

张晶, 顾松山, 楚志刚, 等. 2014. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究. 气象, 40(1): 76-85.

LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨 预报中的应用研究^{*}

张 晶^{1,2,4} 顾松山^{1,2} 楚志刚^{1,2} 付志康³

1 南京信息工程大学, 大气物理学院, 南京 210044
2 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044
3 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074
4 上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 利用 LAPS(Local Analysis and Prediction System)系统同化 GPS(Global Positioning System)/PWV(Precipitable Water Vapor)资料, 分析 GPS/PWV 资料对 LAPS 输出场的影响, 并结合 WRF 模式, 将 LAPS 输出场作为其初始场进行降水预报, 进一步考察 GPS/PWV 资料对降水预报的作用。选取 2009 年 6 月 28 日湖北地区的一次强降水过程, 设计三种方案进行试验。结果表明: 同化 GPS/PWV 资料后对 LAPS 湿度场有显著的改善, 而对高度场及风场的作用则不明显; GPS/PWV 资料对区域平均可降水量的影响比雷达资料大一个量级; 与此同时, 利用多种评分方法对 6 h 累计降水做了检验, 分析结果表明同化 GPS/PWV 资料能够有效地改进 WRF 模式的初始场, 增加丰富的中小尺度信息, 并对随后的确定性预报产生正影响。

关键词: LAPS 系统, GPS/PWV 资料, 同化, WRF 数值预报

中图分类号: P459, P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.009

Assimilation of GPS/PWV Data in LAPS and Its Application in Precipitation Forecasts

ZHANG Jing^{1,2,4} GU Songshan^{1,2} CHU Zhigang^{1,2} FU Zhikang³

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, CMA, Nanjing 210044
3 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074
4 Shanghai Meteorological Centre, Shanghai 200030

Abstract: In order to evaluate the improvement of the GPS/PWV data assimilation to the initial humidity field and precipitation forecast field of numerical model, a series of assimilation experiments were performed using the LAPS (Local Analysis and Prediction System) and WRF (Weather Research and Forecasting) model. One heavy rainfall process in Hubei Area was taken as the experimental research object. The result shows that the assimilation of GPS/PWV is effective in reducing the error of PW in the LAPS humidity field, however its impact on potential height and wind fields is not so notable. The impacts of GPS/PWV are greater than radar data by comparing the total precipitable water analyzed by LAPS in different schemes. Different weather forecast scores show that the initial moisture field in WRF is significantly improved by using GPS/PWV data, and the improved moisture field in initial condition leads to positive effect on the forecast of rainfall.

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106044 和 GYHY201306010)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)及国家高技术研究发展计划(2012AA120902)共同资助
2012 年 10 月 8 日收稿; 2013 年 7 月 22 日收修定稿
第一作者: 张晶, 主要从事数值模式及资料同化研究. Email: zijing930@163.com

Key words: LAPS, GPS precipitable water vapor (PWV), assimilation, WRF numerical prediction

引 言

水汽分布与云和降水的形成直接相关,是灾害性天气发生发展的主要驱动力。而目前可供大气水汽分布研究的水汽资料,如常规探空资料,自动站资料,观测站点稀疏、观测时次偏少,时空分辨率均难满足中尺度数值预报模式的精度要求,因此高精度水汽资料的匮乏制约了数值天气预报精度的提高。近年来,地基 GPS 监测网的迅速完善以及通过 GPS 卫星信号延迟量反演大气可降水量技术的成熟完善为获取高精度水汽资料提供了新途径。1992 年,Bevins 等(1992;1994)首先提出采用地基 GPS 探测大气水汽含量的原理,使地基 GPS 测量可降水量资料在气象上定量使用成为可能。徐桂荣等(2008)、王勇等(2007)利用不同反演模型对大气可降水量进行反演,取得了较好的效果。

我国 GPS 监测网建设方兴未艾,预计未来 GPS/PWV 资料的空间分辨率可达 10~40 km(曹云昌等,2006),时间分辨率最高为 15 min,在实际业务分析及预报中若能有效地利用这一资料,对于改善中尺度分析以及降水预报具有重大意义。国内外专家利用 GPS/PWV 资料作了许多改善降水模拟的研究。Guo 等(2000)进行 GPS/PWV 资料的四维同化试验,结果表明加入 GPS/PWV 资料后预报准确率有显著提高。Kwon 等利用 WRF-3DVAR 同化地基 GPS/PWV 资料和天顶总延迟 ZTD 资料,结果表明同化 GPS/PWV 资料能够有效纠正初始场的可降水量偏差,并进一步验证 GPS/PWV 资料对降水预报场的改善效果。袁招洪(2004;2005)、袁招洪等(2004)、丁金才等(2006;2007)将 GPS/PWV 资料同化入 MM5 中尺度数值模式中,进行 Nudging 同化试验和降水试验预报评估等工作,表明 GPS/PWV 资料具有改善初始场水汽分布的能力,对降水预报有明显的提高。李红莉等(2009;2010)、彭菊香等(2011)在 LAPS 系统的水汽分析模块中加入 GPS/PWV 资料,并结合 WRF 模式进行降水预报,结果表明初始场和预报场较未同化前都有明显改善。

局地分析预报系统 LAPS 是由美国国海洋大气管理局 NOAA 下属的 ESRL(Earth System Research Laboratory)研究开发的一个局地气象数据融合系统,它能综合各种观测资料的优势,快速地融合凌乱的多源、多时空特征的各类观测资料,输出与实况较接近的气象要素场。LAPS 采用 Barnes 分析和一维变分同化的方法来调整背景场,主要包括资料融合、资料分析和预报模式接口三个模块(李红莉,2008;李红莉等,2008;2009)。

