

GSI 同化 GPS 可降水量对四川盆地不同类型降水模拟影响

王成鑫¹, 杨晓丹^{2*}, 师义成³, 茅家华⁴, 赵鲁强²

1. 北京弘象科技有限公司, 北京 100195
2. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081
3. 中国三峡建工集团有限公司, 成都 610041
4. 浙江水利水电学院, 杭州 310002

摘要 选取四川盆地金沙江下游对流性降水个例(记为 CR_2013)和稳定性降水个例(记为 SR_2015), 利用格点统计插值分析系统(GSI)同化全球定位系统(GPS)大气可降水量(PWV)资料, 并结合天气研究与预报模式(WRF)对2次不同类型降水过程的初始场和模拟降水进行同化效果对比分析。结果表明, 降水发生前, 四川盆地已有较多水汽积聚, 水汽分布东多西少, 2个降水个例的强降水中心分别位于南侧和北侧的 GPS 水汽梯度带上。同化 GPS-PWV 资料在改善初始湿度场的同时对初始温度场和风场也有不同程度的改善。控制实验的降水大小和分布总体都与实况较相似, 但存在局部模拟偏强的情况。同化 GPS-PWV 对降水模拟的改进作用明显: CR_2013 模拟的强降水中心范围与实况更接近, 而 SR_2015 则明显减弱了虚假降水中心的强度和范围。降水调整最显著的区域与实况降水中心一致, 都在 GPS 水汽梯度带上。同化 GPS-PWV 能持续影响模拟的累积降水, 对流性降水调整幅度要高于稳定性降水。

关键词 GSI; GPS-PWV; WRF; 三维变分同化; 水汽梯度

水汽在大气中含量很少, 但变化很大, 含量从 0 到 4% 不等。水汽垂直分布很不均匀, 大部分分布在对流层中低层, 约 50% 水汽集中在 2 km 以下,

75% 水汽集中在 4 km 以下, 10~12 km 以下水汽约占全部总量的 99%。同时水汽水平分布也非常不均匀, 中国水汽地理分布主要从东南沿海向西北内

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505503-1); 国家自然科学基金青年基金项目(41905048); 金沙江下游梯级水电站气象预报关键技术研究与系统建设项目(JG/20015B)

作者简介: 王成鑫, 博士, 研究方向为中小尺度动力学, 电子信箱: 13429670011@163.com; 杨晓丹(通信作者), 高级工程师, 研究方向为专业气象预报方法, 电子信箱: yangxd@cma.gov.cn

引用格式: 王成鑫, 杨晓丹, 师义成, 等. GSI 同化 GPS 可降水量对四川盆地不同类型降水模拟影响[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 96-106; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.13.010

陆减少,季节分布为夏季多,冬季少。水汽含量及其变化是天气和气候变化的重要驱动力,是灾害性天气形成和演变的重要影响因子之一^[1]。常规的探测手段难以获取高精度、高时空分辨率的有关水汽输送和累积的精确数据,而这一数据又是改进中尺度天气预报的关键之一。利用地基全球定位系统(global position system, GPS)进行水汽观测,具有全天候、高时空分辨率、观测稳定等优点^[2-4]。通过测量GPS信号在大气中湿延迟量大小可以反演出整层大气可降水量(precipitable water vapor, PWV),能有效弥补常规探空观测对大气水汽测量的不足。GPS水汽资料在暴雨、雨雪冰冻、不同云系降水、冷锋、雷电、梅雨和高原季风等天气、气候过程中的应用^[5-14],都表明GPS水汽遥感技术已在天气分析预报领域展现出广阔的应用前景。

近年来,地基GPS水汽资料在暴雨等灾害性天气监测方面得到了广泛的应用^[15-20]。同时,国内外许多研究已经证明将可降水量同化入数值预报模式以改善湿度场的分析可提高模式的预报能力,尤其是能提高短期降水预报的精度^[21-30]。如赵润华等^[26]利用天气研究与预报模式(weather research and forecasting, WRF)三维变分同化系统(3DVAR)对江淮流域一次暴雨天气过程的数值模拟表明, GPS-PWV同化对低层水汽改善更为显著,比掩星资料同化平均高1个量级,改进了暴雨的强度和影响范围。张晶等^[27]利用局地分析和预报系统(LAPS)分析了湖北地区一次强降水过程,表明GPS-PWV同化效果要明显优于雷达资料同化,同化后的初始场增加了中小尺度信息,改善了降水确定性预报。李昊睿等^[28]利用2次前汛期降水过程研究了GPS-PWV三维变分同化对全球区域同化预报系统(global-regional assimilation and prediction system, GRAPES)的降水预报影响,表明同化GPS-PWV能合理调整初始湿度场,明显改善模式24 h累积降水量级和落区的预报。

暴雨是四川省主要灾害性天气之一,特别是四川盆地周边,因其地形复杂,暴雨及其次生灾害频发。由于其发生机制的复杂性,目前对暴雨特别是局地大暴雨落区和时效的预报仍难以满足社会和公众的需求。水汽条件在暴雨的起始和维持过程

中扮演着非常重要的角色。2012年,依托中国大陆构造环境监测网络项目建设的地基GPS观测站,四川省气象信息中心建立了四川地基GPS水汽监测网(62站),为四川气象业务提供了全新的四维大气水汽实时监测“天眼”,具备连续监测水汽变化特征功能。这为GPS-PWV在四川暴雨中尺度模拟中的实际应用奠定了坚实基础。此外,由上述研究可知,目前国内的GPS-PWV同化实验,主要基于WRF-3DVAR、4DVAR、Nudging(牛顿松弛逼近)、LAPS等同化方法,利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)开发的格点统计插值分析系统(gridpoint statistical interpolation, GSI)同化GPS-PWV,尤其是针对高原东部四川盆地不同降水类型的对比性研究尚不多见。因此,利用GSI系统同化GPS-PWV数据,分别选取四川盆地金沙江下游稳定性降水和对流性降水2个典型个例进行同化效果对比分析,为GPS-PWV在四川暴雨数值预报中的业务应用提供科学依据和参考。

