离散光谱波段,光谱范围从 0.4 (可见光)~14.4 (热红外) μm ,可以对地球环境、海洋表面特性、大气中的云、辐射和气溶胶以及辐射平衡等进行综合观测。2007 年 5 月 26 日 05 时 40 分 EOS-PM 卫星观测到广东地区的暴雨(图 4)。根据文献[18]理想试验的结果,有云情况下,同化第 27 通道(6.535~6.895 μm)和 36 通道(14.085~14.385 μm)亮温资料对背景场的调整最大。波长 6~7 μm 为水汽发射辐射通道,14 μm 附近波段为云顶观测通道,这些波段在气象领域有广泛的应用价值。故本文同化了第 27 和 36 通道的亮温,以检验本文方案的同化效果。

从 TRMM 准实时、多卫星降水分析资料反演的降水分布(图 3)发现,降水分布与卫星云图有较好对应关系。26 日 00—03 时降水主要集中于粤北和中部地区,06—09 时广东大部都有降水,降水中心位于珠江三角洲和广东西北部地区,09 时降水开始减弱,雨带向东北移动并减弱。从卫星反演的降水时空分布来看,这次过程历时较短、降水集中且强度大。

文中采用 MODIS 资料来源于国家卫星中心接收的美国新一代地球观测系统 EOS-PM (AQUA) 卫星,资料为 1 km 分辨率的 1B 数据包,其中第 27 和 36 通道为发射率波段,白天和黑夜都有观测数据。MODIS 观测资料单位为辐射亮度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{Sr})$),本文根据普朗克公式将其转换为亮温(单位: K)。文中涉及的 MODIS 辐射资料均为亮温。

采用 15 km 分辨率的 WRF 模式对此次过程进行模拟,垂直方向 31 层,云微物理参数化使用 WRF Single-Moment 5-class scheme,该方案考虑水汽、云水、雨水、云冰及雪,且水、冰可以共存,采用该方案可提供云水含量、云冰、云量的三维预报场。NCEP 再分析资料作为初始场和边界,资料分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。积分时间开始于 2007 年 5 月 26 日 00

时,积分 6 小时后以 06 时的预报场作为同化的背景场。背景场的物理量包括: 温度、比湿、 U 、 V 风场、云水含量、云冰和云量、地表类型、地表温度、地面气压、云顶气压、总云量及 2 米的温度、比湿

和风。云顶和云底位置的确定及总云量的计算参考文献[13]。同化试验对 05 时 40 分的 MODIS 资料进行同化, 将分析场的增量插值叠加到背景场中, 通过 WRF 模式继续积分, 对降水过程进行模拟。

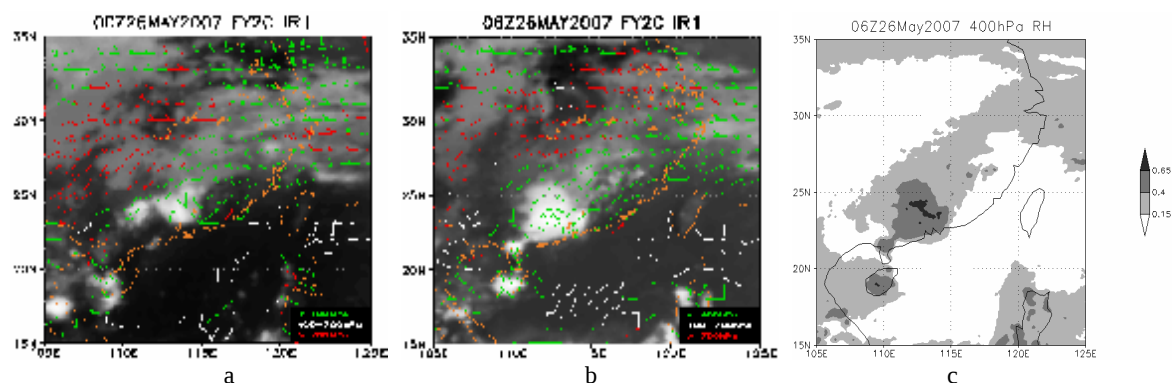


图 1 26 日 00 时 (a) 和 06 时 (b) FY2C 卫星 IR1 通道云图和云导风及 FY2C 卫星反演 400 hPa 相对湿度 (c)