本文设计多种试验方案进行 LAPS 同化 + WRF 预报,主要分析了 GPS/PWV 资料对 LAPS 输出场及降水预报场的改进作用。试验区域为鄂东和湘北(28°~34°N,108°~118°E);背景场资料选用 NCEP 再分析资料(1°×1°);雷达资料来自湖北武汉多普勒雷达站;GPS/PWV 数据来自湖北地基 GPS 监测网(空间分辨率小于 40 km)。

1 基本原理

1.1 GPS 可降水量计算

GPS 反演可降水量的核心思想是:测算一段路径上因大气水汽引起的 GPS 信号湿延迟,并通过转换公式将湿延迟转换为可降水量。Bevins 等(1994)提出的湿延迟与大气可降水量的转换公式:

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (1)$$

式中, Π 是水汽转换系数,可由取常数值、近似积分法、探空资料数值积分法、Bevins 回归经验公式法等方法确定。ZWD 为天顶总延迟,实际应用常借助 GAMIT 或 Bernese 等平台来解算。

徐桂荣等(2008)给出利用地基 GPS 资料反演水汽的主要步骤:(1)利用 GAMIT 或 Bernese 解算 GPS 对流层天顶总延迟。(2)依据地面气压、温度等资料,采用某种干(或静力)延迟计算模型求解天顶干延迟。(3)天顶总延迟减去天顶干延迟可得天顶湿延迟,将天顶湿延迟乘以转换系数则可获得大气可降水量。

1.2 一维变分同化

LAPS 湿度分析模块的原理为:以数值模式的

预报资料或再分析资料做背景湿度场,用 Barnes 分析的方法将探空、地面、雷达、卫星、飞机报告、GPS/PWV 等资料插值到各自的网格点中,最后用一维变分同化的方法将背景湿度场调整到最优。

一维变分同化即融合包含大气状态信息的各种来源资料及系统背景分析场,并通过求解目标函数 J 的最小值,获得大气状态的最优估计。Birkenheuer 等(2001)给出了 LAPS 湿度分析模块中完整的一维变分方程,其中除背景场项外,其余资料项可以根据研究目的进行增减。试验中仅涉及 GPS/PWV 资料和雷达资料的同化,而雷达资料通过影响云场对 LAPS 的水汽场产生影响(刘瑞霞等, 2011),因此分析模块的一维变分方程简化为:

$$J = \sum_{i=1}^N \frac{(1 - c_i)^2}{E_{\text{BACK}}^2} + S_{\text{GPS}} \frac{(\sum_{i=1}^N c_i q_i - Q_{\text{GPS}})^2}{E_{\text{GPS}}^2 L_{\text{GPS}}} + S_{\text{CLD}} \sum_{i=1}^N \frac{q_i [c_i q_i - q_s(t_i)]^2}{E_{\text{CLD}}^2} \quad (2)$$

式中, i 是 LAPS 网格垂直层序号, N 是网格垂直总层数; q 和 t 分别为 LAPS 格点上的比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和温度廓线(单位: K); q_s 是饱和水汽(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),它是温度的函数; c 是湿度场的调节系数; Q_{GPS} 是 GPS 可降水量(单位: mm); E 表示观测资料与背景场的协方差; L 是距离影响因子,是网格格距和观测资料密度的函数。

2 试验设置

2.1 试验过程描述

2009 年 6 月 28 日 20 时至 30 日 04 时(北京时,下同)强降水过程发生在梅雨期,降水强度大,影响范围广,造成重大经济损失。此次降水过程是在贝加尔湖低槽东移、副热带高压加强西伸北抬、西南急流发展、低层切变线南压和低涡东移的条件下发生的,暴雨区呈东西走向,主要位于在鄂西南、江汉平原、鄂东北及鄂东南北部(图 1a)。

鹤峰站是此次过程的最强暴雨中心,该站从 28 日 20 时开始有降水记录,到 30 日 04 时降水基本结束,累计降水量高达 349.7 mm。从鹤峰站逐小时降水分布图(图 1b)看出,该站降水持续时间长,强度大,出现多个雨强超过 $20.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨峰,最大雨强出现在 29 日 11—12 时,达 $53.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

鄂东的红安、荆门等地为另一暴雨中心,该区域出现多场强降水和大风等强对流天气。

2.2 试验资料

2.2.1 GPS/PWV 资料

资料取自湖北省 GPS 监测网,该监测网包括 23 个 GPS 站,每 30 min 提供一组 GPS/PWV 观测数据。GPS 站点位置如图 2 所示,覆盖范围在 $27^\circ \sim 33^\circ \text{N}$ 、 $109^\circ \sim 116^\circ \text{E}$ 之间。站点的分布在湖北东南部密度较大,西北部密度稍小。

为了验证湖北省地基 GPS 反演的大气可降水量的有效性,本文利用 2009 年 6 月 15 日到 7 月 15 日,恩施 GPS 站反演的大气可降水量和恩施探空站的可降水量进行比较分析(图 3),发现两者的数值大小及变化趋势吻合性都较好。从 GPS 可降水量与探空降水量的散点图(图 4)上看,所有同时刻的探空与 GPS 的相关系数为 0.9346,说明根据 GPS 网观测资料反演的可降水量与探空观测可降水量一致性好,具有使用价值。

2.2.2 其他气象资料

除 GPS/PWV 资料外,LAPS 系统使用的资料还包括:NCEP 再分析资料(空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率 6 h)和武汉多普勒天气雷达资料。天气雷达资料在使用前,用《南京信息工程大学天气雷达产品终端软件》进行了地物抑制和中值滤波质量控制,并转换成 LAPS 兼容的 NETCDF 格式。