1 资料和方法

1.1 资料

GPS-PWV数据来自四川省地基GPS水汽监测网,其由四川省气象局、四川省地震局、四川省测绘局等机构共同组建。监测网共有62个GPS站点(本研究使用其中53个站点资料),站点集中分布在122.5°E以东的四川盆地内,122.5°E以西站点只占总数的15%左右,整体呈现东部盆地密集、西部山地稀疏的特征(图1)。地基GPS水汽监测时间分辨率为30 min,监测产品包括大气可降水量、误差、天顶总延迟、本站气压、温度、相对湿度、小时降水量等。实况降水数据选取中国气象局国家气象信息中心发布的中国自动站与CMORPH(CPC MORPHing technique)降水产品融合的逐时降水量网格数据集。该产品采用概率密度匹配+最优插值(PDF+OI)两步数据融合算法,生成自2008年以来的逐小时、0.1°×0.1°分辨率的降水融合产品。模式初边界条件(驱动GSI同化系统和WRF中尺度模式)采用美国NCEP大气再分析资料,空间分辨

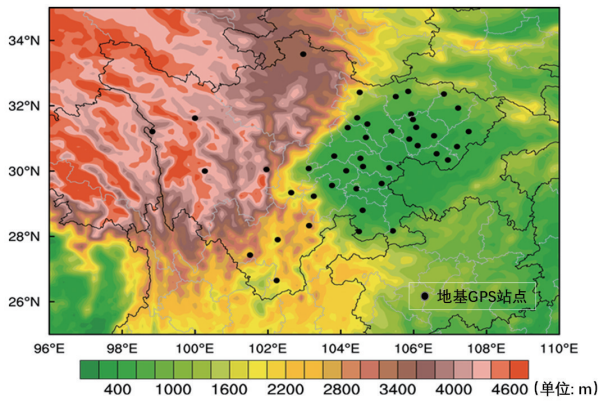


图1 四川地区地形高度及地基GPS站点分布

率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 时间分辨率为6 h。

1.2 地基GPS-PWV反演方法

地基GPS水汽反演可降水量核心思想是利用同一站点湿空气与干空气下GPS信号间差异(水汽的存在造成信号延迟), 乘以一定系数而获得^[31]。其中水汽转换系数(Π), 由近似积分法、探空数值积分法、Bevis回归经验公式法等确定^[27]。GPS-PWV计算具体步骤可分为4步:(1) 计算天顶总延迟;(2) 计算天顶干延迟;(3) 相减得到天顶湿延迟;(4) 乘以 Π 得到GPS-PWV。利用地基GPS观

测网的原始观测数据, 采用GPS数据处理软件(GAMIT)解算出天顶总延迟, 并利用GPS静力学延迟计算模型(Saastamoinen)计算天顶干延迟, 两者相减得到天顶湿延迟, 最后乘以 Π , 便可计算出时间分辨率为30 min的GPS-PWV。

$$\Pi = 10^6 \cdot [\rho R (k_2' + k_3/T)]^{-1} \quad (1)$$

式中, k_2' , k_3 为实验室测定的折射常数, ρ 为液态水密度, R 为水汽气体常数, T 为对流层大气加权平均温度, 由Bevis经验公式修正获得。

GPS-PWV的具体计算步骤见文献[27]、[31]、[32]。

2 个例介绍及数值实验方案

2.1 降水过程概况及环流背景介绍

分别选取四川省2013年7月4—6日一次对流性降水个例(记为CR_2013)和2015年8月16—18日一次稳定性降水个例(记为SR_2015), 进行GPS-PWV同化效果对比分析。图2分别给出2个降水个例逐日累积的观测降水分布, 2个个例最大降水量都超过100 mm, 达到大暴雨等级。

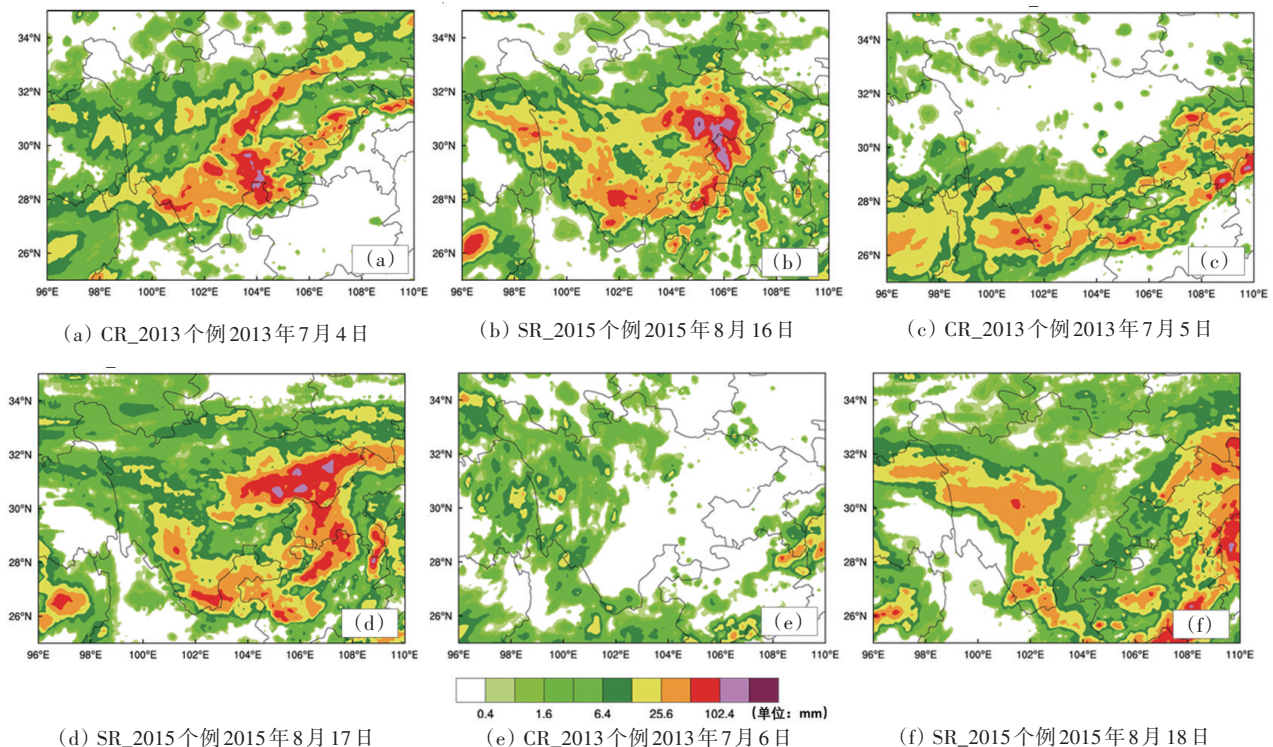


图2 四川地区CR_2013个例和SR_2015个例逐日累积观测降水

对流性降水个例(CR_2013)持续时间较短,强降水主要发生在7月4日,50 mm暴雨区分布在青藏高原东麓,四川盆地南部乐山—宜宾一线有100 mm大暴雨中心。7月5日降水明显减弱,只有凉山彝族自治州有暴雨发生,7月6日降水基本结束。稳定性降水个例(SR_2015)持续时间较长,8月16—17日青藏高原东麓有较大范围的暴雨区,四川盆地中东部成都到达州一线有大暴雨发生。之后