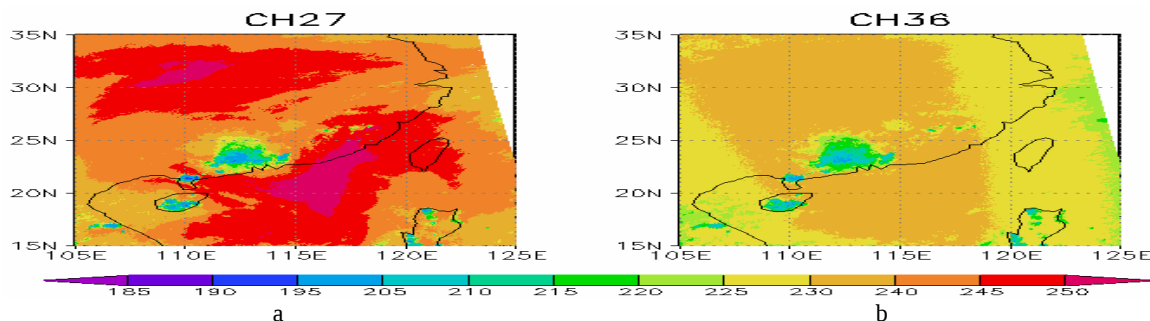


图 4 26 日 05 时 40 分 MODIS 第 27 (a) 和 36 (b) 通道观测亮温 单位: K。

由于同化的背景场采用 WRF 模式积分 6 小时后的预报场, 与卫星云图相比存在一定的偏差, 其中最显著的差别在于模式 06 时的预报场, 广东地区降水开始明显减弱, 雨带向东北方向发展。从背景场 400 hPa 比湿分布 (图 5a) 上可看出, 在福建和江西交界处有一个明显的水汽中心, 而广东地区水汽相对减小, 从 400 hPa 云冰水含量 (图 5b) 和云量 (图 5c) 分布也可以看出这个特点, 广东地区云量都低于 0.8, 明显小于福建和江西交界处的云量。低层的比湿、云水含量和云量分布也具有类似特点 (图 5e~5g), 在福建一带有较强的水汽和较多的云覆盖。从 FY2C 卫星反演的相对湿度分布 (图 1c) 来看, 广东地区仍然是水汽大值区, 且相对湿度分布图和该时刻 FY2C 红外通道云图 (图 1b) 及 MODIS 红外通道亮温分布 (图 4) 都显示出 06 时降水主体仍在广东地区。对比表明, 06 时模式模拟的广东地区的水汽、云冰水含量和云量均偏小, 而对福建附近的模拟偏大。背景场与卫星观测的另一个差别在于广东地区对流层高层反气旋性环流, 卫

星云导风资料反映出 06 时相对于 00 时该区域反气旋性环流加强, 而 WRF 模式模拟的背景场没有反映出反气旋环流的存在 (图 5d)。

前面的理想试验发现在 GRAPES-3DVAR 同化系统基础上增加云水含量、云冰水含量和云量作为同化系统控制变量, 可以利用红外资料调整云参数和常规气象要素场, 提高资料的利用率。本文利用中尺度模式模拟的温度、比湿、 U 、 V 风场、云水含量、云冰水含量和云量作为下一个时次同化的背景场, 通过改进的 GRAPES-3DVAR 同化系统, 对 MODIS 亮温资料进行了同化。GRAPES-3DVAR 资料时间窗定义为正负 30 分钟, 水平分辨率为 15 km, 同化 26 日 05 时 40 分的 MODIS 资料。同化方案定义 MODIS 资料的观测误差为 2.5 K, 背景场误差采用 NMC (美国国家气象中心) 方法统计形成, 云水含量、云冰和云量的背景场误差定义为其数值的 20%。对 MODIS 资料的质量进行了控制, 当背景场模拟的亮温与实际亮温之差大于 5 倍观测误差时, 将剔除这些观测资料。针对 2007 年 5 月 26 日广东

的暴雨过程进行控制试验和同化试验, 其中控制试验没有同化任何资料, 同化试验同化 1 次 05 时 40 分的 MODIS 第 27 和 36 通道亮温资料。图 6 给出

