

朱丰, 徐国强, 李莉, 等. 2014. 同化青藏高原地区 GPSPW 数据对长江中下游地区降水预报的影响评估 [J]. 大气科学, 38 (1): 171–189, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13117. Zhu Feng, Xu Guoqiang, Li li, et al. 2014. An assessment of the impact on precipitation prediction in the middle and lower reaches of the Yangtze River made by assimilating GPSPW data in the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 171–189.

同化青藏高原地区 GPSPW 数据对长江中下游地区降水预报的影响评估

朱丰^{1,2} 徐国强² 李莉² 郑晓辉³ 张胜军⁴

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气象中心/数值预报中心, 北京 100081

3 宁夏气象台, 银川 750002

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 长江中下游地区位于东亚季风区, 其夏季降水的水汽部分来源于孟加拉湾的水汽输送。本文利用青藏高原地区全球定位系统 (GPS) 站点观测到的大气可降水量 (PW) 资料, 采用 WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model) 的同化模块 (WRFDA), 将这支水汽输送带的信息同化进数值模式, 并用 WRF 模式对长江中下游地区的 7 月份降水预报进行批量试验和个例分析。批量试验和个例分析采用 3 种方案: 无资料同化的控制试验 (NoDA), 冷启动同化试验 (Cold) 和循环同化试验 (Cycling)。此外, 还针对 Cycling 方案进行延长预报时长的补充试验以探究同化带来正效果最明显的时段。同时为了探究同化正效果的来源, 针对 Cycling 方案进行只同化被主要水汽输送带覆盖的 GPS 站点的补充试验 (Cycling_less_a) 以及只同化不被主要水汽输送带覆盖的 GPS 站点的补充试验 (Cycling_less_b)。试验结果表明: 同化青藏高原地区的 GPS 数据能在一定程度上改善长江中下游地区的降水预报, 对于 48~72 小时的降水预报改善效果尤为明显, 且 Cycling 方案在整体上优于 Cold 方案。对于 Cycling 方案, 在 120 小时预报时长内, 同化正效果最明显时段为 48~72 小时。当水汽输送带较多地经过同化区域时, 降水的 TS 评分能得到明显改善, 而当水汽输送带较少地经过同化区域时, 降水的 TS 评分改善效果不明显。如果只同化被水汽输送带覆盖到的 GPS 站点的 GPSPW 数据, 仍然可以保留住大部分的同化正效果, 因此, 针对性地同化 GPSPW 数据是可行的。

关键词 WRFDA GPSPW 长江中下游 降水预报

文章编号 1006-9895(2014)01-0171-19

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13117

An Assessment of the Impact on Precipitation Prediction in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Made by Assimilating GPSPW Data in the Tibetan Plateau

ZHU Feng^{1,2}, XU Guoqiang², LI Li², ZHENG Xiaohui³, and ZHANG Shengjun⁴

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Center/Numerical Weather Prediction Center, Beijing 100081

3 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002

收稿日期 2013-01-23, 2013-06-19 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41275104, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006053、国家重点基础研究发展计划 2013CB430106, 国家十二五科技支撑计划 2012BAC22B02

作者简介 朱丰, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模式的物理过程研究。E-mail: zhuf.atmos@gmail.com

通讯作者 徐国强, E-mail: xugq@cma.gov.cn

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The middle and lower reaches of the Yangtze River are located in the East Asian monsoon region where part of its summer precipitation water vapor comes from the moisture transport of the Bay of Bengal. In this paper, the atmospheric precipitable water (PW) data collected from the global positioning system (GPS) sites in the Tibetan Plateau and the assimilation module (WRFDA) of WRF (Weather Research and Forecasting Model) are used to assimilate the water vapor transport information into the numerical model. At the same time, WRF is also applied to do batch testing and case analysis of the precipitation forecast in the middle and lower reaches of the Yangtze River region in July. Three schemes are adopted during batch experiments and analysis of individual cases: a control experiment with no data assimilation (NoDA), a cold-start assimilation experiment (Cold) and a cycling assimilation experiment (Cycling). In addition, the experiment of extending the forecast time of the cycling scheme is performed to find out the most obvious time period of active effect. For the purpose of investigating the source of active effect, additional experiments of only assimilating the GPS sites that are mainly covered with the water vapor conveyor belt (Cycling_less_a) and that are not mainly covered with the water vapor conveyor belt (Cycling_less_b) are carried out according to the cycling scheme. The results show that the assimilation of the GPSPW data of the Tibetan Plateau area can improve the forecast of precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River to a certain extent, especially for the 48–72-h period precipitation forecast. The cycling scheme outperforms the cold scheme on the whole. For the cycling scheme, during the forecast time of 120 h, the active effect is most obvious in the 48–72-h period. When the conveyor belt of water vapor goes through the assimilation area, the TS score of precipitation can be obviously improved, while the improvement will not be so obvious when the water vapor does not go through the assimilation area. If we only assimilate the GPSPW data of the GPS sites covered with the water vapor transportation belt, we can still retain most of the positive effect. Therefore, targeted assimilation of the GPSPW data is feasible.

Keywords WRFDA, GPSPW, Middle and lower reaches of the Yangtze River, Precipitation prediction

1 引言

降水预报历来是数值预报的难点,而缺少精确连续的水汽数据是短期降水预报的主要问题之一(Kuo et al., 1993, 1996)。众所周知,初始场对于客观世界刻画的准确程度直接影响着数值预报的准确程度。而资料同化是改进初始场的有效手段,它通过生成在时空上不规则分布的估计,为模式提供一个最优估计的初始场,能够提高模式的预报能力(Wang et al., 2000)。随着技术手段的进步,能够被有效同化的遥感资料越来越多,如雷达资料(兰伟仁等, 2010a, 2010b)、卫星资料(Bauer et al., 2011; 冉令坤和周玉淑, 2011)等,使得进一步提高数值预报中降水预报的能力成为可能。利用资料同化技术提高模式的降水预报性能,人们做出了多种尝试,其中之一便是对大气可降水量(Precipitable Water, PW)资料的同化。

早在 20 世纪 90 年代,以 Bevis 为代表的学者们的一系列工作指出:利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)得到大气天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)估计值后,可以十分准确地计算 PW 值(Bevis et al., 1992, 1994; Duan et

al., 1996)。1993 年 5 月,在美国开展了一项名为 GPS/STORM 的野外试验,用以评估地基 GPS 对于大气水汽的观测。Businger et al. (1996)认为,地基 GPS 能够以相对低增长的成本在科研和业务工作中投入使用,利用 GPS 获得的 PW 数据(GPSPW)在短期天气预报应用中具有可观的潜在价值。

随后,国外学者开展了大量对 GPSPW 资料的同化试验。Kusaka et al., (2004)针对 2002 年 6 月 13 日在美国的一次飑线过程,利用 WRF (Weather Research and Forecasting)模式三维变分同化模块(Three Dimensional Variational, 3DVAR)WRF-3DVAR 进行了 GPS 资料的同化试验,结果表明 GPSPW 资料的同化能消除强降水过程中过量的降水估计。Smith et al. (2007)研究了同化 GPSPW 资料对快速更新系统(Rapid Update Cycle, RUC)的影响,发现 GPSPW 资料作为有用的实时水汽信息,能提高短期水汽预报的准确性,并且同化在不同时段以及不同季节有着不同程度的正面影响。

国内在 2004 年也开始了这方面的工作。袁招洪等(2004a)利用长三角地区 GPS 观测网中 11 个站点提供的可降水量数据,针对长三角地区 2002 年 6 月 23~24 日的降水过程进行 Nudging 同化试

验,发现可降水量数据能明显增强模式初始场描述水汽分布的能力,改善次网格降水的预报能力。袁招洪等(2004b)还比较了2002年梅雨期MM5模式24小时预报结果和长三角地区4个站点的GPSPW观测资料结果,发现GPSPW资料与探空观测有较高的一致性。此外,袁招洪(2005)还利用GPSPW资料,针对长三角地区2002年6月27~28日的降水过程进行三维变分同化试验,结果表明三维变分技术能有效同化GPSPW资料,该资料的变分同化有利于模式降水预报能力的提高。朱男男等(2008)利用GPS可降水资料针对2005年7月23~24日发生在京、津、冀地区的一次强降水过程进行伴随同化试验,证明加入GPS可降水资料能对初始温度场、高度场以及风场产生不同程度的改善。顾莹等(2010)利用实时GPSPW资料针对2007年7月2~3日发生在日本的一次梅雨锋降水过程进行同化试验,发现GPSPW资料能有效提高降水预报业务的实时性。万文龙等(2010)利用GPSPW资料对2008年9月23~25日的一次川西暴雨进行同化试验,发现同化GPSPW资料对初始场的湿度场影响明显,而对其他变量场影响相对较弱。陈敏等(2010)在北京地区利用GPSPW资料,使用快速更新循环系统进行同化试验,分析了一次强对流个例,发现由于使用资料极为局地,同化并不能对模式总体预报性能带来明显差异,但快速循环同化能使同化效果累积,为气象要素在局地的预报效果带

来显著正面影响。

由上述可知,历史上国内外的GPSPW数据同化试验多为个例分析,且预报的关注区域基本局限在同化区域局地。而本文研究同化青藏高原地区GPSPW数据对长江中下游地区降水预报的影响,立足于GPSPW数据同化的批量试验,且降水预报的关注区域不在同化区域局地,这两点是本文不同于以往研究工作的地方。

长江中下游地区位于东亚季风区,其夏季降水的来源一部分来自东海及南海洋面气流或台风携带而来的水汽,一部分来自南亚孟加拉湾经四川盆地长途输送的水汽。徐祥德等(2002)指出青藏高原地区是长江流域梅雨带水汽输送西边界重要的水汽“转运站”。苗秋菊等(2005)研究发现高原周边水汽输送对长江流域洪涝过程的形成有重要影响。利用美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction, NCAR/NCEP)的再分析资料可以得到长江中下游地区7月份水汽输送的气候特征,如图1。由图可知,7月份自孟加拉湾而来的水汽输送带在90.0°E经线附近分支转向,其中的一支围绕高原地形往北输送,另一支沿高原东部盆地继续向东,而长江中下游正处于这支水汽输送带的下游方向,其降水所需的水汽更多的来源于此。因此,如果通过同化GPSPW数据的方法,将这支水汽输送带的信息同

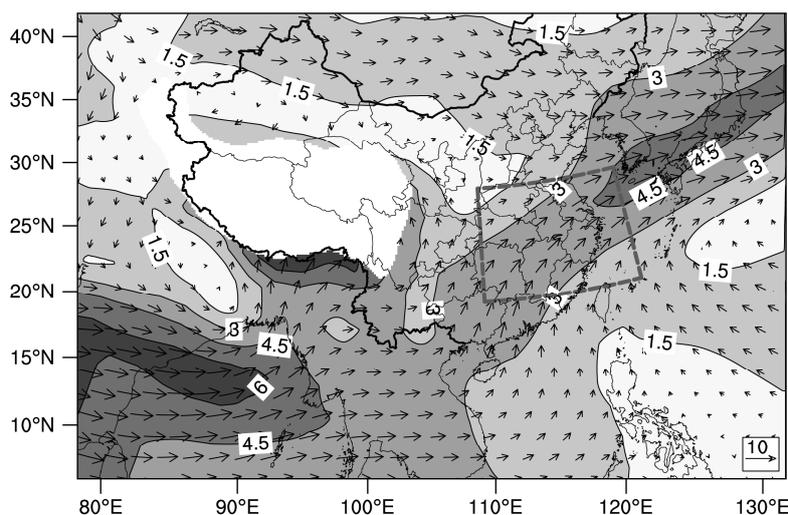


图1 东亚地区7月份1981~2010年长期平均的700 hPa水汽输送。图中矢量箭头表示700 hPa风场,单位: m s^{-1} ; 阴影区表示700 hPa水汽通量,单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。虚线框表示长江中下游地区,其范围是:(25.0°N~35.0°N, 110.0°E~125.0°E),下同

