

副高边缘暴雨过程中的 GPS 可降水量和假相当位温分布特征

李国翠¹ 李国平² 岳艳霞¹ 孙云¹ 刘伟¹

摘要

利用 2010 年 8 月石家庄地基 GPS 反演的可降水量、地面加密自动站和常规天气资料,对由副高进退引起的河北省中南部一次强降水天气过程中 GPS 可降水量和地面假相当位温的演变趋势进行了详细分析。结果表明:1)此次暴雨过程是由副高边缘暖湿气流与切变线共同作用造成的,强降水区主要出现在 500 hPa 的 584~588 dagpm 线、700~850 hPa 切变线之间;2)降水出现时 GPS 可降水量基本对应于高值阶段,强降水出现时可降水量位于峰值前后;降水出现时 GPS 可降水量偏离系数为正值,而强降水一般出现在偏离系数超过 1 时;3)对同一测站而言,GPS 可降水量越大对应的实际降水越强。当测站不同时,GPS 可降水量高并不一定代表更强的降水,这与测站的地理位置和海拔高度有关。4)降水出现前热力和水汽条件配置好,能量不断积累,假相当位温逐渐升至极大值。随着降水出现与能量的释放,假相当位温回落到谷值阶段,此谷值越低、持续时间越长,对应的降水也越强。

关键词

副高边缘暴雨; GPS 可降水量; 偏离系数; 假相当位温; 时空分布

中图分类号 P458.121

文献标志码 A

收稿日期 2011-05-13

资助项目 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M46);中国气象局西南区域气象中心区域重大科研业务项目(2010-3)

作者简介

李国翠,女,高工,主要从事 GPS 气象学和天气预报工作。liguocui@sina.com

0 引言

暴雨是一种危害大、影响范围广的灾害性天气。它经常会引发洪涝与泥石流等灾害,造成人员伤亡和重大财产损失,因此一直受到各界的关注。西太平洋副热带高压(简称副高,下同)是较低纬度最重要的大型环流系统,它的活动不但对中低纬度天气的发生、发展具有极其重要的作用,对中高纬度环流的演变也产生很大影响,是制约大气环流变化的重要成员。作为行星尺度天气系统,其位置变动对我国夏季暴雨的分布有密切关系。副高边缘暴雨方面的研究已有很多,如:周雨华等^[1]对副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征进行分析;金荣花等^[2]对比分析了副高的三维结构,结果发现,不同副高结构性质的两次区域性暴雨过程,所导致的水汽供应条件和产生强烈上升运动的大尺度背景场存在差异;刘还珠等^[3]对副热带高压影响下北京区域性暴雨行了个例分析;王秀荣等^[4]对西太副高与北京降水特征的关系进行了统计分析。

地基全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是探测大气水汽的手段之一,具有较高的探测精度,可以全天候观测而不受气溶胶、云和降水的影响,具有很高的时间分辨率(可获得半小时甚至几分钟高时间分辨率水汽资料),无需校准、设备维护简单等优势,对监测、分析剧变天气过程尤显重要。近年来随着 GPS 站点的不断布设和加密,GPS 遥感大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)已经被广泛应用到灾害性天气的监测分析预报中。郭洁^[5]、李国翠等^[6-7]分别对西南地区和华北地区不同类型降雨过程中 GPS 可降水量的特征进行了分析,姚建群^[8]、杨露华等^[9]也对典型大到暴雨个例进行了 GPS PWV 分析。

2010 年 8 月 10—11 日,由于副高北进和南撤,副高边缘西南暖湿气流与切变线共同作用造成了一次强降水天气过程。本文拟利用河北省中南部的地基 GPS 反演的可降水量资料,对此过程进行仔细分析,探寻 GPS 可降水量与实际降水的对应关系,以期对副高边缘暴雨天气过程的短时临近预报、预警提供参考。

1 暴雨过程概况

2010 年 8 月 9 日夜到 12 日上午,河北省中南部出现一次强降

1 河北省石家庄市气象局,石家庄 050081

2 成都信息工程学院 大气科学学院,成都,610225

水天气过程 过程雨量为中雨到大雨(图 1),其中保定的南部、石家庄中北部、衡水和沧州的西部出现暴雨.

