

# 应用 GPS 可降水量分析河北省一次回流降雪天气

李国翠<sup>1</sup> 张迎新<sup>2</sup> 李国平<sup>3</sup> 赵卫亮<sup>1</sup>

(1 石家庄市气象局, 石家庄 050081; 2 河北省气象台, 石家庄 050021; 3 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225)

**摘要** 利用地基 GPS 反演的可降水量资料、地面加密自动站和常规天气资料, 对 2011 年 2 月发生在河北省的一次回流降雪天气过程进行了分析。结果表明: ①降雪过程前期, GPS 可降水量由西南向东北逐渐增大, 后期自北向南减小, 与西南暖湿气流的输送和地面冷高压的南压对应。②第 1 阶段降雪的主要影响系统为高空槽, GPS 可降水量不断增加, 对应的实际降水也是先增后减; 第 2 阶段的降雪主要表现为回流降雪, 降雪前期 GPS 可降水量迅速增长, 实际降水出现在 GPS 可降水量峰值及下降阶段。随着地面冷高压逐渐南压, GPS 可降水量逐渐下降, 实际降水也逐渐减弱至停止。③在探空层结曲线上, 高湿层位于地面附近和 700 hPa 附近, 而二者之间的近地层存在着低湿层。

**关键词** GPS 可降水量 回流降雪 探空层结

## 引言

强降雪是我国北方地区冬季常见的一种灾害性天气现象, 降雪往往会给交通运输、电力传输、通信设施、农业生产以及人民群众生活造成严重影响。关于暴雪方面的研究已有很多<sup>[1-5]</sup>, 内容涉及常规观测、加密自动站、卫星、雷达、数值预报产品以及 NCEP 再分析资料等方面。水汽是预测强降雪的一个非常重要的物理参数, 水汽监测的最新手段之一是地基全球定位系统(GPS; Global Positioning System)遥感大气可降水量, 其时空分辨率高<sup>[6-8]</sup>, 目前正被广泛应用<sup>[9-11]</sup>。关于 GPS 可降水量用于降雪天气分析方面, 相关的研究还不多, 李国平<sup>[12]</sup>、郭洁<sup>[13]</sup>等研究了 2008 年 1 月中下旬成都雨雪冰冻天气条件下 GPS PWV 的演变特征, 但 GPS 可降水量在北方强降雪天气分析中的应用还较少。

本文应用常规资料及其对应的逐时 GPS 可降水量和加密降水量数据, 对 2011 年 2 月 25 日夜間到 27 日白天河北省出现的强降雪天气过程进行了分析, 得出了一些有益的结论, 可为以后强降雪天气的短时和临近预报及雪灾预警提供参考。

## 1 过程实况及天气演变

2011 年 2 月 25 日夜間到 27 日白天, 河北省出现了一次强降雪天气过程(图 1), 除秦皇岛、承德南部和唐山北部外, 河北省过程降雪量大部分在 5 mm 以上, 石家庄的晋州和辛集、衡水的安平、邯郸

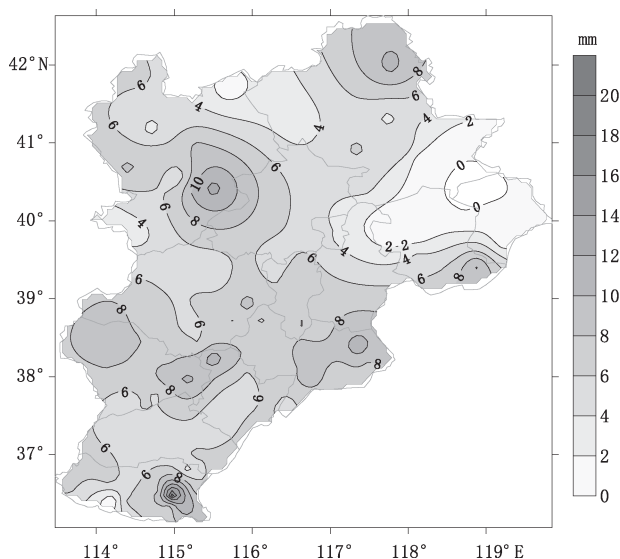


图 1 2011 年 2 月 25 日 20:00 至 27 日 20:00

(北京时, 下同)降雪量分布

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家科技支撑项目(2008BAC37B01)、行业专项(GYHY200906011)、国家自然科学基金项目(40875024)和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)资助