Fig. 1 Long-time mean transfer of water vapor in East Asian area in July 1981-2010. The vector arrow is the wind field at 700 hPa, unit: m s^{-1} ; the shaded area is water vapor flux, unit: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$. The dashed box outlines the area of the middle and lower reaches of the Yangtze River (25.0°N~35.0°N, 110.0°E~125.0°E), the same below

化进数值模式，从而形成对客观世界刻画更准确的初始场，可以期望在一定程度上改善长江中下游地区的降水预报。

本文利用青藏高原地区 GPS 站网的 GPSPW 数据，针对长江中下游地区 2012 年 7 月的降水过程进行批量试验，探究青藏高原地区 GPS 数据的同化对于长江中下游地区降水预报的影响。同时，选取 2012 年 7 月发生的两次降水过程，对比分析何种情况下同化对提高模式降水预报能力有益。此外，进行延长预报时长的补充试验以探究同化正效果最明显的时段。同时，进行同化部分 GPS 站点的补充试验，进一步探究和验证同化有益的条件。通过批量试验、个例分析以及补充试验，全面评估同化青藏高原地区 GPSPW 数据对于长江中下游地区降水预报的影响，探究同化有益的条件，期望为今后我国 GPS 站点的全面布点产生一定的借鉴意义。

2 资料及同化系统简介

2.1 背景场数据与 GPSPW 数据

本文运转模式采用的背景场数据为美国全球预报系统 (Global Forecast System, GFS) 的模式输出，分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ，以 6 小时为间隔，取前 72 小时的预报结果为模式提供初值和边界。青藏高原地区的 GPSPW 数据由中国气象科学研究院提供，时间间隔为 1 小时，测站数为 20 个。站名分别为：BAIS、BFLJ、CQBB、BFDI、DAXI、GAIZ、GANZ、BEKM、LINZ、LITA、LNGZ、MNZI、NAQU、RUOE、SHEN、TNCH、XICH、XINJ、

DING、MNLA，其具体分布见图 2。该资料已经剔除了缺测时次较多的其他站点，并经过了质量控制。

2.2 实况数据

本文采用的实况降水数据由国家气象信息中心气象数据研究室提供，分为两部分。用于形势对比与实况绘图的是“中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量 0.1° 网格数据集 (1.0 版)”，资料时间间隔为 1 小时。用于模式结果统计检验的是从国家气象信息中心实时库中提取的全国测站 00 时 (协调世界时，下同) 逐日 24 小时累积降水资料，测站数接近 6000 个。

本文采用的实况水汽和风场数据为 NCEP/NCAR 免费公开发布的基于 GFS 资料的再分析资料——FNL (NCEP Final Analysis) 资料，其分辨率和时间间隔与 GFS 资料一致，但相对 GFS 资料更接近实况，用以分析东亚地区的水汽输送情况。而图 1 所用的气候数据为 NCEP/NCAR 再分析资料。

2.3 WRF 和 WRFDA

本文采用的数值模式是 2012 年 4 月 6 日发布的 WRF 3.4 版，采用的同化系统是 WRF 的同化模块 WRFDA。WRF 是目前全球在业务与科研领域运用最为广泛的中尺度模式之一，它由美国国家大气研究中心 (NCAR)、美国环境预测中心 (NCEP) 等美国的科研机构为中心开发维护。它采用完全可压的非静力模式，水平网格采用 Arakawa-C 格点，垂直方向采用地形追随质量坐标，时间积分采用 Runge-Kutta 三步时间积分方案，可在全球或区域应用，并支持多重嵌套网格与网格的双向嵌套 (Wang

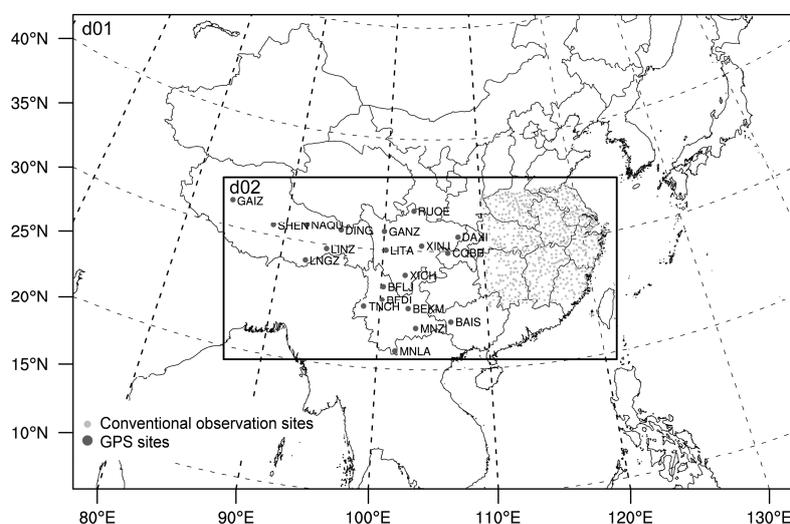


图 2 模拟区域设置及 GPS 和常规观测站点分布

Fig. 2 The simulation domains and the locations of the GPS and conventional observation sites

et al., 2012)。

WRF 的三维变分同化模块 3DVAR 的第一版于 2003 年 6 月发布, 2004 年 5 月发布了它的第二版, 2008 年发布第三版。2004 年, WRF 同化模块引入了四维变分技术 (Four Dimensional Variational, 4DVAR), 于是更名为 WRF-VAR。2008 年引入了混合变分集合算法, 更名为 WRFDA (Barker et al., 2012)。与 4DVAR 相比, 3DVAR 在计算资源有限的情况下性价比更高, 且理论成熟, 在业务上已得到普遍使用, 因此本文选用 3DVAR 进行同化试验。

3 试验方案设计

模式采用双层嵌套网格, 粗网格精度为 21 km, 格点数为 220×331, 细网格精度为 7 km, 格点数为 253×541。粗网格区域覆盖了约 50°N 以南、70°E 以东的东南亚地区, 细网格区域覆盖了青藏高原至长江中下游地区。模式模拟区域及青藏高原 GPS 站点和长江中下游地区常规观测站点分布如图 2。模式的在垂直方向取不均匀的 28 层。模式中的物理过程方案设置如表 1。

表 1 物理过程方案设置

Table 1 Setting of physics processes

物理过程	方案
微物理	WRF Single-Moment 6-class (WSM6)
长波辐射	RRTM
短波辐射	Dudhia
近地面层	MMS 相似理论
陆面	Noah
行星边界层	Yousei University (YSU)
积云参数化	Kain-Fritsch (KF)

为了评估同化 GPSPW 数据对于长江中下游地区降水预报的影响, 我们进行了三组试验, 分别为: 无资料同化的控制试验 (NoDA)、冷启动同化试验

(Cold) 以及循环同化试验 (Cycling)。模式积分时长为 72 小时, 同化试验的同化窗取 6 小时。其中 Cold 方案只在模式起报时刻进行一次冷启动同化, 然后一直积分到结束; 而 Cycling 方案除了在模式起报时刻进行一次冷启动同化外, 还在以后的每 6 小时都进行一次热启动同化, 这样在积分时段内一共进行了 12 次同化(同化分析时刻为: 00 时, 06 时, 12 时, 18 时, 24 时, 30 时, 36 时, 42 时, 48 时, 54 时, 60 时, 66 时), 如图 3。因此, 这三组试验分别对应了对 GPSPW 数据不进行同化、进行单次同化与进行多次同化。

4 试验结果检验

4.1 批量试验的降水预报检验

表 2 检验指标

Table 2 Statistics for inspection

指标名	公式及说明
TS 评分	$TS = N_A / (N_A + N_B + N_C)$ TS 评分反映模式有效预报的准确度, 在同一季度对同一地区的预报具有可比性, 可视为精确评分, 依赖事件的气候频率, 小概率事件的评分低
预报偏差	$Bias = (N_A + N_B) / (N_A + N_C)$ 预报偏差为预报降水站数与实际降水站数之比, 当预报降水站数偏多而实际降水站数偏少, $Bias > 1$, 表明该模式有多报降水的偏差; 反之, $Bias < 1$, 则说明降水预报偏少

注: N_A 、 N_B 、 N_C 的意义见表 3。

表 3 分级降水的双态分类列联表

Table 3 Contingency table of dimorphic distribution of classified precipitation

	预报有降水	预报无降水
实况有降水	N_A	N_C
实况无降水	N_B	N_D

注: N_A 表示预报有降水且实况有降水的站点数, N_B 表示预报有降水但实况无降水 (空报) 的站点数, N_C 表示预报无降水但实况有降水 (漏报) 的站点数, N_D 表示预报无降水且实况无降水的站点数

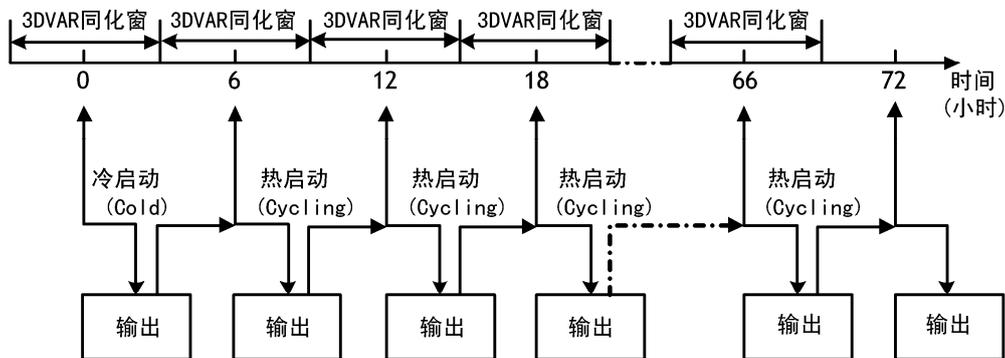


图 3 Cycling 方案 3DVAR 同化流程

Fig. 3 The process of cycling scheme with 3DVAR

本文对模式预报的 24 小时累积降水量进行五级划分: 小雨 ($R \geq 0.1$ mm)、中雨 ($R \geq 10.0$ mm)、大雨 ($R \geq 25.0$ mm)、暴雨 ($R \geq 50.0$ mm) 以及大暴雨 ($R \geq 100.0$ mm)。降水检验采用二分类预报检验法, 检验指标 TS 和 Bias 的计算公式及含义见表 2 (陈超君等 2012)。以 2012 年 7 月 2 日~7 月 31 日每天 00 时 (协调世界时, 下同) 为起报点, 对实况降水采用 NoDA 方案、Cold 方案以及 Cycling 方案进行 72 小时模拟试验, 并以长江中下游地区 ($25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, 110°E 以东之间) 的站点为标准, 剔除在所有时段内有缺测的站点 (余下站点数为 654, 站点分布见图 2), 计算 00~24 小时、24~48 小时、48~72 小时三个时段针对 5 个累积降水等级的 TS 和 Bias 得分, 得到图 4。

