

文章编号: 2096-1618(2024)02-0183-11

3种卫星微波资料同化在三江源一次暴雨的模拟研究

钟浩斌¹, 王磊^{1,2}, 李谢辉^{1,2}, 陈旭¹, 梁周彤^{1,3}

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为了解卫星微波资料同化是否能改善三江源降水模拟, 针对三江源 2018 年 8 月 24 日短时强降水个例, 利用 NCEP FNL 再分析数据, 分别加入 NOAA-18 的 AMSUA、MHS 和 NPP 的 ATMS 微波资料同化, 基于 WRF 模式及其三维变分同化系统对三江源区域此次降水过程进行循环同化实验, 对模拟结果进行分析和讨论。结果表明, 各卫星资料对背景场有着不同的调整作用, MHS 对水汽影响最大并且多为增湿作用, AMSUA 对温度调整最明显, 3 种资料对纬向风的影响结果几乎一样, 对径向风的调整幅度较接近。在加入各卫星资料同化后, 降水模拟有一定改善, 对于各站点降水随时间变化模拟, 效果 MHS>ATMS>AMSUA; 对于模拟的 6 h 累计降水量分布状况以及从降水评分结果, 效果 MHS, ATMS>AMSUA, 对于模拟的 24 h 累计降水量以及检验结果来看, MHS>ATMS>AMSUA, 综合来看, 本次三江源降水事件, MHS 效果改善最好, 其次是 ATMS, AMSUA 效果稍差。

关键词: 三江源; 降水; WRF; 资料同化; 微波辐射率资料

中图分类号: P456.7

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.009

0 引言

三江源位于中国青海省南部, 地理位置为 31°N ~ 39°N, 89°E ~ 103°E, 平均海拔 3335 ~ 6564 m。该地区西高东低, 地形地貌较复杂, 年平均降水 470 mm 左右^[1], 降水主要集中在夏季^[2], 平均降水量接近 300 mm。三江源一旦发生暴雨天气, 容易引起山体滑坡、山洪等自然灾害, 不仅给当地人民人身安全财产状况带来严重的威胁还会损害国家与当地的经济状况^[3-4], 而提升三江源数值天气预报的准确度, 能够提高暴雨预报和防灾减灾的能力, 减少人员伤亡以及经济损失, 因此如何提升三江源的数值天气预报是一个值得深入研究的问题。而三江源地区地势较高地形复杂, 面积广阔, 但气象观测站点稀少, 在数值模式中初值的质量存在较大的问题。资料同化作为一种资料分析方法, 能使模式初始场更接近于真实大气, 从而改善上述问题。在各种同化资料中, 卫星资料相比其他常规资料而言具有观测数据一致、覆盖范围广、时空分辨率高、不受地理条件影响等特点^[5-6], 能够有效填补三江源的观测资料。目前, 卫星资料已在天气诊断、数值天气预报等各个领域、各个方面得到比较广泛的应用, 据欧洲中期数值预报中心公布的数据显示卫星辐射资料占有同化资料的 90% 以上, 纯粹的卫星辐射资料又占有使用资料的 80% 以上^[7], 许多国外的业务数值天气预报中心和研究机构都已经实现了多种类型的

卫星辐射资料同化在数值天气预报中的应用。而卫星资料同化应用较多的垂直探测器主要有微波与红外两类。但微波资料相比于红外资料具有一定优势, 这是因为红外观测容易受云干扰, 而微波观测可以部分透过云区, 捕捉到内部的大气温湿度, 为天气过程的演变提供更丰富的观测数据^[8]。目前对于国际上常用的卫星微波资料也有许多学者展开了研究, 均有不错的研究成果。潘宁等^[9]利用三维变分同化方法对 AMSU-A (advanced microwave sounder unit-A) 资料进行直接同化, 结果表明同化后温度和水汽的预报总体上看有正效应。Mark S Kulie 等^[10]的一实验同化 AMSU-A 和 MHS (microwave humidity sounder) 数据减少了温度偏差, 卫星辐射同化在 6 ~ 12 h 的预报范围内对定量降水预报有积极影响。还有许多研究案例^[11-14]表明, 在加入卫星资料同化后对形势场与降水分布模拟有着显著的提升。这些研究说明了资料同化能在一定程度上改善模拟结果, 但是关于三江源地区的卫星资料应用研究的同化仍然较少, 对于三江源地区的卫星资料同化应用状况仍未探究明白。目前在三江源暴雨研究^[15-16]有不少, 但是有关利用 WRF 模拟三江源暴雨预报的研究较少, 使用卫星资料同化改进初始场来提升三江源预报的研究更是寥寥无几, 对三江源地区暴雨模拟的认识还较为空缺, 仍存在许多未知的问题值得深入了解和研究, 因此这也是本次研究的目的。目前大多数微波资料同化研究集中在 MHS、AMSU-A、ATMS (advanced technology microwave sounder) 这几种资料上, 这些微波探测器资料同化能改进模拟预报, 因此本文将着重于三江源一次夏季短时强降水, 利用

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目 (2019QZ-KK0105); 国家自然科学基金面上资助项目 (41971308)

MHS、AMSU-A、ATMS 这 3 种卫星微波资料分别加入同化模拟,探讨卫星微波资料能否改善三江源地区暴雨模拟,以期提高三江源该地区的预报精度。

1 资料来源与实验方法

1.1 资料来源

本次预报模拟使用 WRF 模式,用来输入 WRF 模式的气象资料是 NCAR/ NCEP 提供的 FNL(final operational global analysis) 全球分析数据,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 6 h,垂直方向上 26 层,包括气温、对流、蒸发、湿度、地势高度等物理量。高时空分辨率的降水观测资料对于降水时间以及模式预报都具有重大意义^[17],因此用来与 WRF 输出数据进行对比的观测降水资料选取空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为 0.5 h 由美国 NASA 提供的 GPM IMERG(integrated multi-satellitE retrievals for GPM) 中的 Final Run 降水产品,目前国内外已有许多研究成果表明高原上使用 GPM IMERG 产品优于其他包括 ERA5、TRMM 等降水资料^[18-21]。站点降水量资料使用 MICAPS(meteorological information comprehensive analysis and processing system) 第 3 类通用填图和离散点等值线数据,空间分辨率为气象站点分布状况。同化资料采用 NOAA(national oceanic and atmospheric administration) 18 的 MHS、AMSU-A 以及 NPP(NPOESS Preparatory Program) 的 ATMS 资料。

1.2 模式设置

本次实验研究所使用的 WRF 模式模拟方案,使用 NCEP FNL 全球再分析资料数据作为背景场,此次模拟过程的时间分别定为 2018 年 8 月 23 日 12:00 至 25 日 00:00(世界时)。实验采用双层嵌套。外层水平分辨率为 9 km 包含部分西北、西南、华北地区,垂直方向 60 层,内层水平分辨率为 3 km,主要以三江源地区为主,垂直方向 60 层,积分步长 30 s,模拟中心点位于 36.1387°N , 96.0612°E ,位于三江源降水位置附近,即图 1 区域。实验设置参数方案详见表 1。

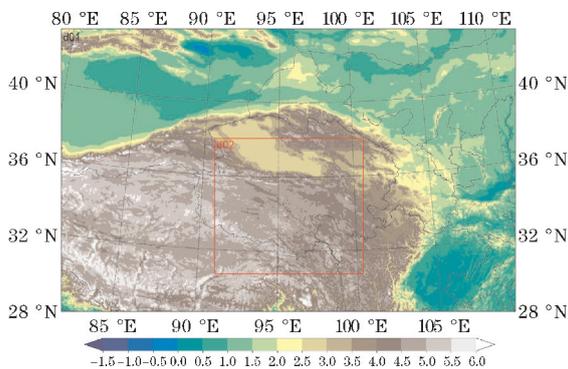


图 1 实验设置区域(填色区:高度)

