

王勇, 毛志锋, 曾昭扬. GNSS水汽与降水比较及用于河北省水汽通道探测研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 107-112. [WANG Yong, MAO Zhifeng and ZENG Zhaoyang. Comparison between GNSS PWV and precipitation and the application of detecting water vapor transport path in hebei province [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 107-112. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.020.]

GNSS水汽与降水比较及用于河北省水汽通道探测研究*

王勇, 毛志锋, 曾昭扬

(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384)

摘要: 河北省地形复杂, 夏季多发生短时强降水和暴雨等强对流天气。有必要利用 GNSS 水汽开展短时天气预报研究。该文首先利用河北省 CORS 网 2013 年 5-8 月 GNSS 站点数据和气象数据开展了 GNSS 水汽与实际降水的比较, 然后依据 6 次降水过程中 GNSS PWV 及 GNSS Δ PWV 的变化来探测河北省夏季水汽通道。研究发现: 接近 60% 的 GNSS 水汽序列峰值超前于实际降水, 可利用测站 GNSS 水汽变化进行降水预报。GNSS PWV 的空间变化趋势与水汽通道的方向一致, 证实了河北省夏季存在西北-东南方向和西南-东北方向两条水汽通道。研究结果可为河北省短时强降雨的预报提供参考和借鉴。

关键词: GNSS; 水汽; 降水; 河北省; 水汽通道

中图分类号: X43; P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0107-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.020

2013 年 7 月 1-8 日河北省发生了大范围、高强度和长时间的降水过程, 该次降水过程造成严重的气象灾害, 短时强降水预报已经成为当前急需解决的重要问题。水汽是影响降水过程的重要因素, 利用 GNSS 技术可反演出高时空分辨率的水汽信息。目前河北省建成 GNSS CORS 网络, 如何利用现有 GNSS 数据为短时天气预报提供参考, 是大地测量与气象学两个学科的交叉问题。Bevis 在 1992 年首次提出了“GNSS 气象学”的概念^[1]。多位学者就北京^[2]、河北^[3-4]和江苏盐城^[5]等地区开展了 GNSS 水汽与降水的比较研究, 发现两者存在着较好的对应关系。刘严萍等人指出北京 GNSS 水汽的变化对应了从西南到东北的水汽输送过程^[6]。以上研究中对河北省的研究较少, 缺少长时间、大范围、多测站的 GNSS 水汽应用研究。

本文利用河北省 2013 年 5-8 月 CORS 网络数据和对应的气象数据反演 GNSS 测站水汽, 开展 GNSS 水汽与实际降水的关系及探测河北省夏季水汽通道, 以期为区域短时强降水预警提供参考。

E, 36°05'~42°40' N, 该地区地形复杂, 包含高原、平原、草原、山地、丘陵、盆地和海滨等地形。根据河北省的地理位置和地形条件等信息, 结合河北省 GNSS 站点分布情况, 选取涉县、魏县、南和等 19 个 GNSS 站点作为研究对象。19 个 GNSS 站点的区域分布如图 1 所示。

1.2 研究数据

由于河北省降水多发生在夏季, 论文选择 2013 年 5-8 月 CORS 网络及同期测站气象数据开展相关研究。GNSS 水汽获取是论文研究的基础, GNSS 水汽反演过程如下: 解算软件为 GAMIT10.6, 卫星高度角设置为 10°, 松弛解解算模式, 每小时解算一个对流层延迟值。利用 SAAS 模型解算测站静力学延迟, 由对流层延迟去除静力学延迟获得测站对流层湿延迟, 根据湿延迟与水汽之间的对应关系^[7], 结合气象要素(温度), 即可获得河北省 GNSS 站点水汽序列。

研究数据还包括气象观测要素, 主要有测站气压、温度、降水量, 以上要素均为小时观测, 数据来源于河北省气象局。

1 研究区域与研究数据

1.1 研究区域

研究区域为河北省, 地处 113°27'~119°50'