由图 4 左栏 TS 评分可见, 00~24 小时, 降水预报同化后比不同化有微弱的正效果。Cold 方案相对于 NoDA 方案, 对 0.1 mm 以上的累积降水等级有微弱负效果, 而对其他各累积降水等级都有不同程度的提升。Cycling 方案对 10 mm 以上的累积降水等级不如 NoDA 方案, 但对其他各累积降水等级均有最佳效果。24~48 小时, 同化方案 (Cycling 方案和 Cold 方案) 的正效果比 00~24 小时略微明

显些, 但对 100 mm 以上的累积降水等级有微弱负效果。Cold 方案对除 100 mm 以上累积降水等级外的其他累积降水等级均保持平稳的 0.01~0.02 左右的提升。而 Cycling 方案对 10 mm 以及 25 mm 以上的累积降水等级正效果不如 Cold 方案明显, 但对 50 mm 以上的累积降水等级有接近 0.03 的提升。48~72 小时, 同化的正效果变得十分明显。Cold 方案除了对 100 mm 以上的累积降水等级有微弱负效果外, 对其他累积降水等级均有约 0.02~0.04 的提升。Cycling 方案则表现出了明显的优越性, 对 5 个累积降水等级都有约 0.02~0.05 的提升, 且得分均高于 Cold 方案。

从整体上看, 对于各时段的各累积降水等级的预报, 经过 GPSPW 数据的同化后, 降水预报的 TS 评分得到了一定程度的改善。00~24 小时和 24~48 小时时段同化的正效果并不十分明显, 原因可能是同化区域位于我国四川盆地、广西、云南及青藏高原地区, 优化后的湿度场还没有完全输送到长江中下游地区。48~72 小时, 随着同化后更准确的湿度场信息输送进长江中下游地区, 同化给降水预报带来的正效果相对显著。Cycling 方案的 TS 评分略高于 Cold 方案, 原因可能是循环同化方案能够将

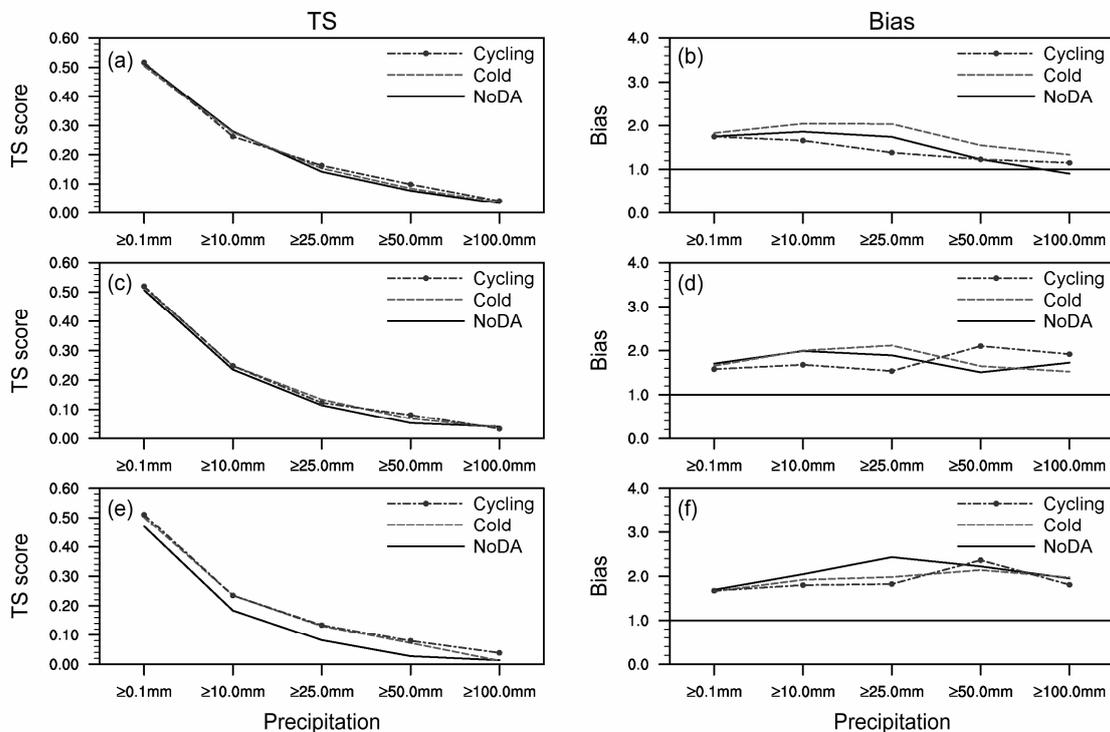


图 4 NoDA、Cold、Cycling 试验中模式对不同强度降水预报的 TS 评分以及预报偏差 (Bias), 时段为 (a, b) 0~24 h, (c, d) 24~48 h, (e, f) 48~72 h

Fig. 4 TS score and Bias in the prediction of different intensity of precipitation from schemes NoDA, Cold, and Cycling, the time period is (a, b) 0~24 h, (c, d) 24~48 h, (e, f) 48~72 h

同化的正效果进行不断累积,使模式的湿度场在 72 小时的预报时段内都比 Cold 方案更接近实况。同时,从图中还能看出,同化 GPSPW 数据后,对于日降水 50 mm 以上的暴雨的预报,同化后在各时段均有一定程度的提升,且在 48~72 小时提升最为明显。而对于日降水 100 mm 以上的特大暴雨的预报,在 00~24 和 24~48 小时时段,同化几乎没有改善效果,但在 48~72 小时, Cycling 方案带来的正面效果尤为明显。

由图 4 右栏预报偏差 (Bias) 可见,除了 00~24 小时 NoDA 方案对 100 mm 以上累积降水等级有略微的偏少外,模式三种方案对降水发生的预报在整体上都比实况偏多。00~24 小时时段, Cycling 方案偏差最小, NoDA 方案次之, Cold 方案偏差较大; 24~48 小时时段, Cycling 方案对于 0.1 mm、10 mm 以及 25 mm 以上的累积降水等级的预报偏差最小,但对 50 mm 以及 100 mm 以上累积降水等级偏差最大; 48~72 小时时段, Cycling 方案对 50 mm 以上累积降水等级的预报偏差最大,但对其他累积降水等级的预报偏差最小。可见, Cycling 方案使得模式过多地预报有降水的倾向在整体上有所缓解,但在 24~48 小时时段内对于 50 mm 和 100 mm 以上累积降水等级以及 48~72 小时时段内对于 50 mm 以上累积降水等级偏差较大,意味着 Cycling 方案使得模式倾向于更多地预报有暴雨以上等级的降水发生。而 Cold 方案在 00~24 小时以及 24~48 小时时段内加剧了模式更多地预报有降水发生的倾向,到 48~72 小时才起到了抑制这种倾向的作用。

由图 4 分析可以知道,同化方案 (Cold 方案和 Cycling 方案) 在整体上优于不同化方案 (NoDA 方案),且对于降水预报的提升在 48~72 小时时段内最明显。而 Cycling 方案与 Cold 方案相比更具优势,主要体现在对降水预报的偏差 (Bias) 上。可见在起报时刻的一次冷启动同化在整体上不如循环同化更能提升模式降水预报的性能。

以上检验方法的结果受降水落区预报的影响较大。为了全面评估同化的效果,还要对最大降水量进行检验。

将各时段各方案预报降水插值到站点上后,统计每日的最大降水量,计算与实况站点最大降水量的绝对误差后得到图 5。该图主要反映了同化方案产生正效果的频数。经统计,对于最大降水量的预

报,00~24 小时时段内, Cold 方案在 30 天中有 14 天相对于 NoDA 方案有正效果,在 24~48 小时时段,正效果天数为 18 天,在 48~72 小时时段内,正效果天数为 14 天。而 Cycling 方案在三个时段内都有 17 天相对于 NoDA 方案有正效果。可见,在正效果的频数方面, Cycling 方案表现较为稳定,对于最大降水量的预报有一定程度的改善作用。而 Cold 方案综合三个时段来看,正效果不明显。同时,我们也注意到 Cycling 方案在 7 月 12 日的 00~24 小时时段、7 月 15 日的 24~48 小时时段以及 7 月 14 日的 48~72 小时时段对于最大降水量的预报有着较大的偏差,说明在某些特殊时段内, Cycling 方案仍然可能会给模式带来某些负面影响,其具体原因有待于进一步研究。

计算各方案相对于实况最大降水量的均方根误差 (RMSE),得到表 4。该表反映了同化方案正效果的总体程度。由表可见,在 00~24 小时时段内, Cold 方案和 Cycling 方案对于最大降水量的误差均大于 NoDA 方案, Cycling 方案的误差最大。24 小时以后,同化方案表现出了优越性:在 24~48 小时时段, Cold 方案都表现出了最佳的预报效果, Cycling 方案次之;在 48~72 小时时段, Cycling 方案最佳, Cold 方案次之。

表 4 各方案相对于实况最大降水量的均方根误差 RMSE (单位: mm d⁻¹)

Table 4 RMSE of the maximum precipitation from every scheme with regard to the observation (unit: mm d⁻¹)

时段	方案		
	NoDA	Cold	Cycling
0~24 h	65.49	65.81	77.61
24~48 h	64.49	54.56	58.52
48~72 h	68.32	70.30	61.92

综上所述,对于最大降水量的预报,从同化正效果的频数以及程度综合来看, Cycling 方案和 Cold 方案与 NoDA 方案相比都有一定程度的正效果,正效果的程度在 24 小时内不甚明显,但在 24 小时以后逐渐加大。

通过对批量试验的以上检验分析,可以得出结论:从整体上看,对于降水落区的预报, Cycling 方案和 Cold 方案都有一定程度的正效果,00~24 小时时段内正效果不明显,24~48 小时正效果逐渐显现,48~72 小时正效果突出,且 Cycling 方案在整体上略优于 Cold 方案。对于最大降水量的预报,