表 1 WRF 模拟实验设置方案

参数方案	d01/d02 方案
长波辐射	rrtm 方案
短波辐射	Dudhia 方案
积云对流参数化方案	浅对流 Kain-Fritsch (new Eta) 方案
近地面层	Monin-Obukhov 方案
陆面过程	Noah 陆面过程方案
边界层	YSU 方案
微物理过程	新 Thompson 冰雹方案

1.3 同化方案

本次研究所使用的同化系统为 WRFDA 资料同化系统(WRF data assimilation system),数据同化方法为 WRF 三维变分同化(WRF-3DVAR)。WRFDA 是由美国国家大气研究中心开发并维护的与中尺度模式 WRF 相配套的资料同化系统,WRFDA 由 Fortran90 程序语言编写,该同化系统同样采用模块化机构。WRF-3DVAR 可以理解为观测场与分析场,分析场与背景误差场之间的二次泛函极小化问题,计算公式为

$$J(x) = \frac{(x-x_b)^T B^{-1}(x-x_b)}{2} + \frac{(y^0-Hx)^T R^{-1}(y^0-Hx)}{2}$$

式中: y^0 为大气观测; x_b 为背景场; x 为初始场最优解; B 为背景误差协方差矩阵; R 为观测误差协方差矩阵; H 为由 x 向 y 的映射(观测算子)。辐射传输模式采用美国卫星资料同化联合中心研制开发的 CRTM,背景误差协方差矩阵采用 WRFDA 的通用“CV3”,卫星资料均已经过稀疏化处理,并且稀疏化分辨率均为 60 km,质量控制采用 WRFDA 自带的质量控制方案,偏差订正采用变分偏差订正方法。同化方案:采用循环同化方案,从初始刻(2018 年 8 月 23 日 12:00)同化初始场积分 6 h 的结果,将模拟结果得到的预报场作为下一个时刻的初始场进行同化,以此循环直至 2018 年 8 月 25 日 00:00。同化时间窗口设为 6 h,以分析时间为中心的 ± 3 h 为时间窗口,设计实验方案见表 2。

表 2 实验设计方案

实验编号	实验方案
Ctrl	初始场不同化直接模拟 36 h,8 月 23 日 12:00 到 8 月 25 日 00:00
MHS	同化 MHS 资料,6 h 循环同化从 8 月 23 日 12:00 到 8 月 25 日 00:00
AMSUA	同化 AMSUA 资料,6 h 循环同化从 8 月 23 日 12:00 到 8 月 25 日 00:00
ATMS	同化 ATMS 资料,6 h 循环同化从 8 月 23 日 12:00 到 8 月 25 日 00:00

1.4 分析方法

对卫星同化诊断主要采用均方根误差 RMSE 与标准差 Stdv。RMSE 能评估模拟和观测数据之间的差异,其中 M_i 和 O_i 是模拟结果与观测结果, n 为进行计算的资料点数。Stdv 能反映一个卫星资料数据集的离散程度,其中 X_i 为每个资料点数的数据, Y 为所有 X_i 的平均值。

公式为

$$\text{Stdv} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y)^2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}$$

为更客观地分析降水预报结果,对于降水分布检验,本文采用 TS (threat score)、ETS (equitable threat score)、FAR (false alarm rate)、POD (probability of detection)、BIAS 对其结果进行检验。TS 评分与模式水平分辨率有重要相关关系,模式网格分辨率越高 TS 评分效果越明显^[22]。ETS 评分是 TS 评分一种改进,能够由空报与漏报的降水预报点对评分进行惩罚,因此使得对降水的评分结果相对后者更加公平^[23]。

TS 评分公式:

$$\text{TS} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C}$$

ETS 公式:

$$\text{ETS} = \frac{N_A - R_a}{N_A + N_B + N_C - R_a}$$

$$R_a = \frac{(N_A + N_B) \cdot (N_A + N_C)}{N_A + N_B + N_C + N_D}$$

其他常用降水评分公式:

$$\text{POD} = \frac{N_A}{N_A + N_C}$$

$$\text{FAR} = \frac{N_B}{N_A + N_B}$$

$$\text{BIAS} = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C}$$

式中: N_A 为成功预报降水的频次, N_B 为降水空报的频次, N_C 为降水漏报的频次, N_D 为预报与实况结果均未达到阈值正确的发生频次, R_a 为降水空报的频次与降水漏报的频次相当时的随机预报 N_A 的数学期望。