此外,收集湖北省武汉、恩施、宜昌 3 个探空站的探空资料及 83 个自动站逐小时降水资料,作为检验初始场和预报场精度的客观标准。

2.3 试验方案设置

2.3.1 试验方案

试验方案设计如表 1。每个方案分为两部分实施。第一部分是初始场试验。利用 LAPS 系统同化不同观测资料,比较不同方案下 LAPS 输出场,分析 GPS/PWV 资料对 LAPS 湿度场的影响。第二部分是预报试验。结合 WRF 模式,将 LAPS 输出场作为 WRF 模式初始场对降水过程进行模拟,并结合多种预报指数考察同化 GPS/PWV 资料对预报场的改进程度。为分析 GPS/PWV 资料对降水预报的影响,需要对各种方案下的初始场分别进行预报模拟。WRF 模拟的时段为 2009 年 6 月 28 日 20 时至 2009 年 6 月 29 日 20 时,每 6 h 输出一次

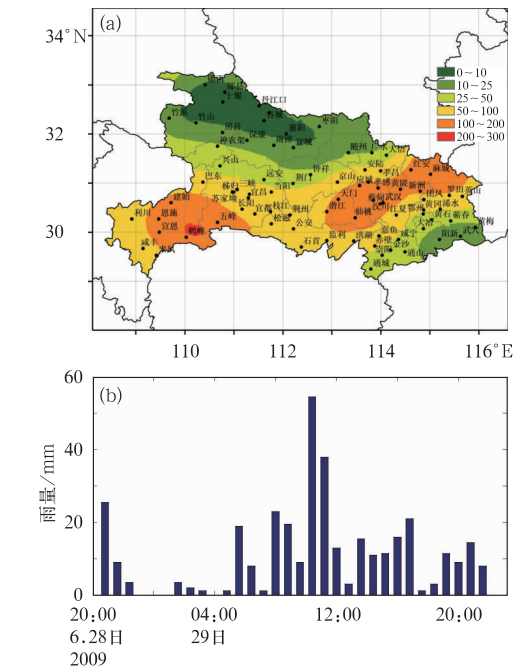


图 1 2009 年 6 月 28 日 20 时至 30 日 04 时湖北省降水实况(a)和鹤峰站逐小时雨量分布(b)(单位: mm)

Fig. 1 (a) Precipitation observed in Hubei, (b) hourly precipitation in Hefeng from 20 BT 28 June to 04 BT 30 June 2009 (unit: mm)

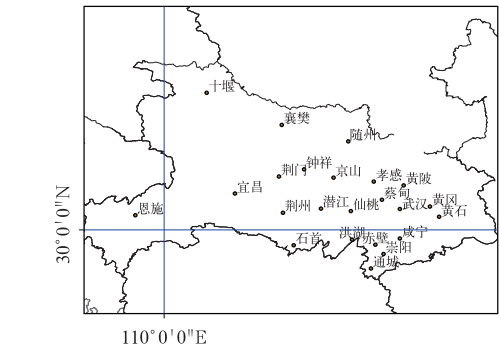


图 2 试验区域 GPS 监测网站点分布

Fig. 2 Distribution of GPS stations in Hubei Province

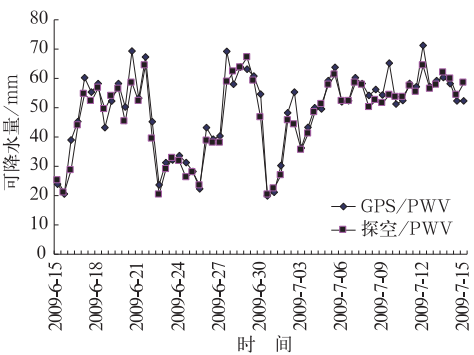


图 3 恩施站 GPS 与探空两种计算可降水量的对比

Fig. 3 A comparison of precipitable water calculated by radiosonde and GPS-PWV at Enshi Station

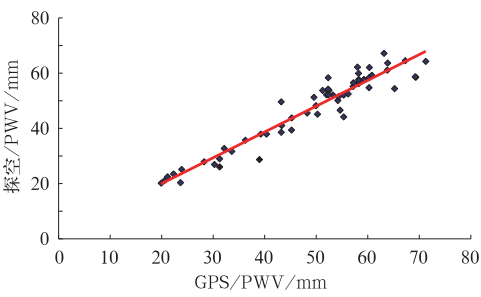


图 4 恩施站 GPS 与探空计算的可降水量散点图

Fig. 4 Scattered dot diagram of precipitable water calculated by radiosonde and GPS-PWV at Enshi Station

累积降水场,共输出 4 个时段的 6 h 累积降水。

2.3.2 模式参数设置

LAPS 系统本地化设置:设置区域格距为 5 km,格点数 500×500,区域中心位于(30°N、113°E),垂直层数为 21 层,模式层顶气压为 100 hPa。

WRF 模式的模拟区域中心、水平格点数、格距等参数与 LAPS 系统保持一致。物理参数设置:云

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of experiment scheme

序号	试验名称	试验方案
Exp1	CTRL	不同化任何观测资料,WRF 初始场由 NCEP 资料插值得到
Exp2	Radar	融合雷达资料,并作 24 h 确定性预报
Exp3	GPS/PWV	同化 GPS/PWV 资料,并作 24 h 确定性预报
Exp4	GPS/PWV+Radar	同化 GPS/PWV 及雷达资料,并作 24 h 确定性预报

微物理过程选用 Ferrier 微物理方案、长波辐射选用 RRTM 方案、短波辐射采用 Dudhia 方案、每 10 min 调用一次辐射过程;积云对流采用 Betts-Miller-Jan-

jic 方案,每 5 min 调用一次;陆面选用热扩散方案;边界层过程 YSU 方案。

3 GPS/PWV 对初始场改进效果分析

图 5 为 2009 年 6 月 29 日 12 时同化 GPS/PWV 资料前后 LAPS 输出的地面相对湿度场及其增量场。实况显示 29 日 12 时左右,鄂西南部的鹤峰站,鄂东部的麻城及红安站均出现强降水,鹤峰站