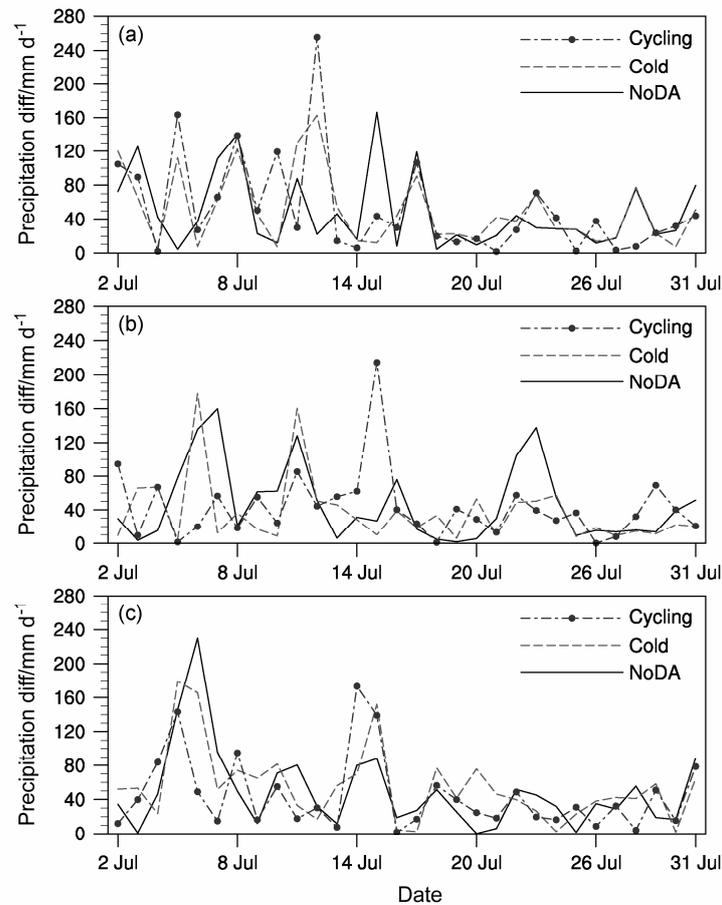


图 5 各时段各方案预报降水插值到站点上所得最大降水量与实况站点最大降水量的绝对误差, 时段为 (a) 0~24 h, (b) 24~48 h, (c) 48~72 h。单位: mm d^{-1}

Fig. 5 The absolute differences of the maximum of precipitation between the results interpolated to the sites from every scheme and the observations, the time period is (a) 0~24 h, (b) 24~48 h, (c) 48~72 h. unit: mm d^{-1}

与 NoDA 方案相比, Cycling 方案和 Cold 方案也都有一定程度的正效果, 正效果主要在 24 小时以后出现, 且 Cycling 方案的效果更好。正如上文所述, 同化方案的正效果在 24 小时以后才逐渐显现的原因, 可能是由于同化信息在 24 小时内没有完全输送进关注区域, 而在 24 小时以后, 模式因同化而逐渐获得更加接近实况的湿度场。而 Cycling 方案的正效果比 Cold 方案更明显, 说明多次同化能够不断累积同化正效果, 比单次同化更具优越性。此外, 同化 GPSPW 数据能在一定程度上改善模式针对暴雨及特大暴雨的预报能力。

4.2 个例分析

为了探究同化青藏高原地区 GPSPW 数据对长江中下游地区的降水预报在何种情况下有益, 何种情况下效果不明显。下面将选取两次降水个例, 针对我国西南部水汽输送的情况与降水 TS 评分的关

系, 进行对比分析。

(1) 效果明显的个例

2012 年 7 月 14 日 00 时至 17 日 00 时, 长江中下游地区经历了一次降水过程。从起报时刻开始, 00~24 小时时段内降水量 100 mm 以上的大暴雨区分布在湖南、江西、安徽、浙江、江苏等地; 24~48 小时, 长江以北地区雨势减小, 大暴雨带横跨在江西中部; 48~72 小时, 大暴雨区主要在湖南东部以及江西西部, 范围最大。

图 6 是针对这个降水个例的实况以及 NoDA、Cold、Cycling 三种方案的模拟结果。从图中可以看出, 00~24 小时 NoDA、Cold、Cycling 三种预报方案都较好地模拟出了大暴雨区的位置, 但在浙江省内都有一定程度的漏报。在这一时段内, Cycling 方案与 Cold 方案和 NoDA 方案相比, 对于大暴雨雨带的预报并无明显优势。24~48 小时, NoDA 方案

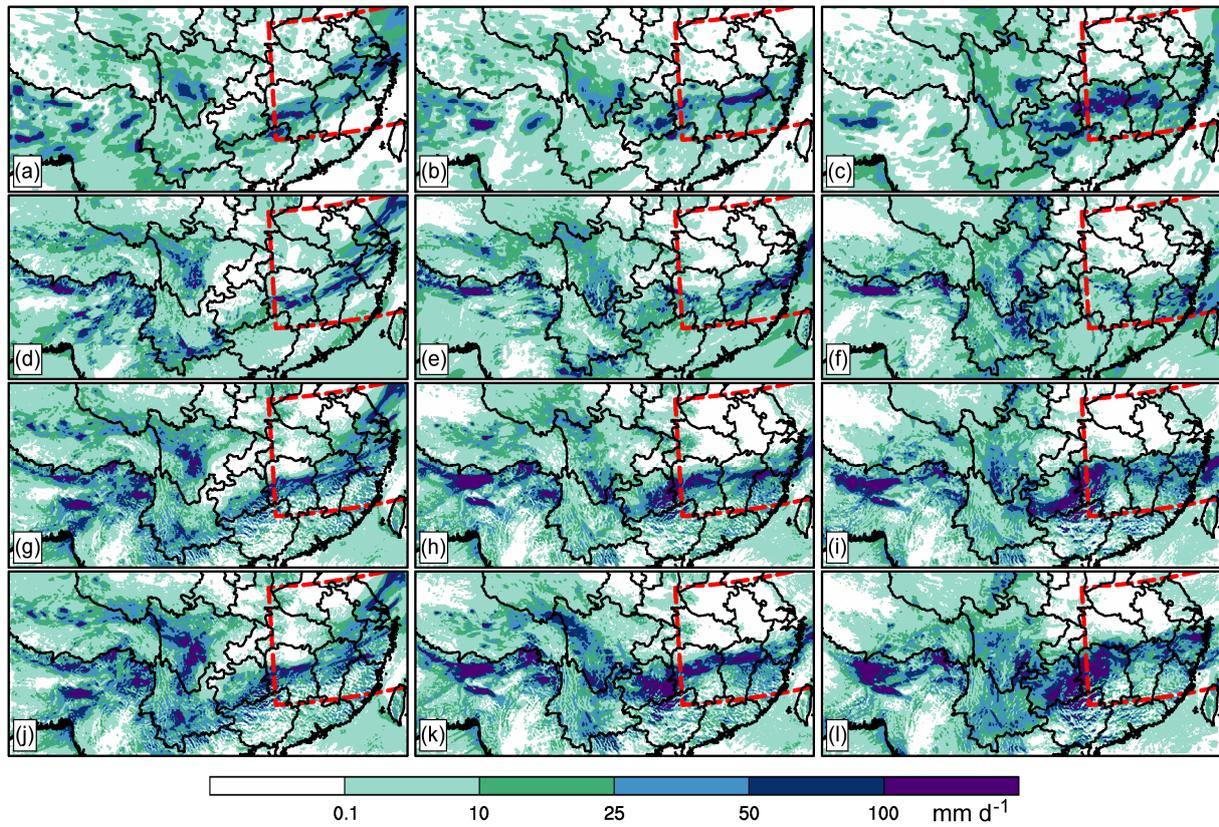


图6 2012年7月14日00时起报的三种方案的0~24 h、24~48 h以及48~72 h的24 h累积降水与实况的对比。0~24 h累积降水为(a)实况、(d) NoDA、(g) Cold、(j) Cycling; 24~48 h累积降水为(b)实况、(e) NoDA、(h) Cold、(k) Cycling; 48~72 h累积降水为(c)实况、(f) NoDA、(i) Cold、(l) Cycling。单位: mm d^{-1}

Fig. 6 Contrast between the 24-hour cumulative precipitation predicted with three schemes and the observations, the initial time is 0000 UTC on 14 July 2012. Cumulative precipitation for 0~24 h is from (a) observation, (d) NoDA, (g) Cold, (j) Cycling; 24~48 h is from (b) observation, (e) NoDA, (h) Cold, (k) cycling; 48~72 h is from (c) observation, (f) NoDA, (i) Cold, (l) Cycling. unit: mm d^{-1}

对于江西中部的大暴雨带预报的位置偏东偏南, 而 Cold 方案与 Cycling 方案针对这一大暴雨带有较好的模拟效果, 且 Cycling 方案模拟的形状比 Cold 方案更接近实况, 但在湖南中部, 两种同化方案对于大暴雨都存在着较多的空报。48~72 小时, NoDA 方案未能预报出位于湖南中北部的大暴雨区, Cold 方案与 Cycling 方案对于这一大暴雨区有着较好的察觉, 且 Cycling 方案模拟出的暴雨区范围比 Cold 方案更大些, 相对更接近实况, 不过仍然显得滞后于实况。而三种方案对于江西地区的局部大暴雨区都存在着不同程度的漏报。

图7左栏是针对这个降水个例的 TS 评分。评分结果与以上分析基本一致。从图中可以看出, 00~24 小时时段, 同化方案产生了一定程度的负效果, 整体上不如 NoDA 方案。24~48 小时时段, 同化方案对于除 100 mm 以上的累积降水等级

外的其他等级的预报都有大幅度改善, 且 Cycling 方案改善效果比 Cold 方案更明显, 而对于 100 mm 以上的累积降水等级, Cold 方案与 Cycling 方案都不如 NoDA 方案, 这主要是由于湖南中部地区的空报造成了减分。在 48~72 小时时段, 相对于 NoDA 方案, Cycling 方案与 Cold 方案对各累积降水等级的预报都有非常明显的改善, 而 Cycling 方案对于 100 mm 以上累积降水的预报效果尤为突出。

水汽的空间分布具有连续性, 因此某地某时的水汽供应将主要来自其上游前一时段内的水汽通量的输送。从天气学角度看, 对于长江中下游地区, 从 GPS 站网所在位置输送而来的水汽, 大约要经过 24 小时的输送时间。因此, 下面关注 24 小时平均水汽输送情况与长江中下游地区降水 TS 评分的关系。