2 卫星资料同化统计诊断

图2为3种卫星资料中的一个通道偏差订正结果

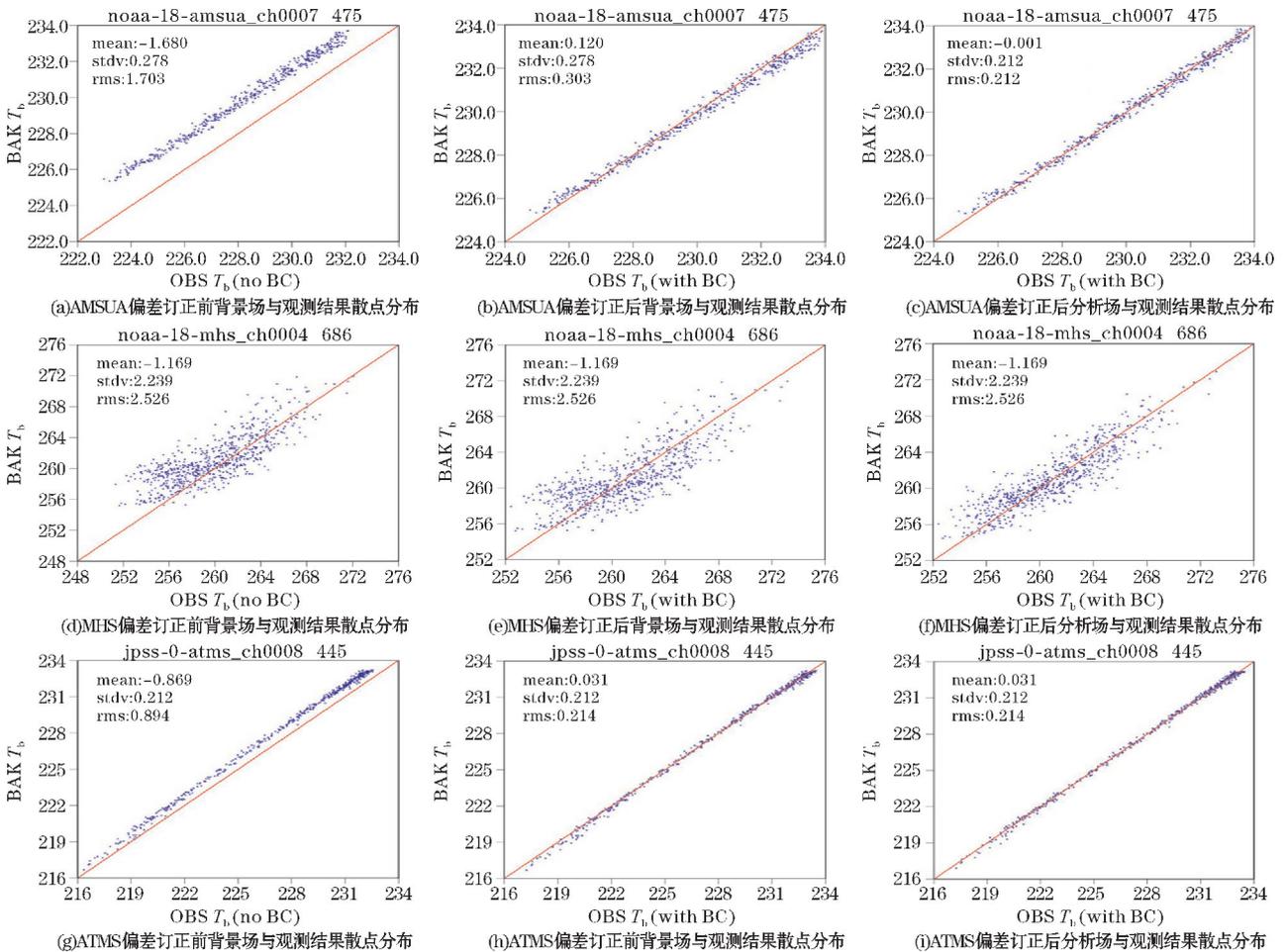


图2 AMSUA第7通道、MHS第4通道、ATMS第8通道偏差订正状况

果。图中横坐标为观测亮温,第一、二列纵坐标为背景场亮温。对此分析可以发现,3种资料各自的一个通道的散点图大致呈现出线性分布,订正前大多数资料分布于对角线之上,说明背景场亮温与观测亮温有一定差距。图中第二列为第一列订正后的结果,观察资料的散点分布图可以发现散点分布相比第一列,第二列整体下降了一定程度,并且更加贴近图中的对角线,说明了资料在经过偏差订正后模拟亮温下降了,更加符合观测亮温的结果。第三列的纵坐标是同化后的分析场模拟亮温,通过比较第二列的结果,第三列的散点更靠拢对角线,分析场模拟亮温与观测亮温结果更加相近,说明同化效果好。

图3是观测残差频数分布直方图,能进一步分析

偏差订正后观测残差的变化情况。第一列和第二列很横坐标为偏差订正前与订正后的 OMB(观测亮温减背景场模拟亮温),第三列横坐标为 OMA(观测亮温减分析场模拟亮温)。由图3(a)知 OMB 在 $-2.6 \sim -1$ K,大值主要位于在 $-1.8 \sim -1.5$ K,图3(b)的 OMB 在 $-0.8 \sim 0.9$ K,说明订正后模拟亮温有所提升,大值主要位于 $0 \sim 0.3$ K,偏差明显减小了,说明偏差订正有着正效应作用,减小了模拟亮温与观测亮温的偏差。图3(c)的 OMA 在 $-0.8 \sim 0.7$ K,与图3(b)相比虽然范围并没有明显缩小,但是更多资料分布在 0 附近,图3(c)位于 0 附近的数值比更大,说明分析场模拟亮温比背景场模拟亮温更加接近观测结果。对其他探测器通道的分析同样能得出较为一致的结论。

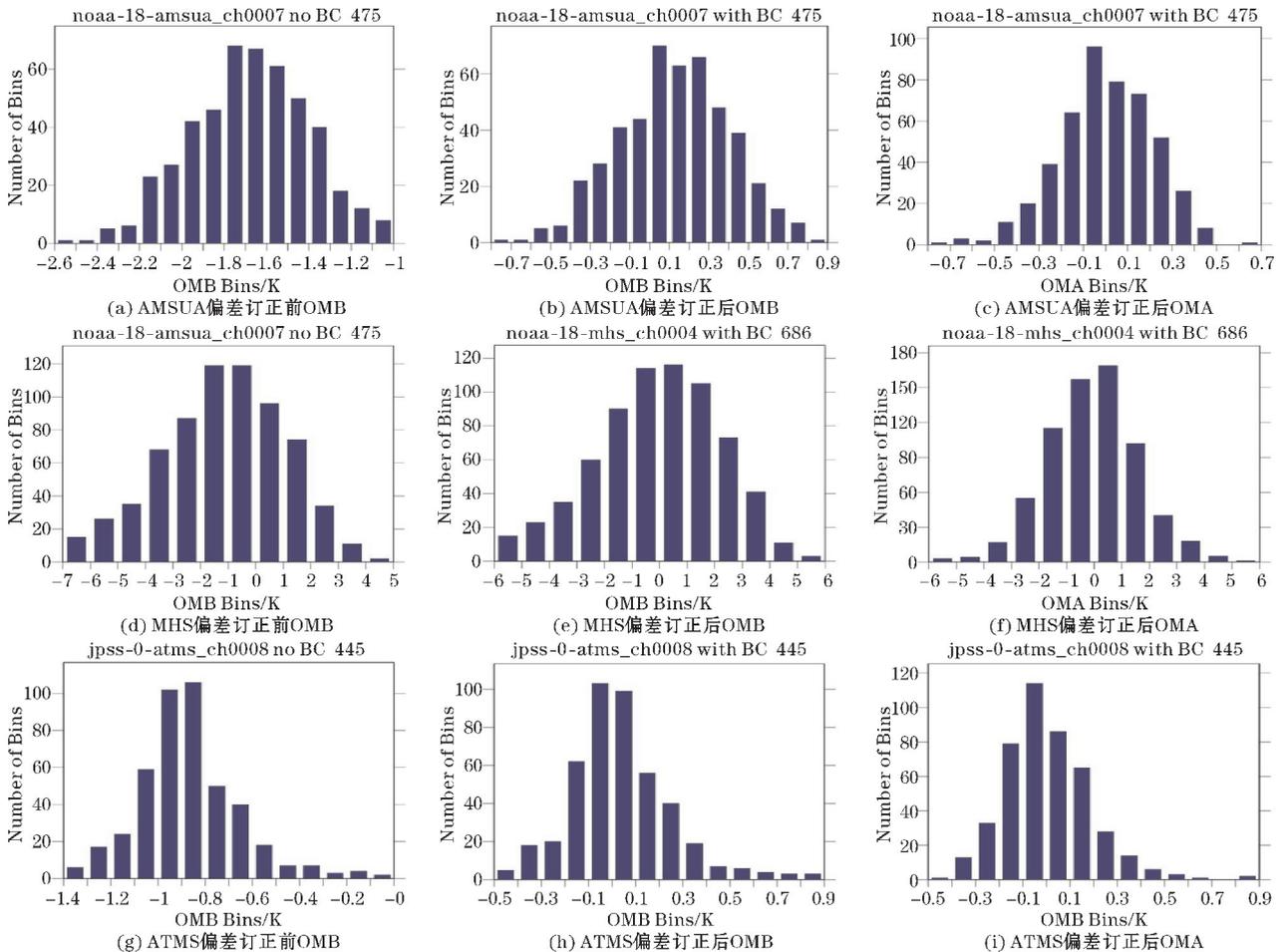


图3 AMSUA第7通道、MHS第4通道、ATMS第8通道偏差订正前后观测残差频数分布直方图

图4为3种卫星资料偏差订正前后各个通道的 OMA 和 OMB 的数目、平均值、标准差,能进一步了解在其他通道的订正情况。分析观测残差偏差的平均值,可以看到3种卫星资料各个通道经过偏差订正后的 OMB 都有不同程度的变化,但均有所减少且更加接近于 0,说明各个通道在经过偏差订正后模拟亮温与观测亮温更加接近。对于标准差结果可以发现,偏差订正对 OMB 的离散程度改

变非常小,但观察 OMA 结果可以发现,除了 AMSU-A 通道 5 和 ATMS 通道 6~10,都有明显的减少,大部分通道的分析场模拟亮温与观测亮温偏差有较大的减小作用,说明大部分通道的同化效果较好。而 ATMS 通道 6~10 和 AMSU-A 的通道 5 的 OMA 相比 OMB 的标准差虽然也有一定的减小,同化的效果也有正效应,但与其他通道相比标准差减少幅度较小,具体原因仍有待进一步研究。