了三维变分同化系统代价函数及其梯度随迭代步数变化的情况, 代价函数随着迭代步数增加而减小, 最终满足收敛条件, 完成资料同化过程。

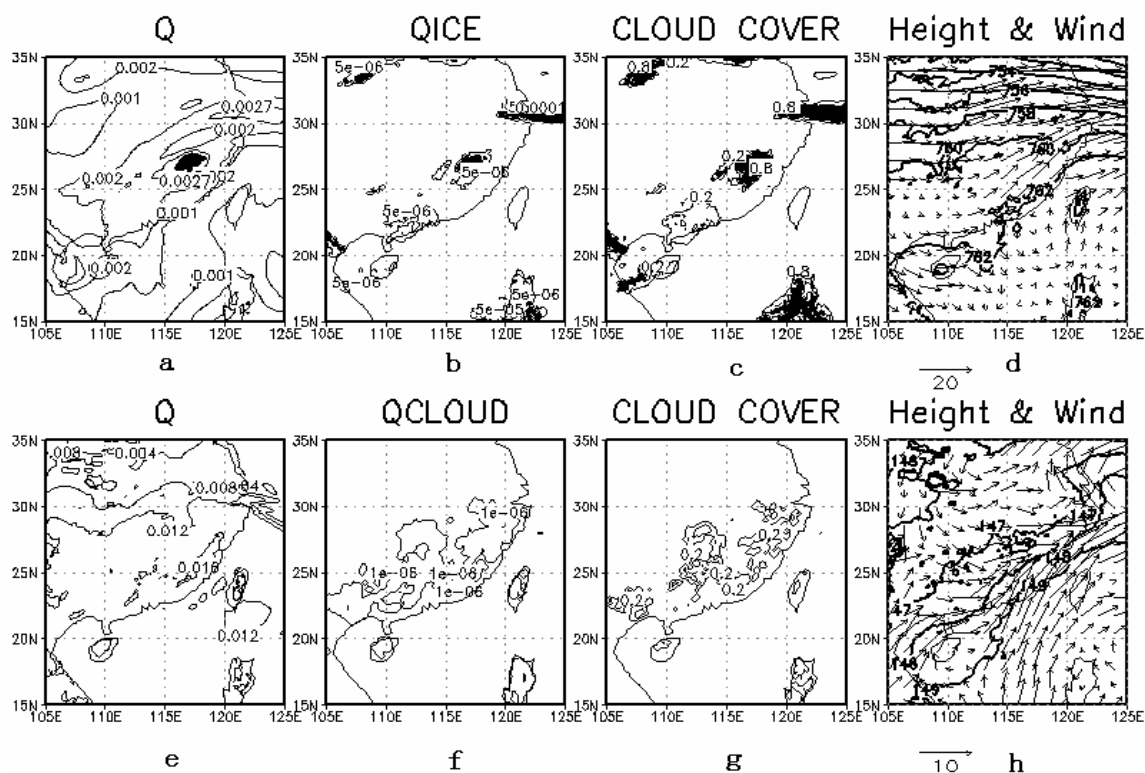


图 5 26 日 06 时背景场 400 hPa(上图)和 850 hPa(下图)的比湿(a、e)、云冰水含量(b)、云水含量(f)、云量(c、g)、位势高度和风场(d、h) 比湿单位: kg/kg, 温度单位: K, 云水含量单位: kg/kg, 云冰水含量单位: kg/kg, 高度场单位: 位势什米, 风场单位: m/s。

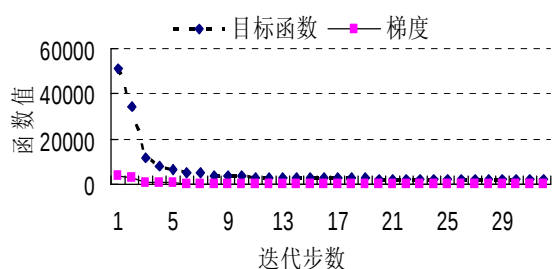


图 6 最小化过程中目标函数值及其梯度数值变化

4 结果分析

图 7 为同化后分析场相对于背景场的增量, 在 400 ~ 300 hPa 附近由北向南比湿的变化大体上呈“— + —”变化, 温度呈“+ — +”变化, 在华南地区以粤北为中心比湿明显增加, 温度降低, 同时伴随着云冰水含量和云量的增加, 而福建一带高层云量和云冰水含量减小。由于背景场在广东地区的水汽、云冰水含量和云量偏小, 福建附近云量