雨强高达 $53.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。由增量场看出,同化 GPS/PWV 资料后,鹤峰、麻城和红安附近暴雨区的地面相对湿度明显增加,而周边的相对湿度减少,比湿分布更加合理。结合地面流线发现,鹤峰、麻城和红安附近的地面风场为较强的辐合区,地面相对湿度场的高值区分布与降水区域分布较为一致,可见 LAPS 系统地面场能够较好地指示强降水发生的动力与水汽条件,符合强对流天气分析的要求。

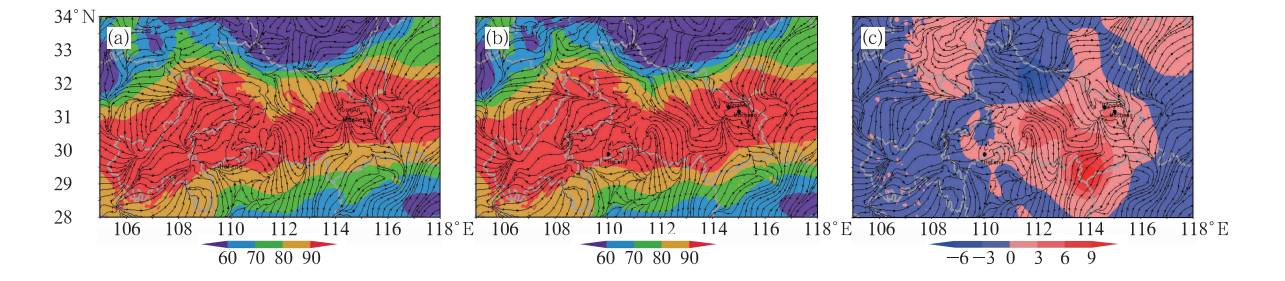


图 5 2009 年 6 月 29 日 12 时 LAPS 地面流线和相对湿度 (单位: %)

(a) 方案 1, (b) 方案 3, (c) 增量场

Fig. 5 Distribution of LAPS surface stream and relative humidity fields (unit: %) at 12:00 BT 29 June 2009
(a) Exp1, (b) Exp3, (c) difference fields

研究表明 700 hPa 比湿对地面降水具有较强的指示意义(赵美等,2011),降水的概率随着 700 hPa 比湿增大而增大。夏季,700 hPa 比湿 $\geq 9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,降水概率可达 80% 以上。结合此次降水过程,进一步考察同化 GPS/PWV 资料对 700 hPa 比湿场的改进作用。

图 6 为 2009 年 6 月 28 日 20 时,同化 GPS/PWV 资料前后 LAPS 输出的 700 hPa 比湿场及其增量场。湖北上空 700 hPa 比湿分布呈现西高东低的布局,特别是鄂西南的鹤峰附近,700 hPa 比湿超过 $11.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于阈值 $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。降雨实况显示,18 时左右鄂西南部连续发生多次强降水,

而鄂东并未发生降水。LAPS 输出场显示,同化水汽资料后,暴雨区增湿作用明显,增量场中表现为大的正值区,非暴雨区减湿作用,表现为大的负值区,可见同化 GPS/PWV 资料后上空比湿分布与实况更加吻合,改善效果明显。

以湖北省 3 个探空站(武汉站、恩施站、宜昌站)的观测资料作为客观标准,检验 GPS/PWV 资料对 LAPS 输出的分析场的定量影响的思路为:根据不同方案中 LAPS 系统输出的相对湿度及温度,计算露点温度(盛裴轩等,2003);再利用距离权重插值法求出湖北境内 3 个探空站(武汉、恩施、宜昌)各气压层的露点温度;最后计算并对比不同方案中 3 个探

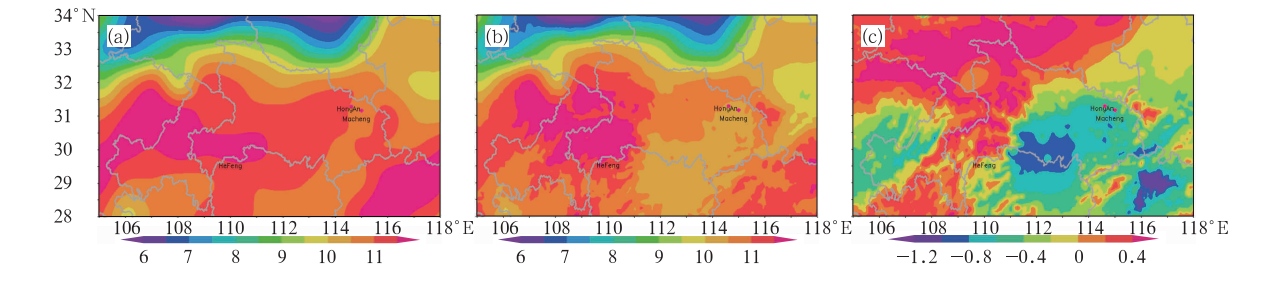


图 6 2009 年 6 月 28 日 20 时 700 hPa 比湿场 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

(a) 方案 1, (b) 方案 3, (c) 增量场

Fig. 6 Distribution of LAPS specific humidity field (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) at 20:00 BT 28 June 2009
(a) Exp1, (b) Exp3, (c) difference fields

空站在各气压层的露点温度误差。

表 2 给出 2009 年 6 月 28 日降水过程中 3 个探空站 LAPS 输出场各气压层露点温度与实际露点温度的均方根误差。从表 2 看出,方案 2 与方案 1 各层的均方根误差相当,说明同化雷达资料对 LAPS 系统输出的湿度场改进作用不大。方案 3 与方案 1 相比,对流层下(500 hPa 以下)均方根误差减小,而在对流层上层均方根误差略有增加,说明同化 GPS/PWV 资料对对流层下层湿度场的改善效果较为明显,而对中高层的改善效果有待提高。大气中的水汽主要集中在对流层下层,对下层水汽的改善具有重要意义。另外,各组试验的均方根误差均随高度增加而增大,说明 LAPS 湿度场的系统误差随高度的增加而递增。另外本文也分析了各组试验中温度场、高度场及风场的变化,发现 GPS/PWV 资料仅对湿度场有显著影响,对高度场及风场影响