作者简介: 李国翠, 女, 1972 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事 GPS 气象学和天气预报工作, Email: liguocui@sina.com

收稿日期: 2011 年 6 月 22 日; 定稿日期: 2011 年 11 月 11 日

的大名、沧州的南皮和黄骅、承德的围场、张家口的涿鹿和怀来降雪量超过 10 mm,其中张家口的怀来最大为 12.8 mm。降雪过程主要分两个阶段,第 1 阶段出现在 25 日夜间到 26 日上午,为高空槽降雪。降雪区位于石家庄、保定、张家口、廊坊、衡水、沧州西部、邢台和邯郸东部,降雪分布北多南少,强降雪出现在张家口、承德和保定北部,降雪量 2.5~6.3 mm,其中承德围场最大为 10.7 mm;第 2 阶段出现在 26 日夜间到 27 日上午,属于回流降雪。降雪分布南多北少,强降雪主要出现在河北省中南部的石家庄、衡水、沧州、邢台和邯郸,降雪量 4.1~11.2 mm。

从天气形势分析,在 2 月 25 日白天的地面图上,河套一带为“南—北”向倒槽控制,蒙古一带有冷高压东移,河北省处于高压后部;随着冷高压东移,地面倒槽由“南—北”向逐渐转为“东北—西南”向,河北省转为东北风。在 500 hPa 高空图上,位于西太平洋的高压脊较强大,高空槽 25 日 20:00 东移至内蒙古的乌拉特中旗到银川一带,河北省转受槽前西南气流控制,700 hPa 风速普遍在 16 m/s 以上,达到低空急流标准;850 hPa 有风速的辐合;925 hPa 及以下转东北风控制,起到“冷垫”作用。受其东部高压脊阻挡,高空槽在东移过程中有所北抽,受高空槽影响,25 日夜间到 26 日上午河北省出现雨雪天气;26 日下午地面转入倒槽控制时,高空槽过境,降雪暂停;26 日 20:00 850 hPa 锋区已南压至 40°N 一带,700 hPa 位于河北、河南交界一带有“东—西”向暖切变;随着暖切变的东移北抬和地面冷高压的东移南压,26 日夜间到 27 日白天降雪再次出现,此阶段属于回流降雪,强降雪区与暖切变和地面回流有密切关系。

## 2 GPS 可降水量分析

目前,河北省有 30 个地基 GPS 测站,其分布状况如图 2 所示。根据 GPS 反演可降水量的原理,利用天顶总延迟(ZTD)、地面气压和气温资料,可以反演得到河北省各个 GPS 测站的逐小时可降水量资料,进而得到 GPS 可降水量的时间演变及空间分布情况。