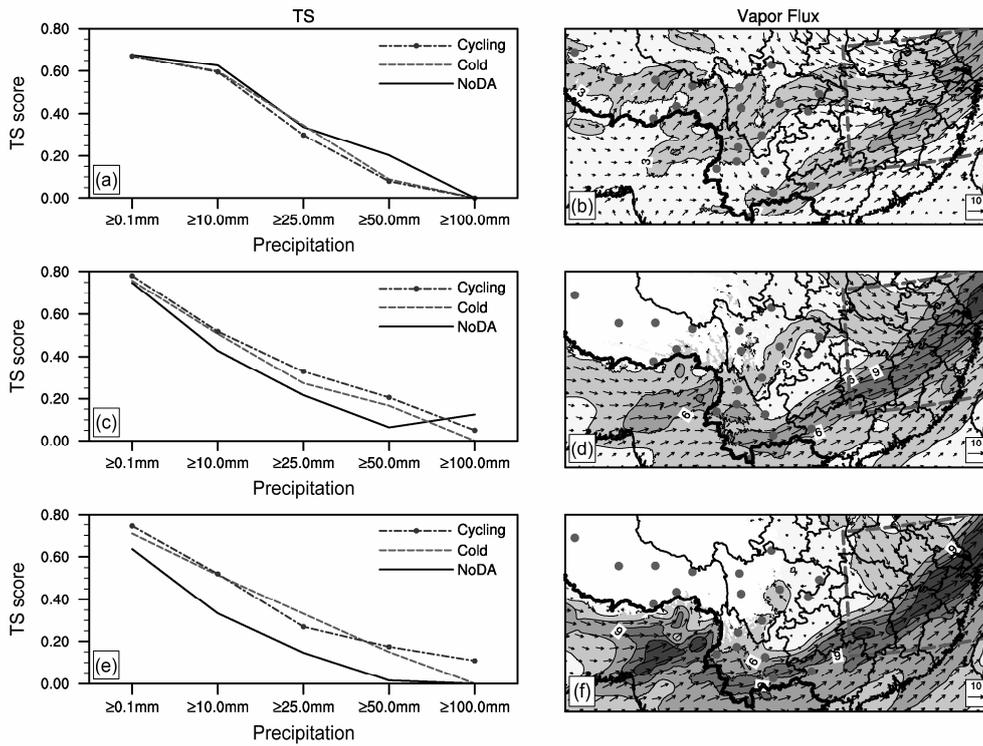


图7 (a, c, e) 同图4中的TS评分, 但针对的是2012年7月14日00时起报的降水个例。(b, d, f) 2012年7月14日00时~15日00时各层的24 h平均水汽输送情况: (a) 500 hPa; (d) 600 hPa; (f) 700 hPa。图中圆点表示GPS站点。风矢量单位: m s^{-1} , 水汽通量单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$
Fig. 7 (a, c, e) Same as Fig. 4 (a, c, e), but for the initial time is 0000 UTC on 14 July 2012. (b, d, f) The 24-hour mean water vapor flux from 0000 UTC on 14 July 2012 to 0000 UTC on 15 July 2012: (b) 500 hPa; (d) 600 hPa; (f) 700 hPa. The dots stand for the GPS sites; wind speed units: m s^{-1}

图7右栏是2012年7月14日00时~15日00时500 hPa、600 hPa、700 hPa三层的24小时平均水汽输送情况。从图中可以看出, 在这一时段内, 700 hPa层次上, 有向长江中下游地区输送趋势的水汽输送带主要通过了云南地区的5个GPS站点以及广西地区的1个GPS站点。600 hPa层次上的情况与700 hPa层次上的情况基本相同, 但水汽输送带不仅经过广西地区的1个GPS站点, 同时也将云南地区所有6个GPS站点都覆盖了, 且覆盖到了位于四川地区的个别GPS站点。500 hPa层次与600 hPa和700 hPa层次上的水汽输送相比, 水汽输送量相对较小, 但可以看出, 对长江中下游地区降水具有贡献的水汽输送带较多地经过了高原上的GPS站点。所以, 不论在中低层还是高层, 对长江中下游地区降水具有贡献的水汽输送带都较多地经过了GPS站点所在区域。

与此形成鲜明对比的是下面要分析的效果不明显的个例。

(2) 效果不明显的个例

图8左栏为2012年7月18日00时起报进行

72小时预报的TS评分结果, 从图中可以看出, 这次预报同化方案在各时段针对各累积降水等级整体上没有明显的正效果。

图8右栏是2012年7月18日00时~19日00时500 hPa、600 hPa、700 hPa三层的24小时平均水汽输送情况。该时段内的水汽输送情况比较有趣, 对于长江中下游地区降水有贡献的水汽输送带在三个层次上都只覆盖到了位于广西地区的1个GPS站点, 绕开了大部分GPS站点所在的位置。

(3) 讨论

众所周知, 天气尺度的降水主要受两方面条件的影响: 一是水汽的供应, 二是垂直运动的发展。GPSPW资料对湿度的时间变化较为敏感, 因此同化GPSPW数据主要修正的是模式场的水汽信息, 这一修正有助于模式更加准确地捕捉水汽带的变化趋势, 从而改进模式对于降水的预报性能。

对于同化方案具有明显正效果的个例, 在起报时刻开始的00~24小时时段内, 对长江中下游地区72小时降水有贡献的水汽输送带较多地经过了GPS站点所在的位置, 因此水汽输送带的信息被

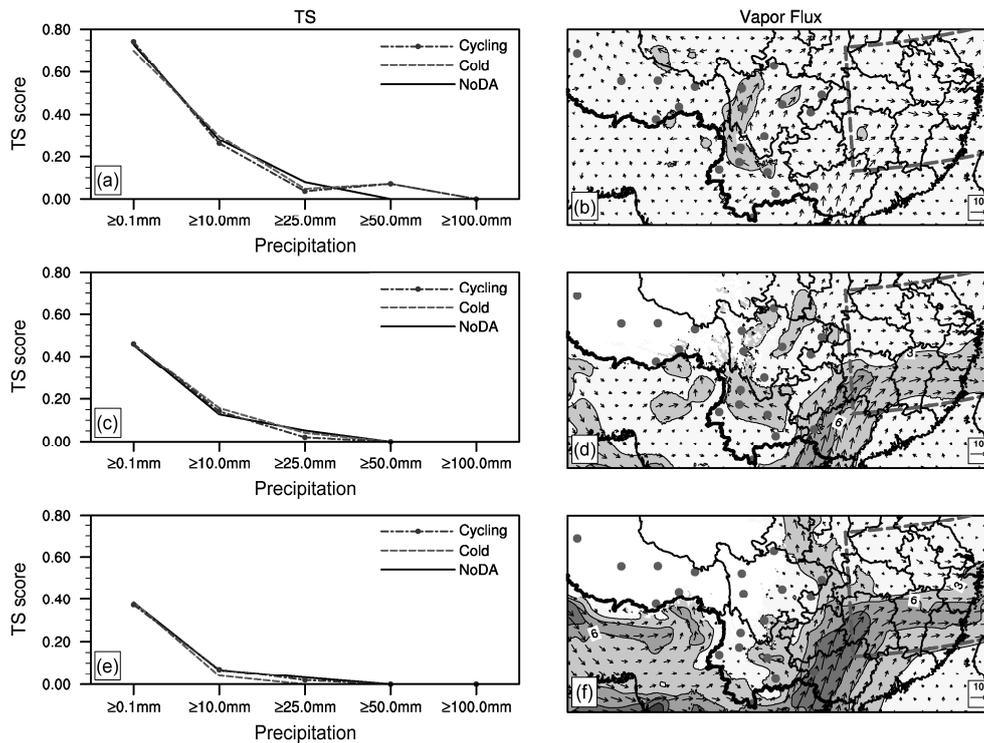


图8 同图7, 但 (a, c, e) TS 评分的起报时刻为 2012 年 7 月 18 日 00 时, (b, d, f) 时段为 2012 年 7 月 18 日 00 时~19 日 00 时

Fig. 8 Same as Fig. 7, but that (a, c, e) the initial time is 0000 UTC on 18 July 2012 and (b, d, f) the time period is from 0000 UTC on 18 July 2012 to 0000 UTC on 19 July 2012

GPS 站网很好地捕捉到, 并通过同化系统同化进模式, 使后续时段的预报准确度得以提高。而与此相对应的是, 正如上文所述的同化正效果不明显的个例, 如果水汽输送带不经过或者较少地经过 GPS 站点所在位置, 那么同化这些站点的 GPSPW 数据将很难对远在近千公里外地区的未来 24~72 小时的降水预报起到正面效果。

5 补充试验

5.1 关于同化正效果最明显时段的探索

通过以上对批量试验的降水预报检验以及个例分析可知, 同化青藏高原地区的 GPSPW 数据对于长江中下游地区的降水预报是有益的。而同化带来的正效果表现出了明显的时段性, 在 00~24 小时、24~48 小时、48~72 小时三个时段内, 同化带来的正效果呈现递增趋势。那么, 这种递增趋势是否能在更长的预报时段内继续维持, 同化 GPSPW 数据究竟在哪个预报时段能给模式的降水预报性能带来最明显的提升? 为了探究这一问题, 进行延长预报时长的批量试验, 将原来的 72 小时预报时长延长至 120 小时, 寻找同化正效果最明显

的预报时段。由于 Cycling 方案在整体上表现出了比 Cold 方案更优的性能, 这里只比较 Cycling 方案相对于 NoDA 方案的性能提升。同时, 这组批量试验只选取 7 月 2 日至 7 月 16 日每日 00 时的 15 个起报点进行, 因为在 4.1 节的批量试验中, 发现从 7 月 22 日以后同化带来的正效果并不明显(其中原因将在 5.2 节予以解释)。

图 9a-e 分别是延长预报时长后批量试验中 Cycling 方案与 NoDA 方案在 00~24 小时、24~48 小时、48~72 小时、72~96 小时以及 96~120 小时时段内的 TS 评分。从图中可以看出, WRF 作为中尺度模式, 随着预报时长的延长, 模式的降水预报能力在 72 小时以后明显下降(比如对于 0.1 mm 以上累积降水等级, 在 72 小时前 NoDA 方案作为控制试验, TS 得分高于 0.5, 但在 72 小时以后, TS 得分低于 0.5)。而图 9f 显示了各时段的 Cycling 方案与 NoDA 方案的 TS 评分差值。由图可以看出, 同化青藏高原地区 GPS 站点的 GPSPW 数据对长江中下游地区带来的性能提升在 5 个预报时段内呈现出一种以 48~72 小时时段为分水岭的对称性。即同化的最大正面效果出现在 48~72 小时预报时段,

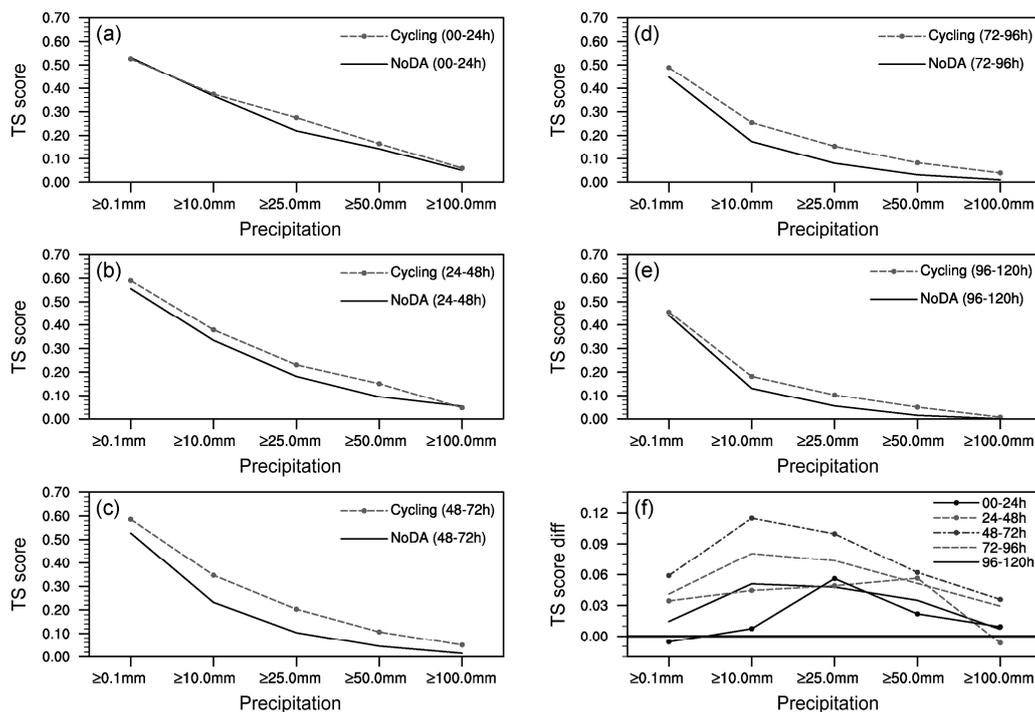


图9 2012年7月2日至7月16日每日00时起报的15个起报点的批量试验。Cycling方案与NoDA方案的TS评分:(a)0~24h时段;(b)24~48h时段;(c)48~72h时段;(d)72~96h时段;(e)96~120h时段内。(f)各时段Cycling方案与NoDA方案的TS评分差值