偏多, 因此分析场在广东和福建一带的高层比湿和云量的变化符合卫星观测事实。分析场在 30 °N 以北的大陆地区以及 20 °N 以南的海洋上比湿减小、温度升高, 对比 MODIS 仪器观测资料 (图 4) 发现这些区域卫星观测亮温较高, 温度和比湿的调整将有利于分析场同区域模拟亮温的增加。

低层比湿的变化趋势与高层类似, 广东地区 850 hPa 附近比湿升高的范围和强度相对于高层有所减弱 (图 7f)。850 hPa 附近温度变化从北向南大体呈负-正趋势, 但温度变化的值都很小 (图 7g)。广东地区 850 hPa 附近云水含量 (图 7i) 和云量 (图 7j) 整体呈减小趋势, 而且变化值也比较小。

由于分析场气温相对于背景场进行了调整, 根据 GRAPES-3DVAR 系统中质量场和风场的平衡关系, 风场也进行相应调整。分析场在 400 ~ 300 hPa 附近广东上空出现明显的反气旋性环流 (图 7c), 位置和强度与 FY2C 卫星观测的 400 hPa 以上的云导风相对应 (图 1b), 而背景场对流层高层在广东

地区没有明显的反气旋环流。分析场对流层低层在广东地区有弱气旋性环流增量(图 7h), 而背景场低层的气旋性环流不明显(图 5h)。这说明在广东地区分析场相对于背景场低层辐合、高层辐散的趋势加强。

分析场相对于背景场的变化表明, 有云环境下同化 MODIS 资料对高层温度、比湿、风场、云冰水含量和云量的影响较大, 调整趋势符合卫星观测事实。低层由于受到云的影响, 故同化 MODIS 资料对其影响较小, 随着云量的减少, 同化对低层的影响逐渐增大。晴空环境下同化 MODIS 资料可以调整低层的温度、比湿和风场。

分析场对大气参数和云参数进行了调整, 必然对模拟亮温产生影响, 根据变分同化理论, 同化过程通过最小化目标函数, 可以缩小模拟亮温与观测亮温的差别, 那么本文中同化的第 27、36 通道是否符合这个规律呢? 通过同化观测算子——RTTOV 辐射传输模式分别计算出背景场和分析场反演的亮温, 可以比较同化前后模拟亮温的差别, 检验同化结果的合理性。图 8 是第 27 和 36 通道同化前后模拟亮温与观测亮温的对比, 图中实线为趋势线。同化前背景场反演的第 27、36 通道亮温整体偏低, 同化后分析场与观测更为接近。这表明同化后第 27 和 36 通道的模拟亮温均有不同程度的改进, 证实了

分析场温度、比湿和云参数的调整符合辐射传输模式的物理规律。

为了比较同化 MODIS 资料后对模拟结果的影响, 设计了控制试验和同化试验, 两次试验都从 26 日 06 时开始积分, 其中控制试验没有同化任何观测资料, 同化试验将分析场增量插值叠加到背景场中。由于此次降水过程时间短, 降水比较集中, 因此只对比了两次试验的 26 日 12 时以前的降水模拟情况(图 9)。控制试验模拟出广东至福建一带有明显的雨带存在, 09 时后降水开始减弱, 从持续时间来看与实况(图 3)比较吻合, 但没能反映出广东地区的强降水中心。同化试验模拟的雨带范围与控制试验基本一致, 并且较好地预报出了广东的强降水中心, 降水强度与实况比较一致。

同化 MODIS 资料后, 可以改善广东地区的降水强度的模拟, 那么分析场物理量的调整是如何影响到模式对降水的模拟呢? 从分析场的变化(图 7)可以看出部分线索, 广东中、北部对流层低层到高层的比湿明显增加, 高层云冰水含量增加, 充沛的水汽条件是造成广东中、北部强降水的可能原因之一。高层温度降低、低层温度略有升高, 这种温度配置将导致该地区大气不稳定性增加, 也是造成强降水的可能原因之一。风场高层辐散和低层辐合趋势加强将有利于广东地区对流系统的发展。