2 GNSS水汽与实际降水的比较

2.1 GNSS水汽与实际降水的逐时演变

水汽随时间和空间的变化比较显著, 连续的

* 收稿日期: 2018-07-31 修回日期: 2018-09-26

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC21600); 河北省自然科学基金(D2015209024)

第一作者简介: 王勇(1978-), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 主要从事 GNSS 气象学研究. E-mail: wangyongjz@126.com



图1 河北省 GNSS 站点分布

GNSS 监测能够比较好的确定水汽的时空变化，可以为降水预报提供及时可靠的依据。由于论文篇幅的限制，本节以涉县和青龙为例，研究 GNSS 水汽与实际降水的关系，分别对涉县和青龙 2 个 GNSS 测站 2013 年 5 - 8 月的 GNSS 水汽与实际降水进行比较(图 2)。

由图 2 可以看出每次降水出现之前总对应着一次 GNSS 水汽的峰值的出现，总体而言 GNSS 水汽序列的峰值略超前于实际降水过程。为进一步说明 GNSS 水汽的峰值与实际降水之间的关系。选择涉县(8 月 1 日)和青龙(6 月 28 日)两次暴雨过程进行分析(图 3)。

以涉县为例，分析一次强降水过程 GNSS 水汽的变化，涉县在 2013 年 8 月 1 日有一次暴雨过程

(图 3a)，暴雨持续时间为 8 月 1 日 7 时至 9 时，该段时间内总降水量为 77.9 mm。在暴雨发生前，GNSS 水汽从 7 月 29 日 17 时至 30 日 6 时开始连续下降，6 时下降到极小值后，从 7 月 30 日 6 时至 7 月 31 日 7 时开始缓慢上升，从 7 月 31 日 7 时至 8 月 1 日 6 时 GNSS 水汽开始急剧增大至最大值 49.33 mm，在 8 月 1 日 7 时出现降雨，暴雨主要出现在 7 时，单位小时内降水高达 69.2 mm。青龙站点 GNSS 水汽与实际降水比较也有相似的规律。

可见，降水过程发生前，GNSS 水汽迅速递增并且达到峰值，可作为降水预报的重要判断依据之一。

2.2 GNSS 水汽与本站降水过程的比较

为了 GNSS 水汽能在实际的降水预报中发挥作用，探究 GNSS 水汽峰值超前实际降水的时间，由于论文篇幅的限制，仍以涉县和青龙为例。

由表 1 可知，涉县 2013 年 5 - 8 月总共发生降水 28 次，GNSS 水汽序列峰值与实际降水时间的比较如表 1 所示。在 28 次降水事件中，GNSS 的水汽序列峰值与实际降水同时发生的次数和超前降水发生的次数一样，都占到总降水次数的 50%。

由表 2 可看出，青龙 2013 年 5 - 8 月发生降水 30 次，GNSS 水汽序列峰值与实际降水时间的比较如表 2 所示。青龙发生的 30 次降水事件中，GNSS 水汽序列峰值与实际降水同时发生和超前降水发生时间 1 h 的次数最多，分别为 16 次和 7 次。GNSS 水汽序列峰值与实际降水同时发生的次数占总降水次数的 53%，GNSS 水汽序列峰值超前降水发生的次数占到总降水次数的 47%。