Fig. 9 A batch experiment consisting of fifteen initial time points at 0000 UTC from 2 July 2012 to 16 July 2012. The TS scores for schemes Cycling and NoDA: (a) 0–24 h; (b) 24–48 h; (c) 48–72 h; (d) 72–96 h; (e) 96–120 h. (f) The difference of TS scores between schemes Cycling and NoDA during each time period

在该时段以前同化的正效果不够明显,而在该时段以后,同化带来的正效果也逐渐减弱。同时注意到,72~96小时时段与24~48小时时段相比,以及96~120小时时段与00~24小时时段相比,都是前者的提升较明显一些。可见同化的累积效果给模式带来了较为深远的正面影响,这种正面影响比模式刚启动时更大。但是WRF作为一个中尺度模式有着固有的有效预报时长,当预报时长延长到一定程度时,受到模式本身性能下降的限制,同化的正效果逐渐被模式其他方面的误差所掩盖,因此不可避免地趋于微弱。

综上所述可以基本认为,对于Cycling方案,同化GPSPW数据获得正效果最明显的时段为48~72小时。

5.2 关于同化正效果来源的探索

通过4.2节中的个例分析可知,同化是否能够带来正效果可能与水汽输送带覆盖GPS站点的程度有关。如果水汽输送带较多的覆盖到GPS站点,那么关于水汽输送带的准确信息将被模式捕捉

到,从而提高降水预报性能;反之,则同化趋于无益。为了进一步验证上述猜想,进行减少同化GPS站点的同化试验,即只同化部分GPS站点的资料,检验其降水预报性能,并与原同化方案比较。同样根据前文的研究,Cycling方案的整体性能优于Cold方案,因此这里只针对Cycling方案进行减少GPS站点的同化试验,命名为Cycling_less方案。

图10是2012年7月12日00时~13日00时500 hPa、600 hPa、700 hPa三层的24小时平均水汽输送情况。从图中可以看到,对长江中下游地区降水有较大贡献的水汽输送带覆盖的站点主要为青藏高原东南部及东部的10个站点:BAIS、BFLJ、CQBB、BFDI、DAXI、BEKM、MNZI、TNCH、XICH、MNLA。虽然在高原上仍有几个站被500 hPa层次上的水汽输送带覆盖,但相对而言水汽通量量级较小。因此首先优先选取上述10个站点进行Cycling_less方案的试验,命名为Cycling_less_a方案。

对模拟结果进行TS评分,得到图11。由图可

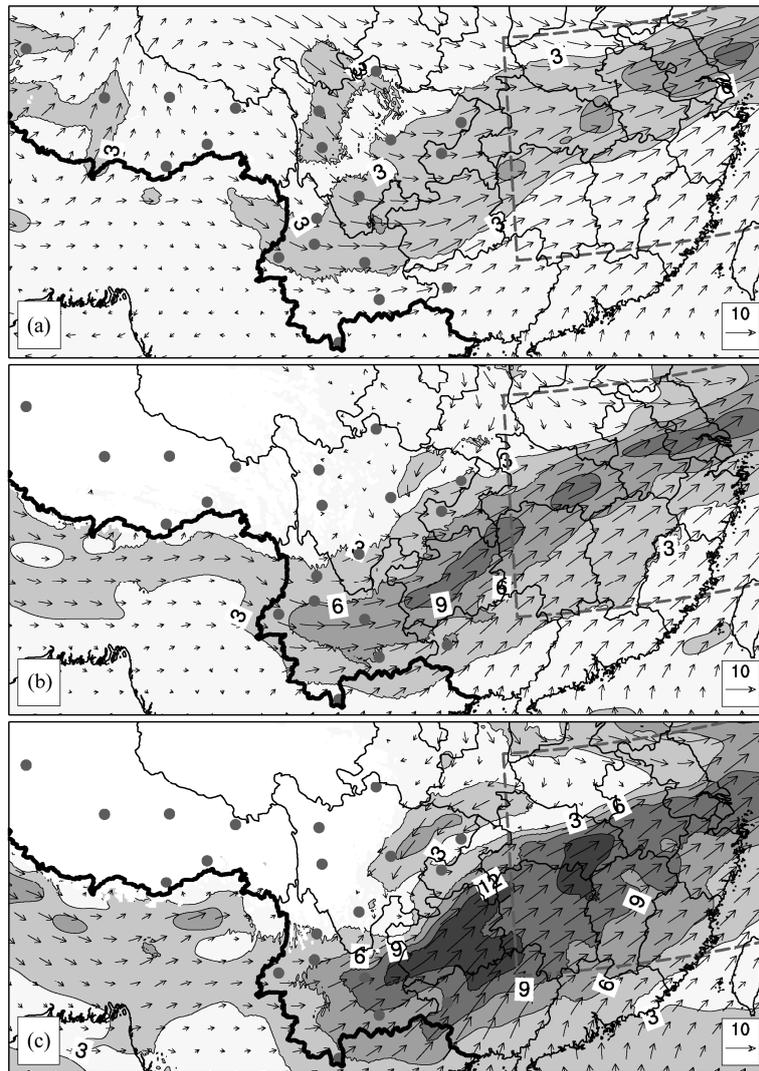


图 10 同图 7 右栏, 但时段为 2012 年 7 月 12 日 00 时~13 日 00 时

Fig. 10 Same as the right column in Fig. 7, but that the time period is from 0000 UTC on 12 July 2012 to 0000 UTC on 13 July 2012

以看出, *Cycling_less_a* 方案与 *Cycling* 方案相比, 几乎具有同等程度的正效果。在 00~24 小时与 24~48 小时时段内, *Cycling_less_a* 方案比 *Cycling* 方案略差, 但差距很小。而 48~72 小时时段内, *Cycling_less_a* 方案甚至整体上还优于 *Cycling* 方案, 它对 0.1 mm、10 mm 以及 50 mm 以上的三个累积降水等级的预报都得到了比 *Cycling* 方案更高的 TS 评分。

那么, 如果同化上述 10 个站点以外的另外 10 个站点会是怎样的结果呢?

对另外 10 个站点进行 GPSPW 数据的同化, 进行 72 小时的数值模拟, 这 10 个站点为: GAIZ、GANZ、LINZ、LITA、LNGZ、NAQU、RUOE、

SHEN、XINJ、DING。命名该方案为 *Cycling_less_b* 方案。图 12 是模拟结果的 TS 评分。从图中可以明显地看出, 同化这 10 个 GPS 站点的 GPSPW 数据对于降水预报的 TS 评分改善作用并不明显。*Cycling_less_b* 方案在 00~24 小时以及 24~48 小时时段存在一定的负效果, 只有在 48~72 小时时段内才在一定程度上靠近 *Cycling* 方案。

同化 GPSPW 数据直接修正的是初始场的 PW 场, 因此我们可以从 PW 场的角度来检查两种 *Cycling_less* 方案的同化作用。

图 13a、b 是 2012 年 7 月 12 日 00 时刻两种 *Cycling_less* 方案与 *Cycling* 方案的 PW 场的差值场。从图 13a 可以看出, 在 00 时, 由于没有同化

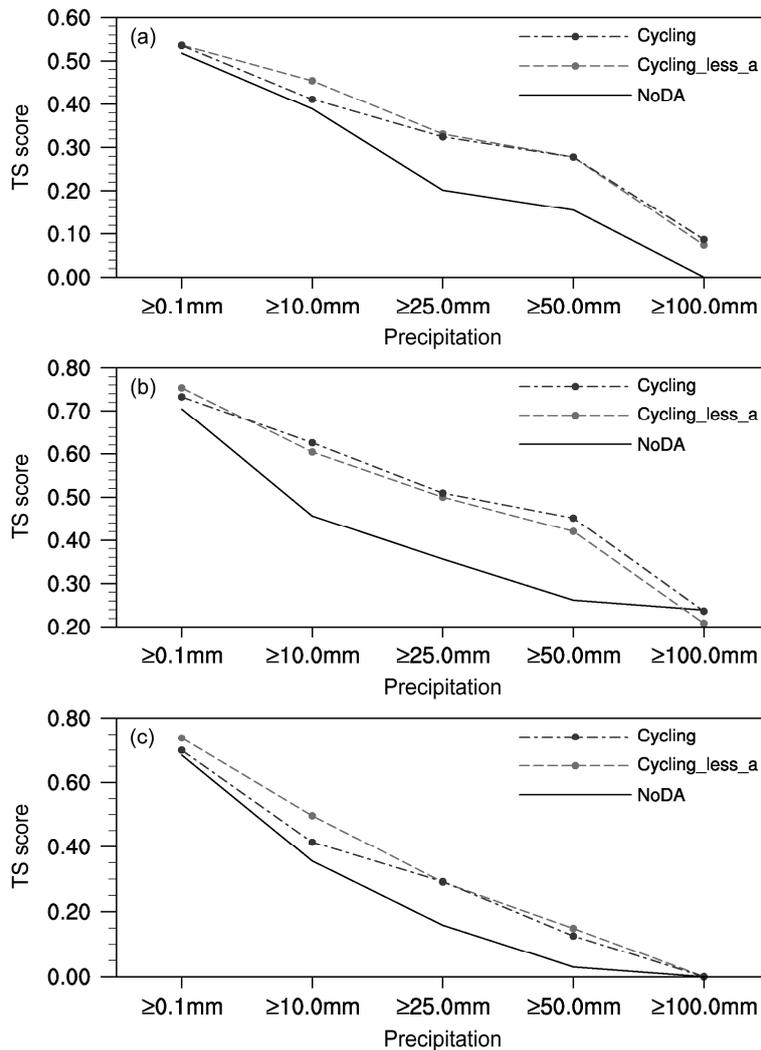


图 11 同图 7 左栏, 但起报时刻为 2012 年 7 月 12 日 00 时, 比较的是 NoDA、Cycling_less_a、Cycling 方案
 Fig. 11 Same as the left column in Fig. 7, but that the initial time is 0000 UTC on 12 July 2012 and that the contrast is conducted among schemes NoDA, Cycling_less_a, and Cycling