不大,而雷达资料对风场产生影响。为充分考察不同资料对 LAPS 输出场的影响效果,需要结合不同的暴雨过程进行试验。本文又选择湖北地区 2010 年 7 月 8 日 08 时持续两天的暴雨过程作为个例 2,2010 年 8 月 20 日 13 时维持两天的暴雨过程作为个例 3,并分别计算不同方案下的露点温度差异。表 3 给出了 3 个个例不同方案下露点温度在时间(6 h 平均)及空间(武汉、恩施、宜昌 3 个探空站)上的平均绝对误差。从表 3 可以看出,在 3 个个例中,方案 3 即同化 GPS/PWV 资料后,露点温度的误差较前两种方案均有减小,可见 GPS/PWV 资料可改善 LAPS 湿度场的分布,对湿度场有正的影响;在个例 1 和 3 中,方案 2 即融合雷达资料后,露点温度的误差有略微减小,而在个例 2 中方案 2 误差大于方案 1,但增大或减小的量均小于 0.02℃,可见湿度场对雷达资料不敏感,与表 2 分析的结果一致。

表 2 2009 年 6 月 28 日降水过程中 3 种方案 LAPS 分析场与 3 个探空站实际观测的露点温度平均绝对误差 (单位:℃)

Table 2 Mean absolute error of dew-point temperature (unit:℃) between LAPS fields and radiosonde data on 28 July 2009

层次/hPa	850	700	500	400	300	250
方案 1	0.862077	1.015118	1.888936	2.036174	5.51075	6.253535
方案 2	0.862075	1.01672	1.879957	2.036246	5.51105	6.252998
方案 3	0.858793	0.39494	1.693279	2.064603	5.550944	6.283334

表 3 3 个个例中各方案下露点温度时空平均绝对误差

Table 3 Spatial and temporal mean absolute error of dew-point temperature in different experiment schemes in three cases

露点温度差/℃	个例 1	个例 2	个例 3
方案 1	4.289 304	4.592 842	4.389 462
方案 2	4.290 281	4.623 932	4.382 348
方案 3	4.185 713	4.482 913	4.269 284

结合 6 月 28—30 日的暴雨过程分析 GPS/PWV 资料对 LAPS 系统分析的暴雨区域平均可降水量的定量影响。图 7 中方案 2 与方案 1、方案 3 与方案 1 的差值分别体现了雷达资料和 GPS/PWV 资料对区域平均可降水量的影响。从纵坐标数值范围可知,GPS/PWV 资料对区域平均可降水量的影响比雷达资料大一个量级。在暴雨发生的不同阶段,GPS/PWV 资料对区域平均可降水量产生的作用不同:在 30 日 00 时之前,即暴雨集中阶段,GPS/PWV 资料多为正影响,30 日 00 时之后,雨势渐止,GPS/PWV 资料表现为负影响,但雷达资料的影响

效果相对不确定。

4 GPS/PWV 资料对降水预报场改进效果分析

将不同方案下的 LAPS 输出场分别作为 WRF 模式的初始场进行 24 h 预报。图 8 给出了 3 种方案的 24 h 累积降水实况及预报图。从图中可以看出,降水主要集中在鄂西南部,暴雨中心位于(30°N、110.5°E),3 种方案都模拟出了整个雨带的大致走势。方案 1 在鄂东地区出现很强的虚拟强降水,且鄂西南部的强降水区域分散,没有形成对应的强降水中心;方案 2 与方案 1 相比,预报出了鄂西南部的暴雨中心;而方案 3 不仅预报出了鄂西南部的暴雨中心,对鄂东部的虚假降水有所抑制,雨带与实况最接近;方案 4 的降水预报分布图与方案 3 基本一致,可见同化 GPS/PWV 资料对降水预报场的改进作用明显,而雷达资料的影响相对较小。综上可知,利用 LAPS 同化 GPS/PWV 资料的输出场作为

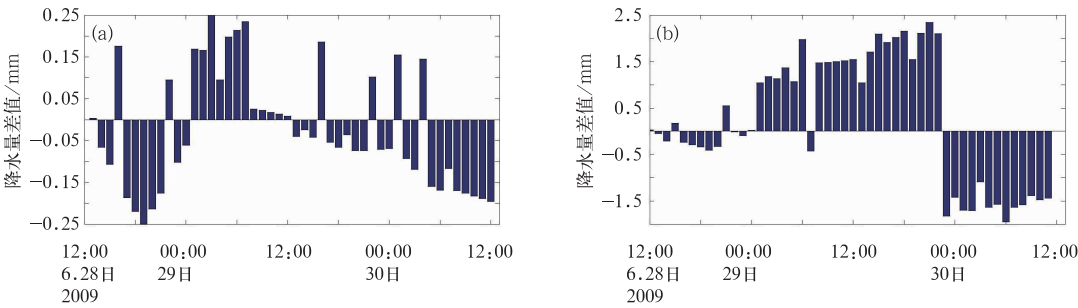


图 7 试验区域平均可降水量的差值随时间分布

(a) 方案 2 减方案 1, (b) 方案 3 减方案 1

Fig. 7 Difference distribution of average precipitable water between

(a) Exp2 and Exp1, (b) Exp3 and Exp1

WRF 初始场进行预报,可改善区域的降水预报,其结果与实况最吻合,效果最优。

图 9a 和 9b 分别是方案 2 与方案 1、方案 3 与方案 1 的 24 h 降水差值分布,分别体现了雷达资料和 GPS 水汽对降水预报的贡献。同化了雷达资料后的预报与仅使用背景场相比,对强降水区域调整不明显,而在鄂东地区的虚假雨区面积增大雨量增强。在图 9b 中,对应强降水区域的降水量差值为正值,且对应虚假降水区域的差值为负值,说明同化 GPS/PWV 资料后对 GPS 测站分布区域的降水预报改善非常明显。