降水逐渐东移,但四川中西部及南部地区仍有中到大雨,局地暴雨发生。

不同类型的暴雨过程,其环流背景通常有较大差异。CR_2013个例中,四川盆地北侧200 hPa上空有一条跨90个经度的纬向型急流带,南侧边缘则是584位势什米线,同时四川盆地位于500 hPa槽前上升区(图3(a));700 hPa高度上四川盆地北侧为东北风,南侧为西南风,有明显风向切变,且位

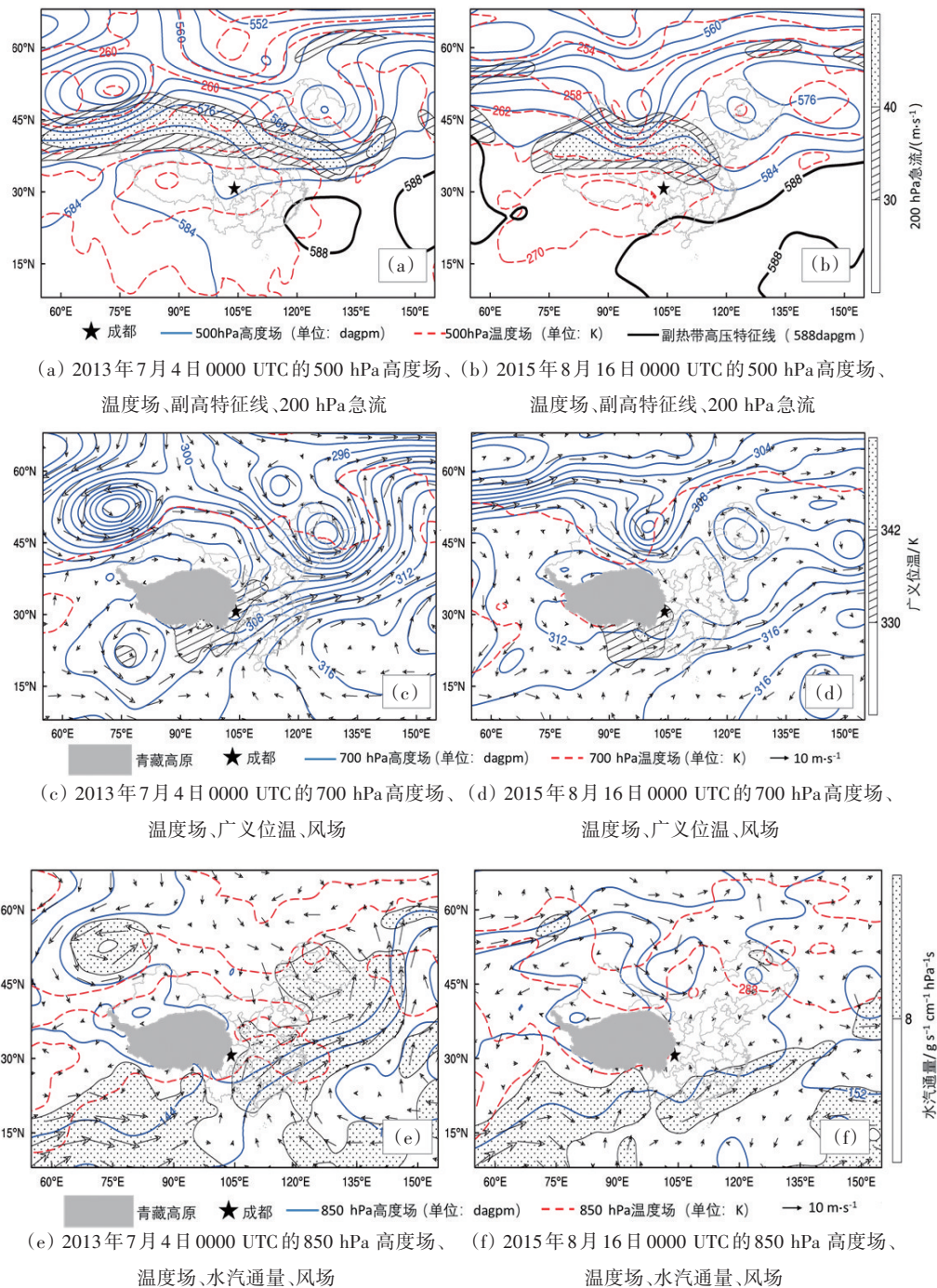


图3 2013年7月4日0000 UTC和2015年8月16日0000 UTC环流形势图

于广义位温高值区,暖湿条件较好,有利于强对流触发(图3(c));850 hPa高度上四川盆地东侧有明显的西南水汽通量大值区,水汽充沛(图3(e))。因此CR_2013暴雨的发生与切变线、副热带高压密切相关。SR_2015个例中,急流区东西跨度相对较小,但是南北跨度增大,同时500 hPa有深厚大槽,四川盆地位于槽前(图3(b)),下游有明显的阻塞高压;南侧588线西伸到四川盆地南侧,且同样位于广义位温高值区,同时青藏高原80°E左右有高原涡存在(图3(d));850 hPa高度上依然是以西南水汽通道为主(图3(f)),但弱于CR_2013个例。因此SR_2015个例的暴雨是在大槽、副热带高压相对稳定且高原涡影响下发生的。

2.2 GPS水汽空间分布

暴雨发生的前提条件是有充分的水汽供应,暴

雨发生前通常有较明显的水汽通量输送和辐合。因此在暴雨发生前,相比于雷达回波等常规探测,同化观测水汽场可能会比较有优势。图4是CR_2013和SR_2015个例降水发生前GPS监测水汽的空间插值分布。可以看到CR_2013个例在降水发生前,已在四川盆地有较多水汽积聚。水汽主要分布在100°E~107°E,26°N~33°N范围内,且东多西少,与地形分布密切相关(图1)。图4(b)中,地基GPS监测到SR_2015个例降水开始前的水汽范围要明显小于CR_2013,但水汽含量同样较为充沛。水汽主要集中在四川盆地中东部呈东北—西南走向分布。与图2实况累积降水相比,2个个例的强降水中心分别位于南侧和北侧的GPS水汽梯度带上,表明水汽中心与降水中心有重合,但并不完全对应。