高原上的 10 个 GPS 站点, 导致 PW 值在这些区域有约 0.4~2.4 mm 的偏少, 而在孟加拉国和缅甸与高原交界处 PW 值偏少得更厉害。从图 13b 可以看出, 由于起报时刻没有同化高原东南部及东部的 10 个 GPS 站点, 而这些区域又是主要水汽输送带通过的地方 (图 10), 因此这些区域的 PW 值相对于 Cycling 方案有较多的偏差, 在重庆、西安地区存在两个偏差大值区, 且位于西安地区的偏差大值区直接影响到了部分长江中下游地区。而图 13c 是各时刻两方案相对于 Cycling 方案的 RMSE。由图可见, Cycling_less_a 方案的 RMSE 值在 72 小时内的各个时刻都低于 Cycling_less_b 方案, 这意味着 Cycling_less_a 方案对 PW 场的刻画相对

Cycling_less_b 方案更接近 Cycling 方案, 也就是说, Cycling_less_a 方案对于 PW 场的调整能力比 Cycling_less_b 方案更接近 Cycling 方案。这在一定程度上导致了 Cycling_less_a 方案的 TS 评分比 Cycling_less_b 方案更接近 Cycling 方案。

为了进一步验证上述对于个别站点进行针对性同化的可行性, 进行批量的针对性同化试验 Cycling_less_a。选站原则仍然基于水汽通量的分布, 即选取被对长江中下游地区有贡献的水汽输送带覆盖到的站点进行同化。由于每天的天气状况不同, 选取的站点组合并不固定, 具体选站情况见表 5。同样为了突出对比选择站点不同带来的同化效果的差异, 对上述站点选取情况进行反选 (不选择

表 5 针对性批量同化试验 Cycling_less_a 的站点选取

Table 5 The stations picked to conduct targeted batch assimilation experiment Cycling_less_a

起报时刻 (UTC)	选取站点	站点数
2012 年 7 月 2 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 3 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 4 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 5 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI XINJ XICH MNLA	10
2012 年 7 月 6 日 00 时	XINJ BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 7 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI LITA GANZ TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 8 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 9 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 10 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB XINJ DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 11 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB XINJ DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 12 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB XINJ DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 13 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB XINJ DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA	10
2012 年 7 月 14 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA XINJ	11
2012 年 7 月 15 日 00 时	BAIS BFLJ BFDI BEKM MNZI TNCH MNLA	7
2012 年 7 月 16 日 00 时	BAIS BFLJ BFDI BEKM MNZI TNCH MNLA	7
2012 年 7 月 17 日 00 时	BAIS MNZI TNCH MNLA	4
2012 年 7 月 18 日 00 时	BAIS	1
2012 年 7 月 19 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH XINJ	10
2012 年 7 月 20 日 00 时	BAIS BFLJ CQBB BFDI DAXI BEKM MNZI TNCH XICH MNLA XINJ	11
2012 年 7 月 21 日 00 时	BAIS CQBB DAXI BEKM MNZI TNCH MNLA	7
2012 年 7 月 22 日 00 时	DAXI	1
2012 年 7 月 23 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 24 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 25 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 26 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 27 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 28 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 29 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 30 日 00 时	-	0
2012 年 7 月 31 日 00 时	-	0

表中出现的站点), 即选择水汽输送带较少覆盖到的站点进行批量的同化试验 Cycling_less_b。

图 14 是两种选站情况下针对性同化批量试验的 TS 评分对比, 图中虚线表示 Cycling 方案而实线代表 NoDA 方案。由图 14c 可见, Cycling_less_a 方案对于各累积降水等级的 TS 评分都比较接近 Cycling 方案, 而 Cycling_less_b 方案与 NoDA 方案比正效果并不明显。该图很好地印证了前面的猜想, 即只同化被水汽输送带主要覆盖到的 GPS 站点也能够保持住大部分的同化正效果, 而只同化那些不被水汽输送带覆盖到的 GPS 站点, 同化带来的正效果不明显。值得注意的是, 基于能够保持住大部分同化正效果的选站原则, 从 7 月 2 日 00 时至 7

月 31 日 00 时 30 个起报点的平均同化站点数只有 6 个。

需要再次说明的是, 表 5 中站点的选取是定性的, 是根据如图 10 的水汽通量情况人为判定的, 并不精确。而选取的情况虽然每天有细微的差异, 但大多选择了高原东部和东南部的站点, 这种大体上一致但每日有差别的选取情况, 与水汽输送的气候态以及每日变化相对应。7 月 18 日只选择了 BAIS 一个站点, 因为从图 8 右栏可以看出只有 BAIS 这个站点被对长江中下游地区有贡献的水汽输送带覆盖。而在 7 月 22 日以后, 由于第 8 号台风“韦森特”的逐渐靠近, 中国南部的风速流场从原来的西南气流转为偏东气流 (图略), 这意味着长江中

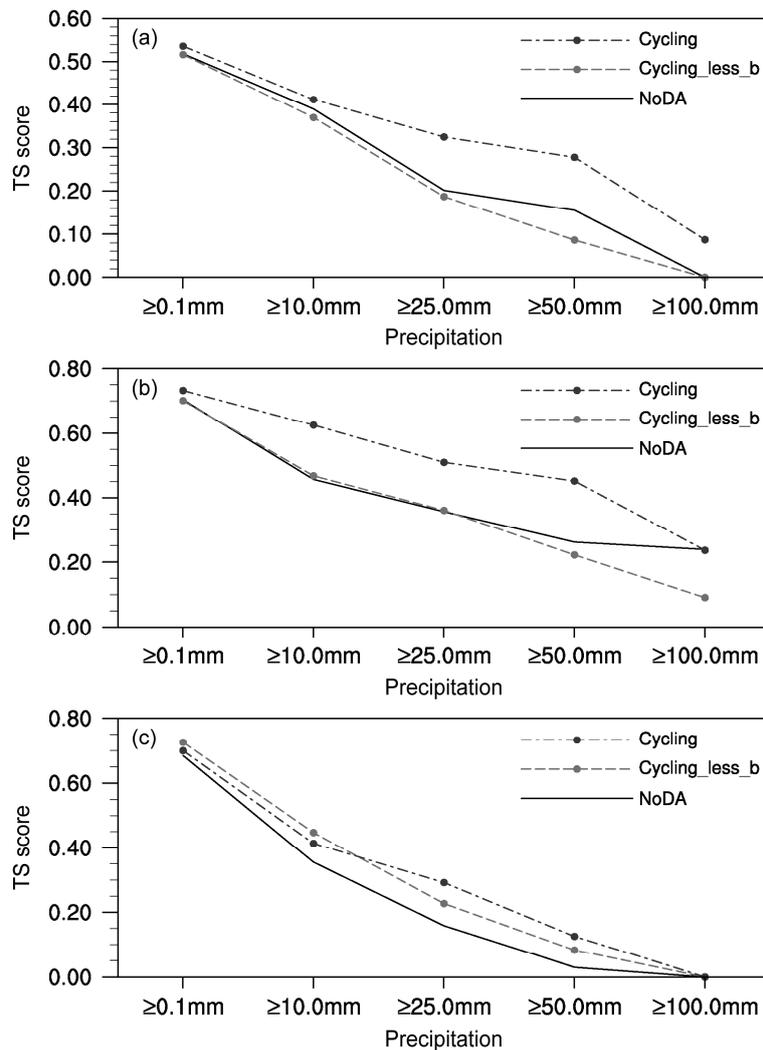


图 12 同图 11, 但同化的是另外 10 个站点: GAIZ、GANZ、LINZ、LITA、LNGZ、NAQU、RUOE、SHEN、XINJ、DING

Fig. 12 Same as Fig. 11, but that the assimilated ten sites are: GAIZ, GANZ, LINZ, LITA, LNGZ, NAQU, RUOE, SHEN, XINJ, DING

下游地区的降水水汽来源发生了改变, 自南亚孟加拉湾而来的水汽带受到台风影响而转变了方向。这种影响一直持续到 7 月末都未能改变, 因为在“韦森特”离开以后, 第 9 号台风“苏拉”又接踵而至了。因此, 基于前面提到的选站原则, 认为 7 月下旬时段内同化青藏高原地区的 GPS 站点无法期望得到正面效果。

综上所述, 降水的 TS 评分与水汽输送带经过同化区域的站点数量存在一定的联系, 同化的正效果主要来源于水汽输送带覆盖到的 GPS 站点的 GPSPW 数据的同化。只同化被水汽输送带覆盖到的 GPS 站点的 GPSPW 数据, 仍然能够保留住大部分的同化正效果。同化不被水汽输送带覆盖到的 GPS 站点的 GPSPW 数据对于提高降水预报能力贡

献不大。因此, 针对性地同化 GPSPW 数据是可行的。

6 结语

通过进行对于青藏高原地区 GPSPW 数据的一系列同化试验, 检验并评估其对长江中下游地区降水预报的影响, 得出以下结论:

(1) 同化青藏高原地区 GPSPW 数据, 对长江中下游地区的降水预报有一定程度的正面效果。正效果在 00~24 小时时段内不是很明显, 在 24~48 小时时段内正效果逐渐显现, 在 48~72 小时时段内具有明显正效果。而基于多次同化的循环同化方案 (Cycling) 在整体上优于基于单次同化的冷启动同化方案 (Cold)。

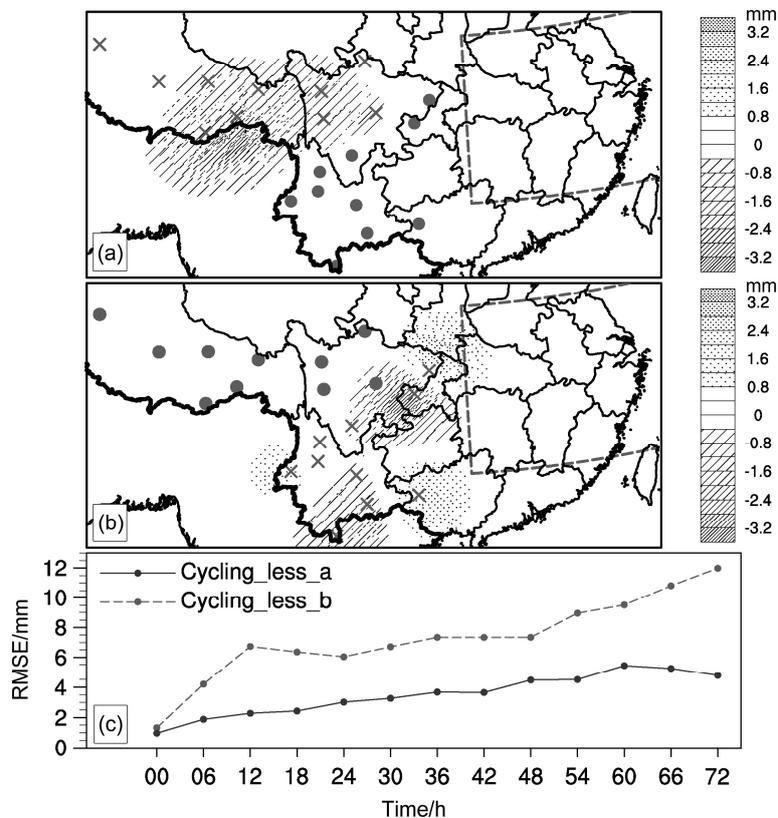


图 13 2012 年 7 月 12 日 00 时的 (a) Cycling_less_a 方案与 Cycling 方案的 PW 差值场以及 (b) Cycling_less_b 方案与 Cycling 方案的 PW 差值场。图中圆点表示该站点参与同化, “×”号表示该站点不参与同化。(a) 2012 年 7 月 12 日 00 时起报的各时刻 Cycling_less_a 方案与 Cycling_less_b 方案相对于 Cycling 方案的 PW 场的 RMSE, 考察范围为长江中下游地区。单位: mm