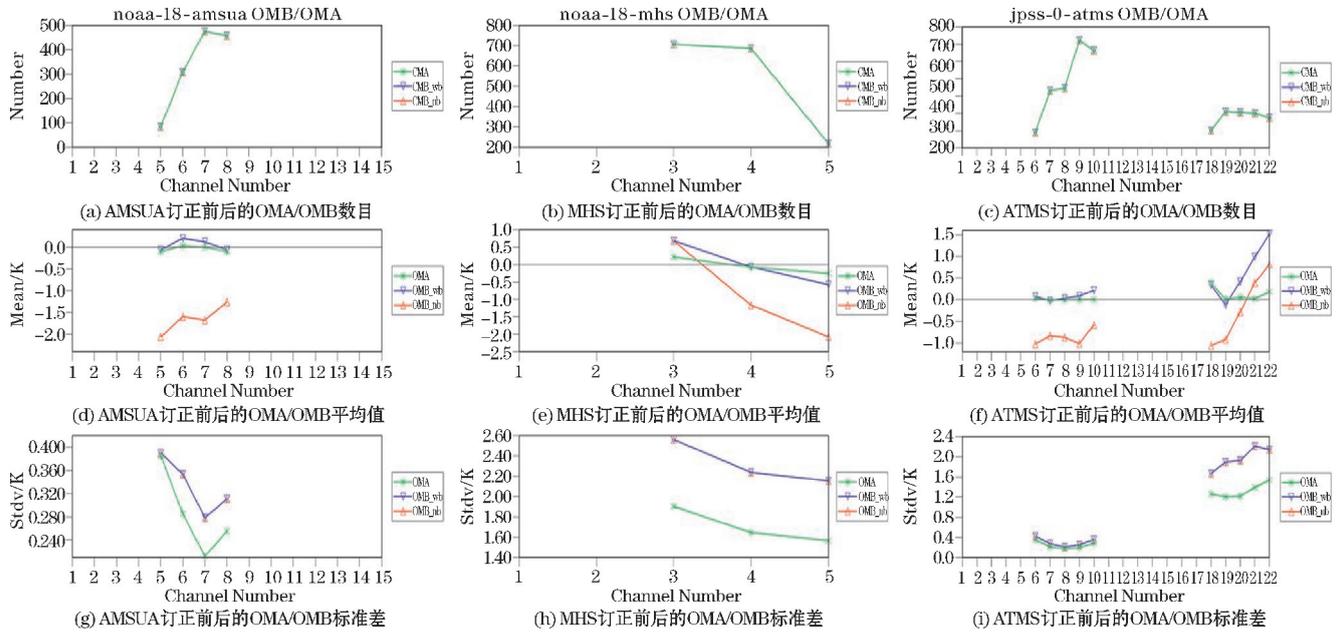


图 4 偏差订正前后各个通道 OMA 和 OMB 的数目、平均值和标准差

3 模式模拟结果

3.1 同化对模式初始时刻的调整

图 5 为计算实验初始时刻研究区域内的各组实验的

分析场与背景的相对湿度、温度、纬向风、径向风在不同的高度层上的平均偏差,由于三江源地处高原,地势较高,高度在 600 ~ 100 hPa。方法是在三江源研究区域各个高度层内取值,计算分析场与背景场的差值,然后计算区域内的平均值,结果如图 5 所示,图 5 左上角给出了均方根误差,能进一步了解同化对背景场的调整状况。

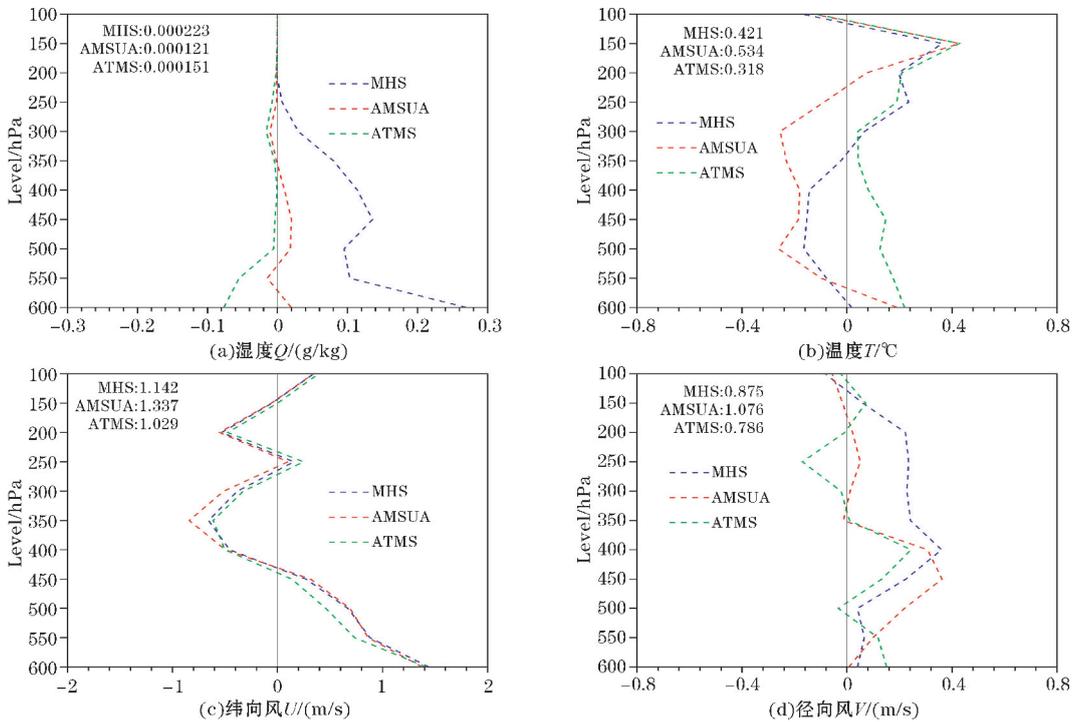


图 5 同化分析场与背景场平均偏差垂直分布

对于比湿,可以看到 MHS 实验组增量变化最大,并且均以增湿为主,低层到中高层都有明显的增湿作用,AMSUA 与 ATMS 实验组湿度增量与 MHS 相比较

小。通过比较它们的均方根误差, MHS 对湿度的调整情况最大,对高空湿度的影响要远大于 ATMS 与 AMSUA。对于温度,各同化实验对背景场的调整在不

同高度上仍有一定差异, MHS 与 ATMS 在中高层对温度的影响较大, 而 AMSUA 在整层高度均有较大影响。比较它们的均方根误差和各层平均偏差, 可以发现 AMSUA 对温度变化调整的贡献最大, 这可能与卫星资料探测器有关。对于纬向风, 3 种资料在同化后纬向风随高度变化趋势较为一致, 3 次同化实验在低层以西风异常为主, 中高层以东风异常为主。对于径向风, 3 种资料对背景场径向风的调整幅度相差不大, 但相比纬向风, 径向风 3 组的同化实验之间的差异更大。另外, 通过比较实验组径向风与纬向风的均方根误差, 可以发现 ATMS 对背景场风速调整要明显小于 MHS 与 AMSUA。

3.2 模拟降水结果

3.2.1 站点模拟降水

站点降水量随时间的变化如图 6 所示。由于三江源地区站点较少, 分布较为稀疏, 大多数观测站点不处于降水主要位置, 因此选取其中 5 个位于雨带区域并且尽量接近降水大值区域的观测站点来分析。通过图 6 的观测结果与各实验模拟的结果可以发现, 不同站点各实验组降水模拟变化仍有明显的差异。兴海站点, MHS 各实验组的模拟状况与实际站点观测均有较