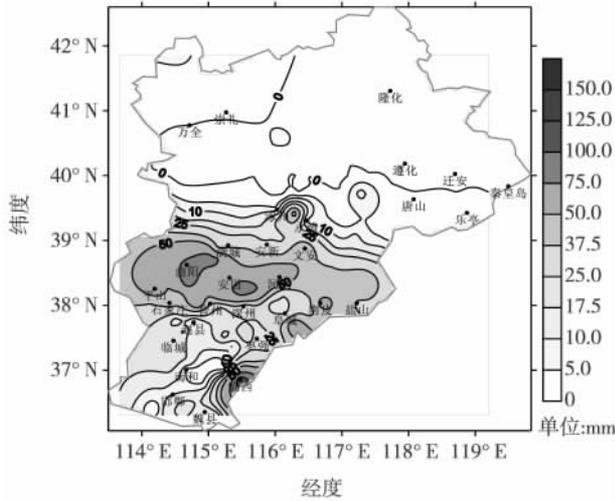


图 1 8月9日20时—12日08时河北省降水量分布及GPS站点分布

Fig. 1 Precipitation and GPS distribution of Hebei province from 20:00 BST of August 9 to 08:00 BST of August 12

在 500 hPa 天气形势图上 9 日白天副高加强北抬 9 日 20 时(北京时,下同)河北省中南部处于副高 584 dagpm 线北部边缘,10 日 08 时介于 584 ~ 588 dagpm 线之间,700 hPa 切变线位于北京到太原一线,850 hPa 切变线位于邢台到济南之间. 受其影响,9 日后半夜出现第一阶段降水,降水区位于副高外围 584 ~ 588 dagpm 线、700 hPa 与 850 hPa 切变线之间;10 日白天到夜间副高继续加强北抬,河北省中南部转受副高控制,降水暂停;11 日白天副高略有南撤,500 hPa 又处于 584 ~ 588 dagpm 线之间,700 hPa 切变线位于张家口—大同—西安一带,呈东北—西南向(图 2 其中切变线右上角标注日期和时间 dd. hh)并逐渐南压,切变线在南压过程中逐渐转东—西向,并稳定维持在北京、太原到邢台北部一线,使得第二阶段强降水出现在石家庄北部和保定南部. 在 850 hPa 以下层次河北省南部受弱反气旋控制,降水量级略小. 12 日白天随着切变线东移,降水结束.

此次暴雨过程的主要影响系统是副高和切变线,属于非对流性降水,具有降水落区集中、持续时间长等特点,而副高和切变线的长时间维持是造成此次暴雨的最主要原因. 这点在卫星云图和多普勒雷达上也有所体现:卫星云图上的中低云系和雷达上的强回波表现为东西带状,并自西向东移动,在保

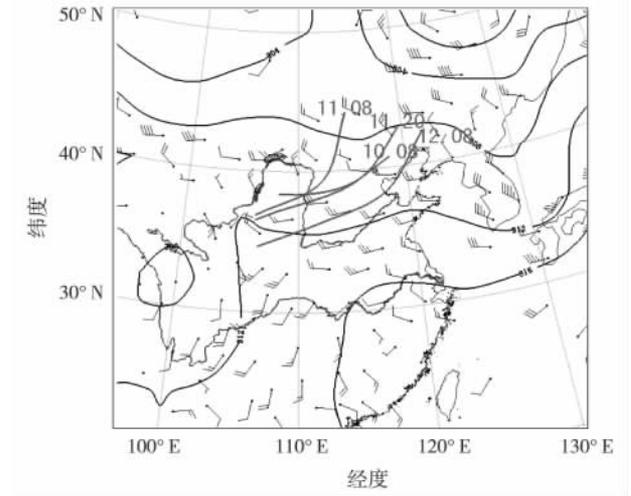


图 2 8月11日20时的700 hPa 等高线(单位: dagpm, 间隔: 4 dagpm)、风场及切变线动态
Fig. 2 The height field (in dagpm with interval of 4 dagpm), wind field and the dynamic of shear line of 700 hPa at 20:00 BST of August 11

定南部到石家庄中北部表现为“列车效应”^[10],属于典型的暴雨形式.