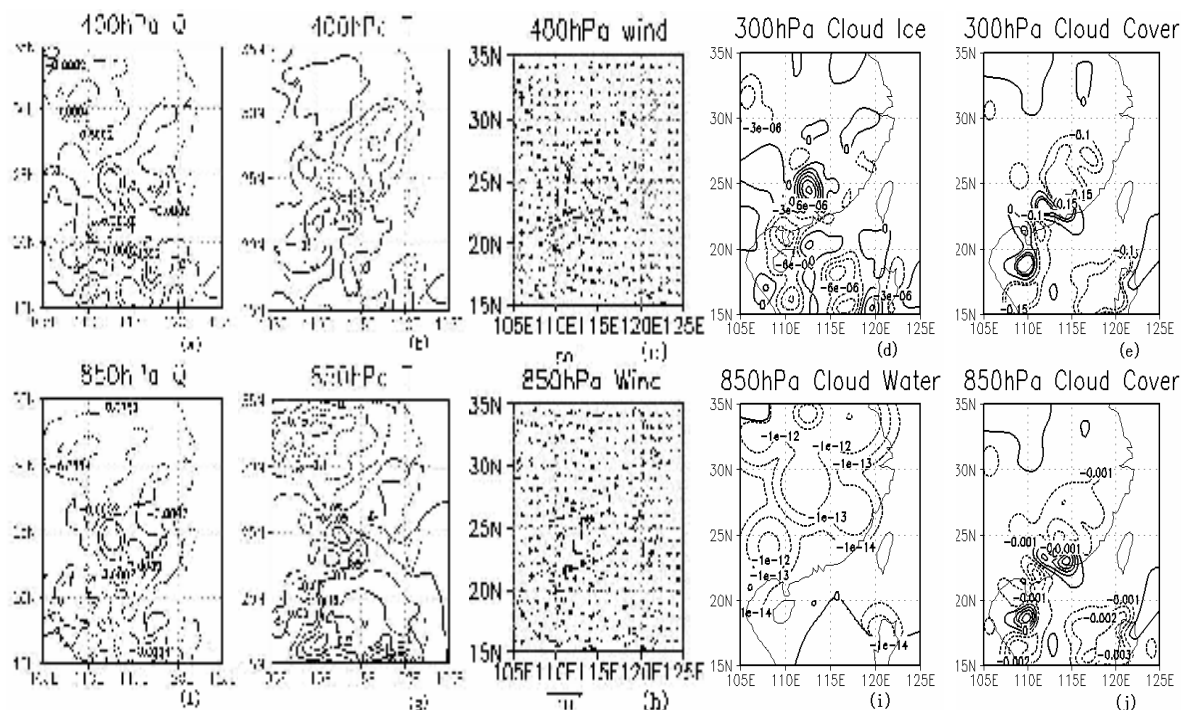


图 7 分析场的 400 hPa、300 hPa (上图) 和 850 hPa (下图) 的比湿(a、f)、温度(b、g)、风场(c、h)、云冰水含量(d)、云水含量(i)、云量(e、j)的增量场 单位同图 5。

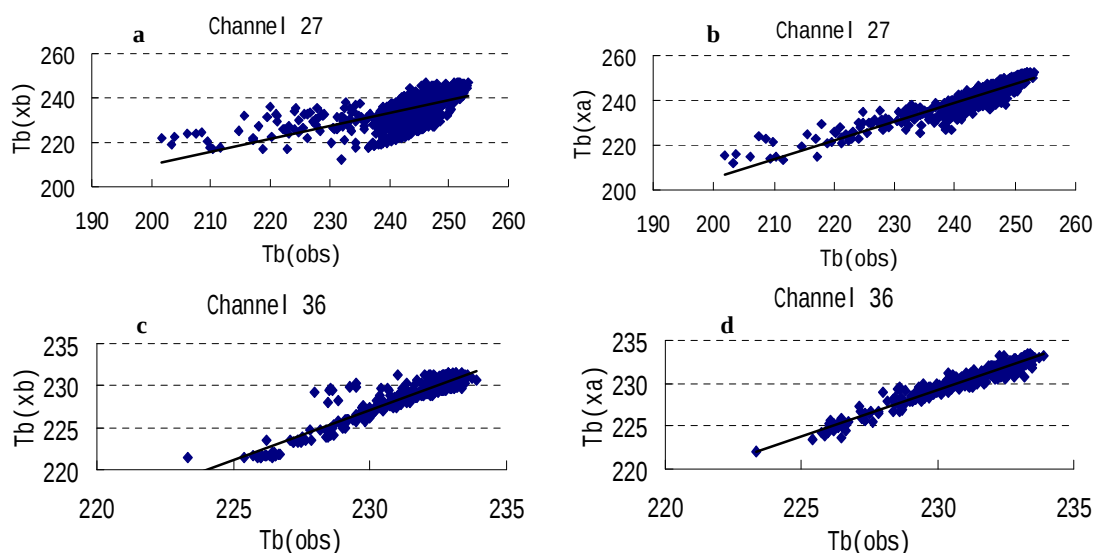


图8 背景场(左图)和分析场(右图)模拟的MODIS第27通道(a、b)和36通道(c、d)的亮温与观测亮温的比较 实线为趋势线。

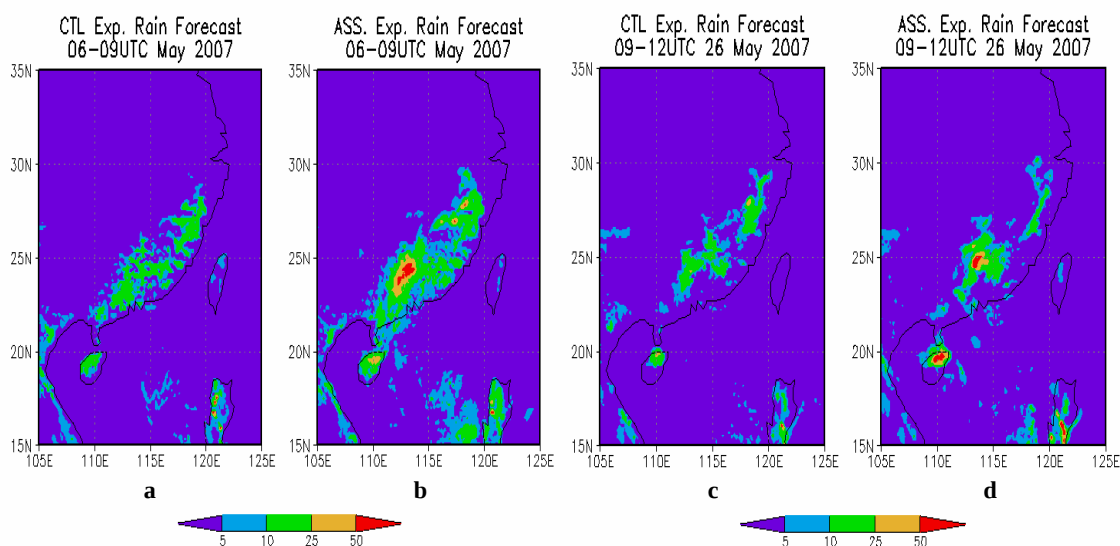


图9 控制试验和同化试验模拟的3小时累积降水

单位: mm。

a. 控制试验 06—09 时; b. 同化试验 06—09 时; c. 控制试验 09—12 时; d. 同化试验 09—12 时。

为了进一步对分析场造成强降水的原因进行分析, 计算了同化前后大气可降水和假相当位温 q_{se} 。同化前广东至福建一带有一片大气可降水超过 3 cm 的区域, 但广东地区没有明显可降水中心(图 10a)。同化后大气可降水相对于同化前的增加量(图 10b), 广东到福建一带大气可降水增加, 其中心位置在广东中、北部地区, 与卫星观测的强降水中心位置一致(图 3), 最大值大于 8 cm。这表明分析场在广东中、北部地区有更强的水汽供给。沿雨带方向从 (20°N, 108°E) 至 (30°N, 120°E) 作 q_{se} 增量的垂直剖面图(图 10c), 在 112°E 附近 q_{se} 高层减小、中低层增加, 这将导致该区域对流不稳定

性增加, 而其东北面区域高层 q_{se} 明显增加、低层变化不明显, 这种配置导致该区域稳定性增加。 q_{se} 变化所反映出来对流稳定性变化特征与同化试验暴雨区域有很好的对应关系, 表明同化 MODIS 资料后可以导致广东中、北部地区对流不稳定性增加。

以上分析表明同化 MODIS 资料后, 温度、比湿、风场、云水含量、云冰水含量和云量的变化不仅可以使得分析场模拟亮温更接近卫星观测实况, 而且可以改善背景场中暴雨区域水汽供给和对流稳定性。与控制试验相比, 同化试验可以较好地预报出广东地区暴雨的位置和强度。

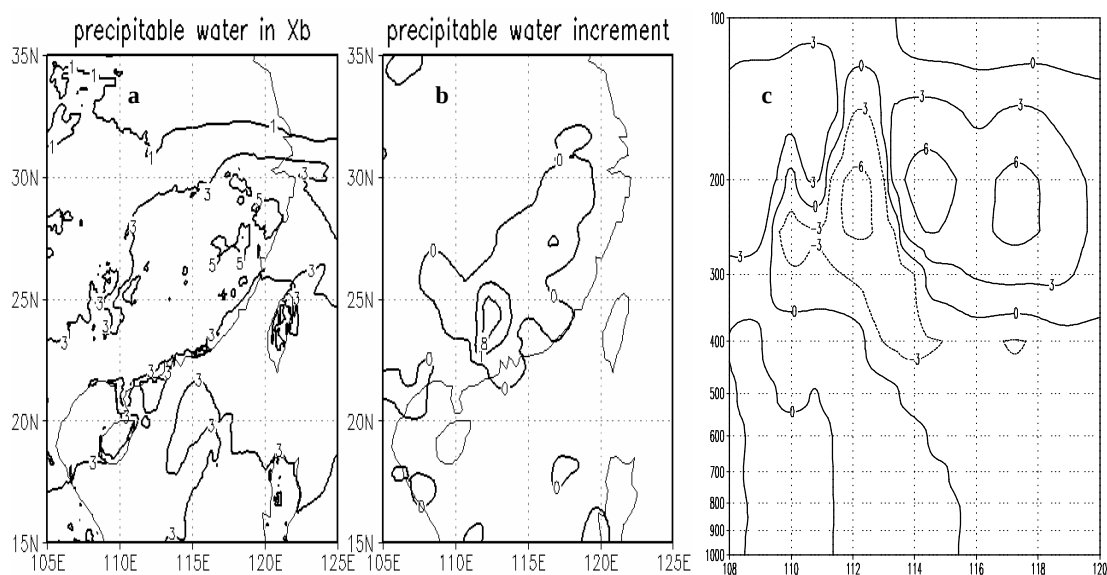


图 10 背景场 (a) 和分析场 (b) 的大气可降水 (单位: cm) 增量分布及假相当位温增量沿 (20°N, 108°E) ~ (30°N, 120°E) 的垂直剖面 (c, 单位: K)

5 结论与讨论

云对红外通道的辐射传输过程有十分重要的影响, 在同化系统的辐射传输模式中考虑云参数的影响, 可以改进卫星红外通道的模拟, 提高同化系统卫星资料同化观测算子的准确性。在同化系统中将云参数作为同化系统控制变量, 同化 MODIS 辐射亮温资料改善了分析和预报结果。本文在 GRAPES-3DVAR 基础上增加云水含量、云冰水含量和云量来改进 RTTOV 辐射传输模式的模拟, 并将这些云参数作为同化系统控制变量, 定义了背景场和观测资料的误差矩阵以及观测资料的质量控制方案。选取 2007 年 5 月 26 日在南海季风环流背景之下的广东暴雨过程, 采用模式 6 小时的预报场作为背景场, 对水汽和对流层高层风场的描述存在一定偏差。选取 MODIS 第 27 和 36 通道亮温资料进行同化, 利用 WRF 模式进行控制和同化试验。

(1) 同化 MODIS 资料可以改进初始场的水汽和温度分布, 反映出降水中心区域水汽供给和稳定度分布特征, 风场的调整显示出对流层高层辐散、低层辐合的特点, 大气参数和云参数的调整趋势符合卫星资料观测实况。辐射传输模式利用分析场反演的亮温优于利用背景场反演的亮温。

(2) 同化试验可以改进短时降水预报, 较好地模拟出广东地区暴雨中心的位置和强度。

(3) 受到高层云的影响, 同化 MODIS 资料对低层云参数的调整不如高层明显, 随着云量的减少, 对低层的影响逐渐增大。

由于红外资料对云的整体特征有较好的反映, 但无法详细刻画云内部结构, 因此受高层云的影响, 同化 MODIS 资料对低层云的调整幅度较小。下一步需要结合微波和雷达资料共同改进云区内部参数和低层云的同化效果。

参 考 文 献:

- [1] 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 552-566.
- [2] 巴德 M J, 福布斯 G S, 格兰特 J R, 等. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用[M]. 卢乃锰, 等译. 北京: 科学技术出版社, 1998.
- [3] 陈渭民. 卫星气象学 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [4] 师春香, 江吉喜, 方宗义. 1998 年长江大水期间对流云团活动特征研究[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 279-286.
- [5] 王立琨, 陶祖钰, 杨阳, 等. 1998 年长江洪水大暴雨的卫星云图分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36 (1): 87-94.
- [6] 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17 (6): 690-704.

- [7] 熊文兵, 李江南, 姚才, 等. “05-6”华南持续性暴雨的成因分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23 (1): 90-97.
- [8] 廖国男. 大气辐射导论 (第二版) [M]. 郭彩丽, 等译. 北京: 气象出版社, 2004.
- [9] ANDERSSON E, PAILLEUX J, THÉPAUT J-N, et al. Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation[J]. Q J R Meteorol Soc, 1994, 120: 627-653.
- [10] DERBER J C, WU W. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system[J]. Mon Wea Rev, 1998, 126(8): 2 287-2 299.
- [11] KIDDER S Q, GOLDBERG M D, ZEHR R M, et al. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding Unit (AMSU)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81(6): 1 241-1 260.
- [12] CHEVALLIER F, G KELLY. Model clouds as seen from space: comparison with, geostationary imagery in the 11-m window channel[J]. Mon Wea Rev, 2002, 130(3): 712-722.
- [13] 丁伟钰, 万齐林. “珍珠”台风卫星红外通道亮温的数值模拟[J]. 大气科学, 2008, 32 (3): 572-580.
- [14] ERRICO R M. Assimilation of satellite cloud and precipitation observations in numerical weather prediction models: Introduction to the JAS special collection[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2007, 64(11): 3 737-3741.
- [15] GREENWALD T J, HERTENSTEIN R, VUKICEVIC T. An all-weather observational operator for radiance data assimilation with mesoscale forecast models[J]. Mon Wea Rev, 2002, 130(7): 1 882-1 897.
- [16] 丁伟钰, 万齐林, 张诚忠, 等. 有云条件下 HIRS/3 资料的同化及其对“珍珠”台风的影响/[C]全国数值预报发展与应用研讨会论文集. 北京: 气象出版社, 2009: 19-28.
- [17] BORMANN N, THÉPAUT J-N. Impact of MODIS polar winds in ECMWF's 4DVAR data assimilation system[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(4): 929-940.
- [18] 丁伟钰, 万齐林, 陈子通, 等. 有云环境下 MODIS 亮温资料变分同化 I ——方案设计与理想试验[J]. 热带气象学报, 2009, 25(6): 649-659.
- [19] 梁建茵. 2007 年 5 月季风爆发监测报告 (2007 年第 1 期) [EB/OL]. 广州: 中国气象局广州热带海洋气象研究所, [2007-5-30]. <http://218.19.164.219/grapes/jcgb/jcgb0705.htm>.

MODIS BRIGHTNESS TEMPERATURE DATA ASSIMILATION UNDER CLOUDY CONDITIONS II

——Impact On Rainstorm Forecasting

DING Wei-yu, WAN Qi-lin, HUANG Yan-yan,
CHEN Zi-tong, ZHANG chen-zhong

(Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Satellite observations provide a great deal of information on clouds and precipitation, playing an important role in heavy rain forecasting. They are, however, insufficiently applied in the data assimilation of numerical weather predictions, especially with regard to the infrared radiances. Since it is difficult to simulate infrared radiances transmission under cloudy conditions, assimilating only the radiances with clear-sky conditions seems to be the usual practice. On the basis of the GRAPES-3DVAR (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System), cloud liquid water, cloud ice water and cloud cover are added as the governing variables in the assimilation system. This scheme can not only improve the simulation of infrared radiances transmission by RTTOV (fast radiative transfer model for TOVS), but also adjust the atmospheric parameters and cloud parameters using infrared radiance observations. In this paper, a case of heavy rain in Guangdong province on May 26, 2007 is selected, which was after the onset of the South China Sea Monsoon. For this case, the channels of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) for observing water vapor (ch.27) and cloud top (ch.36) are selected for assimilation and the process of heavy rain is simulated using the WRF (Weather Research and Forecasting Model). The results show that the assimilated MODIS data can improve the distribution of water vapor and temperature in the first guess fields and adjust the upper-level wind field indirectly; the tendency of the adjustment conforms well to the satellite observations and the assimilation scheme has positive impacts on the short-range forecasting of rainstorms.

Key words: MODIS brightness temperature data; assimilation; rainstorm