大差异, 但各实验组相比较 MHS 实验组的模拟与实际最为相近。图 6(c) 玛多站点中, 实际降水量在 09 时出现一次极大值随后开始减少, Ctrl 与 ATMS 实验组与此结果较为接近, AMSUA 结果与实际差异最大。图 6(d) 清水河站点实际降水在 08 时与 13 时有两次降水极大值, MHS 与 ATMS 基本能模拟出此处的极大值, 其中 08 时, MHS 和 ATMS 与 OBS 结果非常相近, 在 13 时, ATMS 结果在此处的峰值偏大, MHS 偏小。图 6(e) 玉树站点, 实际降水呈现出先增后减趋势, 在 14 时出现极大值, 比较各实验组, AMSUA、MHS、ATMS 在此站点模拟降水较好。图 6(f) 杂多站点中比较各实验结果可发现 ATMS 与 Ctrl 结果与实际差异较大, 而 MHS 与 AMSUA 实验组与实际降水变化趋势结果较为为相似, 模拟效果较好。可以发现, MHS 除了玉树站点与实际情况相差较大, 在其他站点中与实际结果均较为相近, 在 4 组实验中最优。ATMS 除了在兴海和杂多站点与实际差异较大, 其他站点模拟情况均较为良好, 优于 Ctrl 与 AMSUA 实验组。Ctrl 与 AMSUA 实验组大部分站点模拟结果与实际相差较大。总体而言, 对于 5 个站点降水量随时间变化的结果来看, MHS 结果最佳, ATM 其次, Ctrl 与 AMSUA 结果稍差。

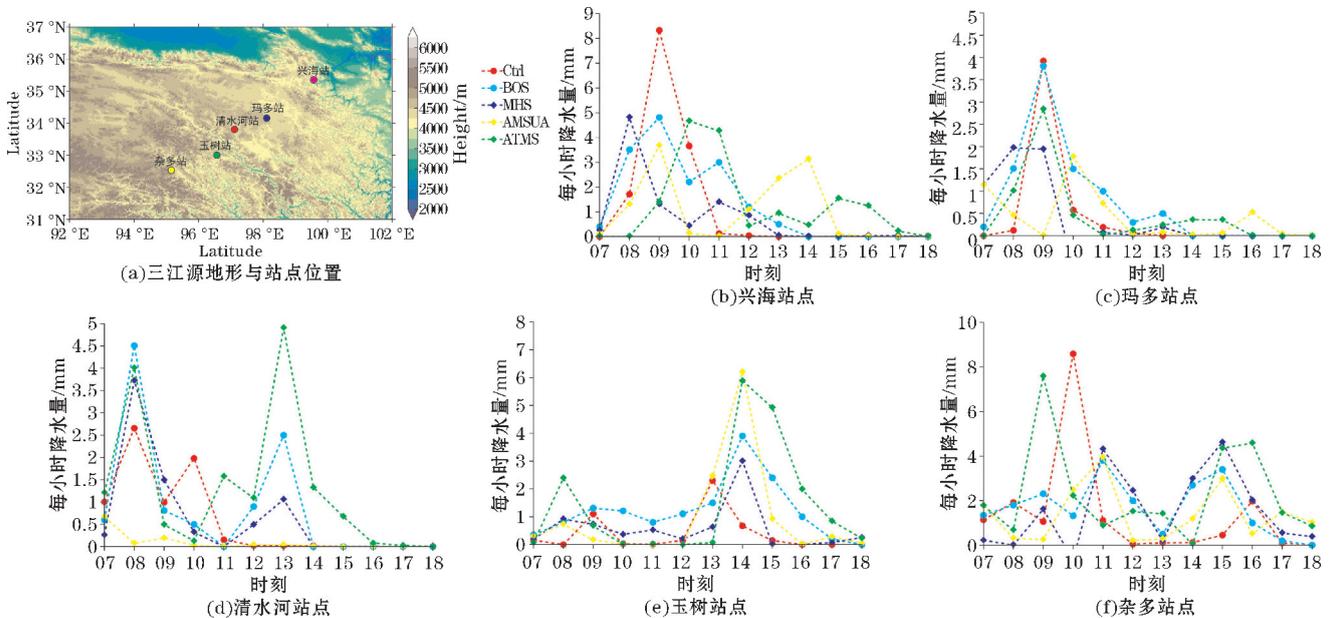


图 6 站点降水量模拟随时间变化

3.2.2 站点水汽模拟

图 7 为清水河站点模拟 450 hPa 水汽含量随时间变化状况。比较各模拟结果可以发现, 水蒸气混合比模拟各实验组大小与变化趋势基本一致, 在 07-13 时降水时间段最大, 之后迅速减小, 但其他各类混合比同化后有较大差异。对于云水含量, Ctrl 实验组在 08-10 时出现了迅速增大后减小的变化趋势, MHS 与 AT-

MS 同化实验组先增后减变化趋势出现在 12 时, AMSUA 实验组在 01-05 时出现两次。对于雨水含量, 只有 Ctrl 实验组较大在 08-10 时有先增后减的变化趋势, 可以发现云水与雨水对 Ctrl 实验模拟降水的影响较大。对于雪水混合比, Ctrl 与 AMSUA 实验组结果非常小, 而 MHS 与 ATMS 同化实验组在 06-14 时间段出现两次剧增后减小的趋势, 说明了在此站点上 MHS 与

ATMS 同化模拟对雪水混合比影响较为明显,对清水河站的降水预报影响较大。对于冰水混合比,MHS 与 ATMS 实验组在 11-13 时有峰值,MHS 比 ATMS 峰值稍小。总体来看,在清水河站点水汽模拟随时间变化的状况各实验组除了在水蒸气混合比上较为一致,其

他混合比模拟差异较大。其中 Ctrl 实验组对云水与雨水含量模拟较大,MHS 与 ATMS 实验组对冰水雪水含量较大,而 AMSUA 实验组对云水雨水冰水雪水含量模拟均较小,这也解释了图 6 中 AMSUA 实验组清水河站降水量模拟较小的原因。

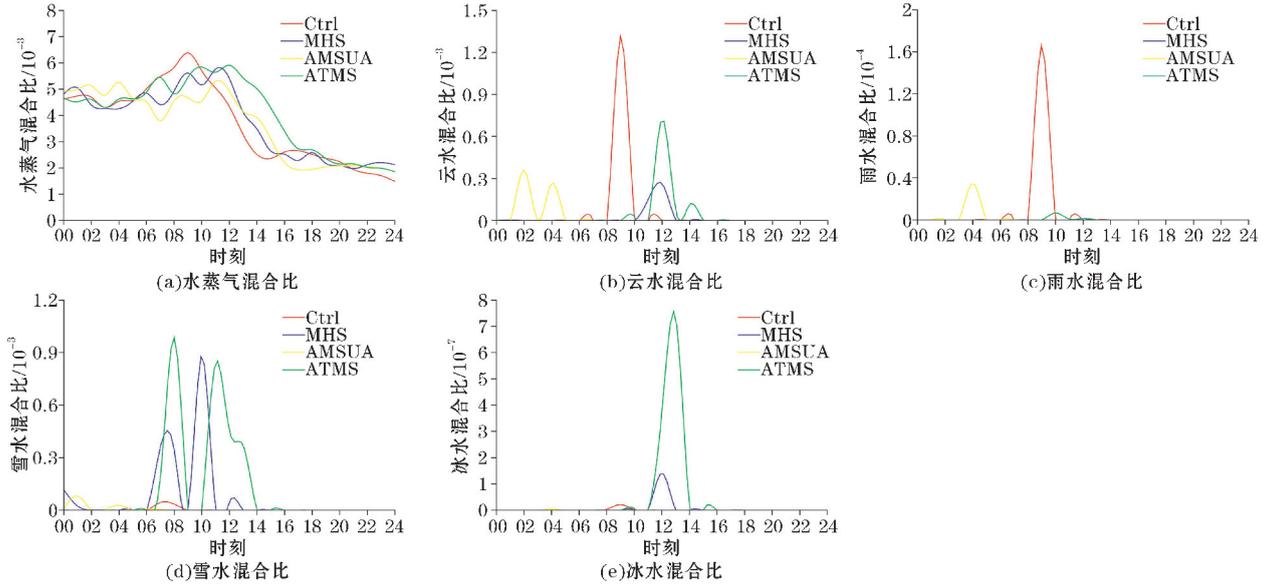


图 7 站点水汽含量模拟随时间变化

3.2.3 6 h 累计降水分布模拟

图 8 是各实验模拟的本次降水的主要 6 h 降水累积量分布,从图 8(b) 可以看到,实际降水分布是一条东北西南走向的雨带,其中在东北侧与南侧局部地区存在大值降水。比较各实验组模拟结果,同化前的实验模拟结果基本能模拟出这条东北西南走向的雨带,但其中的大值主要模拟在雨带的西南处地区。同化后的结果来看,各同化实验组均能模拟出这一条东北西