利用预报评估指数对 2009 年 6 月 28 日 20 时至 29 日 20 时共 4 个时段的 6 h 累积降水量场进行评估,方法是:利用插值法求得湖北省 83 个自动站在各时段的 6 h 累积降水量,并按照小雨等级($R_6 \geq 0.1 \text{ mm}$)、中雨等级($R_6 \geq 5.0 \text{ mm}$)、大雨等级($R_6 \geq 12.5 \text{ mm}$)对降水量预报场进行统计分析。具体的统计评估方法是:观测有、预报也有,观测无、预报也无,即预报正确的站点数分别记为 N_{11}, N_{22} ;观测无、预报有的空报的站点数记为 N_{21} ;观测有、预报无的漏报的站点数记为 N_{12} 。

试验选用的评估指数为临界成功指数 CSI ,预报准确率 V_s (丁金才等,2007),预报偏差 B ,漏报率 PO 及空报率 FAR (尤凤春等,2009),分别定义为:

$$CSI = N_{11} / (N_{11} + N_{12} + N_{21}) \tag{3}$$

$$V_s = \frac{N_{11} + N_{22}}{N_{11} + N_{12} + N_{21} + N_{22}} \times 100\% \tag{4}$$

$$B = \frac{N_{11} + N_{21}}{N_{11} + N_{12}} \tag{5}$$

$$PO = \frac{N_{12}}{N_{11} + N_{12}} \times 100\% \tag{6}$$

$$FAR = \frac{N_{21}}{N_{11} + N_{21}} \times 100\% \tag{7}$$

临界成功指数 CSI 是预报有雨的正确次数与所有有雨次数(预报与观测有雨次数之和)比值,反映预报场预报有雨的准确性。表 4 列出了同化 GPS/PWV 资料前后 WRF 模式降水预报在各个时段各种降水等级的 CSI 评分结果。有无降水预报在 4 个时段的 CSI 评分都较高,同化前后预报场的平均 CSI 评分分别为 0.752 和 0.729,但在该降水等级,前两个时段同化前后的预报场 CSI 评分相同,未能体现 GPS/PWV 资料对预报场的改进作用。随着降水等级增加,预报场的 CSI 评分降低,两种方案中强降水预报 CSI 评分都为最低。另外,随预报时间加长,GPS/PWV 资料的影响减弱,特别是时段 4,同化水汽前后 CSI 评分改变非常小。

不过, CSI 评分存在一定局限性,仅反映预报场预报有雨的能力。预报准确率 V_s 是总预报正确次数(包括有雨及无雨)占总预报次数的百分比,可更准确分析预报场预报降水的能力。表 5 给出了同化 GPS/PWV 资料前后 WRF 模式降水预报在各个时段不同降水等级的 V_s 评分结果。预报正确率 V_s 在各个时段各个降水等级都比对应的 CSI 评分高。在有无降水等级,两种评价指数差异较小,说明在该降水等级,有雨预报的准确率占预报准确率的大部分,然而在中等降水和强降水等级,预报正确率 V_s 比 CSI 评分高出 2~3 倍之多,说明这两个降水等级无雨预报的准确率占了预报准确率的大部分。与 CSI 类似,在模式预报初期,未能表现 GPS/PWV 资料的影响,随预报时间加长同化 GPS/PWV 资料前后的 V_s 评分差异也减小。

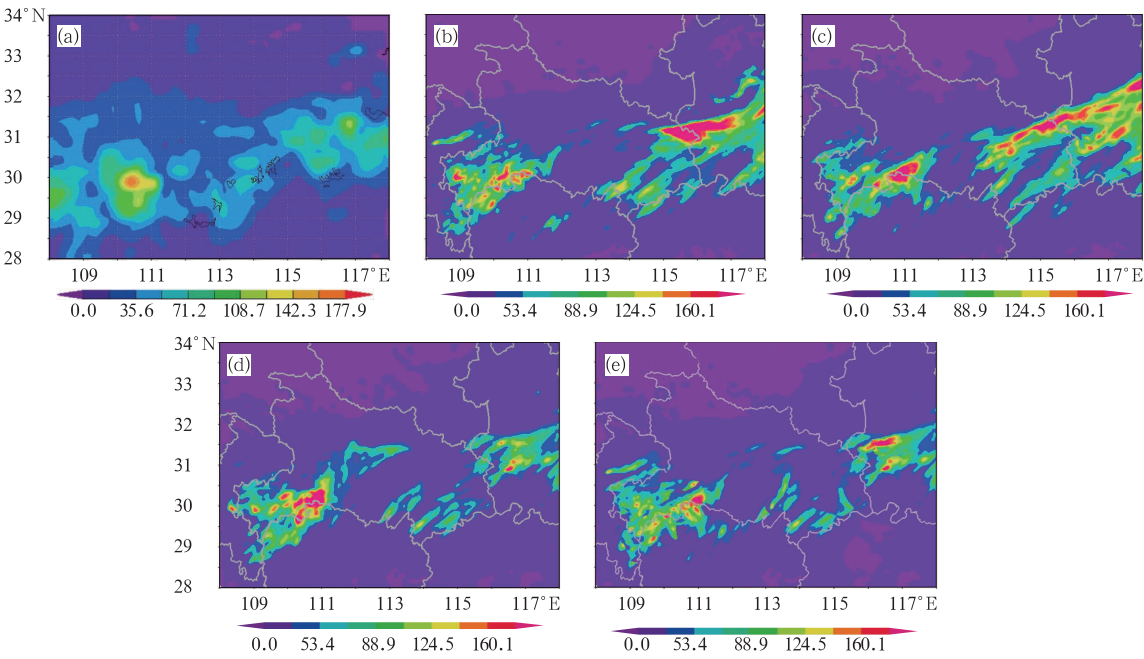


图 8 2009 年 6 月 28 日 20 时至 29 日 20 时 24h 降水分布 (单位: mm)

