

王继竹,郭英莲,徐桂荣,等. 2014. 湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析. 气象,40(11):1308-1315.

# 湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析<sup>\*</sup>

王继竹<sup>1</sup> 郭英莲<sup>1</sup> 徐桂荣<sup>2</sup> 付志康<sup>2</sup> 龙利民<sup>1</sup> 韩芳蓉<sup>1</sup>

1 武汉中心气象台,武汉 430074  
2 武汉暴雨研究所,武汉 430074

**提 要:** 利用常规探空、秒级原始探空、GPS/MET、微波辐射计、GFS 再分析资料以及区域中尺度 WRF 模式的预报场资料计算整层可降水量,对多种资料计算的整层可降水量进行误差特征和原因分析,结果表明:秒级探空和常规探空计算的整层可降水量基本一致。GPS/MET、微波辐射计、GFS 以及 WRF 计算的整层可降水量与常规(秒级)探空的相关系数分别为 0.94、0.92、0.93、0.80,有降水时 GPS/MET 和微波辐射计与常规探空的相关系数分别下降到 0.85 和 0.81,但有降水时 GPS/MET 误差分布较集中,而有降水时微波辐射计误差显著增大,主要由于 1~2 km 处水汽密度误差异常增大。除微波辐射计和 GFS 宜昌站计算的整层可降水量为相对常规探空偏高,其他资料均为偏低,GPS/MET 宜昌和恩施站平均偏低 3 mm,GFS 武汉和恩施站分别偏低 1 和 7 mm,WRF 恩施平均偏低 2 mm,WRF 武汉和宜昌平均偏低 6~8 mm。GFS 恩施站可降水量偏低是由于 GFS 资料中恩施地面气压比实际偏低,但其露点温度整层均比常规探空偏高。除 GFS 恩施站外,GFS 武汉、GFS 宜昌和 WRF 3 站的露点温度相对常规探空资料露点温度均表现为:850 hPa 以下偏低,850 hPa 以上偏高。WRF 12 h 预报场的整层可降水量与常规探空整层可降水量的相关性和误差均优于 24 h 预报场。

**关键词:** 探空, GPS/MET, 微波辐射计, GFS, WRF, 误差

**中图分类号:** P458      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.003

## Error Analysis of Estimating Precipitable Water Vapor from Different Databases in Hubei Province

WANG Jizhu<sup>1</sup> GUO Yinglian<sup>1</sup> XU Guirong<sup>2</sup> FU Zhikang<sup>2</sup> LONG Limin<sup>1</sup> HAN Fangrong<sup>1</sup>

1 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074  
2 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

**Abstract:** Using the sounding observation data (SO), raw sounding observation data (RSO), GPS/MET data, microwave radiometer data (MWR), GFS reanalyzed data and the mesoscale area-limited model WRF data, the precipitable water vapor (PWV) was estimated. Through the error analysis of different data, it is found that the SO PWV and RSO PWV are the same basically. The correlation coefficient of the GPS/MET PWV, the MWR PWV, the GPS PWV, the WRF PWV and the SO PWV are 0.94, 0.92, 0.93, 0.80, respectively. The correlation coefficients of the GPS/MET PWV, the MWR PWV and the SO PWV reduce to 0.85 and 0.81 seperately when raining, and the error distribution of the GPS/MET PWV is concentrated, while the error distribution of the MWR PWV increases significantly, because the water vapor density error increases abnormally in the part 1—2 km. The PWV is generally low, except for the MWR PWV and the GPS/MET PWV at Yichang. The GPS/MET PWV is averagely 3 mm lower than the SO PWV at Yichang and Enshi, the GFS PWV at Wuhan and Enshi is respectively 1 mm and 7 mm, the WRF PWV at Enshi is averagely 2 mm and 6—8 mm at Wuhan and Yichang. The surface pressure of GFS is

<sup>\*</sup> 湖北省气象局科技发展基金重点项目(2013Z02)资助  
2013 年 12 月 9 日收稿; 2014 年 5 月 22 日收修定稿  
第一作者:王继竹,主要从事水文气象、短期天气预报. Email:18814863@qq.com

lower than the observation at Enshi is the reason for the GFS PWV errors, but the dew-point temperature of GFS is higher than SO. The dew-point temperature analysis shows that the GFS at Wuhan, the GFS at Yichang, and WRF at three stations are lower below 850 hPa and higher above 850 hPa than SO, except for the GFS at Enshi. The correlation coefficient and the error distribution of the WRF PWV and the SO PWV analysis show that the 12 h forecasting is better than 24 h.

**Key words:** sounding observation (SO), GPS/MET, microwave radiometer (MWR), GFS, WRF, error distribution

## 引 言

大气中的可降水量 (Precipitable Water Vapour, PWV) 定义为地面以上气柱中的水汽全部凝结并降至地面的降水量, 是表征大气中水汽含量的重要指标, 与地面降水量直接相关, 对天气预报、气候预测和人工影响天气都非常重要。2012 年 7 月 21 日北京发生了特大暴雨, 造成严重损失和伤亡, 俞小鼎(2012)、赵洋洋等(2013)、孙军等(2012)、湛芸等(2012)和方翀等(2012)均指出, 可降水量的异常偏大是造成此次大暴雨的原因之一。目前水汽资料的获取主要通过无线电探空、卫星观测、GPS/MET 水汽监测、微波辐射计等。由于无线电探空资料只有每日 08 和 20 时进行探测, 且站点较少, 限制了在预报中的使用效率。其他 3 种途径均在时间和空间分辨率上占有显著的优势。已有大量文献对卫星(张洁等, 2011; 权维俊等, 2004)、GPS/MET(陈小雷等, 2009; 王小亚等, 1999; 向玉春等, 2009; 张晶等, 2014)、微波辐射计等(徐桂荣等, 2010)资料反演的可降水量进行对比检验, 指出相对于无线电探空, 这些资料在一定的条件下均有着较高的精度, 尤其 GPS/MET 几乎不受天气条件影响, 其误差也最小。因此, GPS/MET 可降水量资料的业务应用成为必然的趋势(丁海燕等, 2012; 曹云昌等, 2005)。于是, 在检验单一资料可降水量的基础上, 开展多种资料可降水量的对比以及应用研究, 尤其是可降水量的预报应用势在必行。袁招洪等(2004)就曾对 MM5 预报模式预报的可降水量与 GPS/MET 观测进行了比较研究, 得出模式积分前 10 h 对可降水量表现了较好的预报能力, 积分 20 h 后, 模式预报偏差明显增长。中国气象局武汉暴雨研究所 2012 年引进 WRF 模式系统并投入业务试运行, 每天 08、20 时各运行一次, 预报未来 84 h 逐小时的预报, 但其预报场计算的可降水量准确性尚未经过检验。

本文搜集了 2012 年 5—9 月期间湖北省武汉、宜昌、恩施 3 站的常规探空和秒级原始探空资料计算可降水量, 作为实况; 选用实时 GPS/MET、微波辐射计以及常用于后期过程分析的 GFS 再分析资料计算可降水量, 分析其与实况的差别; 选用武汉暴雨研究所本地化的 WRF 模式的预报场计算可降水量, 分析其预报能力; 以期为今后可降水量资料的应用提供基础。

## 1 资料和方法

常规探空资料为中国气象局下发的每日两次 (08、20 时) 全国 500 多站的常规探空站资料, 包含规定层和特性层。

秒级探空资料为湖北省气象局从武汉、宜昌、恩施 3 站搜集的无线探空基数据, 利用高空气象探测系统数据处理软件得出逐 50 m 高度的数据, 包括高度、气温、气压、湿度、露点、温度露点差、虚温、风向、风速。

GPS/MET 可降水量资料为利用 GAMIT 解算软件并采用一定的反演方法(徐桂荣等, 2010)对湖北省气象局建设接收的 59 个 GPS/MET 站点的资料及相关地面资料计算所得的大气整层可降水量, 资料间隔为半小时。

武汉微波辐射计为 MP-3000A 型, 它配置了红外温度计, 可在降水天气下进行观测, 包括地面至 10 km 高度共 58 层的温度、相对湿度、水汽密度和液态水含量的廓线数据, 其垂直分辨率 500 m 以下为 50 m, 500 m 至 2 km 为 100 m, 2 km 以上为 250 m, 时间分辨率为 2 min 左右。

GFS 再分析资料为通过通用网络系统(IDD)获取的来自 NCEP 和 ECMWF 的  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  分析场资料。包括每天 02、08、14、20 时 4 个时次(北京时间), 1000~10 hPa 共 26 层的资料。

区域 WRF 模式资料为武汉暴雨所引进美国

WRF 3.4 模式进行本地化参数调整后进行的 1 日两次,每次预报 84 h 的数据。该模式同化了地面、高空、航空、船舶、浮标、飞机、飞行员报告和卫星测厚等资料,分辨率为 3 km、垂直 1000~100 hPa 共 11 层,输出时间间隔为 1 h。

以上资料中,除微波辐射计资料没有气压值,其他均有气压值。因此,利用微波辐射计资料计算大气可降水量使用如下公式(刘健文等,2007):

$$PW = \int_0^\infty \rho_v dz$$

式中, $\rho_v$  为水汽密度,积分高度为 0~10 km。

其他资料计算大气可降水量均使用如下公式(刘健文等,2007):

$$PW = \frac{1}{g} \int_0^p q dp$$

式中, $q$  为比湿, $g$  为重力加速度, $p_0$  为地面气压。

由于

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e}$$
$$e = 6.112 \exp\left(\frac{17.67t_d}{t_d + 243.5}\right) = \rho_v R_v T \quad (1)$$

因此计算可降水量涉及到的基本物理量只有露点温度(或水汽密度),下文对误差分析时主要针对露点温度(或水汽密度)的探空曲线进行对比。

为了保证时间统一,所有资料均提取 2012 年 5 月 1 日至 9 月 30 日期间每日 08、20 时的武汉、宜昌、恩施 3 站资料进行对比,计算过程中剔除缺测

资料时次。

## 2 不同资料可降水量误差特征及原因

### 2.1 秒级探空

在日常天气预报和数据分析中,秒级探空资料使用并不广泛,但是在 GPS/MET 可降水量与探空资料的对比研究中有些使用秒级探空资料(徐桂荣等,2009),而常规探空资料与秒级探空资料计算可降水量误差有多大还不清楚。为了避免分析微波辐射计时等高面与等压面的转换,也需要用到秒级探空的等高度数据。因此,本文对比分析分别利用秒级探空和常规探空计算的可降水量。从表 1 可以发现,湖北省武汉、宜昌、恩施 3 个探空站的两种资料可降水量之间的相关系数均达到 0.997 以上。平均绝对误差最大的为武汉(0.6987 mm),最小的为恩施(0.5850 mm)。宜昌最大绝对误差在 3 站中最小(2.27 mm),恩施平均误差为 3 站中最小(0.05 mm)。在 306 组可降水量值中绝对误差超过 2 mm 的武汉有 11 个,宜昌有 2 个,恩施有 4 个,同时,武汉站的最大绝对误差也是 3 个站中最大的。因此,武汉是两种探空计算可降水量差异最大的站,恩施站差异最小。

分析可降水量绝对误差最大点的探空分布可以发现,常规探空和秒级探空的误差是由于常规探空

表 1 多种资料可降水量与常规探空可降水量之间的相关系数、绝对误差、平均误差(其他减常规探空)

Table 1 The correlation coefficient, absolute error, average error of PWV estimated by multiple data between RSO PWV and others

资料名称	相关系数	最大绝对误差/mm	平均绝对误差/mm	平均误差/mm
武汉-秒级探空	0.9979	6.2660	0.6987	-0.2793
宜昌-秒级探空	0.9986	2.2729	0.6077	-0.2240
恩施-秒级探空	0.9975	3.2333	0.5850	-0.0515
宜昌-GPS/MET	0.9684	13.6248	4.0630	-3.4484
恩施-GPS/MET	0.9410	18.3061	3.4175	-2.3827
武汉-微波辐射计	0.9150	44.4098	5.2496	3.7002
武汉-GFS再分析	0.9712	15.7947	2.8693	-1.4616
宜昌-GFS再分析	0.9653	18.0089	2.8190	0.4413
恩施-GFS再分析	0.9304	19.4820	7.6316	-7.4248
武汉-WRF12	0.8044	27.9584	8.7736	-6.6307
宜昌-WRF12	0.9292	20.7286	6.8795	-6.1555
恩施-WRF12	0.9178	14.1068	3.6834	-1.7829
武汉-WRF24	0.8226	30.1106	9.3009	-8.0130
宜昌-WRF24	0.9076	33.8186	7.6309	-6.8542
恩施-WRF24	0.8772	17.15028	4.6982	-2.5425

仅选取了秒级探空中规定层和特性层,两种资料垂直分辨率不同(图 1),造成了两者之间较大的误差。在考虑环境场基本状态的条件下,由于两者序列之间的高相关性和低绝对误差,我们认为常规探空资料的精度足以用于可降水量的计算分析。

2.2 GPS/MET

GPS/MET 是目前能实时获取大气可降水量最有效的方法。很多人(王小亚等,1999;向玉春等,2009;颜晓露等,2012)均对 GPS/MET 和探空资料反映的可降水量进行了对比分析,得出绝对误差基本在 4 mm 之内。考虑武汉站的 GPS/MET 位于蔡甸,而武汉探空站位于汉阳,存在 13 km 左右的距离差,本文仅对比宜昌和恩施两站同址观测的数据。通过对比 2012 年 5—9 月每日两次湖北两站的 GPS/MET 和常规探空的可降水量发现,两站相关系数均达到 0.94 以上,宜昌为 0.9653,恩施为 0.9410。两站的平均绝对误差基本小于 4 mm,与之前文献提到的一致。从平均误差(GPS/MET 减常规探空)则可以看出 GPS/MET 反演的 PWV 普遍比常规探空偏小,个别时次偏大。从图 2 可以看出,可降水量均在 6 月 25 日左右开始突然增加,随后均保持在相对高值,一直到 9 月整体略有下降的同时出现大幅波动的现象。结合 2012 年湖北汛期的特征可以发现,6 月 25 日湖北省出现入梅后首场强降水过程,一直到 9 月初强降水过程结束。9 月后可降水量的波动一方面与资料缺失造成的不连续性有关,另一方面 9 月以后副热带高压南撤,干冷空气开始呈主要势力与弱的暖湿空气交绥。另外,在 6 月 25 日到 9 月 1 日的高可降水量时段内,两者之间的误差显著增大。

考虑到误差较大时段为降水相对集中的主汛期,当空气饱和,可降水量达到一定大值后便变化不

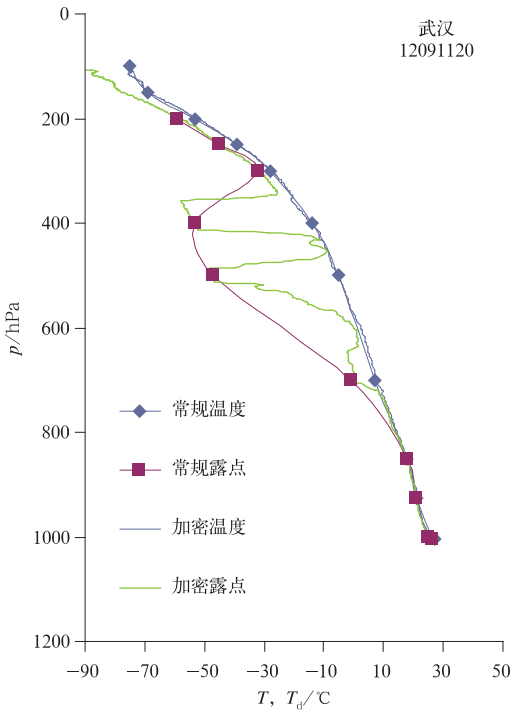


图 1 常规探空和加密(秒级)探空的温度和露点温度垂直廓线

Fig. 1 The vertical profiles of temperature and dew point temperature calculated by sounding observation (SO) and raw sounding observation (RSO)

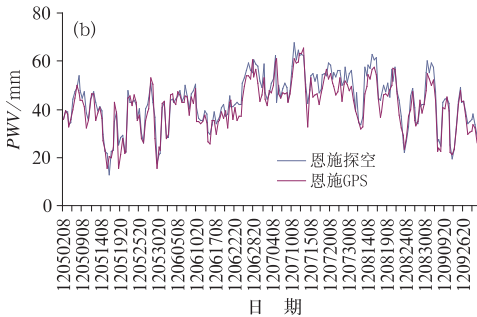
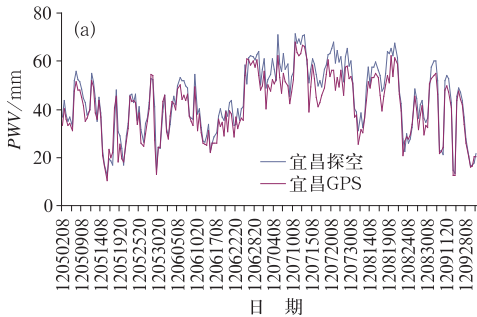


图 2 2012 年 5—9 月宜昌(a)和恩施(b)常规探空和 GPS/MET 可降水量序列  
Fig. 2 The time series of PWV (a) Yichang and (b) Enshi estimated by sounding observation and ground-based GPS/MET

太大,因此,区分有无降水后分析发现(表 2),有降水时 GPS/MET 与常规探空的相关性明显下降,而无降水时的相关性较高,同时宜昌有降水时误差分

布相对集中,无降水时误差分布较广,恩施则相反。另外,宜昌、恩施 GPS 站有降水时平均可降水量依次为 50.4955、49.2424 mm,无降水时平均可降水

量依次为 39.7800、40.1146 mm,结合常规探空计算的可降水量可将  $PWV=50$  mm 作为出现降水的参考值,但  $PWV$  达到 50 mm 以上不一定有降水,即使有降水也不是  $PWV$  越高对应降水量越大。因此,可降水量与降水量之间的关系有待进一步的分析。

2.3 微波辐射计

微波辐射计目前在湖北省只有武汉、咸宁、荆州 3 个站点,并不如 GPS/MET 一样有利于大范围水汽条件的分析,且其可降水量与常规探空的相关性(0.915)也比 GPS/MET 低,但是微波辐射计由于具有垂直方向和时间尺度的高分辨率,且可以同时探测温度和湿度,因此,微波辐射计资料可用于精密的探空分析(唐仁茂等,2012;黄治勇等,2013)。微

波辐射计的测量受降水影响较大,即使在目前 MP-3000A 型微波辐射计已经配备防雨罩的情况下,仍然影响较大(表 2),无降水时相关系数高达 0.9496,有降水时相关系数降至 0.8109。有降水时平均绝对误差也高达 19.3 mm,且 30 个误差超过 10 mm 的时次中只有 8 次是当时无降水的,其他时次均有降水,且降水最大的误差也最大。因此有降水时微波辐射计计算的可降水量误差较大。

由于微波辐射计可降水量是利用水汽密度计算而来,因此利用式(1)反算秒级探空资料的水汽密度进行探空曲线对比。从全部平均误差(微波辐射计减秒级探空)来看(图 3a),1.5 km 以下为微波辐射计水汽密度比秒级探空偏低,1.5 km 以上为偏高。区分有降水和无降水时的平均值可以发现,无降水时误差分布特征与全部误差平均分布特征基本

表 2 有降水 and 无降水时 GPS/MET 和微波辐射计可降水量与常规探空的相关系数、绝对误差、平均绝对误差

Table 2 The correlation coefficient, absolute error, average error between GPS/MET PWV and SO PWV with and without rainfalls

GPS 和常规探空		宜昌	恩施
有降水时	相关系数	0.908679	0.851994
	最大绝对误差/mm	10.16421	18.30613
	最小绝对误差/mm	0.02654	0.07969
	平均绝对误差/mm	3.913299	2.998834
无降水时	相关系数	0.971502	0.954599
	最大绝对误差/mm	13.62478	10.9444
	最小绝对误差/mm	0.01802	0.05679
	平均绝对误差/mm	4.083465	3.47914
微波辐射计和常规探空		武汉	
			有降水
			无降水
相关系数	0.915045	0.810885	0.949609
最大绝对误差/mm	44.40984	44.40984	36.67485
最小绝对误差/mm	0.02208	0.13501	0.02208
平均绝对误差/mm	5.249588	19.29909	4.038942

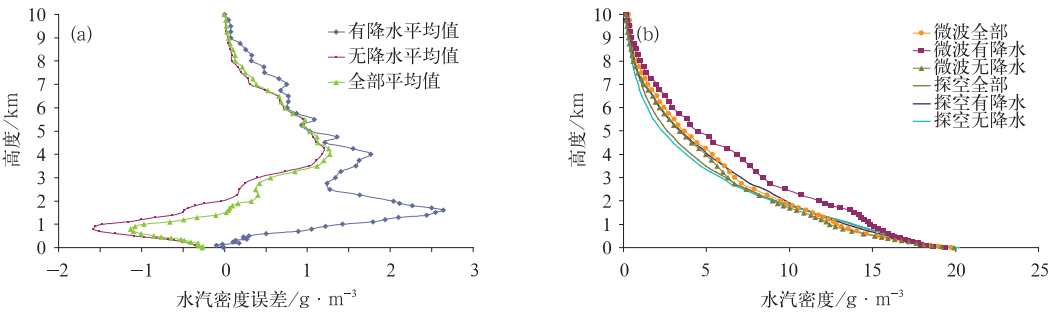


图 3 2012 年 5 月 1 日至 9 月 30 日有降水 and 无降水时微波辐射计与加密(秒级)探空的垂直廓线 (a) 水汽密度误差, (b) 水汽密度

Fig. 3 The vertical profiles of microwave radiometer and sounding observation between 1 May and 30 September 2012 with and without rainfalls (a) vapor density difference, (b) vapor density

一致,有降水时微波辐射计整层水汽密度均比秒级探空偏高,2 km 以上不论有无降水均存在一致性偏差,2 km 以下有降水量则误差异常增大到  $2.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,明显区别于全部平均和无降水时。由于水汽主要集中在大气层的中低层(图 3b),2 km 以下水汽密度达到  $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,因此,从水汽密度垂直分布上看,水汽密度的误差并不明显。同时,从图 3b 可以发现,探空资料在有无降水时水汽密度廓线的主要差别在 2~7 km,而微波辐射计受 2 km 附近异常偏大误差影响,有无降水差异降至 1~7 km,因此订正 1~2 km 附近水汽密度可有效地减少降水带来的探测误差。造成微波辐射计 2 km 附近有降水时水汽密度异常偏大的原因有待进一步深入分析。

2.4 GFS 再分析场

NCEP/NCAR 中心下发的 GFS 再分析资料是日常业务分析中较常用于实况分析的一种资料。因此,需要对该资料与实况探空的误差有所了解。GFS 资料本身有 *PWV* 的输出量,也可以利用温度和相对湿度计算露点后再利用前文公式计算 *PWV*。对比 GFS 资料的 *PWV* 直接输出量和计算量可以发现,武汉、宜昌、恩施 3 站的平均误差分别为 0.3、1.65、2.14 mm,其误差主要为积分计算中地面起始高度的误差造成,尤其恩施为高海拔站。为了避免计算带来的误差,GFS 资料 *PWV* 的对比检验选用直接输出量。从表 1 可以看出 GFS 再分析资料直接输出的可降水量与常规探空之间的相关系数均在 0.93 以上。武汉 GFS 与探空的相关系数 GPS/MET 高达 0.97,为 3 站中最高。平均绝对误差除恩施超过 7 mm 以外,武汉和宜昌均小于 3 mm。

为了分析造成 GFS 计算可降水量偏差的原因,提取常规探空和 GFS 资料对应层次的露点温度进行对比。从图 4 的露点温度误差(GFS 减探空)廓线可以看出,700 hPa 以下 3 站误差均小于  $1.6^{\circ}\text{C}$ ,3 站在 500 和 850 hPa 两层的误差基本相同,500 hPa GFS 资料的露点均比常规探空低  $3^{\circ}\text{C}$ ,850 hPa 3 站误差均接近  $0^{\circ}\text{C}$ ,500 hPa 以上 3 站露点误差均迅速增加,且武汉站误差增长最大。850 hPa 以下除恩施站为正偏差外,武汉和宜昌均为负偏差,但武汉的负偏差更显著,从而导致 GFS 武汉的 *PWV* 平均误差为负,宜昌的低层负误差很小但中高层正误差很

大,导致 GFS 宜昌的 *PWV* 平均误差为正。从表 1 平均误差可以看出 GFS 恩施的 *PWV* 比常规探空 *PWV* 偏低,但图 4 中 GFS 恩施站露点温度却始终比常规探空高,分析发现 GFS 计算恩施 *PWV* 时判定的地面气压均比 900 hPa 低,而常规探空的地面气压均比 925 hPa 高,有的甚至接近 1000 hPa,因此 GFS 计算恩施 *PWV* 显著偏小。若不考虑地形,GFS 计算 *PWV* 均从 1000 hPa 开始积分则其结果显著偏大,且始终偏大,与露点温度误差特征一致。

上述分析中也可以发现,由于逐层可降水量随露点温度的增加呈指数级增长,低层高露点构成整层可降水量的主要部分,同时低层露点温度的小幅误差造成的 *PWV* 偏差远远高于高层露点温度的大幅误差造成的 *PWV* 偏差。

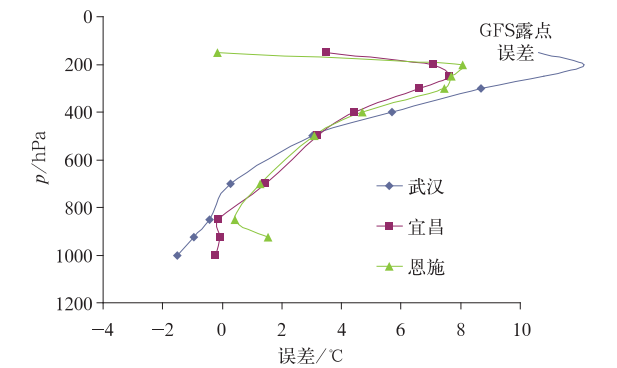


图 4 GFS 资料与探空资料的露点温度平均误差  
Fig. 4 Average error of dew points between GPS/MET and sounding observations

2.5 区域 WRF 模式预报场

湖北省数值预报场预报的可降水量目前主要有两方面的用途:人工增雨潜势判断和暴雨、强对流预报的参考。因此,主要参考其 12 和 24 h 预报场。对比 WRF 预报场和其他准实况资料与常规探空 *PWV* 的相关系数(表 1),虽然 WRF 预报场均偏低,但相关系数均达到 0.8 以上,其中武汉的最低(0.80 和 0.82),宜昌的最高(0.93 和 0.91)。除武汉外,12 h 预报场的相关系数均比 24 h 预报场高,12 h 的平均绝对误差均比 24 h 偏低。平均误差则说明 WRF 预报场 *PWV* 普遍比探空偏低。从 *PWV* 的时间序列图(图 5)可以看出,WRF 预报偏低主要集中在 6 月 25 日以后到 9 月之前的汛期。恩施站 12 h 预报场的相关系数与 GFS 相近,平均绝对误差、最大绝对误差和平均误差均比 GFS 的



小,因此,WRF 12 h 预报场在恩施站的准确性已经达到 GFS 再分析资料的精度。

同样提取 WRF 预报场和常规探空相同层次的露点(图 6)进行对比分析发现,3 站误差廓线略有不同,但每站 12 和 24 h 误差廓线基本一致。需要注意的是 3 站 12 h 误差整层均比 24 h 误差大,这与表 1 中 12 h 平均误差和平均绝对误差均比 24 h 存

在矛盾,实际上在 GFS 资料误差分析中已经指出,低层露点温度是构成整层可降水量的主要部分,且其误差浮动越大造成的 PWV 误差也越大,图 6 中 850 hPa 以下 3 站基本均为负误差,12 h 误差的绝对值是小于 24 h 的,因此 12 h 的 PWV 相对探空偏差更小一些。WRF 预报场与 GFS 再分析场的露点温度误差廓线有相似的特征,在 500 hPa 以上误差

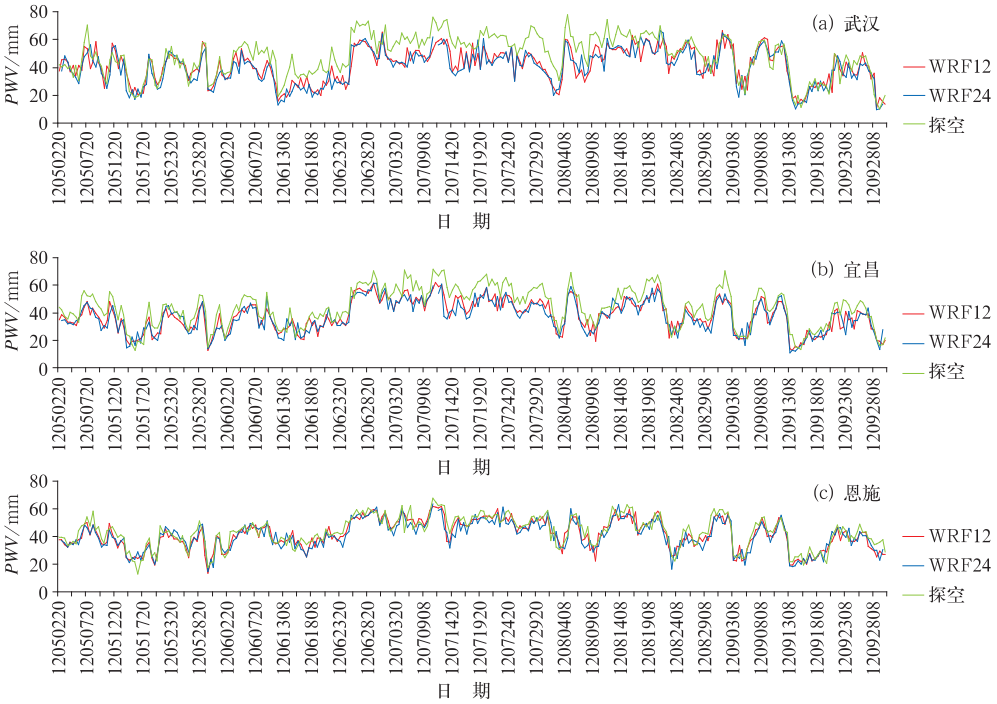


图 5 2012 年 5—9 月武汉(a)、宜昌(b)、恩施(c)常规探空和 WRF 12 h、WRF 24 h 预报的可降水量序列

Fig. 5 The time series of SO PWV and WRFVAR PWV forecast period of 12 h and 24 h in Wuhan (a), Yichang (b), and Enshi (c) from May to September 2012

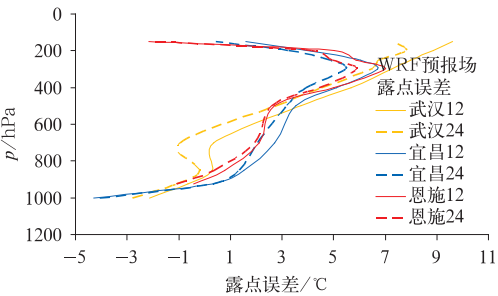


图 6 WRF12、24 h 预报与常规探空的露点温度平均误差

Fig. 6 Average error of dew points between sounding observation and WRFVAR forecast period of 12 h and 24 h

最大,500 hPa 处的误差 3 站基本一致,850 hPa 以下主要表现为负误差。

3 结 论

综上分析了 2012 年 5 月 1 日至 9 月 30 日期间武汉、宜昌、恩施 3 站逐日 08 和 20 时多种实时资料以及 WRF 预报资料与常规探空资料的可降水量误差特征及其原因,从中得出以下结论:

- (1) 利用秒级探空资料和常规探空资料计算的整层可降水量基本一致,可任意选择作为实况使用。
- (2) 利用 GPS/MET 反演所得的整层可降水量

与常规探空的相关系数达到 0.94 以上,武汉站由于没有同址观测资料,不做分析,宜昌和恩施站的平均误差小于 4 mm。GPS/MET 反演的  $PWV$  整体比探空偏低。有降水时两种资料相关性减小,无降水时相关系数增加,但有降水时误差分布相对集中,无降水时误差分布较广。 $PWV=50$  mm 可作为出现降水的参考值,但  $PWV$  达到 50 mm 以上不一定有降水,即使有降水也不是  $PWV$  越高对应降水量越大。

(3) 利用微波辐射计资料计算的整层可降水量与常规探空的相关系数为 0.92,有降水时其相关系数大幅降低。从水汽密度廓线的误差分布得出造成有降水时误差增大的主要原因为 1~2 km 处误差异常增大,造成此异常的原因有待进一步分析。

(4) 利用 GFS 再分析资料计算的整层可降水量与常规探空的相关系数均在 0.93 以上,武汉最高,恩施最低,且恩施的误差最大,主要为 GFS 资料在恩施的地面气压比实际偏低造成。武汉平均误差为 -1.5 mm,宜昌为 0.4 mm,恩施为 -7.4 mm。各层露点温度资料在 700 hPa 以下误差较小,700 hPa 以上则整体偏大。但是 850 hPa 以下低层的露点温度误差对整层降水量的误差影响最大,武汉为 GFS 偏小,宜昌误差几乎为 0,恩施则为 GFS 偏大。

(5) 区域 WRF 预报场资料计算的整层可降水量与常规探空的相关系数也达到了 0.8 以上,宜昌站甚至达到 0.93。12 h 预报场优于 24 h 预报场,其整层可降水量比探空偏低,其露点温度误差廓线与 GFS 类似。因此,WRF 模式 12 h 预报场有较好的适用性。

# 参考文献

曹云昌,方宗义,夏青. 2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水

关系的初步分析. 应用气象学报,16(1):54-59.

陈小雷,景华,全美然,等. 2009. 地基 GPS 遥测大气可降水量应用精度和范围. 气象科技,37(1):85-88.

湛芸,孙军,徐培,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象,38(10):1255-1266.

丁海燕,李青春,郑祚芳,等. 2012. 利用北京 GPS 监测网分析夏季暴雨的水汽特征. 应用气象学报,23(1):47-58.

方翀,毛冬艳,张小雯,等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象,38(10):1278-1287.

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等. 2013. 地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用. 应用气象学报,24(5):576-584.

刘健文,郭虎,李耀东,等. 2007. 天气分析预报物理量计算基础. 北京:气象出版社,27-28.

权维俊,陈洪滨,肖稳安. 2004. MODIS 与 NCEP 大气可降水量资料的比较分析. 南京气象学院学报,27(2):169-176.

孙军,湛芸,杨舒楠,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考. 气象,38(10):1267-1277.

唐仁茂,李德俊,向玉春,等. 2012. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析. 气象学报,70(4):806-813.

王小亚,朱文耀,严豪健,等. 1999. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果. 大气科学,23(5):605-612.

向玉春,陈正洪,徐桂荣,等. 2009. 大气可降水量推算方法结果的比较分析. 气象,35(11):48-54.

徐桂荣,孙振添,李武阶,等. 2010. 地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析. 暴雨灾害,29(4):315-321.

徐桂荣,万蓉,李武阶,等. 2009. 地基 GPS 反演大气可降水量方法的改进. 暴雨灾害,28(3):203-209.

颜晓露,郑向东,李蔚,等. 2012. 两种探空仪观测湿度垂直分布及其应用比较. 应用气象学报,23(4):433-440.

俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象,38(11):1313-1329.

袁招洪,丁金才,陈永林. 2004. 中尺度数值预报模式预报水汽与 GPS 观测的比较研究. 大气科学,28(3):433-440.

张洁,刘敏,尹球,等. 2011. FY2E 反演大气可降水量与地基 GPS 反演降水量的比较. 第 28 届中国气象学会年会——S2 风云卫星定量应用与数值.

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.

赵洋洋,张庆红,杜宇,等. 2013. 北京 721 特大暴雨环流形势极端性客观分析. 气象学报,71(5):817-824.