### 2.1 时空分布

从时间分布看,GPS 可降水量的变化趋势大致可分为 3 个阶段:第 1 阶段为 25 日白天,GPS 可降

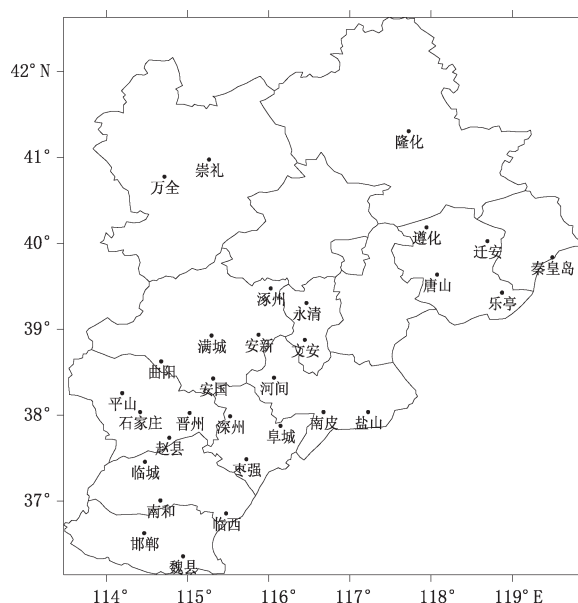


图 2 河北省地基 GPS 测站分布

水量普遍位于 10 mm 以下(图 3a),说明水汽含量数值小,实况无降水出现。在空间分布上,河北省北部的 GPS 可降水量普遍低于南部测站,这种分布与水汽总量的南多北少气候分布是一致的<sup>[14]</sup>。第 2 阶段为 25 日夜间到 27 日上午,此阶段的 GPS 可降水量数值增大到 10~20 mm,GPS 可降水量极大值达 20 mm 以上,与降水的两个阶段相对应。其中 25 日夜间到 26 日上午,河北省 GPS 可降水量由西南向东北逐渐增大,普遍呈快速递增趋势(图 3b~d),这与高空槽前西南暖湿气流的水汽输送相对应。26 日凌晨开始 GPS 可降水量已增大到 10 mm 以上,对应着高空槽降水阶段;26 日夜间到 27 日上午(图 3e~g),河北省 GPS 可降水量南高北低,10 mm 可降水量等值线逐渐南压,低值可降水量范围增大,GPS 可降水量自北向南呈减小趋势,使得对应区域内的降水也逐渐停止,这与回流降水(东北冷高压逐渐南压)有关。第 3 阶段为 27 日白天(图 3h),GPS 可降水量逐渐减小到 10 mm 以下,相应地降雪减弱至停止。

另外,从 GPS 可降水量与实际降水的分布看,强降雪主要出现在 GPS 可降水量的高值中心区域。在 25 日夜间到 26 日上午的高空槽降雪阶段,除秦皇岛和唐山之外,河北省中北部 GPS 可降水量增加显著;而在 26 日夜间到 27 日上午的回流降雪阶段,河北省中南部的 GPS 可降水量明显高于北部,这与前面所述的两个阶段的降雪区是基本吻合的。

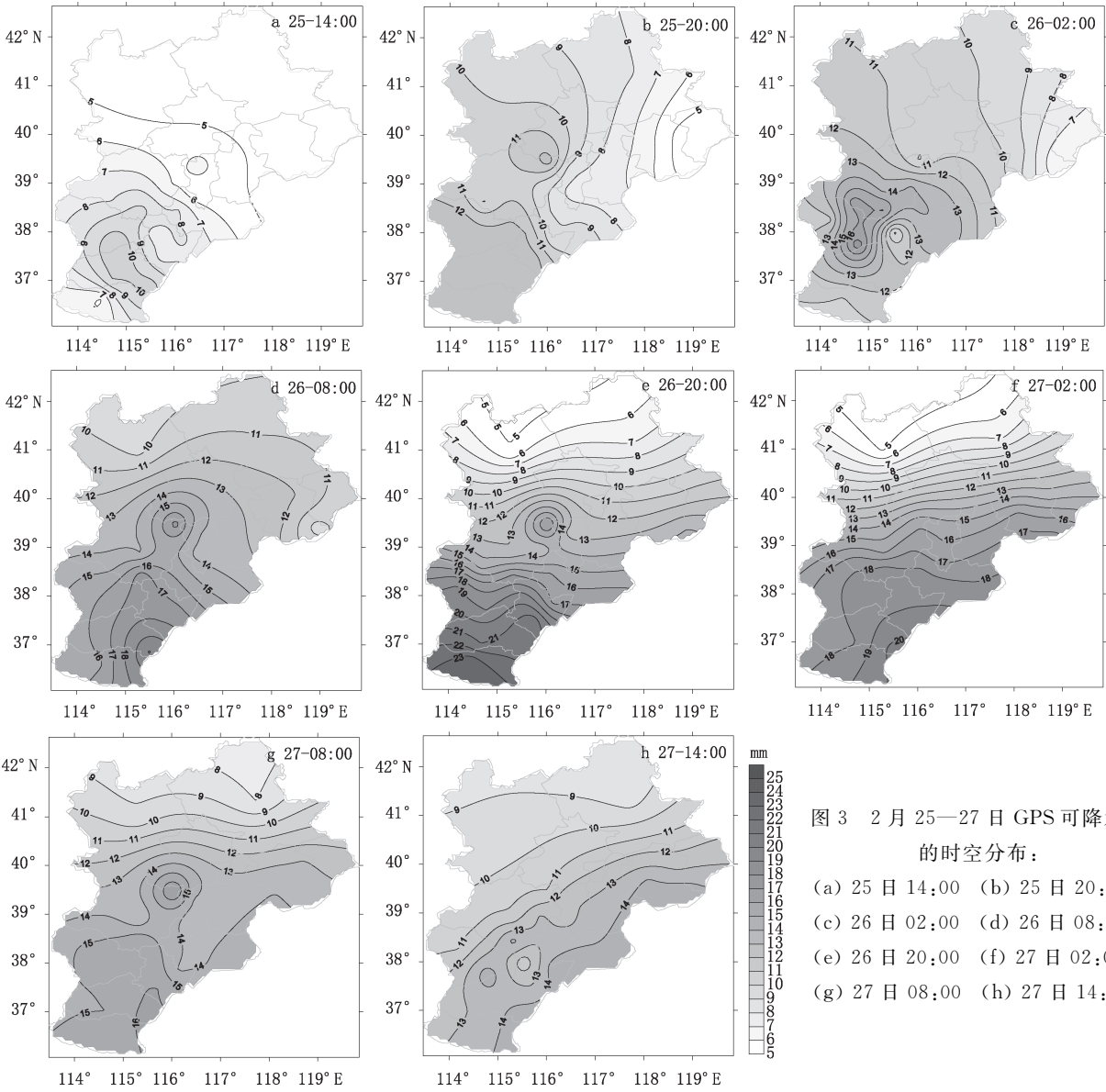


图 3 2 月 25—27 日 GPS 可降水量  
的时空分布：  
(a) 25 日 14:00 (b) 25 日 20:00  
(c) 26 日 02:00 (d) 26 日 08:00  
(e) 26 日 20:00 (f) 27 日 02:00  
(g) 27 日 08:00 (h) 27 日 14:00

2.2 单站分析

为了对 GPS 可降水量(GPS PWV)和降水量(R)进行逐时加密分析,选取有固态降水自动观测任务且降雪比较明显的石家庄的平山、保定的涿州和衡水的深州 3 个的 GPS 测站进行单站分析。

2.2.1 石家庄平山

第 1 次降水过程出现在 26 日 04:00—08:00,过程降水量为 2.3 mm,其中小时降水量最大为 0.8 mm,出现在 26 日 06:00。降水出现在 PWV 降至低谷后的再次上升阶段。降水之前 PWV 经历了 24 日 18:00、25 日 09:00 和 25 日 17:00—23:00 3 次极大值,峰值分别为 11.3、9.9 和 13.8 mm。此阶

段主要特点是降水出现在 PWV 谷值之后的再次上升阶段,降水过程中 PWV 和实际降水强度逐渐增加。

第 2 次降水过程出现在 26 日 22:00—27 日 10:00,过程降水量为 6.0 mm,小时最大降水量为 0.9 mm(26 日 23:00)和 1.0 mm(27 日 03:00)。降水出现在 PWV 最大值之后的下降阶段,其中 26 日 21:00—22:00PWV 对应的峰值为 20.5 mm 和 20.8 mm。此阶段主要特点是降水出现在 PWV 峰值之后,降水过程中 PWV 逐渐下降;相比而言,第 2 阶段的 PWV 值和实际降水量均较第 1 阶段大(图 4a)。

2.2.2 保定涿州

第 1 次降水过程出现在 26 日 05:00—10:00,过程降水量为 3.1 mm,小时最大降水量为 1.1 mm (26 日 07:00)。降水出现在 PWV 降至低谷后的再次上升阶段。降水之前 PWV 经历了 24 日 19:00、25 日 19:00 的 2 次极大值阶段,峰值分别为 8.1 mm 和 13.5 mm。降水过程中 PWV 最大值为 17.6 mm(26 日 09:00),此阶段主要特点是降水出现在 PWV 上升阶段(26 日 02:00 的 9.9 mm 上升至 09:00 的 17.6 mm),实际降水先增后减。

第 2 次降水过程出现在 27 日 05:00 至 27 日 12:00,过程降水量为 3.0 mm,小时最大降水量为 0.9 mm(27 日 07:00)。此阶段 PWV 持续维持在高值阶段(26 日 15:00 至 27 日 09:00 PWV 持续位于 14.5~17.2 mm),实际降水出现在 PWV 小峰值之后的下降阶段。过程主要特点是降水出现在 PWV 的高值(弱峰值之后的下降期)阶段,随着 PWV 的下降,实际降水也呈逐渐减弱趋势(图 4b)。