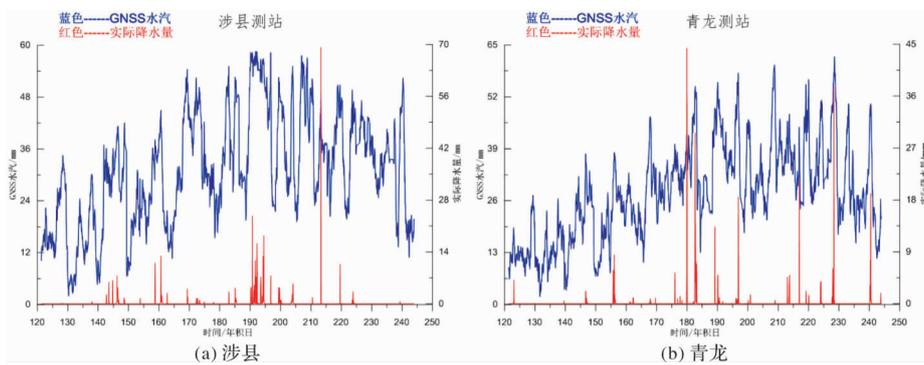


图2 河北省 2013 年 5 - 8 月 GNSS 水汽与实际降水的比较

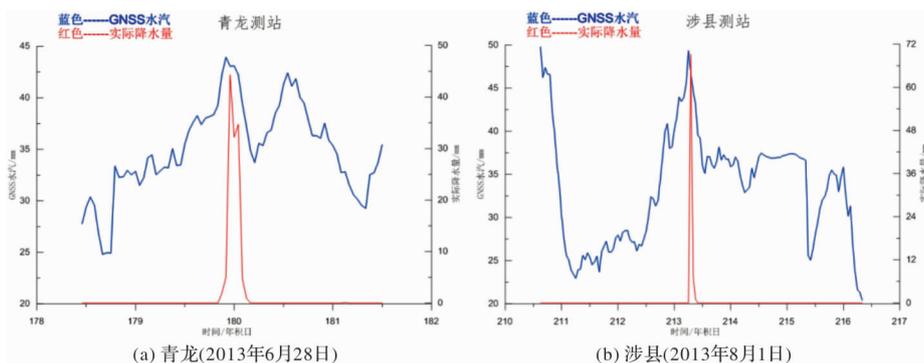


图3 暴雨过程 GNSS 水汽与实际降水的比较

表 1 涉县 GNSS 水汽序列峰值超前降水时间统计

GNSS 水汽峰值超前降水时间/h	0	1	2	3	4	5	>5	总计
次数	14	3	2	1	0	1	7	28