Fig. 13 The differences of PW fields at 0000 UTC on 12 July 2012 between (a) schemes Cycling_less_a and Cycling, (b) schemes Cycling_less_b and Cycling. The dots stand for the GPS sites that are assimilated while “×” stands for the ones that are not. (c) The RMSEs of PW fields between the results from schemes Cycling_less_a, Cycling_less_b and Cycling respectively, the initial time is 0000 UTC on 12 July 2012 and the area of inspection is the middle and lower reaches of the Yangtze River. Units: mm

(2) 对于 Cycling 方案, 在 120 小时预报时长内, 同化上游 GPS 站点数据对长江中下游地区带来最大正面效果的时段为 48~72 小时, 在该时段以前同化的正效果不够明显, 而在该时段以后, 中尺度模式 WRF 的降水预报能力大幅度下降, 同化带来的正效果也逐渐减弱。

(3) 当水汽输送带较多地经过同化区域时, 降水的 TS 评分在整体上能得到明显改善; 而当水汽输送带较少地经过同化区域时, 整体上降水的 TS 评分改善效果不明显。

(4) 与同化所有 GPS 站点的 GPSPW 数据相比, 只对水汽输送带覆盖的 GPS 站点进行 GPSPW 数据同化, 仍然可以保留住大部分的同化正效果, 提高模式的降水预报能力。因此, 对于长江中下游地区的降水预报而言, 针对性地同化青藏高原地区的

GPSPW 数据是可行的。

目前, 我国 GPS 站网还没有全面建起, 针对长江中下游地区的降水预报, 在今后的站网布点时, 可以适当减少现有 GPS 站点中不被长期水汽输送带覆盖到的站点, 而在水汽输送带长期经过的位置加密 GPS 站点的分布, 从而更具效益地提高降水预报能力。推而广之, 可以逐渐增设可移动的 GPS 站点。由于水汽输送具有一定的连续性, 其预报相对容易, 因此, 利用可移动的 GPS 站点, 根据水汽输送情况灵活变动其位置, 可以最大限度地发挥既有 GPS 站点的作用, 从而有效提高长江中下游地区的降水预报能力。

本文最后一部分中探索同化正效果来源的补充试验仍是基于定性分析, 选择同化哪些站点的 GPSPW 数据只依据水汽输送带的覆盖范围。该依

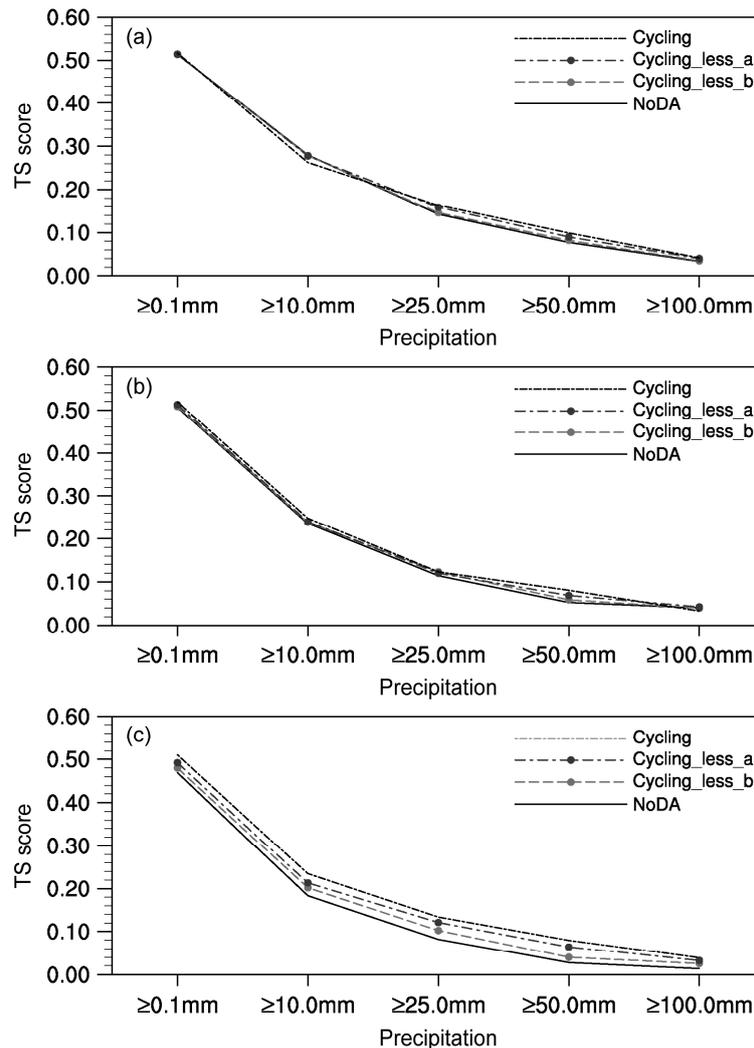


图 14 同图 4 左栏, 但比较的是 NoDA、Cycling_less_a、Cycling_less_b 以及 Cycling 方案

Fig. 14 Same as the left column in Fig. 4, but that the contrast is conducted among schemes NoDA, Cycling_less_a, Cycling_less_b, and Cycling

据较为粗略, 且基于经验性的判定而没有量化, 因此受人为因素影响较大, 但依然取得了不错的效果。这意味着针对性同化 GPSPW 数据具有较大的潜力, 如何更具技巧地对 GPSPW 数据进行针对性同化有待于进一步深入研究。

致谢 感谢中国气象科学研究院提供青藏高原地区的 GPSPW 资料, 感谢国家气象中心以及国家气象信息中心为本文提供实况降水数据, 同时感谢 NCEP/NCAR 免费公开发布 GFS、FNL 资料以及气候态再分析资料。

参考文献 (References)

Barker D, Huang X Y, Liu Z, 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.

Bauer P, Ohning G, Kummerow C, et al. 2011. Assimilating satellite observations of clouds and precipitation into NWP Models [J]. *Bull. Amer.*

Meteor. Soc., 92 (6): ES25–ES28.

Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. 1992. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System [J]. *J. Geophys. Res.*, 97 (14): 15787–15801.

Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. 1994. GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (3): 379–386.

Businger S, Chiswell S R, Bevis M, et al. 1996. The promise of GPS in atmospheric monitoring [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (1): 5–17.

陈超君, 王东海, 李国平, 等. 2012. 冬季高海拔复杂地形下 GRAPES-Meso 要素预报的检验评估 [J]. *气象*, 38 (6): 657–668.

Chen Chaojun, Wang Donghai, Li Guoping, et al. 2012. A study of the GRAPES-Meso prediction verification for high altitude and complex terrain during winter time [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (6): 657–668.

陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 2010. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验 [J]. *气象学报*, 68 (4): 450–463.

Chen Min, Fan Shuiyong, Zhong Jiqin, et al. 2010. An experimental study

- of assimilating the Global Position System-precipitable water vapor observations into the rapid updated cycle system for the Beijing area [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68 (4): 450–463.
- Duan J P, Bevis M, Fang P, et al. 1996. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35 (6): 830–837.
- 顾莹, 日下博幸, 束炯, 等. 2010. 实时 GPS 可降水量资料的变分同化个例研究 [J]. *气象科学*, 30 (2): 172–178. Gu Ying, Hiroyuki KUSAKA, Shu Jiong, et al. 2010. A case study of variational assimilation of true real-time GPS precipitable water [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (2): 172–178.
- Kusaka H, Guo Y R, Crook A, et al. 2004. The impact of assimilating GPSPW data using WRF-3DVAR on a simulation of a squall line observed during IHOP [C] // 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle, WA, USA: Amer. Meteor. Soc.: p1.23.
- Kuo Y H, Guo Y R, Westwater E R. 1993. Assimilation of precipitable water measurements into a mesoscale numerical model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (4): 1215–1238.
- Kuo Y H, Zou X, Guo Y R. 1996. Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (1): 122–147.
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, 等. 2010a. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34 (3): 610–652. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 640–652.
- 兰伟仁, 朱江, Xue M, 等. 2010b. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34 (4): 737–753. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 737–753.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征 [J]. *气象学报*, 63 (1): 93–99. Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. 2005. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (1): 93–99.
- 冉令坤, 周玉淑. 2011. TRMM 卫星的闪电观测资料在中尺度数值模式中的 Nudging 同化应用研究 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1145–1158.
- Ran Lingkun, Zhou Yushu. 2011. Application of lightning observations of TRMM satellite to the mesoscale numerical model by a New Nudging assimilation adjustment technique [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1145–1158.
- Smith T L, Benjamin S G, Gutman S I, et al. 2007. Short-range forecast impact from assimilation of GPS-IPW observations into the rapid update cycle [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (8): 2914–2930.
- Wang B, Zou X, Zhu J. 2000. Data assimilation and its applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97 (21): 11143–11144.
- Wang W, Bruyere C, Duda M, et al. 2012. ARW Version 3 Modeling System User's Guide [M]. USA: M&MMD/NCAR, 384pp.
- 万文龙, 张杰, 朱克云, 等. 2010. GPS-PW 资料在川西暴雨中的应用研究 [J]. *安徽农业科学*, 38 (13): 6759–6764. Wan Wenlong, Zhang Jie, Zhu Keyun, et al. 2010. Study on the application of GPS-PW data in the rainstorm in Western Sichuan [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (in Chinese), 38 (13): 6759–6764.
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原——季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系 [J]. *气象学报*, 60 (3): 257–264. Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon “large triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (3): 257–264.
- 袁招洪. 2005. GPS 可降水量资料应用于 MM5 模式的变分同化试验 [J]. *气象学报*, 63 (4): 391–402. Yuan Zhaohong. 2005. Variational assimilation of GPS precipitable water into MM5 mesoscale model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (4): 391–402.
- 袁招洪, 丁金才, 陈敏. 2004a. GPS 观测资料应用于中尺度数值预报模式的初步研究 [J]. *气象学报*, 62 (2): 200–212. Yuan Zhaohong, Ding Jincai, Chen Min. 2004a. Preliminary study on applying GPS observations to mesoscale numerical weather prediction model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (2): 200–212.
- 袁招洪, 丁金才, 陈永林. 2004b. 中尺度数值预报模式预报水汽与 GPS 观测的比较研究 [J]. *大气科学*, 28 (3): 433–440. Yuan Zhaohong, Ding Jincai, Chen Yonglin. 2004b. A comparison study of precipitable water simulated by NWP and GPS observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (3): 433–440.
- 朱男男, 沈桐立, 朱伟军. 2008. 一次降水过程的 GPS 可降水量资料同化试验 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (1): 26–32. Zhu Nannan, Shen Tongli, Zhu Weijun. 2008. An adjoint assimilation experiment of GPS precipitable water [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31 (1): 26–32.