南走向的雨带,主要差异仍在降水大值落区位置。MHS 的降水大值区几乎覆盖整条雨带,虽然模拟出部分地区的降水大值中心,但过多地区的大值降水预报使大值降水错报较多。AMSUA 的雨带相比同化前稍宽,但大值降水中心模拟在西南处,与实际降水有一定差距。ATMS 模拟的雨带相比同化前要宽,大值中心主要分布在东侧,这与实际降水位置有一定重合,说明了此次的模拟效果较好。

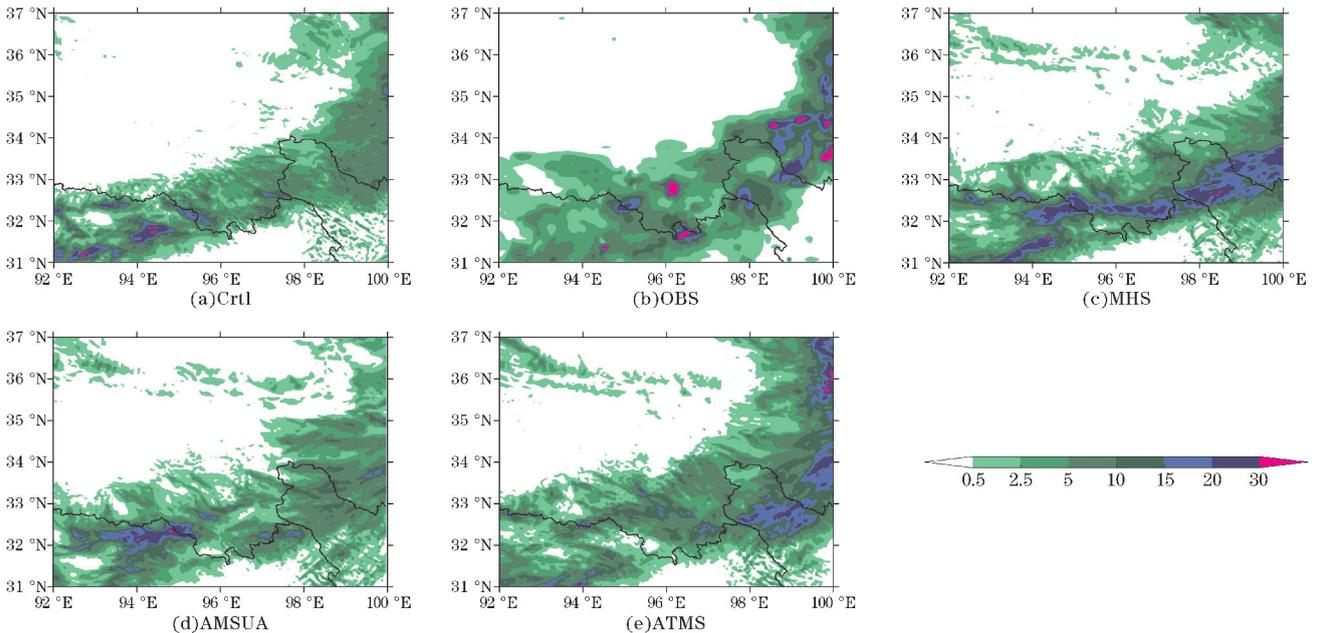


图 8 2018 年 8 月 24 日 09:00-15:00 6 小时累计降水量分布

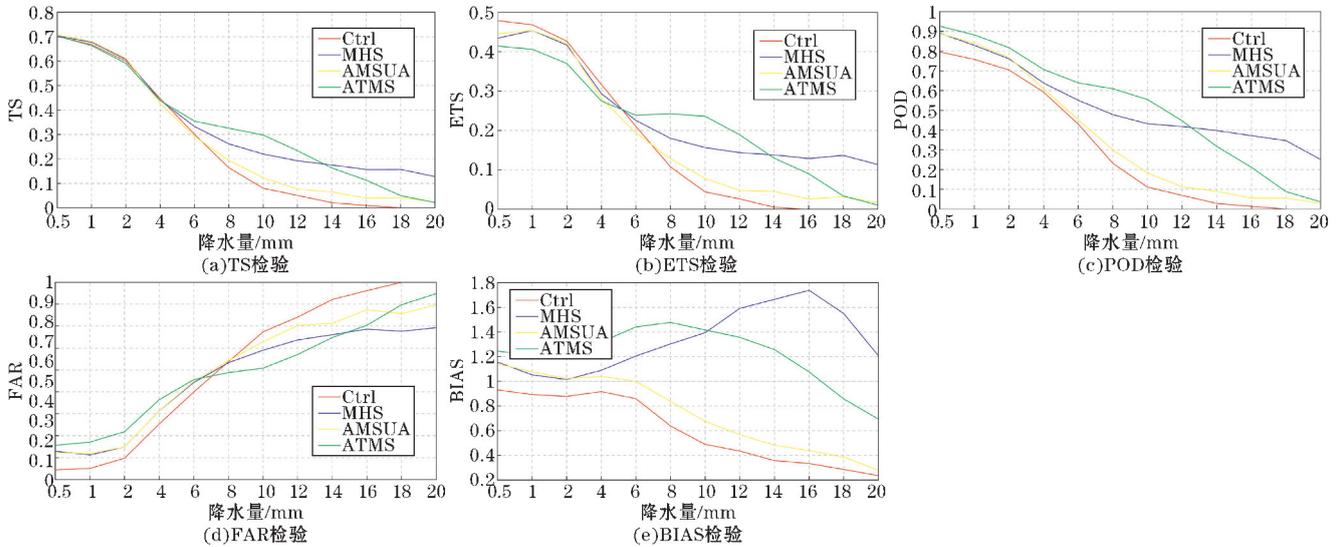


图9 6 h 累计降水量降水评分与检验

虽然已对降水分布结果进行分析,但是仅从降水分布来分析预报结果存在一定的主观因素,下面将对图8降水模拟结果进行降水评分,客观分析检验预报结果。方法是将模式输出数据与GPM数据统一计算地区,进行网格插值,再通过计算得出TS、ETS、POD、FAR、BIAS结果对其进行客观分析。

图9是图8降水检验结果,图9(a)是TS评分结果,在4 mm的降水阈值内,各实验的结果基本一致,在4 mm之后,各实验差异增大。其中,降水模拟结果ATMS与MHS最优,ATMS在4~12 mm的降水阈值优于MHS,在14~20 mm的降水阈值上,MHS的结果要优于ATMS。其次是AMSUA,可以发现,AMSUA虽然评分结果差于MHS与ATMS,但是评分结果仍在Ctrl之上,说明此次同化是有一定的改善的作用。图9(b)为ETS评分结果,ETS会对空报和漏报进行惩罚,使得分数整体偏低,可以看出ETS结果相较于TS结果均下降。与TS结果最大的不同的是在0~4 mm的降水阈值,Ctrl要优于所有同化实验组,MHS与AMSUA结果接近且均优于ATMS结果。