(a) TRMM, (b) 方案 1, (c) 方案 2, (d) 方案 3, (e) 方案 4

Fig. 8 Distribution of precipitation from 20:00 BT 28 to 20:00 BT 29 July 2009 (unit: mm)

(a) TRMM, (b) Exp1, (c) Exp2, (d) Exp3, (e) Exp4

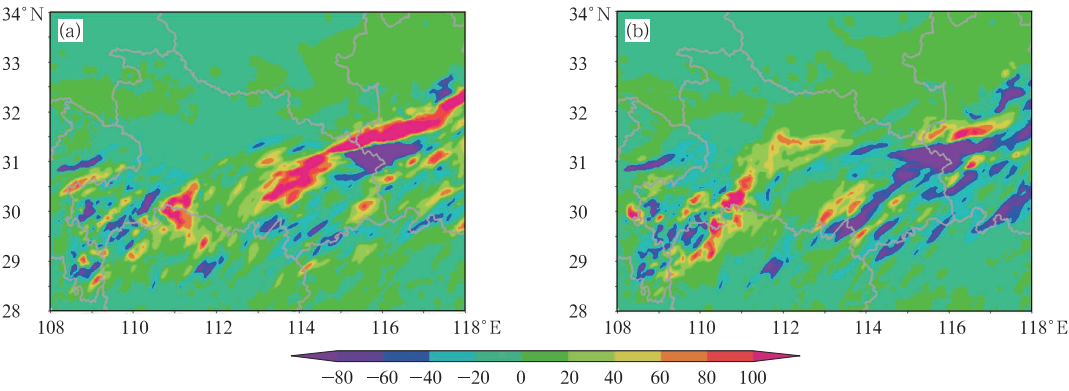


图 9 2009 年 6 月 28 日 20 时至 29 日 20 时各方案 24 h 降水预报增量场分布 (单位:mm)

(a) 方案 2 减方案 1, (b) 方案 3 减方案 1

Fig. 9 Difference distribution of 24-h simulated precipitation (unit: mm)

from 20:00 BT 28 to 20:00 BT 29 July 2009

(a) Exp2 and Exp1, (b) Exp3 and Exp1

漏报率 PO 表示模式漏报有雨的站点数与观测有雨的总站点数的比值;空报率降 FAR 又称伪警率,是模式空报有雨的站点数与预报有雨总站点数的比值;预报偏差 B 则表示模式预报降水的总站点数与实况观测降水总站点数的比值。表 6 列出了同化 GPS/PWV 资料前后 WRF 模式降水预报在第三时段各降水等级的漏报率、空报率及偏差的评分结

果。从表 6 可以看出,随着降水等级增加,漏报率和空报率的评分均降低,不同降水等级的预报偏差较稳定,均在 1.0 附近。同化 GPS/PWV 资料后,3 种统计量评分均有提高,特别在大雨等级,提高显著。可见同化 GPS/PWV 资料后的模式初始场可较好地改善降水预报场的分布。

表 4 同化 GPS/PWV 资料前后各时段各降水等级的 CSI 评分

Table 4 CSI scores of precipitation forecast before and after GPS/PWV data assimilation

降水 等级	小雨			中雨			大雨		
	GPS	NO_GPS	DCSI	GPS	NO_GPS	DCSI	GPS	NO_GPS	DCSI
时段 1	0.763	0.763	0.0	0.200	0.167	+0.033	0.087	0.074	+0.013
时段 2	0.711	0.711	0.0	0.362	0.383	−0.021	0.323	0.303	+0.020
时段 3	0.773	0.667	+0.106	0.456	0.309	+0.147	0.298	0.152	+0.146
时段 4	0.800	0.773	+0.027	0.286	0.375	−0.089	0.200	0.214	−0.014

表 5 同化 GPS/PWV 资料前后各时段各降水等级的 V_s 评分

Table 5 V_s scores of precipitation forecast before and after GPS/PWV data assimilation

降水 等级	小雨			中雨			大雨		
	GPS	NO_GPS	DV _s	GPS	NO_GPS	DV _s	GPS	NO_GPS	DV _s
时段 1	78.0	78.0	0.0	65.9	63.4	+2.5	74.4	69.5	+4.9
时段 2	73.2	73.2	0.0	64.6	63.4	+1.2	74.4	72.0	+2.4
时段 3	79.3	69.5	+9.8	63.4	53.6	+9.8	58.9	52.4	+7.4
时段 4	81.7	79.3	+2.4	51.2	57.3	−6.1	59.8	59.8	0.0

表 6 相关统计量在不同等级降水的评分结果

Table 6 The test result of related statistics of precipitation in different grades

降水 等级	漏报率 PO/%			空报率 FAR/%			偏差 B		
	NO_GPS	GPS	DPO	NO_GPS	GPS	DFAR	NO_GPS	GPS	DB
小雨	13.5	9.2	−4.3	25.0	16.9	−8.1	1.15	1.09	−0.06
中雨	33.3	29.7	−3.6	51.3	40.9	−10.4	1.37	1.19	−0.18
大雨	50.0	40.0	−10.0	80.0	61.5	−18.5	2.50	1.56	−0.94

5 结 论

本文利用湖北地区 GPS 观测网的可降水量资料对 2009 年 6 月 28—30 日湖北区域性大暴雨的降水过程进行了资料同化试验,通过分析同化 GPS/PWV 资料对初始湿度场和降水预报场的改进作用,可以得出以下结论:

(1) 分析 LAPS 系统输出的地面流线和相对湿度场发现,LAPS 系统输出的地面场能够较好地指示强降水发生的动力与水汽条件,可应用于强对流天气中尺度分析。同化 GPS/PWV 资料对地面风场没有影响,而对地面相对湿度场有一定改进作用,特别是相对湿度高值区,同化 GPS/PWV 资料后,高值区分布更加合理。

(2) 对比 LAPS 系统同化 GPS/PWV 资料后输出的 700 hPa 比湿场及与未同化前的增量场发现,GPS/PWV 资料对于调整强降水区域的湿度场效果明显,能改善对 LAPS 分析区域暴雨区的湿度场的分布,且同化 GPS/PWV 资料后 LAPS 输出的 700 hPa 比湿场能够较正确地预示强对流天气的发生。

(3) 以探空观测为客观标准,计算 3 种方案中

LAPS 输出场与对应探空站的平均露点温度的均方根误差,结果表明同化 GPS/PWV 资料对各层湿度场均有改善,特别是低层湿度场,改善效果较为明显,而中高层湿度场的改善效果有待提高,同化雷达资料对 LAPS 系统输出的湿度场改进作用不大;同化 GPS/PWV 资料的仅对湿度场产生作用,而不影响高度场及风场。

(4) GPS/PWV 资料对区域平均可降水量的影响比雷达资料大一个量级。在暴雨发生的不同阶段,GPS/PWV 资料的影响效果不同,在暴雨集中阶段,GPS/PWV 资料大多为正影响,而暴雨消散阶段,GPS/PWV 资料表现为负影响。

(5) 利用 WRF 针对此次暴雨进行模拟,LAPS 系统同化 GPS/PWV 资料后为模式提供初始场所进行的预报,明显改善了 GPS 测站分布区域的降水预报,预报场最接近实况。利用 CSI 评分和预报偏差 B 等多种统计量对同化 GPS/PWV 资料前后累积降水量场进行评分可发现,同化 GPS/PWV 在预报初期对 CSI 及 V_s 的评分影响不明显,随着预报时间加长,两种指数差异随之减小。进一步分析发现同化 GPS/PWV 资料后,PO、FAR 及偏差 B 的评分均有提高,在大雨等级提高显著。

致谢:作者感谢中国气象局武汉暴雨研究所万蓉所长的帮助,贵所为本文提供 GPS/PWV 资料及多普勒雷达资料;感谢中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室国家卫星气象中心的刘瑞霞为本文提供的理论及技术上的支持;感谢肖辉在模式的调试方面给予的帮助;感谢南京信息工程大学官莉和沈菲菲在论文完善中给予的帮助。

参考文献

曹云昌,方宗义,夏青,等. 2006. 中国地基 GPS 气象应用站网建设展望. 气象,11(32):42-47.

丁金才,叶其欣,马晓星,等. 2006. 区域 GPS 气象网站点合理布设的几点依据. 气象,32(2):34-39.

丁金才,袁招洪,杨引明,等. 2007. GPS/PWV 资料三维变分同化改进 MM5 降水预报连续试验的评估. 气象,33(6):12-17.

李红莉. 2009. GPS 水汽资料在中尺度分析及预报中的应用研究. 第 26 届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集,1143-1152.

李红莉,崔春光,王志斌,等. 2009. LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用. 暴雨灾害,28(1):64-70.

李红莉,万蓉,谢有才. 2010. 利用 LAPS 系统同化地基 GPS 水汽资料的应用研究. 热带气象学报,26(6):702-709.

李红莉,张兵,陈波. 2008. 局地分析和预报系统(LAPS)及其应用. 气象科技,36(1):20-24.

刘瑞霞,陈洪滨,师春香,等. 2011. 多源观测数据在 LAPS 三维云量场分析中的应用. 应用气象学报,22(1):123-128.

彭菊香,李红莉,崔春光. 2011. 华中区域 LAPS 中尺度分析场的检验与评估. 气象,37(2):170-175.

盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 2003. 大气物理学. 北京:北京大学出版社,332-333.

王勇,刘严萍,柳洪涛,等. 2007. 区域 GPS 网对流层延迟直接推算可

降水量研究. 热带气象学报,23(5):510-514.

徐桂荣,陈波,万蓉,等. 2008. 地基 GPS 不同水汽反演方法的误差分析. 暴雨灾害,27(4):346-350.

尤凤春,魏东,王雨. 2009. 北京奥运期间多模式降水检验及集成试验. 气象,35(11):3-8.

袁招洪. 2004. GPS 资料在中尺度数值预报模式中的应用研究. 南京,南京气象学院.

袁招洪. 2005. GPS 可降水量资料应用于 MM5 模式的变分同化试验. 气象学报,63(4):391-404.

袁招洪,丁金才,陈敏. 2004. GPS 观测资料应用于中尺度数值模式的初步研究. 气象学报,62(2):200-212.

赵美,李永,张军,等. 2011. 高空 700 hPa 规定层比湿与地面降水关系分析. 江苏省气象学会第七届学术交流会议文集,13.

Bevis M S, Businger A R, Chiswell, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. J Appl Meteorol,33(3):379-386.

Bevis M S, Businger T A, Herring, et al. 1992. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J Geophy Res,97(D14):15787-15801.

Birkenheuer D. 2001. Utilizing variational methods to incorporate a variety of satellite data in the LAPS moisture analysis // Preprints,11th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography. Madison, WI, Amer. Meteor Soc.

Guo Y R, Y H Kuo, J Dudhia, et al. 2000. Four dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong case. Mon Wea Rev,128(3):619-642.

Ha-Taek Kwon. 2012. Assimilation of Ground-Based GPS Measurements: Impact of GPS-PW and ZTD on the Rainfall Forecast Over the Korean Peninsula. 16th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS).