

苗爱梅,郝振荣,贾利冬,等. 精细化监测资料在山西暴雨预报模型改进中的应用[J]. 气象,2012,38(7):786-794.

# 精细化监测资料在山西暴雨预报模型改进中的应用<sup>\*</sup>

苗爱梅<sup>1</sup> 郝振荣<sup>2</sup> 贾利冬<sup>3</sup> 李 苗<sup>4</sup> 逯张禹<sup>5</sup> 韩 龙<sup>3</sup>

- 1 山西省气象台,太原 030006
- 2 山西省气象信息中心,太原 030006
- 3 山西省气象局,太原 030002
- 4 山西省气象服务中心,太原 030002
- 5 山西省农业科学院农业科技信息研究所,太原 030006

**提 要:** 利用近 3 年 5—9 月山西 63 个 GPS/MET 监测站反演的逐时气柱水汽总量空间分布图与对应的 459 天气象观测资料、42 个暴雨日的暴雨落区以及对应的流型配置图,对比分析发现:(1)当气柱水汽总量空间分布的水平梯度在 25~40 mm/1 经(纬)度时,未来 12~36 小时,在水平梯度的大值区及其南北(东西)0.5~1.0 个经(纬)度的范围内,暴雨及其以上天气出现的概率达 100%,当气柱水汽总量空间分布的水平梯度 $\geq 40$  mm/1 经(纬)度时,在水平梯度的大值区及其南北(东西)0.5 个经(纬)度的范围内出现大暴雨的概率为 63.6%;(2)暴雨落区在气柱水汽总量空间分布图中水汽含量水平梯度大值区及其以北(西)还是以南(东)0.5~1.0 个经(纬)度的范围出现,不同的流型配置会出现不同的结果。应用逐时 GPS/MET 资料和逐时自动气象站极大风速风场资料,依据暴雨出现在气柱水汽总量空间分布图中水汽含量水平梯度大值区的不同位置,建立不同流型配置下的多种暴雨概念模型;采用轮廓识别技术在 C/S 架构下,对 12~36 小时暴雨落区预报模型进行改进并实现了自动化运行,2011 年进行准业务使用证明效果良好。

**关键词:** 气柱水汽总量,暴雨落区,预报模型,改进技术

## The Application of Meticulous Monitoring Data to Shanxi Rainstorm Forecasting Model Improvement

MIAO Aimei<sup>1</sup> HAO Zhenrong<sup>2</sup> JIA Lidong<sup>3</sup> LI Miao<sup>4</sup> LU Zhangyu<sup>5</sup> HAN Long<sup>3</sup>

- 1 Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006
- 2 Shanxi Meteorological Information Centre, Taiyuan 030006
- 3 Shanxi Meteorological Service, Taiyuan 030002
- 4 Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan 030002
- 5 Information Institute of the Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006

**Abstract:** The authors contrasted and analyzed the spatial distribution map of hourly air column vapor content retrieved from the 63 GPS/MET monitoring stations from May to September during 2009—2011 in Shanxi, and the corresponding meteorological observation data in 459 days, and the rainstorm falling area in 42 rainstorm days, and the corresponding flow pattern configuration map, and discovered that: (1) When the horizontal gradients of the air column vapor content spatial distribution are between 25 to 40 mm/latitude(longitude), in the next 12—36 hours, the probability of rainstorm and above is 100 percent in the big value area of horizontal gradients and its neighboring 0.5—1.0 latitude and longitude range from south

<sup>\*</sup> 山西省科技攻关项目(20090311083)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906011)、中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M11)和(CMAGJ2012M09)、以及中国气象局预报员专项(CMAYBY2011-004)和(CMAYBY2012-007)共同资助  
2012 年 1 月 18 日收稿; 2012 年 4 月 25 日收修定稿  
第一作者: 苗爱梅,主要从事中短期、短时天气预报技术研究. Email:mam1226@163.com

to north (east to west); when the horizontal gradients of the air column vapor content spatial distribution is  $\geq 40$  mm/latitude(longitude), the probability of rainstorm is 63.6 percent in the big value area and its neighboring 0.5 latitude and longitude range from south to north (east to west); (2) The rainstorm falling area appears in the south (east) or north (west) 0.5—1.0 latitude and longitude of the horizontal gradients big value area of the air column vapor content spatial distribution, different flow pattern configuration would be a different result. Using the hourly GPS/MET data and hourly automatic weather station (AWS) maximum wind speed data, and based on the different location of rainstorm appearing in the horizontal gradients big value area in air column vapor content spatial distribution map, the authors built several rainstorm conceptual models in different flow pattern configurations; under C/S construction, the authors improved rainstorm falling area 12—36 h forecasting model with the contour recognition technology, and achieved automatic operation runs, and the quasi-operation run in 2011 proved good effects.

**Key words:** air column vapor content, rainstorm falling area, forecasting model, improvement technology

## 引 言

充足的水汽是降水天气过程的必要条件之一<sup>[1-5]</sup>,准确、迅速的获得水汽观测资料对于中小尺度灾害性天气预报具有重要意义。目前,应用GPS可降水量资料的个例分析已有不少<sup>[6-18]</sup>,但都局限于气柱水汽总量的局地变化与单站降水量随时间变化的关系研究。对于气柱水汽总量的空间分布与降水的空间分布方面的研究甚少<sup>[19]</sup>。本研究利用近3年5—9月山西63个GPS/MET监测站反演的逐时气柱水汽总量空间分布图、有气柱水汽总量资料以来的气象监测资料以及对应的流型配置图进行研究,根据暴雨出现在气柱水汽总量空间分布图中水平梯度大值区的不同位置,概括不同流型配置下暴雨的落区,从而获得暴雨发生前,气柱水汽总量空间分布与暴雨空间分布的关系;气柱水汽总量空间分布水平梯度的阈值及阈值的出现对暴雨发生的提前量;降水开始前,气柱水汽总量空间分布水平梯度的演变规律;降水开始后,气柱水汽总量空间分布水平梯度的演变规律,以达到改进暴雨预报模型的目的。

## 1 资料与方法

逐日和逐时降水量实况资料、气柱水汽总量资料、自动气象站以及区域雨量站资料和多普勒雷达资料均由山西省气象信息中心提供,气柱水汽总量资料和区域雨量站资料长度均为2009—2011年3年的资料(2009年才开始有气柱水汽总量资料),自动站和多普勒雷达资料为2007—2011年5年的资

料。为说明气柱水汽总量空间分布的水平梯度大小与降水量大小的关系,本省区域内只要有3或3个以上区域雨量站或1个人工观测站出现暴雨(不包括大暴雨),则定义为1个暴雨日;有2或2个以上区域雨量站出现大暴雨则定义为1个大暴雨日。为在图例中叙述简洁,本文将“气柱水汽总量空间分布的水平梯度大值区”简称为“水汽锋”。

采用的方法:(1)对比分析气柱水汽总量空间分布与暴雨日暴雨空间分布的关系;(2)对比分析气柱水汽总量的局地变化与单站降水量的关系;(3)自动站瞬间风向风速与暴雨落区的关系与自动站极大风速风场资料与暴雨落区关系的对比分析;(4)应用VAD风廓线资料对对流性暴雨和稳定性暴雨过程进行对比分析。

## 2 气柱水汽总量与各种流型配置下暴雨落区关系的研究

### 2.1 气柱水汽总量空间分布与暴雨日暴雨空间分布的关系

利用2009—2011年5—9月山西63个GPS/MET监测站反演的逐时气柱水汽总量空间分布图,与有气柱水汽总量资料以来的459天气象观测资料、42个暴雨及其以上降水日的暴雨落区,以及对应的流型配置图,对比分析发现:(1)逐时气柱水汽总量空间分布图可提供水汽的空间分布、水汽的辐合辐散、不同属性气团间的相互作用等重要信息(图略)。(2)当气柱水汽总量空间分布的水平梯度 $\geq 25$  mm/1经(纬)度时,未来12~36小时,在水汽

锋及其南北(东西)0.5~1.0 个经(纬)度的范围内出现暴雨及其以上天气的概率达 100%(据表 1 数据计算而得),出现大暴雨日的概率为 23.8%,出现暴雨日的概率为 76.2%;当气柱水汽总量空间分布的水平梯度在 25~40 mm/1 经(纬)度时,未来 12~36 小时,在水汽锋及其南北(东西)0.5~1.0 个经(纬)度的范围内,暴雨及其以上天气出现的概率为 100%,大暴雨日出现的概率为 9.4%,暴雨日出现的概率为 90.6%;当气柱水汽总量空间分布图中水汽含量的水平梯度 $\geq 40$  mm/1 经(纬)度时,在水汽锋及其南北(东西)0.5 个经(纬)度的范围内,暴雨及其以上天气出现的概率为 100%,大暴雨日出现的概率为 63.6%,暴雨日出现的概率为 36.4%。(3)暴雨落区是在水汽锋及其以北(西)还是以以南(东)0.5~1.0 个经(纬)度的范围出现,不同的流型配置会出现不同的结果。

表 1 气柱水汽总量空间分布的水平梯度与暴雨的统计关系  
Table 1 The statistical relation between horizontal gradients of air column vapor content spatial distribution and rainstorms

类别	气柱水汽总量空间分布的水平梯度		
	$\geq 25$ mm/ 1 经(纬)度	25~40 mm/ 1 经(纬)度	$\geq 40$ mm/ 1 经(纬)度
暴雨日数/d	32	29	4
大暴雨日数/d	10	3	7
暴雨及其以上日数/d	42	32	11
无暴雨日数/d	0	0	0

2.2 气柱水汽总量空间分布图中水汽含量的水平梯度演变规律

图 1a 为 2010 年 8 月 18—19 日强对流大暴雨过程中气柱水汽总量空间分布的水平梯度与暴雨中心乡宁县尉庄乡逐时降水量的演变。由图 1a 可知,暴雨发生前 24 小时,气柱水汽总量空间分布的水平梯度逐渐增大;暴雨发生前 12 小时,气柱水汽总量空间分布的水平梯度达到最大 40.5 mm/1 经(纬)度;尉庄乡降水开始出现前 2 小时(实际上暴雨中心附近已经出现降水),气柱水汽总量空间分布的水平梯度发生陡降;尉庄乡降水开始后,气柱水汽总量空间分布的水平梯度继续下降;暴雨期间,气柱水汽总量空间分布的水平梯度很小。

气柱水汽总量空间分布图上水汽含量水平梯度

的演变过程印证了暴雨发生前能量的积累和降水开始后能量的释放过程。

图 1b 为此次大暴雨过程中靠近水汽锋湿区一侧和靠近水汽锋干区一侧气柱水汽总量的增量随时间的变化。通过对比分析图 1b 和 1a 发现:降水开始出现前(8 月 18 日 18 时前),水汽锋湿区一侧的水汽增量大于干区一侧,说明气柱水汽总量空间分布的水平梯度在增大;降水开始后(8 月 18 日 18 时以后),水汽锋干区一侧的水汽增量则大于湿区一侧,从而导致在暴雨期间气柱水汽总量空间分布的水平梯度很小。

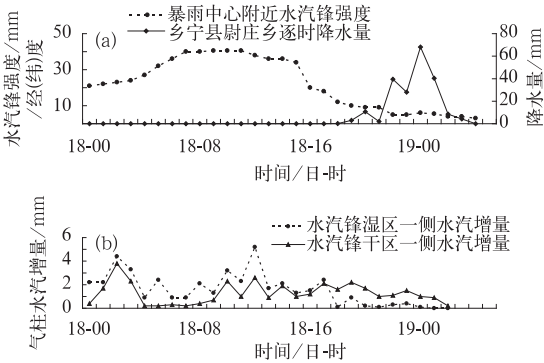


图 1 2010 年 8 月 18—19 日大暴雨过程水汽锋强度变化(a)以及水汽锋两侧水汽增量的变化(b)  
Fig. 1 The variations of the vapor front strength (a) and the vapor increment in both sides of the vapor front in the heavy rainstorm process during 18—19 August 2010

对 42 个暴雨及其以上降水日(图略)和对应的气柱水汽总量资料对比分析发现:降水开始前 24~36 小时,气柱水汽总量空间分布图中水汽含量的水平梯度逐渐增大;降水开始前 12~24 小时,气柱水汽总量空间分布的水平梯度达到最强(水汽锋达到最强);随着降水的开始,靠近水汽锋湿区的一侧水汽增量呈现减小趋势,而靠近水汽锋干区的一侧水汽增量则呈现出增大趋势,结果使水汽锋的强度不断减弱;暴雨期间,暴雨区气柱水汽总量均在 40 mm 以上,但气柱水汽总量空间分布的水平梯度很小;未来 12~36 小时无暴雨产生时,水汽含量的水平梯度 $< 25$  mm/1 经(纬)度;未来 12~36 小时无降水产生时,气柱水汽总量空间分布的水平梯度为 0 或几乎为 0。

2.3 气柱水汽总量的局地变化与单站降水量的关系

(1) 暴雨落区在水汽锋以北时

降水开始前,气柱水汽总量缓慢上升,当气柱水汽总量 $\geq 26$  mm 时,降水开始;降水开始后 2~3 或 2~8 小时,气柱水汽总量上升幅度增大;之后,气柱水汽总量基本稳定在 40 mm 上下;降水结束后,气柱水汽总量缓慢下降。小时降水量极大值不足小时气柱水汽总量极大值的 1/2,即不足 20 mm。如图 2 所示的 2010 年 6 月 30 日暴雨中心兴县的气柱水汽总量与降水量演变和 2010 年 8 月 10—11 日暴雨中心岚县的气柱水汽总量与降水量演变。

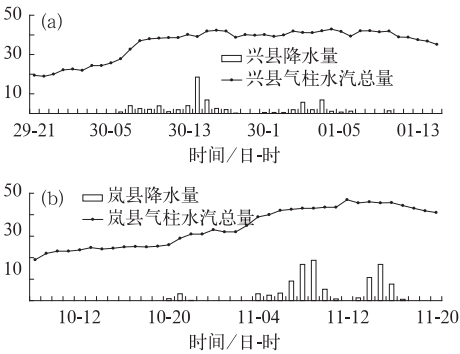


图 2 暴雨落区在水汽锋以北时局地气柱水汽总量与降水量的演变(单位:mm)  
Fig. 2 The evolution of local air column vapor content and precipitation when rainstorm falling area is located in the north of vapor front (unit: mm) as shown in cases (a) Xingxian Station during 29 June to 1 July 2010 and (b) Lanxian Station during 10–11 August 2010

(2) 暴雨落区在水汽锋以南时

降水开始前,气柱水汽总量呈波动性增长,从降水开始到降水结束,整个降水过程气柱水汽总量稳定在 42 mm 以上,降水结束后,气柱水汽总量缓慢下降或迅速下降。小时降水量极大值接近小时气柱水汽总量极大值。

如图 3a 所示的 2010 年 8 月 18—19 日暴雨过程,18 日 23 时晋城市 1 小时降水量达 46.1 mm,对应的气柱水汽总量为 44.2 mm,降水结束后气柱水汽总量缓慢下降;又如 2011 年 7 月 28—29 日的暴雨过程,29 日 11 时襄汾 1 小时降水量达 31.6 mm,对应的气柱水汽总量为 50 mm,降水结束后,气柱

水汽总量迅速下降(见图 3b)。  
图 3 所示的两个暴雨过程均为发生在水汽锋以南的暴雨,局地气柱水汽总量与单站降水量有不尽相同的演变规律,因此,用局地气柱水汽总量的变化与单站降水量的变化很难把握降水的开始与结束时间以及降水强度的预报。

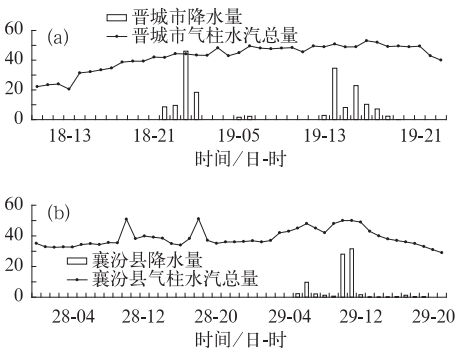


图 3 暴雨落区在水汽锋以南时局地气柱水汽总量与降水量的演变(单位:mm)  
Fig. 3 The evolution of local air column vapor content and precipitation when rainstorm falling area is located in the south of vapor peak (unit: mm) as shown in cases (a) Jincheng Station during 18–19 August 2010 and (b) Xiangfen Station during 28–29 July 2011

(3) 中尺度对流辐合体(MCC)影响下气柱水汽总量与降水量的局地变化

降水开始前 24 小时,即 MCC 移入山西(或在山西生成)前,暴雨区的气柱水汽总量已达 50 mm 以上,降水开始前 6 小时,气柱水汽总量超过 60 mm,或在降水峰值出现前 1 小时,气柱水汽总量陡升,小时降水量极大值接近小时气柱水汽总量极大值。如 2010 年 8 月 11—12 日的大暴雨过程,暴雨中心在临猗县杨范村,降水开始前 6 小时,临猗县气柱水汽总量超过 60 mm,临猗县杨范村 1 小时最大降水量为 69.3 mm,气柱水汽总量极大值为 72.9 mm(见图 4a);又如 2011 年 7 月 2—3 日大暴雨过程,暴雨中心在阳城县横河,在降水峰值出现前 1 小时,气柱水汽总量从 58.0 mm 陡升到 72.8 mm,横河 1 小时最大降水量达 99.1 mm。同受 MCC 的影响,局地气柱水汽总量与单站降水量有不尽相同的演变特征。

以上分析表明:暴雨出现在水汽锋的不同位置,有不同的局地气柱水汽总量与降水量的演变特征;

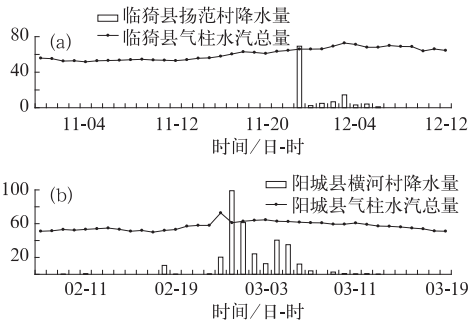


图 4 MCC 影响时局地气柱水汽总量  
与降水量的演变 (单位:mm)

Fig. 4 The evolution of local air column  
vapor content and precipitation when it  
is under the control of an MCC (unit: mm)  
as shown in cases (a) Linyi Station during  
11–12 August 2010 and (b) Yangcheng  
Station during 2–3 July 2011

暴雨出现在水汽锋的相同位置,局地气柱水汽总量与单站降水量的演变特征也不尽相同。因此,在利用单站气柱水汽总量估算单站降水量时,应结合气柱水汽总量的空间分布特征和流型配置进行判断。

3 自动站极大风速风场资料与暴雨落区关系

利用自动气象站瞬间风场和大风速风场资料进行对比分析,发现:由于山西地形复杂,自动气象站逐时瞬间风场资料风向杂乱无章,无法获得边界层风场真正的辐散与辐合,对暴雨的落区预报没有很好的指示意义,而经过处理后的资料则对暴雨落区预报有很好的指示意义。当自动气象站逐 1、2、3 或 6 小时极大风速风场中有中小尺度切变线生成且中切变线前后风速 $\geq 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,未来 12 小时在切变线前后将有暴雨及其以上降水出现的概率为 85.9%,出现大暴雨的概率为 13.6%,出现暴雨的概率为 72.3%,无暴雨出现的概率为 14.1%(见表 2);当中切变线前后风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,未来 12 小时在切变线前后将有暴雨及其以上降水出现的概率为 85.4%,大暴雨出现的概率为 72.1%,暴雨出现的概率为 13.3%,无暴雨出现的概率为 14.6%(见表 2)。进一步的统计分析表明,当风速 $\geq 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 而无暴雨出现的区域主要是位于山西省北部的 3 地市;另外当系统风很强时(如冷锋过境),自动站极大风速风场与暴雨发生的相关性较小。

表 2 边界层极大风速风场切变线前后风速  
大小与暴雨出现站数的统计  
Table 2 The statistics of the wind speed magnitude  
and the numbers of the rainstorm that appeared ahead  
and behind the maximum wind speed wind field  
shear line in the boundary layer

自动站极大风速 /m·s <sup>-1</sup>	≥4		4~6		≥6	
	站数	概率	站数	概率	站数	概率
包括区域雨量站						
暴雨	1055	72.3%	753	61.4%	31	13.3%
大暴雨	199	13.6%	302	23.9%	168	72.1%
暴雨及其以上	1254	85.9%	1055	83.3%	199	85.4%
无暴雨	205	14.1%	171	13.5%	34	14.6%

4 VAD 风廓线资料分析

速度方位显示 (Velocity azimuth display, VAD) 产品即风廓线 (VAD wind profile, VWP), 是一种间接探测水含量的方法, 该方法用于较均匀的降水过程。

通过对 42 次暴雨过程的逐时和逐 6 min 多普勒雷达 VAD 风廓线分析发现: 稳定性暴雨(包括对流转稳定), 降水开始前 11~13 小时, 风场从高层(6~9 km)开始出现(即从高层开始增湿)并向下伸展, 风速随高度的增高而增大, 风向随高度增高顺转, 整层风出现时间较降水开始和雨峰出现时间分别有 9 和 15 小时以上的提前量; 降水结束前 3~4 小时, 从高层开始风场迅速被 NO 取代(如图 5)。对流性暴雨, 降水开始前 1~13 个小时, 风场从低层开始出现(即从低层开始增湿)并向高层扩展, 风向和风速分别随高度的增高顺转和增大, 整层风出现时间较降水开始时间和雨峰出现时间分别有 1~13 个小时和 3~13 个小时的提前量; 降水结束前从高层开始风场迅速被 NO 取代, 风向随高度的升高逆转如图 6。稳定性暴雨过程有降水量越大风的垂直切变越大的特征(图略); 而对于强对流暴雨过程则有雨强越强, 整层风场出现时间比降水开始时间提前量越少的特征(如 2009 年 8 月 25—26 日的暴雨过程, 整层风出现时间比降水开始时间和雨峰出现时间仅有 1 和 3 小时的提前量)。

风廓线资料分析结果印证了深厚的湿层、源源不断的水汽输送是稳定性暴雨形成的主要特征, 而上干冷、下暖湿强烈的不稳定是强对流暴雨形成的特征。



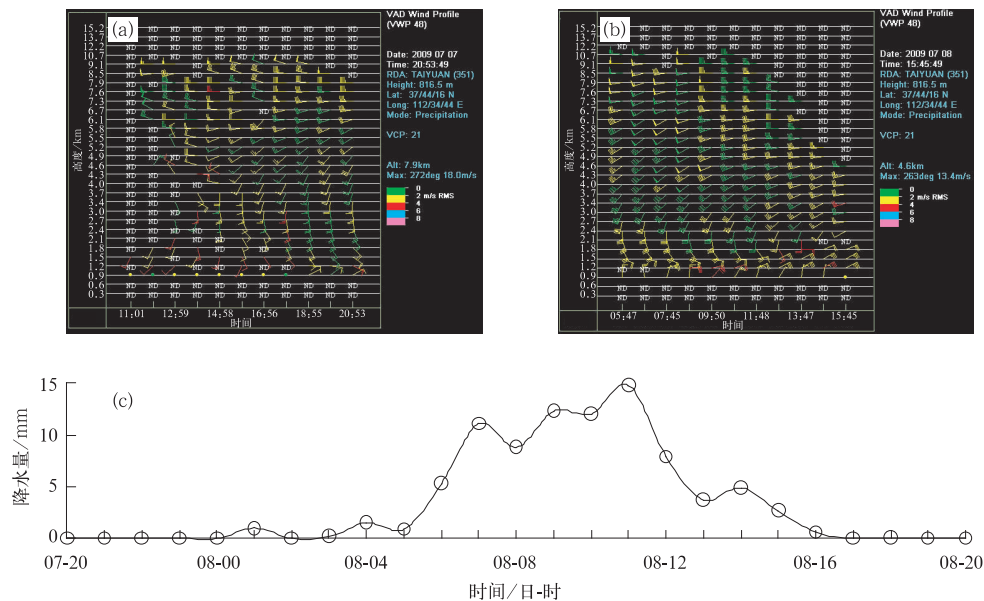


图 5 2009 年 7 月 7—8 日太原市小店区的 VWP 产品和逐时降水量演变(北京时间)  
(a) 7 月 7 日 11:01—20:53, (b) 7 月 8 日 05:47—15:45, (c) 逐时降水量  
Fig. 5 The evolution of the VWP product during 11:01—20:53 BT 7 July (a),  
05:47—15:45 BT 8 July (b), and hourly precipitation during 7—8 July 2009 (c)

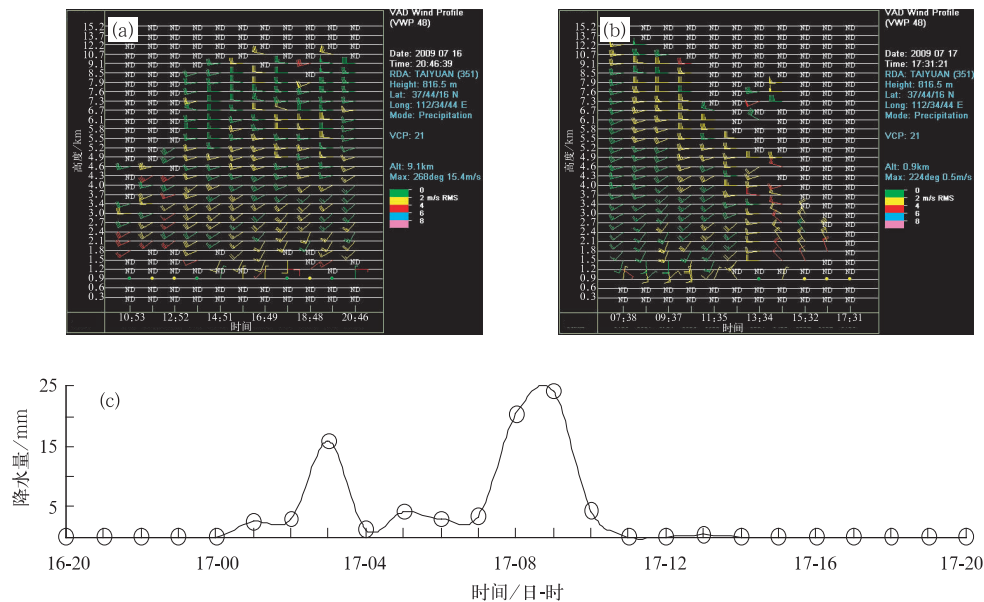


图 6 2009 年 7 月 16—17 日时楼县的 VWP 产品和逐时降水量演变(北京时间)  
(a) 7 月 16 日 10:53—20:46, (b) 7 月 17 日 07:38—17:31, (c) 逐时降水量  
Fig. 6 The evolution of the VWP products during 10:53—20:46 BT 16 July (a),  
07:38—17:31 BT 17 July 2009 (b), and hourly precipitation  
during 16—17 July 2009 (c)

风廓线资料分析结果表明:风的垂直分布和演变特征可以提前 12 小时准确判断是稳定降水还是对流降水,避免强对流降水时,由于水汽锋形成较稳定性降水晚而放弃预报暴雨的错误。

5 暴雨概念模型建立

由于暴雨发生时在中低层都伴有切变线(槽线)

出现,因此应用逐时 GPS/MET 和逐时自动气象站极大风速风场资料,依据暴雨出现在水汽锋的不同位置,建立不同流型配置下暖切变和冷切变为触发机制的  $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中尺度的多种暴雨概念模型,采用轮廓识别技术在 C/S 架构下,使改进后的暴雨预报模型能够实现自动化运行。

## 5.1 暖切变暴雨概念模型

### 5.1.1 无副高影响时

(1) 山西境内,500、700 和 850 hPa 三层均有暖切变线存在,且中低层至少有一层(850 或 700 hPa)为低涡切变,此时若有边界层切变线或辐合线配合,则暴雨发生在切变低涡的第 1 和第 4 象限、气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以北 0.5~1 个经纬距内,低空西南(东南)急流的北侧,700 hPa 水汽通量散度  $\leq -16 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的区域。暴雨中心位于 700~850 hPa 暖切变线之间,边界层切变线或辐合线附近,700 或 850 hPa 水汽通量散度的辐合中心附近区域(图略)。

(2) 山西境内,700 和 850 hPa 两层均有暖切变线存在,且至少有一层为低涡切变,此时若有边界层切变线或边界层辐合线配合,则暴雨发生在 700~850 hPa 暖切变线之间、850 hPa 切变低涡的第 1 象限或 700 hPa 切变低涡的第 4 象限,气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以北 0.5~1 个经纬距内,低空西南(东南)急流的北侧。暴雨中心位于 700 或 850 hPa 切变低涡的第 4 或第 1 象限、边界层切变线或辐合线附近,700 或 850 hPa 水汽通量散度的辐合中心附近区域(图略)。

(3) 山西境内,700 和 850 hPa 两层均有暖切变线存在,且 700 hPa 暖切变线位于 5800 gpm 线以北,850 hPa 暖切变线则位于 5800~5840 gpm 线之间,此时容易形成南北两条暴雨带,气柱水汽总量空间分布图上提前 12~24 小时会有两条水汽锋对应形成。北部的暴雨带位于 700 hPa 切变线附近,气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以北 0.5°~1 个经纬度的区域内,暴雨中心一般位于边界层切变线或边界层辐合线附近;南部的暴雨带位于 5800~5840 gpm 线之间,850 hPa 暖切变线以北或以南的区域,具体的位置视边界层切变线的位置而定,如果边界层切变线位于 850 hPa 暖切变线以北,则暴雨发生在 850 hPa 暖切变线以北的区域,若边界层切变线位于 850 hPa 暖切变线以南,则暴雨将落在

850 hPa 切变线到 5840 gpm 线之间的区域,若此时 850 hPa 暖切变线的北侧和南侧都有边界层切变线或辐合线配合,则在 850 hPa 的南北两侧都有暴雨产生,形成多中心暴雨。暴雨发生在气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以南(东)0.5~1 个经纬度的区域内,低空西南(东南)急流的北侧,700 或 850 hPa 水汽通量散度的辐合中心或中心附近区域(图略)。

(4) 山西境内,700 和 850 hPa 仅有一层有暖切变线存在,此时若有边界层切变线或边界层辐合线配合,则暴雨发生在暖切变线到边界层切变线(辐合线)之间靠近边界层切变线(辐合线)一侧,低空西南(东南)急流北侧、气柱水汽总量空间分布图上水平梯度的大值区(图略)。

### 5.1.2 有副高影响时

(1) 山西境内,700 和 850 hPa 两层均有暖切变线存在,且两层的切变线均落在 5880~5840 gpm 线之间,此时若有边界层切变线或边界层辐合线配合,则暴雨发生在 5880~5840 gpm 线之间、700~850 hPa 暖切变线之间、气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以南(东)0.5~1 个经纬度内,低空西南(东南)急流的北侧;暴雨中心位于 700~850 hPa 切变线之间的边界层切变线(辐合线)附近,700 或 850 hPa 水汽通量散度的辐合中心附近区域(图略)。

(2) 山西境内,700 和 850 hPa 两层均有暖切变线存在,且 700 hPa 暖切变线位于 5840 gpm 线以北,850 hPa 暖切变线则位于 5880~5840 gpm 线之间,此时容易形成南北两条暴雨带,气柱水汽总量空间分布图上提前 12~24 小时会有两条水汽锋对应形成。北部的暴雨带位于 700 hPa 切变线的南侧,气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以北 0.5°~1 个经纬度的区域内,暴雨中心一般位于边界层切变线或边界层辐合线附近;南部的暴雨带位于 5880~5840 gpm 线之间,850 hPa 暖切变线以北或以南的区域,具体的位置视边界层切变线的位置而定,如果边界层切变线位于 850 hPa 暖切变线以北,则暴雨发生在 850 hPa 暖切变线以北的区域,若边界层切变线位于 850 hPa 暖切变线以南,则暴雨将落在 850 hPa 切变线到 5880 gpm 线之间的区域,若此时 850 hPa 暖切变线的北侧和南侧都有边界层切变线或辐合线配合,则在 850 hPa 的南侧、北侧都有暴雨产生,形成多中心暴雨。总之,暴雨发生在低空

西南(东南)急流的北侧,水汽锋南北(东西) $0.5^{\circ}\text{N}$ (E)范围与边界层切变线相重叠的区域,以及700或850 hPa水汽通量散度辐合中心附近区域(图略)。

(3) 在5880~5840 gpm线之间,山西境内700或850 hPa仅有一层有暖切变线存在,此时若有边界层切变线或边界层辐合线配合,则暴雨发生在暖切变线到边界层切变线(辐合线)之间靠近边界层切变线(辐合线)一侧,低空西南(东南)急流北侧、气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其南北 $0.5$ 个经纬度的区域(图略)。

## 5.2 冷切变暴雨概念模型

(1) 700或850 hPa冷性切变线呈东北—西南向出现在5840 gpm线以北(内蒙古)或以西(河套地区)的区域。暴雨发生在700或850 hPa冷性切变线东南部(前部)到5840 gpm线以北(西)的区域,气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其以南(东) $0.5\sim 1$ 个经纬距内,低空西南(东南)急流的北侧, $K\geq 36^{\circ}\text{C}$ , $SI\leq 0^{\circ}\text{C}$ , $T_{850}-T_{500}\geq 28^{\circ}\text{C}$ , $CAPE\geq 350\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、700 hPa水汽通量散度 $\leq -4\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 相重叠的区域(图略)。

(2) 700或850 hPa冷性切变线呈东北—西南向出现在5840~5880 gpm线之间。暴雨可能发生在700或850 hPa冷性切变线以南到5880 gpm线以北的区域,也可能发生在700(或850 hPa)冷性切变线以北到5840 gpm以南的区域,究竟发生在哪个区域视气柱水汽总量空间分布图上水汽锋及其南北 $0.5$ 个经纬距范围内,边界层风切变或辐合线的位置而定(图略)。总之,暴雨落区位于低空西南(东南)急流的北侧, $K\geq 36^{\circ}\text{C}$ , $SI\leq 2^{\circ}\text{C}$ , $T_{850}-T_{500}\geq 27^{\circ}\text{C}$ , $CAPE\geq 300\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、700 hPa水汽通量散度 $\leq -8\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、气柱水汽总量空间分布图中水汽锋附近与边界层切变线相重叠的区域。

## 6 程序设计和应用效果

### 6.1 程序设计

依据建立的暴雨概念模型,采用轮廓识别技术在C/S架构下,服务器端完成数据的收集、处理、分发;客户端主要完成数据的浏览功能。其中服务器

端编写定时程序,利用python的MySQL模块从水汽反演实时数据库和自动气象站极大风速风场数据库中读取最新的数据。读取到的数据写成grads的站点数据格式。利用grads中的Cressman函数转化为 $34^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ,格点间距为 $0.5$ 的网格数据。遍历网格所有的点,找到满足气柱水汽总量空间分布图中水平梯度和边界层风场切变线和辐合线的阈值条件的点,将这些点的经纬度坐标值保存到数组中,形成目标点集A。遍历目标点集A,如果一个目标点在目标点集中存在相邻点,且相邻点的数目大于等于3,将这个点和相邻点保存在一个新的数组N中,同时从目标点集A中将这些点移除;如果一个目标点不存在相邻点或者相邻点的数目小于3,则从目标点集A中将这个点移除。在新的数组N按照上述的方法依次遍历点,按照上述方法从目标点集A抽取满足条件的点,直到目标点集A中不存在目标点。将新的数组N保存在一个列表中,形成一个目标形状。根据不同流型配置下改进的暴雨概念模型,将目标形状中每个目标点的经纬度数据进行一定的数值调整形成暴雨落区。根据暴雨落区的坐标值,逐一替换基于中尺度气象数值模式基础上的暴雨动力诊断模型输出的未来12、24、36和48小时的降水预报场中的对应的点,自动形成订正后的本地暴雨落区预报场。

### 6.2 应用效果

2011年7—9月,利用改进后的暴雨落区概念模型预报结果订正基于中尺度模式暴雨动力诊断模型输出的12、24及36小时预报,暴雨落区预报和暴雨落点预报TS评分分别提高了7%和6%。

## 7 结论与讨论

(1) 逐时气柱水汽总量空间分布图可提供水汽的空间分布、水汽的辐合辐散、不同属性气团间的相互作用等重要信息。

(2) 降水开始前24~36小时,气柱水汽总量空间分布的水平梯度逐渐增大;降水开始前12~24小时,水汽锋达到最强;随着降水的开始,靠近水汽锋湿区的一侧水汽增量呈现减小趋势,靠近水汽锋干区的一侧水汽增量呈现出增大趋势,结果使水汽锋的强度不断减弱;暴雨期间,暴雨区气柱水汽总量均在40 mm以上,但气柱水汽总量空间分布的水平梯



度很小。

(3) 当气柱水汽总量空间分布的水平梯度 $\geq 25$  mm/1 个经(纬)度时,未来 12~36 小时,在水汽锋及其南北(东西)0.5~1.0 个经纬度的范围内出现暴雨及其以上降水天气的概率达 100%,当气柱水汽总量空间分布的水平梯度 $\geq 40$  mm/1 个经(纬)度时,在水汽锋及其南北(东西)0.5 个经纬度的范围内出现大暴雨的概率为 63.6%。

(4) 自动气象站极大风速风场资料对暴雨落区预报有很好的指示意义。当自动气象站逐 1、2、3 或 6 小时极大风速风场中有中小尺度切变线生成、且中切变线前后风速 $\geq 4$  m $\cdot$ s $^{-1}$ 时,未来 12 小时在切变线前后将有暴雨及其以上降水出现的概率为 85.9%;当中切变线前后风速 $\geq 6$  m $\cdot$ s $^{-1}$ 时,未来 12 小时在切变线前后将有暴雨出现的概率为 72.1%。

(5) 应用逐时 GPS/MET 资料和逐时自动气象站极大风速风场资料,依据暴雨出现在气柱水汽总量空间分布图中水汽锋的不同位置,建立了不同流型配置下的多种暴雨概念模型;采用轮廓识别技术在 C/S 架构下,对 12~36 小时暴雨落区预报模型进行改进并实现了自动化运行。

(6) 应用 3 年的 GPS/MET 资料和 5 年的自动站极大风速风场资料改进了短期暴雨落区预报模型,业务使用收到了良好的效果。但毕竟资料年代较短,实时运行遇到的暴雨类型有限,改进后的暴雨模型的稳定性还有待后期大量的预报个例去验证。另外,精细化监测资料的质量控制还存在一定问题,这些将会影响后期的预报稳定性。

## 参考文献

- [1] 林志强,唐叔乙,何晓红,等. 西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常[J]. 气象,2011,37(8):984-990.
- [2] 尹洁,郑婧,张瑛,等. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象,2011,37(7):827-837.

- [3] 罗建英,廖胜石,黄归兰,等. 2004 年 7 月广西汛期暴雨过程水汽特征[J]. 气象,2009,35(8):62-69.
- [4] 苗爱梅,贾利冬,吴蓁,等. 070729 特大暴雨的地闪特征与降水相关分析[J]. 气象,2008,34(6):74-80.
- [5] 陈春艳,孔期,李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象,2012,38(1):72-80.
- [6] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmosphere water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 1992, 97(D14):15787-15801.
- [7] Nakamura H, Koizumi K, Mannoji N. Data assimilation of GPS precipitable water vapor into the JMA mesoscale numerical weather prediction model and its impact on rainfall forecast[J]. J Meteor Soc Japan, 2004, 82(1B):441-452.
- [8] 朱男男,沈桐立,朱伟军. 一次降水过程的 GPS 可降水量资料同化实验[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1):26-32.
- [9] 顾莹,日下博幸,束炯,等. 实时 GPS 可降水量资料的变分同化个例研究[J]. 气象科学, 2010, 30(2):172-178.
- [10] 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.
- [11] 李国平,陈娇娜,黄丁发. 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11):1328-1331.
- [12] 丁金才,黄炎,叶其欣,等. 2002 年台风 Ramasun 影响华东沿海期间降水量的 GPS 观测和分析[J]. 大气科学, 2004, 28(4):613-623.
- [13] 姚建群,丁金才,王坚捍,等. 用 GPS 可降水量资料对一次大暴雨过程的分析[J]. 气象, 2005, 31(4):48-52.
- [14] 杨露华,叶其欣,邬锐,等. 基于 GPS/PWV 资料的上海地区 2004 年一次夏末暴雨的水汽输送分析[J]. 气象科学, 2006, 26(5):502-508.
- [15] 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.
- [16] 张端禹,王明欢,陈波. 2008 年 8 月末湖北连续大暴雨的水汽输送特征[J]. 气象, 2010, 36(2):48-53.
- [17] 曹晓岗,张吉,王慧,等. “080825”上海大暴雨综合分析[J]. 气象, 2009, 35(4):51-58.
- [18] 顾清源,肖递祥,黄楚惠,等. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J]. 气象, 2009, 35(4):59-67.
- [19] 苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 2009 年山西 5 次横切变暴雨的对比分析[J]. 气象, 2011, 37(8):961-972.