2.2.3 衡水深州

第 1 次降水过程出现在 26 日 09:00—13:00,过程降水量为 0.8 mm,小时最大降水量为 0.4 mm (26 日 12:00)。PWV 之前经历了 24 日 19:00、25 日 19:00 至 26 日 00:00、26 日 09:00 3 次极大值阶段,峰值分别为 11.0 mm、12.8 mm 和 18.1 mm。而实况降水出现在 26 日凌晨,26 日 08:00 降雪量为 0.3 mm(自动站小时降水数据滞后)。此阶段主要特点是降水出现在 PWV 上升阶段(从 26 日 02:00 的 9.7 mm 升至 26 日 09:00 的 18.1 mm, PWV 上升速率为每 7 h 8.4 mm)。

第 2 次降水过程出现在 26 日 23:00 至 27 日 11:00,过程降水量为 7.5 mm,小时最大降水量为 1.7 mm(27 日 02:00),在降水之前, PWV 在 26 日 21:00 出现最大值 20.7 mm。此阶段主要特点是实际降水出现在 GPS 可降水量峰值之后的下降阶段,降水之前 PWV 均经历了快速上升阶段,由 26 日 16:00 的 15.9 mm 升至 26 日 19:00 的 20.2 mm, PWV 上升速率为每 3 h 4.3 mm(图 4c)。

2.2.4 对比分析

(1)本次降雪过程中,平山、深州和涿州 GPS 可降水量均高于旬平均值,最大值分别为 20.8 mm、20.7 mm、17.6 mm,较同期平均值(5.8 mm、5.5 mm 和 6.5 mm)明显偏高。说明高值可降水量是降

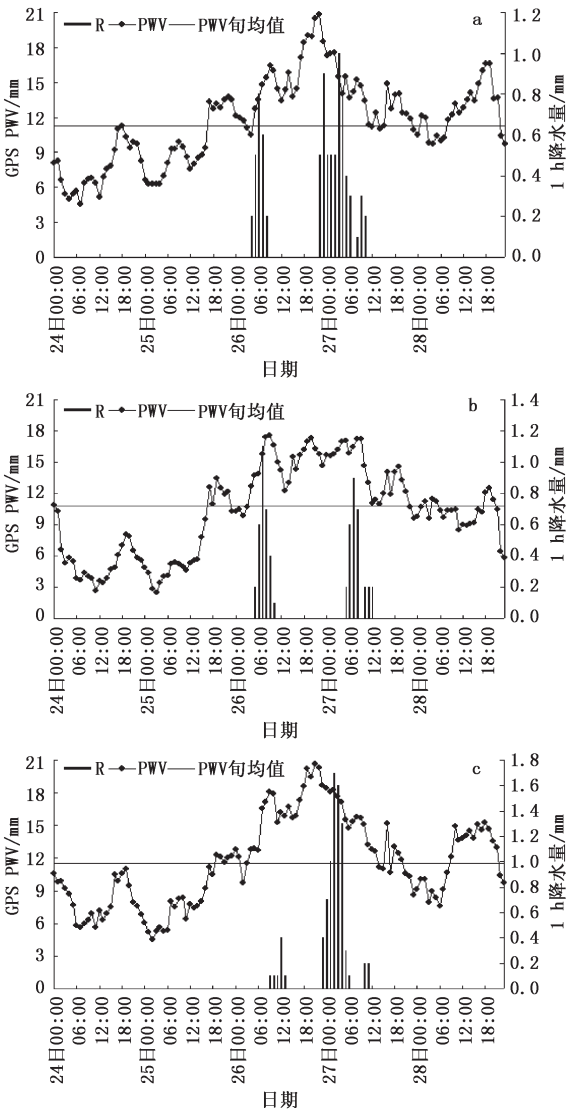


图 4 2 月 24—28 日 GPS 可降水量和降水量逐时演变曲线:(a)平山;(b)涿州;(c)深州

水发生的必要条件。

(2)对比两个阶段降水过程,平山和深州第二阶段的实际降水和 GPS 可降水量高于前阶段,涿州相差不大,这与降水影响系统和水汽输送紧密相关。

(3)第 1 阶段的实际降水出现在 PWV 谷值后的上升阶段,而第 2 阶段的降水出现在 PWV 峰值阶段或峰值之后的下降阶段,降水前 PWV 经历了快速上升过程。这与降雪的影响系统紧密有关,第 1 阶段的降雪的主要影响系统是高空槽和地面倒槽前部的东北风,降雪过程中 GPS 可降水量不断增加,对应的实际降水先增后减,这与高空槽移动导致的水汽输送多少有很大关系;第 2 阶段的降雪主要