图9(c)是POD,通过比较各组实验结果,可以发现ATMS与MHS结果改善最为明显,ATMS的预报命中率在12 mm内最高,12~20 mm MHS实验结果最优,AMSUA结果在4 mm后优于Ctrl。图9(d)为FAR空报率,其结果显示,在6~20 mm结果上MHS与ATMS结果较好,其次是AMSUA和Ctrl。但在6 mm的阈值下Ctrl最小,其次是MHS与AMSUA,最大是ATMS,结果与POD相反。这说明了ATMS实验模拟的雨带雨区较宽,能更容易模拟实际降水区域,但与此同时,过

大的降水预报区域也会带来更大的空报率,这也解释了ETS评分在较小的阈值上ATMS评分最低的原因。对于其他实验组也同样能得出结果,在较小的降水阈值上,同化实验的空报率大于同化前,与图8各同化实验组的降水雨带稍宽雨区稍大对应。

图9(e)是BIAS降水偏差结果,可以直接看出,MHS与ATMS的预报结果是偏湿的,Ctrl与AMSUA的结果预报明显偏干。MHS在0~20 mm均是预报偏湿,在稍大的阈值上较为明显。而上文在分析同化资料对背景场调整情况,MHS资料对背景场水汽不仅调整影响最大,而且多数为增湿作用,调整之后的水汽场水汽含量更丰富,与之后预报降水量更大的结果有着对应的关系。ATMS在0~16 mm预报偏湿,16~20 mm预报偏干。另外可以发现,3次同化实验预报的降水量均比同化前要大,最大是MHS,其次是ATMS,AMSUA。

3.2.4 24 h 累计降水分布模拟

图10是各实验模拟的24 h降水累积量分布。可以看出,实际降水主要发生在三江源东部与南部,与主要6 h降水分布相比,24 h累计降水量分布的雨带更宽,雨带西侧也有多处地区降水。比较各组实验,Ctrl组与实况相比,雨带的中部降水量模拟稍小,北部的降水大值区也没有模拟出。其他同化实验组在24 h降水量上能基本完整地模拟出一条雨带,但是在东北侧的局部降水大值均没有很好地模拟出。其中MHS与ATMS实验组模拟结果较好,与实际降水重合区域更多,而AMSUA实验组在雨带的北侧模拟降水较少,此处与实际情况相差较大。

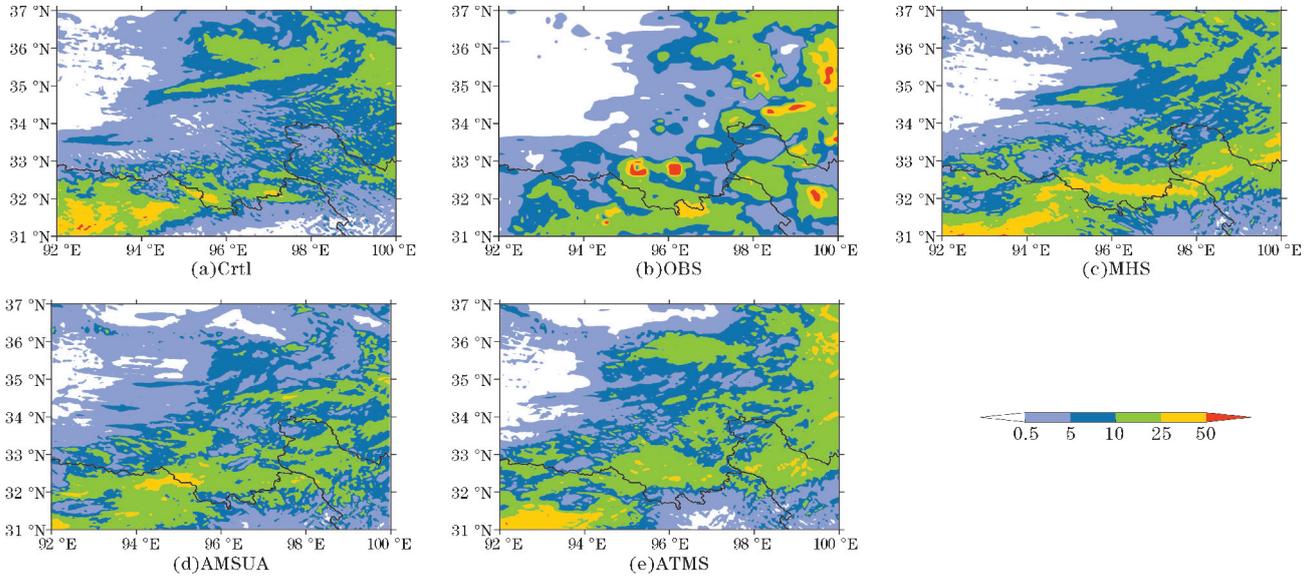


图 10 2018年8月24日00:00–24:00 24 h 累计降水量分布

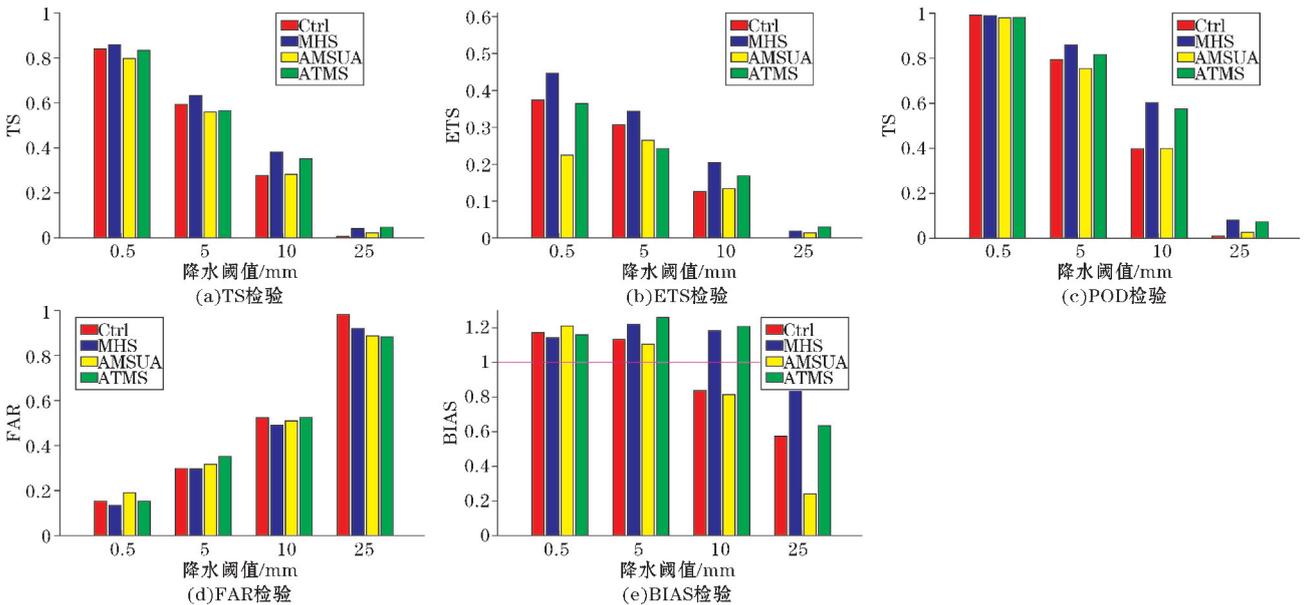


图 11 24 h 累计降水量降水评分与检验

图 11 为图 10 的 24 h 累计降水量分检验结果。比较 TS 与 ETS 结果,可以发现, MHS 实验组在 0.5 mm、5 mm、10 mm、25 mm 上均比同化前要大,与其他同化实验组相比,除了在 25 mm 阈值上比 ATMS 结果稍低,其他阈值结果均比其他实验要好。而 AMSUA 与 ATMS 实验组,虽然在 0.5 mm 与 5 mm 阈值检验结果低于同化前,但在 10 mm 与 25 mm 上高于同化前,其中 ATMS 结果要优于 AMSUA。这说明了在大值降水的模拟上,同化实验组仍有一定优势。对于其他检验结果,可以发现 MHS 效果几乎优于其他所有实验组。总体来看,对于 24 h 累计降水量的模拟情况, MHS > ATMS > AMSUA。

4 结论与讨论

本文针对三江源 2018 年 8 月 24 日的一场短时强

降水过程,利用 WRF 及其三维变分同化系统(WRF-DA),使用 NCEP 提供的 FNL 再分析数据资料输入 WRF 模式中,通过分别单独同化 NOAA-18 的 MHS、AMSUA 以及 NPP 的 ATMS 微波资料,采用循环双层嵌套循环同化方案进行了多次循环模拟实验,探讨了不同卫星资料对模拟结果的影响,得出以下结论:

(1) 各卫星同化资料对背景场有着不同的调整作用,其中对于水汽 MHS 资料影响最大,并且多为增湿作用,对于温度 AMSUA 资料调整最明显,对于纬向风 3 种资料的影响结果几乎一样,对于径向风 3 种资料的调整幅度较接近。

(2) 加入各卫星资料同化后对降水模拟都有一定改善作用,对于模拟各站点降水随时间变化,模拟效果 MHS > ATMS > AMSUA,对于模拟的主要 6 h 降水分布状

况以及各降水评分检验结果,模拟效果 MHS, ATMS > AMSUA, 对于模拟的24 h 累计降水量以及检验结果来看, MHS > ATMS > AMSUA, 综合来看, 本次三江源降水事件, MHS 资料同化改善最优, 其次是 ATMS, AMSUA 结果稍差。

本次实验也存在一些不足的地方: 研究的降水个例降水时长较短, 选用实验研究的个例较少不具有普适性, 研究结论可能不适用于长时间的降水事件, 后期将考虑会针对三江源地区的一些其他降水个例进行研究实验, 进一步验证其他降水事件的同化效果。对于图4, 本次研究对小部分通道的偏差订正后同化效果与其他通道相比稍差的原因仍未知, 之后将会对此进一步深入研究以解开此疑惑。另外, 本次研究均为单个资料的同化模拟结果, 同化实验较为单一, 对于同化多种卫星资料的结果如何尚未明确。此外, 同化实验使用的方法虽然是目前已经发展成熟的三维变分同化, 但其他同化方法也值得一试, 未来将考虑在此研究基础上继续开展实验, 探讨同化多种卫星资料模拟结果状况是否比同化单一卫星资料更优, 并且尝试四维变分同化, 卡尔曼滤波同化等其他同化方法以展开更深入的对比研究。

参考文献:

- [1] 蔡永祥, 罗少辉, 王军, 等. 三江源地区 1961-2019 年降水量时空变化特征[J]. 草业科学, 2022, 39(1): 10-20.
- [2] 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 1960-2015 年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1803-1820.
- [3] 马秀梅, 刘晓燕, 代青措. 副热带高压影响下青海东部 2 次暴雨对比分析[J]. 青海科技, 2017, 24(3): 72-77.
- [4] 雷彦, 张广伟. 青海东北部地区一次暴雨天气成因分析[J]. 现代农业科技, 2020, (22): 162-163.
- [5] 王宗皓. 卫星探测辐射率在数值天气预报中的直接应用[J]. 应用气象学报, 1995, 1995(1): 101-108.
- [6] 杨引明, 杜明斌, 张洁. FY-3A 微波资料在“莫拉克”台风预报中的同化实验[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 23-30.
- [7] 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.
- [8] 俞兆文, 刘健文, 黄江平, 等. 同化 AMSR2 微波成像资料对 WRF 模式暴雨预报的影响[J]. 气象灾害防御, 2017, 24(3): 10-14.
- [9] 潘宁, 董超华, 张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化实验研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 226-236.
- [10] Kulie M S, Bennartz R, Greenwald T J, et al. Uncertainties in Microwave Properties of Frozen Precipitation: Implications for Remote Sensing and Data Assimilation [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 67(11), 3471-3487.
- [11] Yang J, Duan K, Wu J, et al. Effect of data assimilation using WRF-3DVA for heavy rain prediction on the northeastern edge of the Tibetan Plateau [J]. Adv Meteor, 2015, 15: 1-14.
- [12] Andersson E, E Hólm, Bauer P, et al. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences [J]. applied meteorology and physical oceanography, 2007, 133(627): 1473-1485.
- [13] Schwartz C S, Liu Z, Chen Y, et al. Impact of assimilating microwave radiances with a limited-area ensemble data assimilation system on forecasts of Typhoon Morakot [J]. Weather and forecasting, 2012, 27(2): 424-437.
- [14] Wang Y, Liu Z, Yang S, et al. Added value of assimilating Himawari-8 AHI water vapor radiances on analyses and forecasts for “7. 19” severe storm over north China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(7): 3374-3394.
- [15] 王美月, 王磊, 李谢辉, 等. 三江源地区暴雨的水汽输送源地及路径研究 [J]. 高原气象, 2022, 41(1): 68-78.
- [16] 杨显玉, 吕雅琼, 文军, 等. 三江源区域夏季降水异常的水汽输送及源地特征的研究 [J]. 高原气象, 2022, 41(2): 465-476.
- [17] 任英杰, 雍斌, 鹿德凯, 等. 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 560-572.
- [18] Ehsan, Sharif, Reinhold, et al. Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic Conditions in Iran: Preliminary Results [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2).
- [19] Liu Z. Comparison of integrated multisatellite re-

trievals for GPM (IMERG) and TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products: initial results [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(3): 777-790.

[20] 汪梓彤,李石宝,张志友. GPM 近实时降水产品在青藏高原的多尺度精度评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 43-49.

[21] 盛夏,石玉立,丁海勇. 青藏高原 GPM 降水数

据空间降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 571-580.

[22] 王在文,梁旭东,范水勇,等. 数值模式降水评分对分辨率的敏感性初探[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(1): 10-16.

[23] 吴启树,韩美,刘铭,等. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报, 2017, 28(3): 306-317.

Simulation of a Rainstorm in the Sanjiangyuan by Assimilation of Three Kinds of Satellite Microwave Data

ZHONG Haobin¹, WANGN Lei^{1,2}, LI Xiehui^{1,2}, CHEN Xu¹, LIANG Zhoutong^{1,3}

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laborator, Chengdu, 610225, China; 3. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

Abstract: To understand whether satellite microwave data assimilation can improve the precipitation simulation in Sanjiangyuan, a case of short-time heavy precipitation in summer in Sanjiangyuan was studied (August 24, 2018). Using NCEP FNL to re-analyze the data, adding MHS and AMSUA of NOAA-18 and ATMS of NPP data assimilation, based on the WRF model and its three-dimensional variational assimilation system, the cyclic assimilation experiment of the precipitation process in the Sanjiangyuan was carried out, and the simulation results were analyzed and discussed. The results show that the adjustment effects on the background field vary from satellite data. MHS has the largest impact on water vapor and most of it is humidification. AMSUA has the most obvious adjustment on temperature. The effects of the three data on the zonal wind are almost the same, and the adjustment range of the radial wind is relatively close. After the assimilation of satellite data, the precipitation simulation was improved to a certain extent. For each station precipitation change with time simulation, the effect was MHS > ATMS > AMSUA. In terms of the simulated 6-hour cumulative precipitation distribution and the results of precipitation score, effect MHS, ATMS > ATMS; in terms of simulated 24-hour cumulative precipitation and test results, MHS > ATMS > AMSUA. In summary, the effect of MHS improved best in this precipitation event, followed by ATMS, and AMSUA results were slightly worse.

Keywords: Sanjiangyuan; precipitation; WRF; data assimilation; microwave radiance data