2 GPS 可降水量的时空分布

以时间为横轴,自南向北排列的 GPS 站点(图 1)为纵轴,绘制河北省中南部 GPS 可降水量的时空分布(图 3a). 可以看出, GPS 可降水量表现为“升—降—升—降”的变化趋势,两个大值时段分别出现在 10 日凌晨和 11 日白天到夜间,与降水量的时空分布(图 3b)变化一致. 在 10 日后半夜副高加强北抬时,在副高外围与弱切变共同作用下, GPS 可降水量逐渐增大,出现第一阶段的降水;之后副高控制,降水出现间歇, GPS 可降水量有所减小但仍维持在较高水平;11 日白天副高开始略有南撤,切变线东移, GPS 可降水量再次出现上升,夜间达到极大值,在石家庄和衡水保定一带出现 80 mm 以上的两个水汽高值中心,对应着第二阶段强降水出现;12 日午后 GPS 可降水量急剧下降至月均值以下,降水彻底结束.

从两个阶段可降水量的数值大小及高值持续时间对比看出,即图中单站时间序列(水平分布)变化看出,第二阶段 GPS 可降水量值较第一阶段偏大且高值持续时间长,实况降水持续时间和总降水量也较第一阶段有所加强,可以说明同一测站的 GPS 可降水量越大对应的降水越强;在空间分布图上,大值 GPS 可降水量一般与强降水对应. 但对于不同测站

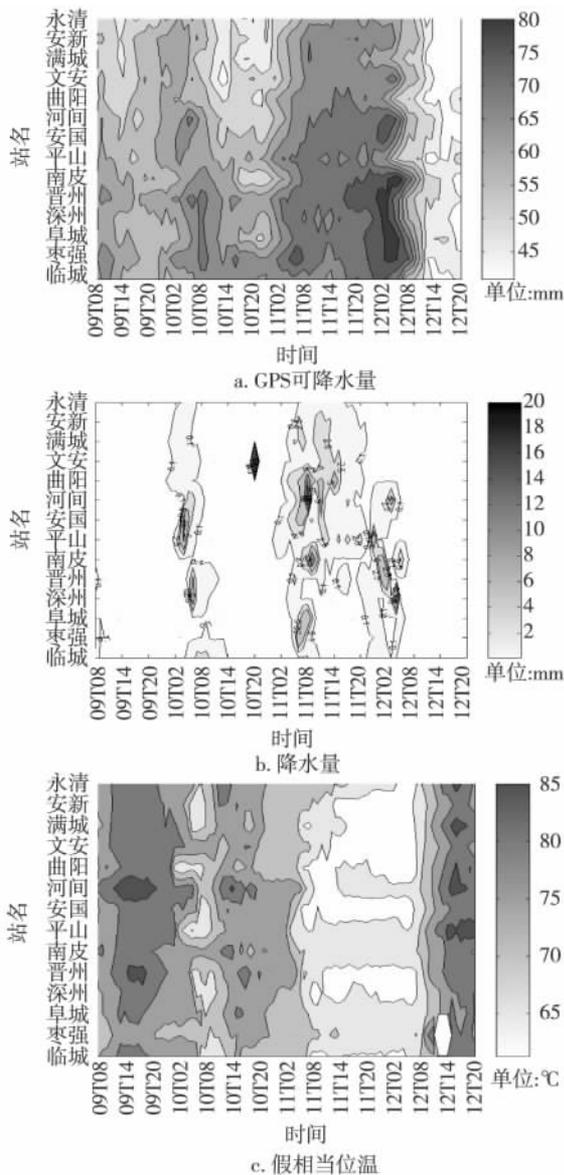


图3 8月9日08时—12日20时河北省中南部GPS可降水量时空分布(单位:mm)、降水量时空分布(单位:mm)和假相当位温分布(单位:°C)

Fig.3 The temporal and spatial distribution of GPS-retrieved precipitable water vapor (a), precipitation (b), and ground pseudo-equivalent temperature (c) in the south central Hebei province from 08:00 BST of August 9 to 20:00 BST of August 12

而言,GPS可降水量值高的测站并不一定代表大的实际降水强度,如11日夜间邢台南部也存在GPS可降水量80mm左右的高值中心,但对应的实际降水仅为小雨.究其原因,除了与地理位置的南北差异造成水汽含量的差异外^[11],还与副高与切变线结合位置及高低层配置有很大关系.