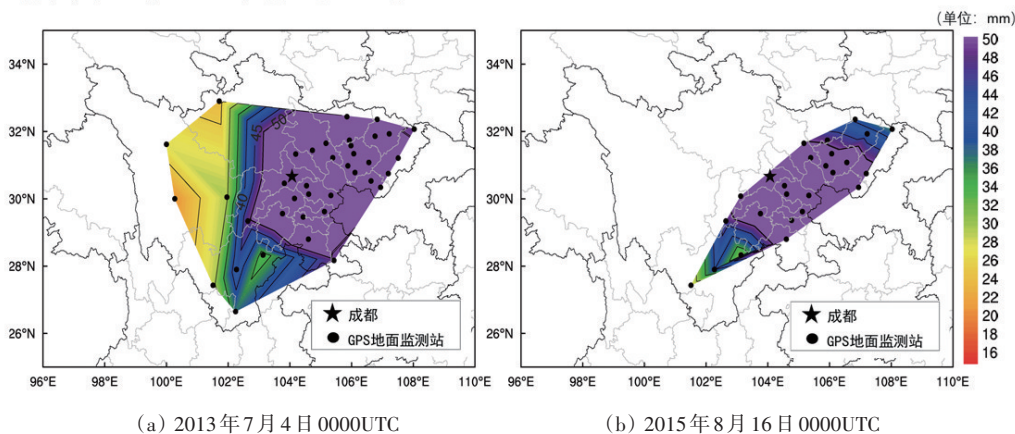


图4 四川地区GPS水汽分布图

2.3 数值实验方案设计

与SR_2015稳定性降水相比,CR_2013对流性降水持续时间和空间分布都更为集中,但两者的首日降水强度和范围相当,因此本研究的数值模拟时间分别选取两者首日降水时段。模拟分别为2个控制实验CTL_CR_2013和CTL_SR_2015(初始时刻未同化GPS-PWV数据),以及2个敏感性实验PWV_CR_2013和PWV_SR_2015(初始时刻同化GPS-PWV数据)。同化采用GSI 3.6版本,背景场为WRF初值场,同化方法为三维变分。

模拟采用WRFV4.0版本^[33-36],模式中心点为

(102.5°E, 30°N),采用9 km一重单向嵌套网格,水平方向为200×198个格点,垂直层数为61层,积分24 h,积分步长为30 s,物理方案配置如表1所示。

表1 数值实验物理方案选项设置

类别	选项
积云对流方案	Modified Kain-Fritsch (new Eta)
微物理方案	Morrison (2 moments)
陆面方案	Unified Noah Land-surface Model
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
边界层方案	YSU

3 GPS-PWV 同化对初始场改进效果对比

已有研究表明,同化 GPS-PWV 数据可以对模式的初始场进行调整^[25-27]。本研究对 GSI 同化 GPS-PWV 后, WRF 模式初始场的水汽、温度、东西向风(U)和南北向风(V)改进效果分别进行分析,探究不同类型降水同化 GPS-PWV 后初始场的变化程度。从模拟区域格点平均的垂直廓线(图 5)看,同化 GPS-PWV 之后,影响最大的是水汽场、其次是温度场、再次是 U 风和 V 风场。

图 5(g)和(h)中, CR_2013 和 SR_2015 平均湿度场的调整只集中在对流层中低层,主要发生在 8 km 以下,极值位于 2.5 km 附近,均为负增量,表明 2 个个例的再分析数据对四川地区的水汽分布均存在高估。温度调整垂直分布(图 5(a)、(b))表明,

同化 GPS-PWV 对于初始温度场的改善亦明显,并且随着高度变化有不同的增量:共有 3 个极值,分别为 3 和 16 km 左右的正增量,以及 6 km 附近的负增量。这表明在低层水汽被高估的情况下, GSI 系统通过增强中高层干冷空气(5~12 km)平衡低层水汽的调整。从风场增量的垂直分布(图 5(c)、(d)、(e)、(f))可以看到,同样存在多个增量极值,分别为 1 km 左右的西北风增强, 3 km 左右的东北风增强, 5 km 左右的西南风增强以及 8 km 左右的东北风增强。这表明低层水汽减弱伴随低层偏北风增强;中层西南风增强与中层温度增强一致;中高层偏北风增强,对应温度下降。此外, CR_2013 和 SR_2015 同化前后廓线增量对比发现,对流性降水的水汽和温度调整要明显高于稳定性降水,而 U 风和 V 风调整则低于稳定性降水。

分析水汽条件的改善程度,直接影响数值模式

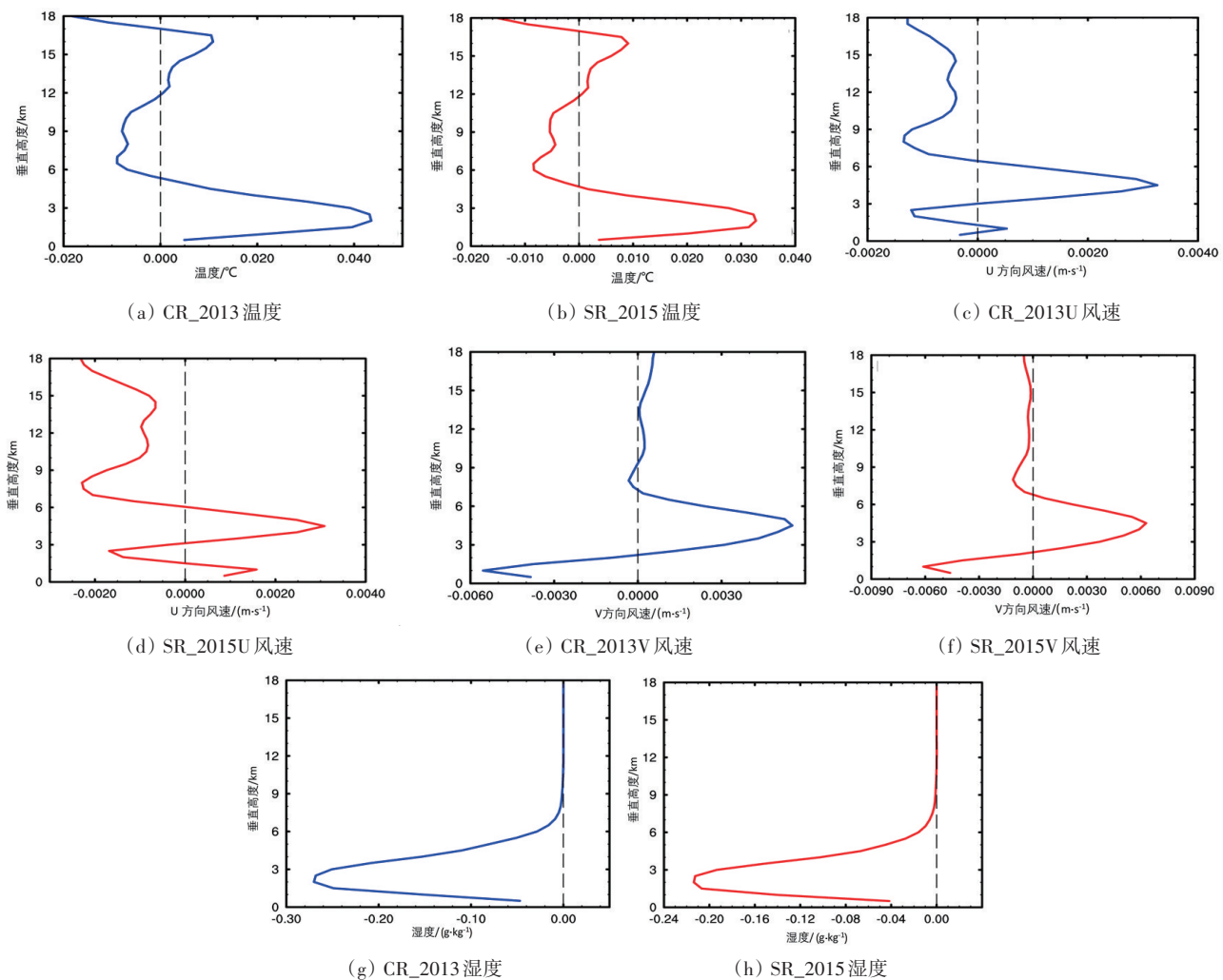


图5 CR_2013 和 SR_2015 同化后与同化前不同的垂直廓线

对于强降水强度的模拟。图6(g)和(h)分别是CR_2013和SR_2015同化GPS-PWV数据前后,初始时刻的水汽增量经过垂直积分后的整层水平分布。水汽的主要调整均发生在探测点附近区域(图4),调整区域取决于探测点的分布和密度。GPS-PWV同化后湿度最大调整区域发生在(105°E, 29°N)

(图6(g))以及(105°E, 30°N)(图6(h))附近,且整个降水区域都为负增量,说明再分析数据的水汽分布存在高估,同化后水汽含量的减少可能会减弱整体的降水模拟。图3(c)和(d)都表明降水发生在高温高湿环境,降水核心区水汽的减少,必然对应温度的降低(图6(a)、6(b))。

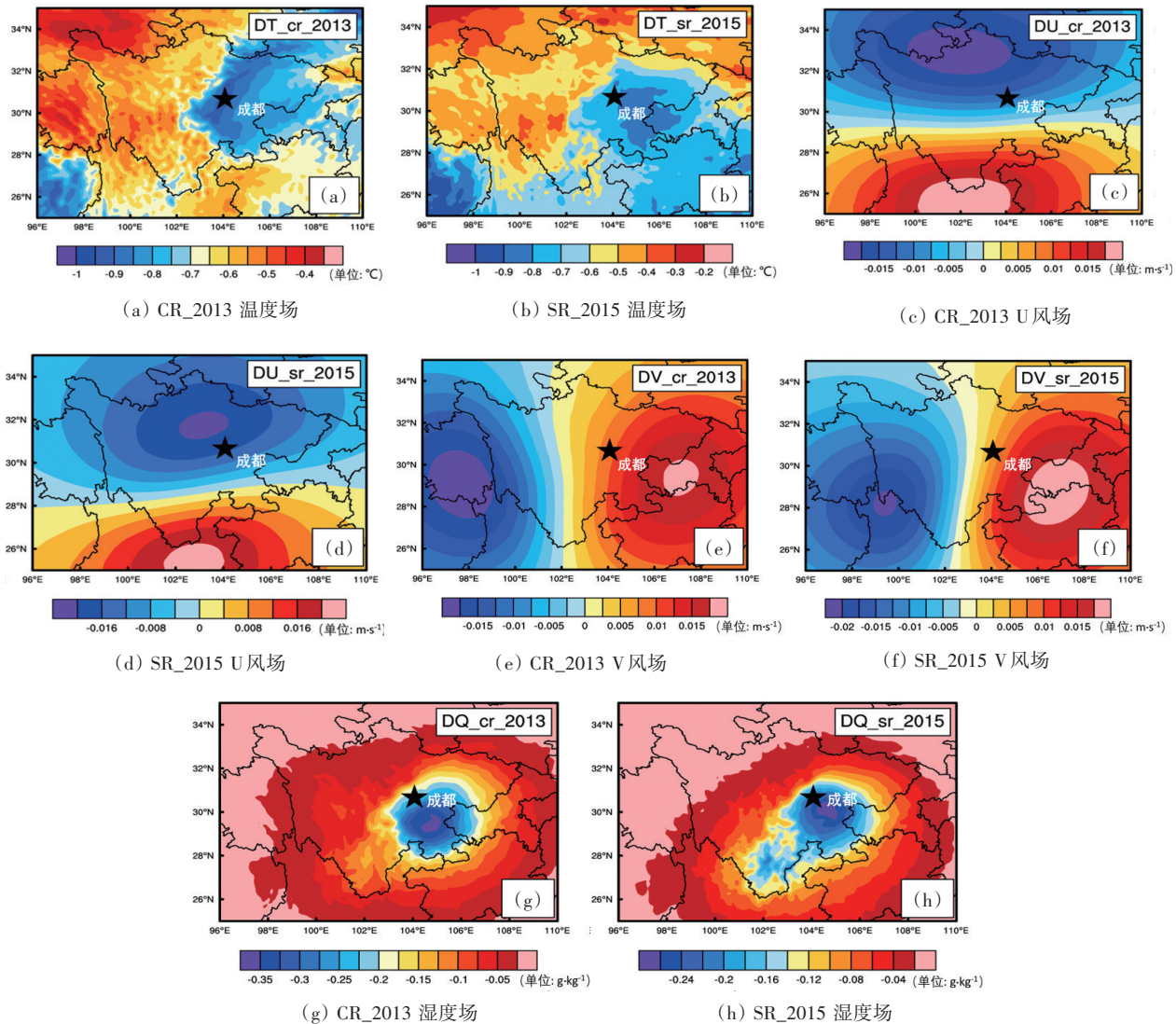


图6 CR_2013和SR_2015个例同化后与同化前不同初始场的整层水平差异

相比温度增量中心,水汽调整中心与实况降水中心位置更为接近。此外,从温度调整的水平分布看,其与地形有较高的相关度。而初始场水汽调整则明显与探测点分布相关,远离探测点则调整幅度越小,与地形分布关系不明显。从风场看,同化GPS-PWV之后,降水核心区的西北风略有增强,干

冷空气的增强是对水汽调整的平衡响应。而从CR_2013和SR_2015对比看,CR_2013对流性降水的温度和水汽调整幅度更大,但是风场的调整幅度差别不大。此外,CR_2013对流性降水的温度和水汽调整中心与实况降水中心(图2(a))更接近,对应更好。

4 GPS-PWV 同化对降水模拟改进效果对比分析

4.1 同化前后累积降水与观测对比

将 GSI 同化后的输出场及同化前的 NCEP 再分析资料分别作为 WRF 模式的初始场进行 24 h 数值模拟。图 7 给出了 CR_2013 和 SR_2015 不同方案下的 24 h 累积降水实况及模拟图。可以看出, CTL_CR_2013 和 CTL_SR_2015 (图 7(c) 和 (d)) 的降水量级和分布总体与实况 (图 7(a) 和 (b)) 都较为相似, 尽管某些区域模拟偏强。CTL_CR_2013 强降水中心的模拟要优于 CTL_SR_2015, 但后者模拟的大范围雨带分布 (>20 mm) 则要优于前者。在

此基础上, 分别在个例初始时刻同化 GPS-PWV, 模拟的降水都有一定程度的改善 (图 7(e) 和 (f))。从 CR_2013 个例同化前后降水对比看, 同化后改善最明显的是四川盆地南部的暴雨中心 (图 7(a)、(c) 和 (e) 黑圈内)。实况降水大值区呈南北条状分布, CTL_CR_2013 模拟的强降水范围明显偏大且位置偏北, 与实况存在偏差。而 PWV_CR_2013 模拟的强降水中心范围较 CTL_CR_2013 明显减小, 与实况更为接近, 可见同化 GPS-PWV 资料对降水模拟的改进作用明显。从同化前后降水增量看 (图 7(g)), 黑圈区域北部有明显的降水负增量, 南部有明显的降水正增量。对比 GPS 水汽分布 (图 4(a)) 及同化前后湿度增量 (图 6(g)), 降水调整最显著

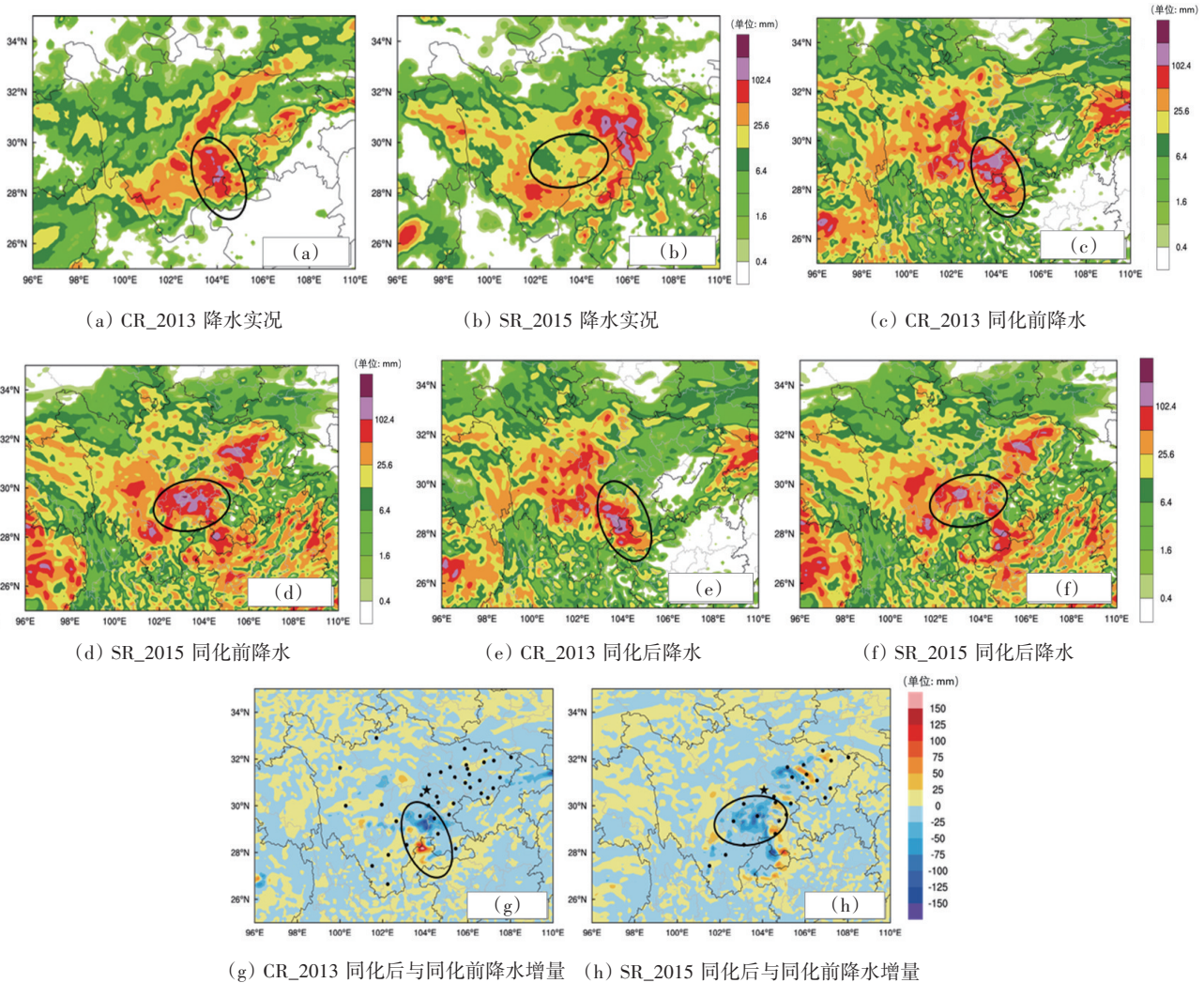


图7 CR_2013和SR_2015模拟时段的24 h累积降水以及同化后与同化前的降水增量

的区域并不是GPS站点密集区,也不是GPS水汽分布大值区,而是在GPS水汽分布南侧的梯度带上,并且实况降水中心也正好发生于此。从SR_2015同化前后降水场对比看,实况降水中心主要分布在四川盆地中东部,CTL_SR_2015和PWV_SR_2015也有对应的强降水中心,但在盆地东南侧CTL_SR_2015模拟的降水明显偏强(图7(d)黑圈内),甚至出现了200 mm以上的极端虚假降水中心。同化GPS-PWV之后,PWV_SR_2015明显减弱了虚假降水中心的强度和范围。从同化前后降水增量看(图7(h)),黑圈内有明显的降水负增量,与水汽调整(图6(h))一致,并且也位于GPS水汽梯度带上(图4(b))。

4.2 同化前后逐时降水对比分析

为了进一步分析同化后降水调整的演变特征,图8给出了CR_2013和SR_2015这2个个例同化前后区域平均的逐时降水对比。可以看到,SR_2015的逐小时累积降水量要高于CR_2013,这与稳定性降水范围更大有关系。CTL_CR_2013和CTL_SR_2015逐时降水演变特征基本一致,降水峰值都出现在0900 UTC,之后降水逐渐减小,并在1600

UTC左右开始趋于平缓。同化GPS-PWV数据之后,PWV_CR_2013和PWV_SR_2015的逐时降水演变特征并未有明显改变,但是模拟的降水整体减弱,减少了降水的高估。图8(c)给出了CR_2013和SR_2015同化前后降水增量的逐时演变,在模式前2个小时由于模式spin-up存在,导致同化后降水调整幅度较小。之后2个小时,CR_2013同化前后降水差异到达一个峰值,随后有所回落,到1700 UTC时以后又开始逐渐增大。而SR_2015同化前后降水负增量有3个峰值,分别在0600 UTC、1500 UTC和1900 UTC,整体上调整幅度要弱于CR_2013,特别是2000 UTC以后,SR_2015降水增量明显减小,说明同化GPS-PWV对改善对流性降水的小时雨强更为明显。

通过累积降水对比验证表明,对流性降水个例中同化GPS-PWV,能显著改善暴雨中心的模拟效果,而稳定性降水个例则显著减弱了虚假的暴雨中心。降水调整最显著的区域与实况降水中心一致,都在GPS水汽梯度带上。逐时降水对比表明,同化GPS-PWV能持续性地影响模拟的累积降水,同时对对流性降水调整幅度要高于稳定性降水。

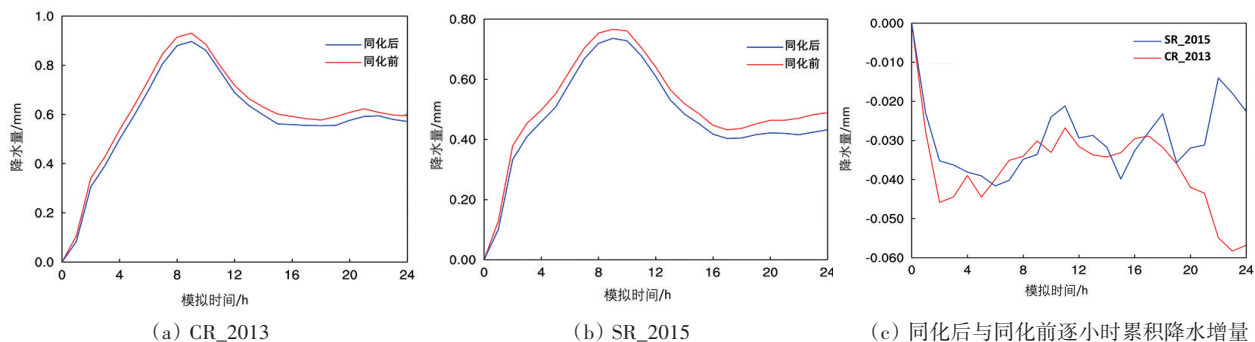


图8 CR_2013和SR_2015模拟时段内同化前后区域平均的逐小时累积降水及降水增量对比

5 结论

针对四川地区2013年7月4—6日一次对流性降水个例和2015年8月16—18日一次稳定性降水个例,采用GSI同化系统和WRF中尺度模式,对初始场和模拟降水进行GPS-PWV同化效果对比分析,得出以下主要结论。

1) CR_2013对流性降水个例发生与切变线、副热带高压密切相关,SR_2015稳定性降水个例发生在大槽、副热带高压稳定和高原涡背景下。从GPS水汽空间分布得到,降水发生前四川盆地已有较多水汽积聚,水汽分布东多西少,2个降水个例的强降水中心分别位于南侧和北侧的GPS水汽梯度带上。

2) 同化 GPS-PWV 后,水汽的主要调整均发生在 GPS 探测点附近区域,调整区域取决于探测点的分布和密度。同化 GPS-PWV 对于调整强降水区域的湿度场效果明显,且同样能调整温度及风场分布,但水汽及温度的调整幅度要高于风场。同化后对流层中低层的初始水汽场明显减弱,温度则表现为低层增强,高层减弱,风场做相应的平衡调整。

3) 2 组控制实验的降水大小和分布总体与实况较为相似,但存在局部模拟偏强的情况。同化 GPS-PWV 资料对降水模拟的改进作用明显:CR_2013 同化后模拟的强降水中心范围与实况更为接近,而 SR_2015 则明显减弱了虚假降水中心的强度和范围。降水调整最显著的区域与实况降水中心一致,都在 GPS 水汽梯度带上。同化 GPS-PWV 能持续影响模拟的累积降水,同时对流性降水调整幅度要高于稳定性降水。

参考文献 (References)