表 2 青龙 GNSS 水汽序列峰值超前降水时间统计

GNSS 水汽峰值超前降水时间/h	0	1	2	3	4	5	>5	总计
次数	16	7	0	1	1	0	5	30

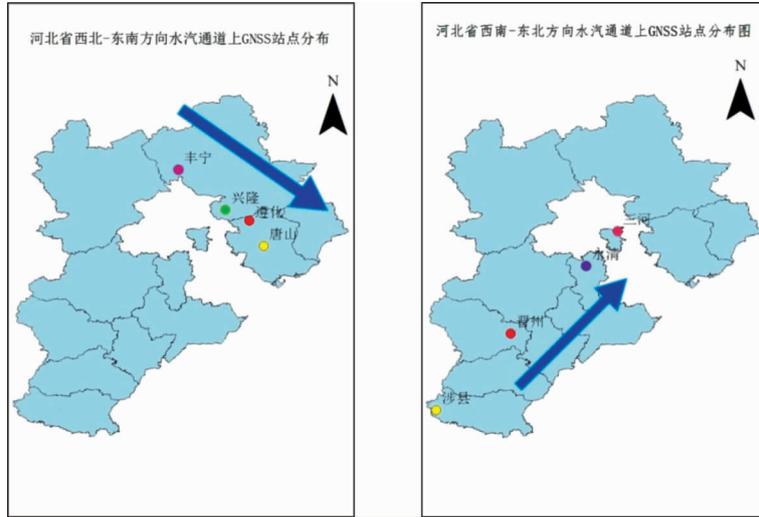


图 4 两条水汽通道 GNSS 站点分布图

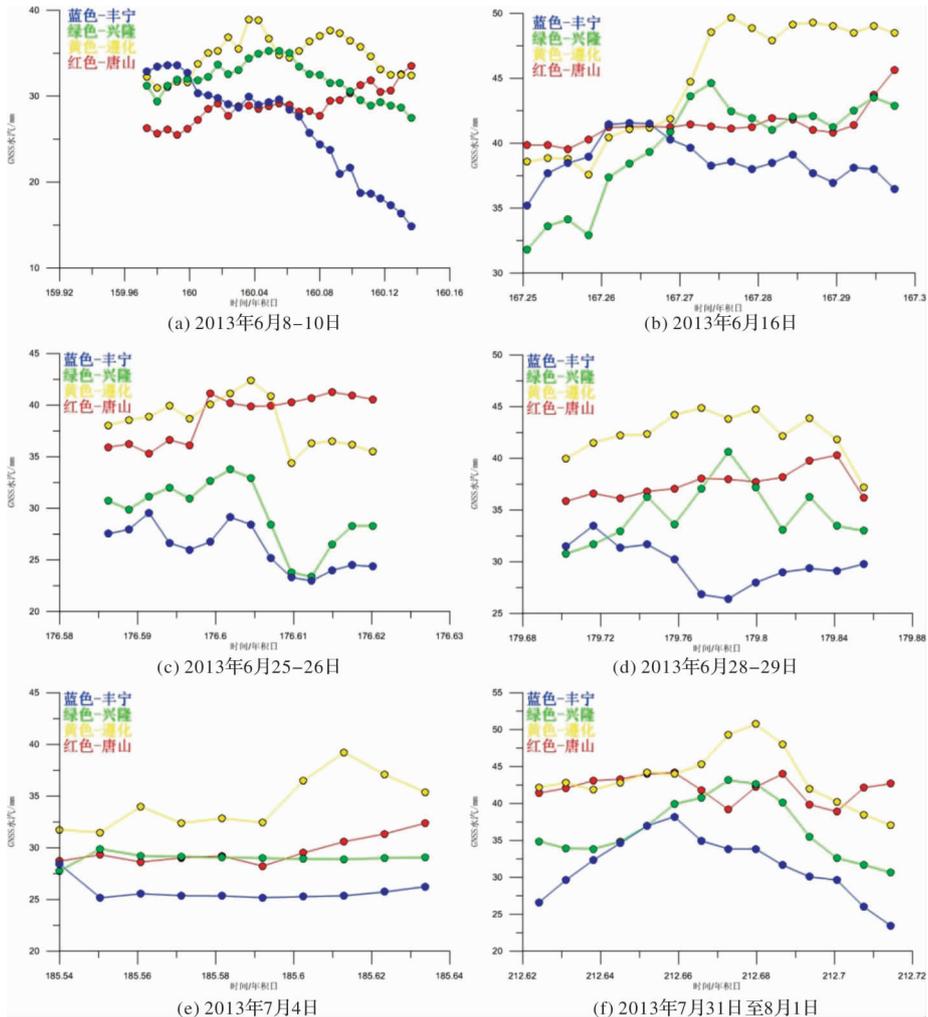


图 5 GNSS PWV 的变化

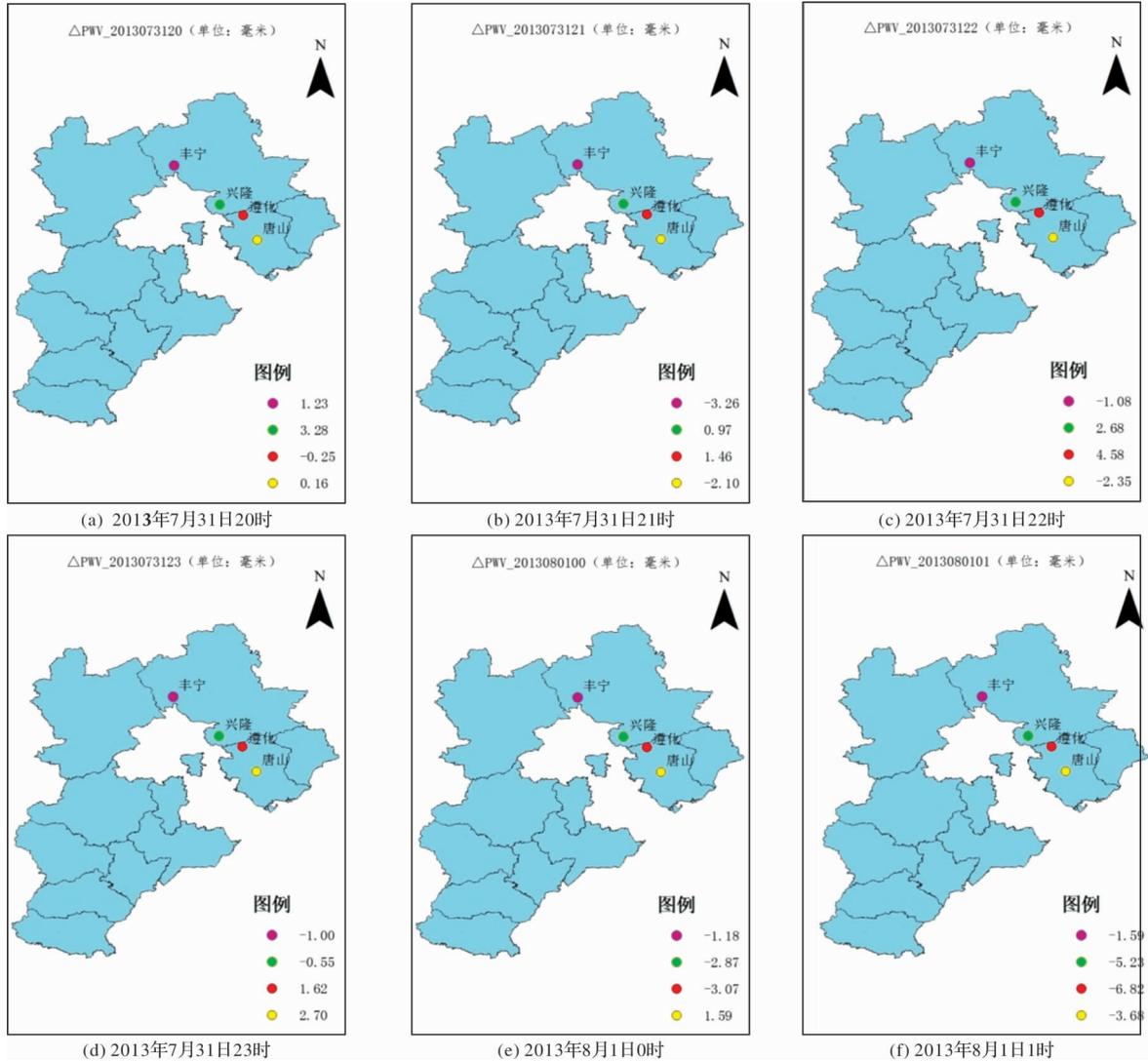


图6 GNSS ΔPWV 时空变化

通过统计 19 个测站 GNSS 水汽序列峰值与实际降水时间的关系可知, GNSS 水汽序列峰值超前降水发生时间 1 h 和 2 h 的次数较多。即 GNSS 水汽序列峰值超前降水发生时间约为 1~2 h。GNSS 水汽序列峰值超前降水发生的次数占总降水次数的 59%, GNSS 水汽序列峰值与实际降水同时发生的次数占总降水次数的 41%。说明 GNSS 水汽监测在短期强降水预报中具有超前性和实用性。

3 基于 GNSS 的河北省夏季水汽通道探测

3.1 水汽通道选取

从上一节的研究结果可以看出 GNSS 水汽序列峰值与实际降水同时发生的次数占总降水次数的 41%, 对于这些降水过程 GNSS 测站水汽无法进行提前预警。如果能通过区域 GNSS 水汽的变化与降水的关系研究(即水汽通道探测)可为河北省夏季降水提前预报提供辅助决策。国内学者对华北地区夏季水汽通道开展了相关研究^[8-10], 对于利用 GNSS 水汽研究河北省夏季的水汽通道的文献甚

少。结合河北 GNSS 站点的分布, 本节将针对西南至东北方向和西北至东南方向上的站点开展 GNSS 水汽空间变化来验证其水汽通道的存在。GNSS 站点选择如下: 在西北-东南的方向上选择丰宁、兴隆、遵化和唐山四个站点; 在西南-东北的方向上选择沙县、晋州、永清和三河四个站点。两条水汽通道的 GNSS 站点分布如图 4 所示。本节的研究还用到了单位时间(h)的水汽变化, 用 ΔPWV 表示(mm), ΔPWV 计算公式见式(1)。

$$\Delta PWV_i = PWV_i - PWV_{(i-1)} \quad (1)$$

式中: ΔPWV_i 表示第 i 时的水汽变化, PWV_i 表示第 i 时的水汽, $PWV_{(i-1)}$ 表示第 $(i-1)$ 时的水汽。

3.2 西北-东南水汽通道的存在性验证

为验证河北省西北-东南方向上水汽通道的存在, 选择西北-东南方向上四个 GNSS 测站(丰宁、兴隆、遵化和唐山)2013 年夏季的 6 次降水过程进行分析(图 5)。

为了更好地表达 ΔPWV 的时空变化, 本节使用 ArcGIS 绘制出 2013 年 7 月 31 日 20 时至 8 月 1 日 1 时的 ΔPWV 时空变化如图 6 所示。

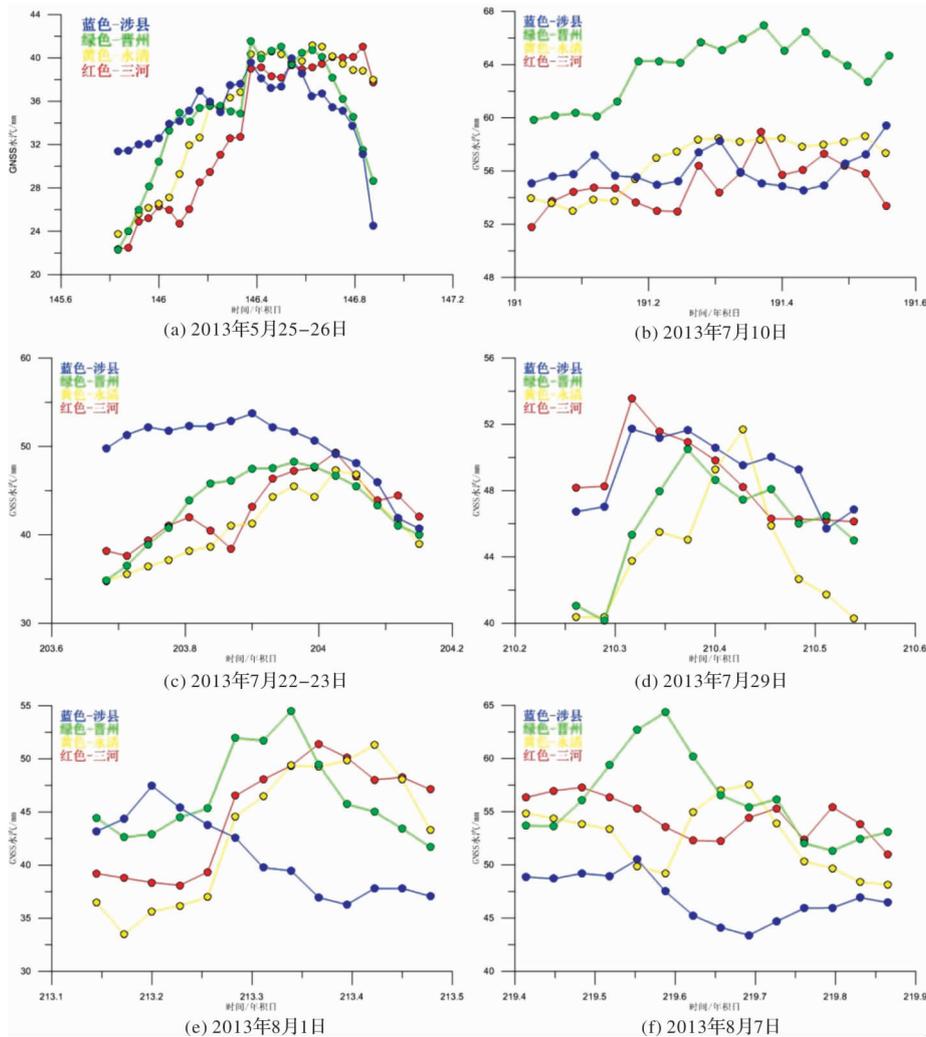


图7 GNSS PWV 的变化

由图 5 和图 6 可以看出, 在西北 - 东南方向上发生的 6 次降水过程中, 各站点的 GNSS_PWV 峰值出现的时间也存在着空间和时间上差异性, ΔPWV 值由正变负的时间也存在差异性。丰宁、兴隆、遵化和唐山四个站点的 GNSS 水汽序列沿着西北 - 东南方向依次到达峰值, 然后开始下降。这四个站点的 ΔPWV 值由正到负的变化过程也是沿着西北 - 东南的方向。结合气象部门提供的 2013 年夏季的降水资料, 6 月 8 日至 10 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 9 日 0 时、9 日 7 时、9 日 10 时和 10 日 01 时; 6 月 16 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 8 时、12 时、16 时和 21 时; 6 月 25 日至 26 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 14 时、20 时、20 时和 21 时; 6 月 28 日至 29 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 28 日 19 时、28 日 20 时、29 日 0 时和 29 日 0 时; 7 月 4 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 16 时、18 时、19 时和 20 时; 7 月 31 日至 8 月 1 日丰宁、兴隆、遵化和唐山的降水时间分别为 31 日 20 时、31 日 22 时、31 日 23 时和 8 月 1 日 2 时。由此可知, 降水过程的发生, 对应了 GNSS 水汽序列到达峰值并开始下降, 及

ΔPWV 值由正变为负的变化过程, 这与上一节得出的结论一致。

国内学者马京津^[8]指出由于夏季东亚大气环流的影响华北地区的水汽主要来自西北方向。由于丰宁、兴隆和遵化等城市主要位于河北的西北方向, 因此受西北 - 东南方向水汽通道的影响较大。故认为, 河北省的确存在着西北 - 东南方向的水汽通道。

3.3 西南 - 东北水汽通道的存在性验证

选择西南 - 东北方向上 4 个 GNSS 测站(涉县、晋州、永清和三河)2013 年夏季的 6 次降水过程进行分析(图 7)。

由图 7 可看出在西南 - 东北方向上发生的 6 次降水过程中, 各站点的 GNSS PWV 峰值出现的时间也存在着空间和时间上差异性。涉县、晋州、永清和三河四个站点的 GNSS 水汽序列沿着西南 - 东北方向依次到达峰值, 然后开始下降。结合气象部门提供的 2013 年夏季降水资料, 5 月 25 - 26 日涉县、晋州、永清和三河的降水时间分别为 25 日 22 时、26 日 8 时、26 日 17 时和 26 日 21 时; 7 月 10 日涉县、晋州、永清和三河的降水时间分别为 3 时、6 时、7 时和 14 时; 7 月 22 - 23 日涉县、晋

州、永清和三河的降水时间分别为 22 日 17 时、22 日 21 时、31 日 1 时和 31 日 2 时；7 月 29 日涉县、晋州、永清和三河的降水时间分别为 11 时、12 时、13 时和 15 时；8 月 1 日的降水时间分别为 7 时、12 时、12 时和 13 时；8 月 7 日涉县、晋州、永清和三河的降水时间分别为 14 时、15 时、18 时、19 时。

由图 7 的分析可知，河北省存在由 WS - NE 方向的水汽通道。华北地区夏季的水汽通道有三条，分别为西南、东南和偏西方向水汽通道，其中西南方向水汽通道最为重要^[10]。而西南水汽源地主要在孟加拉湾、南海和东海，孟加拉湾水汽通过西南方向水汽通道输送到华北，而南海水汽在到达广西和广东地区后并入西南风水汽通道输送到华北。西南方向水汽通道是两股水汽来源会合的结果。故可认为，河北省存在西北 - 东南方向的水汽通道。

4 结论

通过对河北省 GNSS 水汽开展其与降水比较并用于河北省水汽通道探测，获得以下结论：

(1) GNSS 水汽序列峰值超前降水发生时间约为 1 ~ 2 h。GNSS 水汽序列峰值超前降水发生的次数占到总降水次数的 59%，GNSS 水汽序列峰值与实际降水同时发生的次数占总降水次数的 41%。

(2) 河北省存在西北 - 东南和西南 - 东北方向

的水汽通道，利用区域 GNSS 水汽变化可为河北省短时强降雨的预报提供参考和借鉴。

参考文献：

- [1] Bevis M, S Businger, T A Herring, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Geophys. Research, 1992, 97(D14): 15787 - 15801.
- [2] 梁丰, 李成才, 王迎春, 等. 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 236 - 244.
- [3] 王勇, 何荣, 刘严萍, 等. GPS 反演的可降水量与降水的对比分析研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(5): 80 - 82.
- [4] 陈小雷. 地基 GPS 在河北气象中应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [5] 罗梦森, 曾明剑, 景元书, 等. GPS 反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系研究[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 418 - 423.
- [6] 刘严萍, 张飞涟, 孙晓. 地基 GPS 可降水量用于 2011 年北京暴雨监测[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 63 - 66.
- [7] 王勇, 刘严萍. 地基 GPS 气象学原理与应用研究[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [8] 马京津, 高晓清. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 893 - 899.
- [9] 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠, 等. 华北降水季节演变主要模式及影响因子[J]. 大气科学, 2011, 35(2): 217 - 234.
- [10] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 影响华北汛期降水的水汽输送过程[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 345 - 357.

Comparison between GNSS PWV and Precipitation and the Application of Detecting Water Vapor Transport Path in Hebei Province

WANG Yong, MAO Zhifeng and ZENG Zhaoyang

(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The topography of Hebei is complex, and severe convective weather such as short time heavy rainfall and heavy rain occur in summer. It is necessary to use GNSS water vapor to carry out short-term weather forecasting. In this paper, the correlation between GNSS water vapor and actual precipitation was carried out by using the data of GNSS stations and meteorological data of Hebei CORS network from May to August 2013, and then the summer water vapor channel in Hebei Province was explored according to the changes of GNSS PWV and GNSS Delta PWV during the six precipitation periods. It is found that the peak value of nearly 60% GNSS water vapor series is ahead of the actual precipitation, and the precipitation can be predicted by the variation of GNSS water vapor. The spatial variation trend of GNSS PWV coincides with the direction of water vapor channel, which confirms that there are two water vapor channels in summer in Hebei Province, namely, northwest-southeast and southwest-northeast. The research results can provide reference for the prediction of Short-time Heavy Rainfall in Hebei.

Key words: GNSS; precipitable water vapor; precipitation; Hebei province; water vapor transport path