为揭示副高边缘强降水天气过程的能量演变情

况,利用地面加密自动站资料计算得到了河北省中南部各测站逐时的假相当位温,图3c给出了地面假相当位温的时空分布.可以看出:1)9日后半夜到10日上午、11日白天到夜间为假相当位温的谷值区,谷值区域及出现时段与降水区域和出现时段基本吻合.在谷值出现之前,即9日白天到前半夜和10日白天到夜间假相当位温经历了上升和峰值阶段,对应着能量的积累过程.2)相比而言,假相当位温的峰值越大,对应的降水也越强.说明强降水一般出现在假相当位温高值之后,降水之前经历了能量的积累过程,而且前期能量积累越多,产生的降水也越大.3)两阶段降水过程相比,第一阶段假相当位温谷值高、持续时间短,对应着时间短而弱的降水;第二阶段的假相当位温峰值低、持续时间长,对应着强而长时间的降水.

3 单站GPS可降水量偏离系数分析

3.1 单站GPS可降水量

选取石家庄西部山区的平山、东部平原的晋州和保定的曲阳3个地基GPS观测站,绘制8月9日08时—12日20时逐时GPS可降水量和一小时降水量时序(图4)及要素时间分布列表(表1),其中GPS月均值计算时用的是有资料以来(2010年)本站当月所有样本的平均值.

从3站的GPS可降水量和降水量时序图及降水特征表可以得出:1)GPS可降水量从9日开始至12日10时持续位于8月月平均值之上,过程平均GPS可降水量比月均值偏高15mm左右,说明副高边缘暴雨天气过程中的水汽含量很高;2)3站的GPS可降水量总体均呈“升—降—升—降”的变化趋势,相对于对流降水而言^[6],升降幅度平缓,但降水结束后的可降水量下降急剧;3)过程中GPS可降水量出现了两次峰值(极大值),分别为10日凌晨、11日凌晨到前半夜,与两个降水时段基本一致.

由于副高边缘的水汽通道建立通畅,有源源不断的西南暖湿气流的水汽供应,使得大气的垂直水汽总量相当高,GPS可降水量远远高于8月月均水平;降水出现前后可降水量呈缓慢升降趋势,降水出现时段对应可降水量的高值阶段,强降水出现在可降水量的峰值前后;当副高南撤移出本地时,可降水量急剧下降,降水彻底结束.但是受测站地理位置、海拔高度等影响,在降水的不同阶段,不同测站的可降水量在数值上存在着差异,无法很好地进行数据对比.

表 1 平山、晋州和曲阳 3 站降水特征

Table 1 Precipitation characteristics of Pingshan, Jinzhou and Quyang station

站点	实况降水			GPS 可降水量	
	过程降水量/mm	降水时段	极大值/mm	峰值时段	极大值/mm
平山	64.1	10 日 02—10 时	5.2(10 日 03 时)	9 日 23 时—10 日 09 时	67.4(10 日 03 时)
		11 日 01 时—12 日 00 时	11.0(10 日 04 时) 9.2(11 日 23 时)	10 日 05—09 时	71.2(11 日 23 时)
晋州	35.7	10 日 05—12 时	5.8(10 日 06 时)	11 日 03 时—12 日 00 时	71.5(10 日 06 时)
		11 日 04 时—12 日 02 时	6.9(12 日 01 时) 10.0(12 日 02 时)	11 日 05 时—12 日 04 时	71.9(10 日 08 时) 84.6(12 日 02 时)
曲阳	80.2	10 日 00 时—10 日 06 时	5.1、6.9、15.2、6.2	9 日 20—10 日 09 时	61.9(9 日 23 时)
		11 日 03 时—12 日 02 时	(11 日 06—09 时) 5.4(11 日 11 时)	11 日 02 时—12 日 03 时	69.6(11 日 09 时) 72.0(11 日 15 时)

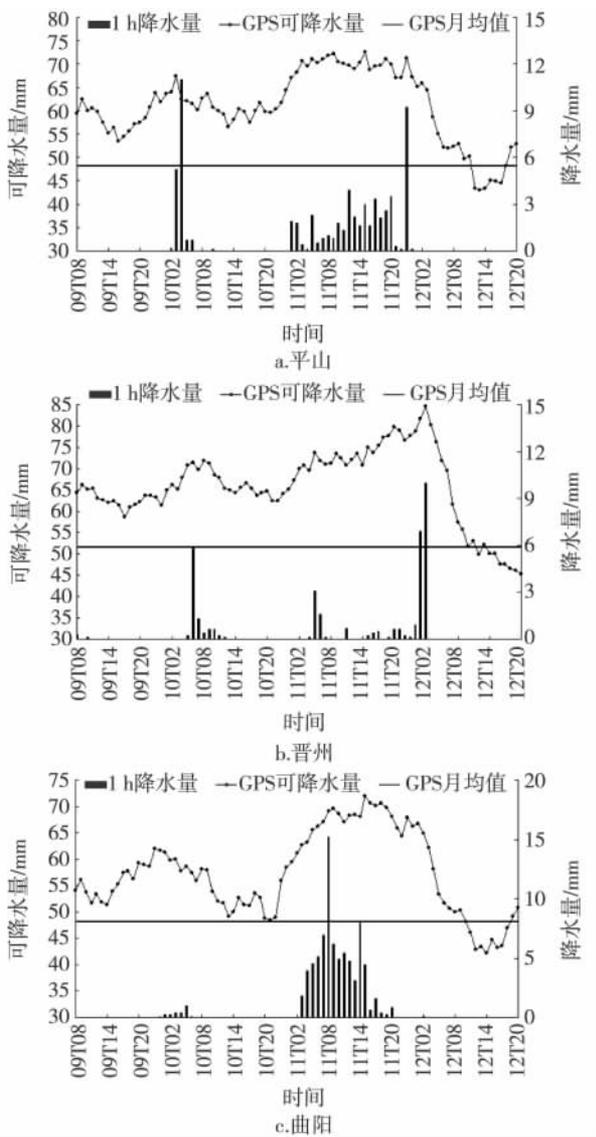


图 4 9 日 08 时—12 日 20 时 GPS 可降水量和降水量时序
Fig. 4 Hourly curve of precipitable water vapor and precipitation from 08:00 BST of Aug 9 to 20:00 BST of Aug 12

3.2 地面假相当位温

图 5 为 9 日 08 时—12 日 20 时平山、晋州和曲阳 3 站的假相当位温时序图,除了可以看出与河北省中南部假相当位温的时空分布同样的规律外,还有一点就是:3 测站对比分析,曲阳的假相当位温数值最低,平山次之,晋州最高,但降水却刚好有相反的规律,这主要是因为 3 个测站所处的地理位置的南北差异而造成的。

3.3 GPS 可降水量偏离系数

以上已经提到,受测站的海拔高度等因素影响,测站之间的 GPS 可降水量和假相当位温之间存在系统性差异,不能直接用于比较区域性差异.因此,将 GPS 可降水量标准化,引入 GPS 可降水量偏离系数^[12]:

$$P_{wv}^* = (P_{wv} - \overline{P_{wv}}) / \delta P_{wv} \quad (1)$$

其中 $\overline{P_{wv}}$ 为该站的月平均值(基准值) δP_{wv} 是其标准差.利用偏离系数可以消除站与站之间的系统性误差,还可以凸显 GPS 可降水量与平均值的差别,正值表示比平均值大,负值则比平均值小,偏离系数值越大表示偏离平均值的程度越大,通过分析 P_{wv}^* 的变化,可了解大气水汽的积累和消散.