- [1] 杨璐瑛, 刘畅, 杨成芳, 等. 不同天气系统影响下强降雨过程 GPS 可降水量变化特征对比[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 475-482.
- [2] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [3] Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23): 2631-2634.
- [4] Emardson T R, Elgered G, Johansson J M. Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of GPS receivers[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D2): 1807-1820.
- [5] Baker H C, Dodson A H, Penna N T, et al. Ground-based GPS water vapour estimation: Potential for meteorological forecasting[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, 63(12): 1305-1314.
- [6] Gradinarsky L P, Johansson J M, Bouma H R, et al. Climate monitoring using GPS[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(4): 335-340.
- [7] 楚艳丽, 郭英华, 张朝林, 等. 地基 GPS 水汽资料在北京“7.10”暴雨过程研究中的应用[J]. 气象, 2007, 33(12): 16-22.
- [8] 李国翠, 李国平, 连志鸾, 等. 不同云系降水过程中 GPS 可降水量的特征——华北地区典型个例分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1066-1073.
- [9] 郭洁, 李国平, 黄文诗, 等. 不同类型降雨过程中 GPS 可降水量的特征分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 763-768.
- [10] Chen J N, Li G P. Diurnal variations of ground-based GPS-PWV under different solar radiation intensity in the Chengdu Plain[J]. Journal of Geodynamics, 2013, 72: 81-85.
- [11] Choy S, Wang C, Zhang K, et al. GPS sensing of precipitable water vapour during the March 2010 Melbourne storm[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(9): 1688-1699.
- [12] 石小龙, 尚伦宇, 尹远渊, 等. 大连地区 GPS 反演大气可降水量的变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1648-1653.
- [13] 周长艳, 唐信英, 邓彪. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1636-1647.
- [14] 马思琪, 周顺武, 王烁, 等. 基于 GPS 资料分析西藏中东部夏季可降水量日变化特征[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 318-328.
- [15] 曹云昌, 方宗义, 李成才, 等. 利用 GPS 和云图资料监测北京地区中小尺度降水的研究[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 91-96.
- [16] 王留朋, 白征东, 过静, 等. 利用地基 GPS-PWV 序列和相对湿度 RH 序列研究暴雨过程[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 142-198.
- [17] 陈娇娜, 李国平, 黄文诗, 等. 华西秋雨天气过程中 GPS 遥感水汽总量演变特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 753-760.
- [18] 丁海燕, 李青春, 郑祚芳, 等. 利用北京 GPS 监测网分析夏季暴雨的水汽特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 47-58.
- [19] 张振东, 魏鸣, 王皓. 用 GPS 水汽监测资料分析一次强对流性降水过程[J]. 气象科学, 2013, 33(5): 492-499.
- [20] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.
- [21] Smith T L, Benjamin S G, Shwartz B E, et al. Using GPS-PWV in a 4-D data assimilation system[J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 921-926.
- [22] De Ponte M, Zou X. A case study of the variational assimilation of GPS zenith delay observations into a mesoscale model[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40: 1559-1576.
- [23] Barker D M, Huang W, Guo Y, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132: 897-914.
- [24] 万蓉, 郑国光. 地基 GPS 在暴雨预报中的应用进展[J]. 气象科学, 2008, 28(6): 697-702.

- [25] 陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 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, 2010, 68(4): 450–463.
- [26] 赵润华, 李跃春, 沈宏彬. GPS可降水量与掩星折射率资料同化对暴雨模拟的影响[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(2): 24–29.
- [27] 张晶, 顾松山, 楚志刚, 等. LAPS同化GPS/PWV资料在暴雨预报中的应用研究[J]. 气象, 2014, 40(1): 76–85.
- [28] 李昊睿, 丁伟钰, 薛纪善, 等. 广东省GPS/PWV资料的质量控制及其对前汛期降水预报影响的初步研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 455–462.
- [29] 贝纯纯, 李昕, 王元, 等. GPS/PWV资料在梅雨锋暴雨两个例中的同化试验[J]. 气象科学, 2016, 36(2): 149–157.
- [30] 何志新, 江杨, 张苏, 等. 同化GPS可降水量资料在安徽地区暴雨预报中的应用[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(2): 18–27.
- [31] Bevis M, Busingor S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379–386.
- [32] Li M, Li W W, Shi C, et al. Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1): 150–162.
- [33] Snoun H, Kanfoudi H, Bellakhal G, et al. Validation and sensitivity analysis of the WRF mesoscale model PBL schemes over Tunisia using dynamical downscaling approach[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2019, 4(1): 1–10.
- [34] Onwukwe C, Jackson P L. Meteorological downscaling with wrf model, version 4.0, and comparative evaluation of planetary boundary layer schemes over a complex coastal airshed[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59(8): 1295–1319.
- [35] He J, Loboda T V. Modeling cloud-to-ground lightning probability in Alaskan tundra through the integration of Weather Research and Forecast (WRF) model and machine learning method[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(11): 115009.
- [36] Shenoy M, Raju P V S, Prasad J. Optimization of physical schemes in WRF model on cyclone simulations over Bay of Bengal using one-way ANOVA and Tukey's test [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1–9.

The impact of assimilation of GPS precipitable water vapor in GSI on the simulation of different precipitation types in Sichuan Basin

WANG Chengxin¹, YANG Xiaodan^{2*}, SHI Yicheng³, MAO Jiahua⁴, ZHAO Luqiang²

1. Beijing Presky Technology Company Limited, Beijing 100195, China
2. Public Weather Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
3. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China
4. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310002, China

Abstract In order to evaluate the impacts of assimilation of GPS (global position system)–PWV (precipitable water vapor) on the initial field and simulation of different precipitation types in Sichuan Basin, several control tests and assimilation experiments were performed using GSI (gridpoint statistical interpolation) and WRF (weather research and forecasting) model. Two cases, namely CR_2013 and SR_2015, representing the processes of convective precipitation and stable precipitation, respectively were analyzed. The results showed that a great amount of water vapor had accumulated in Sichuan Basin before the occurrence of rain, with the amount in the east being more than that in the west. The rainstorm centers of the two cases were located at the southern and northern gradient zones of GPS water vapor, respectively. The assimilation of GPS–PWV not only improved the humidity field but also ameliorated temperature and wind field to some extent. Although the locations and intensities of simulated precipitation in the control tests were generally similar to the observed precipitation, there was stronger simulated precipitation in small areas. The assimilation of GPS–PWV significantly improved the simulation of precipitation. The range of simulated rainstorm centers of CR_2013 was closer to the observation, while the simulation of SR_2015 significantly weakened the intensity and range of the fake rainstorm centers. The most significant adjustment was located at the gradient zones of GPS water vapor, which was consistent with the observed rainstorm center. The assimilation of GPS–PWV continuously influenced the simulated accumulated precipitation, and the adjustment range of convective precipitation was higher than that of stable precipitation.

Keywords GSI; GPS–PWV; WRF; 3DVAR; moisture gradient ●



(责任编辑 傅雪)