从平山、晋州和曲阳 3 站的 GPS 可降水量偏离系数与 1 h 降雨量的对应关系(图 6)看出,副高边缘降水均出现在偏离系数为正值($P_{wv}^* > 0$)时.当降水强度较大,一小时实况降水量超过 2 mm 时 $P_{wv}^* \geq 1$.如晋州 12 日 01、02 时偏离系数分别为 2.1 和 2.3,对应的 1 h 降水量分别为 6.9 mm 和 10.0 mm;平山 11 日 23 时的偏离系数为 1.8,对应的 1 h 降水量为 9.2 mm;曲阳 11 日 06—09 时、11 时的偏离系数分别为 1.4、1.4、1.6、1.7 和 1.5,对应的 1 h 降水量分别均超过 5 mm.

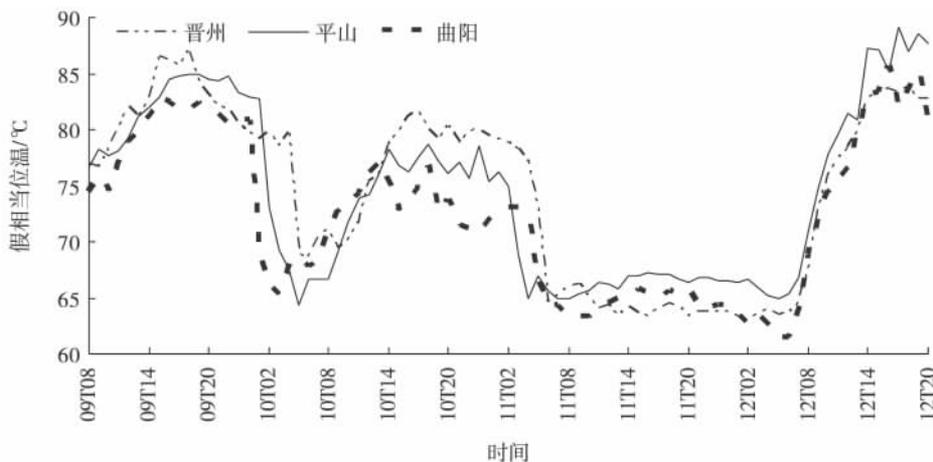


图5 9日08时—12日20时平山、晋州和曲阳地面假相当位温时序

Fig. 5 The timing diagram of ground pseudo-equivalent temperature from 08:00 BST of Aug 9 to 20:00 BST of Aug 12

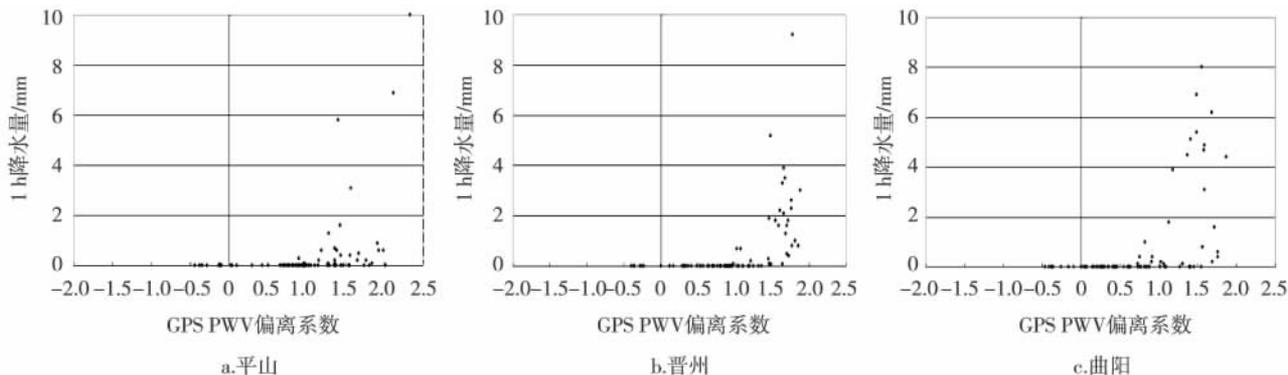


图6 GPS 可降水量偏离系数与1h降雨量的对应关系

Fig. 6 The corresponding relationship between deviation coefficient of GPS PWV and hourly precipitation(a for Pingshan b for Jinzhou and c for Quyong)

4 小结与讨论

2010年8月10—11日在副高北进和南退过程中,切变线稳定维持在石家庄中北部、保定南部,二者共同作用造成河北中南部的强降水天气过程.降水过程表现为以下特点:

1) 西太副高边缘的GPS可降水量水平持续较高,较月均值偏高15mm左右,说明大气的垂直水汽总量相当高,扰动极有可能导致降水出现.

2) 副高边缘降水出现前热力条件和水汽条件配置好,高能高湿不断积累,假相当位温快速增加;降水阶段对应着可降水量的高值阶段和可降水量偏离系数大于零时,其中强降水出现在可降水量的峰值前后,可降水量和偏离系数越大,对应的降水越强,一小时降水量超过2mm的强降水一般出现在偏离

系数超过1时;当副高南撤移出本地时,伴随着能量释放,假相当位温处于谷值阶段,可降水量急剧下降,降水彻底结束.

值得说明的是,上述结论仅是对8月10—11日河北省中南部的暴雨天气过程分析总结后得出的,可能有一定的局限性.随着GPS测站资料的日益丰富,还有待于通过更多个例的应用研究并结合数值模拟来加以验证和完善.

参考文献

References

[1] 周雨华,黄小玉,黎祖贤,等.副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征[J].气象,2006,32(1):12-17
 ZHOU Yuhua, HUANG Xiaoyu, LI Zuxian, et al. Analysis of Doppler radar echo feature of heavy rain events at the edge of west pacific subtropical high [J]. Meteorological

- Monthly 2006 32(1):12-17
- [2] 金荣花,蒙嘉川,裴海瑛.两次区域性暴雨过程副高三维结构对比分析[J].气象 2007 33(4):40-46
JIN Ronghua, MENG Jiachuan, PEI Haiying. A comparison of three dimension structure of subtropical high for two regional heavy rainfall events [J]. Meteorological Monthly 2007 33(4):40-46
- [3] 王秀荣,王维国,刘还珠,等.北京降水特征与西太副高关系的若干统计[J].高原气象,2008,27(4):822-829
WANG Xiurong, WANG Weiguo, LIU Huanzhu, et al. Beijing region precipitation feature and some statistics of relationship between it and SHWP [J]. Plateau Meteorology 2008 27(4):822-829
- [4] 刘还珠,王维国,邵明轩,等.西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,2007 31(4):727-734
LIU Huanzhu, WANG Weiguom, SHAO Mingxuan, et al. A case study of the influence of the western pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 2007 31(4):727-734
- [5] 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
GUO Jie, LI Guoping, HUANG Wenshi, et al. Characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor in different precipitation types [J]. Advances in Water Science, 2009 20(6):763-768
- [6] 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
LI Guocui, LI Guoping, LIAN Zhiluan, et al. Features of precipitable water vapor by GPS in different cloudform precipitation: Analyses on some typical cases in North China [J]. Plateau Meteorology 2008 27(5):1066-1073
- [7] 李国翠,李国平,连志鸾,等.地基GPS水汽资料在石家庄一次暴雨过程中的应用[J].气象与环境科学,2007 30(3):50-53
LI Guocui, LI Guoping, LIAN Zhiluan, et al. Application ground-based GPS data during a heavy rainfall in Shijiazhuang area [J]. Meteorological and Environmental Sciences 2007 30(3):50-53
- [8] 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
YAO Jianqun, DING Jincai, WANG Jianhan, et al. Analysis of a heavy rainfall event with GPS data of precipitation [J]. Meteorological Monthly 2005 31(4):48-52
- [9] 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
YANG Luhua, YE Qixin, WU Rui, et al. Analyses of water vapor transport in a heavy rain in the late summer of 2004 in Shanghai based on GPS/PWV data [J]. Scientia Meteorologica Sinica 2006 26(5):502-508
- [10] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社 2006:172-176
YU Xiaojing, YAO Xiuping, XIONG Tingnan, et al. Principle and application of Doppler weather radar [M]. Beijing: China Meteorological Press 2006:172-176
- [11] 李国翠,李国平,景华,等.华北三站地基GPS反演的大气可降水量及其特征[J].气象科学 2008 28(4):389-394
LI Guocui, LI Guoping, JING Hua, et al. The research on remote sensing of precipitable water vapor by ground-based GPS and its feature at three stations in north China [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(4):389-394
- [12] 李炳华,黎守德.全球卫星定位系统(GPS)水汽资料在暴雨临近预报中的发展和应用[C].阳江第十九届粤港澳气象科技研讨会 2005
LI Binghua, LI Shoude. Development and application of Global Positioning System (GPS) —based vapor data in nowcasting of rainstorms [C]. The 19th Hongkong Macao Meteorological Science and Technology Seminar, Mar. 2005, Guangdong Yangjiang
- [13] 丁金才,黄炎,叶其欣,等.2002年台风Ramasun影响华东沿海期间可降水量的GPS观测和分析[J].大气科学 2004 28(4):613-623
DING Jincai, HUANG Yan, YE Qixin, et al. GPS observation and analysis of precipitable water vapor during typhoon Ramasun in 2002 influencing east china coast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 2004 28(4):613-623
- [14] 李国平,陈娇娜,黄丁发,等.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
LI Guoping, CHEN Jiaona, HUANG Dingfa, et al. Real-time monitoring system of precipitable water vapor derived from ground-based GPS and its applications in meteorology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 2009 34(11):1328-1331
- [15] 王留朋,白征东,过静瑛,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):142-143
WANG Liupeng, BAI Zhengdong, GUO Jingjun, et al. A case study on rainstorm using ground-based GPS PWV and relative humidity series [J]. Science of Surveying and Mapping 2007 32(3):142-143
- [16] 刘旭春,王艳秋,张正禄.利用GPS技术遥感哈尔滨地区大气可降水量的分析[J].测绘通报 2006 14(4):10-16
LIU Xuchun, WANG Yanqiu, ZHANG Zhenglu. Analysis of Harbin area atmosphere precipitable water vapor by using GPS technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping 2006 14(4):10-16
- [17] 袁野,王成章,蒋年冲,等.不同云天条件下水汽含量特征及其变化分析[J].气象科学,2005 25(4):394-398
YUAN Ye, WANG Chengzhang, JIANG Nianchong, et al. Analyzing the character and the change of water vapor under the different cloud weather [J]. Scientia Meteorologica Sinica 2005 25(4):394-398

Characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor and ground pseudo-equivalent temperature during a heavy rain of western pacific subtropical high

LI Guocui¹ LI Guoping² YUE Yanxia¹ SUN Yun¹ LIU Wei¹

1 Shijiazhuang Meteorological Bureau ,Shijiazhuang 050081

2 College of Atmospheric Sciences ,Chengdu University of Information Technology ,Chengdu 610225

Abstract Based on precipitable water vapor retrieved from ground-based GPS ,data of ground automatic meteorological stations and conventional weather data ,the evolution tendency of precipitable water vapor and ground pseudo-equivalent temperature during a heavy rain in south central Hebei province is studied. The results show that the heavy rainfall are caused by warm-wet flowing and shear line at the edge of subtropical high ,and the precipitation area is between 584 to 588 dagpm lines in 500 hPa ,between shear line in 700 to 850 hPa. Rainfall usually occurs when the GPS-retrieved precipitable water vapor is higher than the average value ,especially near its maximum value and the heavy rain period is corresponding to the maximum value stage of precipitable water vapor. Rainfall occurred more often when the deviation coefficient of GPS-retrieved precipitable water vapor is positive ,heavy rainfall generally happens while deviation coefficient is higher than 1. For the same station ,when GPS-retrieved precipitable water vapor is high ,the real precipitation is strong. While for the different stations ,the high precipitation is not necessarily represent strong real rainfall ,for it is corresponding to the station location and altitude. High-energy accumulation is a necessary condition of rainfall. The rainfall of subtropical high usually occurs in the rapid decline phase of pseudo-equivalent temperature or its valley areas. The precipitation will be stronger when pseudo-equivalent temperature is at high peak ,in sharp movement and with long duration of high value.

Key words heavy rain of subtropical high; GPS-retrieved precipitable water vapor; deviation coefficient; pseudo-equivalent temperature; spatial and temporal distribution