表现为回流降雪,降雪前期 GPS 可降水量迅速增长,实际降水出现在 GPS 可降水量峰值及下降阶段,随着地面冷高压的逐渐南压,GPS 可降水量逐渐下降,实际降水逐渐减小停止。

3 探空层结曲线分析

选取河北省的邢台探空站,对此次强降雪天气过程的探空层结进行分析。图 5 为强降雪天气过程中的水汽压随高度变化的探空层结曲线,可以看出:降雪过程中湿层厚,85% 以上的水汽集中在 600 hPa 以下;水汽压中低层较大、高层逐渐减小。

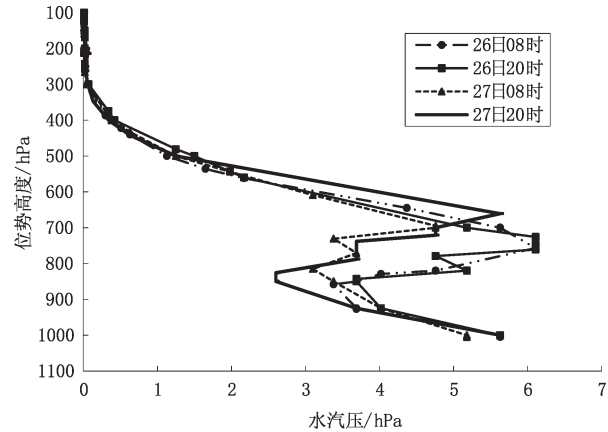


图 5 2011 年 2 月 26—27 日邢台探空水汽压层结曲线

在降雪过程中,在低层(1000 hPa 以下)水汽充沛,水汽压数值一直大于 5 hPa;近地层(925~750 hPa 之间)存在水汽压的低值层,其中 26 日低值层位于 925~829 hPa,27 日升至 925~731 hPa,低值层高度略有增高,且水汽压数值也有所减小。这与地面东北风有很大关系,其中前阶段地面倒槽由“南—北”向转为“东北—西南”向,河北省自北向南转受倒槽前部的东北风控制;后阶段地面冷高压不断南压,河北省处于高压底部的东北风控制;在中层 700 hPa 左右出现水汽压(高湿)中心,其中 26 日水汽压最大值达 6.11 hPa,出现高度位于 750 hPa 上下,27 日水汽压降至 4.76~5.73 hPa,出现高度抬升至 695~661 hPa。中层出现高湿的原因主要在于 700 hPa 偏南气流的水汽输送,在高空槽降雪阶段,水汽输送带为 700 hPa 槽前的西南低空急流,而在回流降雪阶段,700 hPa 的暖切变前部的偏西风或西南风及风向辐合是造成水汽聚集在降雪区的主要原因。

在此次降雪过程中,探空层结曲线(图 5)表明

水汽压在近地层存在湿度小值区,与 2009 年 11 月 10 日的强降雪类似,与东北风回流降雪造成的低层湿度减小有很大关系。

4 结论与讨论

(1)在降雪过程中,GPS 可降水量表现为以下特点:河北省北部的 GPS 可降水量普遍低于南部测站,而且高值持续时间短。降雪过程前期,GPS 可降水量由西南向东北逐渐增大,后期自北向南减小,与西南暖湿气流的输送和东北冷高压的南压对应。

(2)高值可降水量是降水发生的必要条件,GPS 可降水量的高值阶段对应降雪过程。第 1 阶段降雪的主要影响系统是高空槽和地面倒槽前部的东北风,降雪过程中 GPS 可降水量不断增加,对应的实际降水先增后减,这与高空槽移动导致的水汽输送多少有很大关系;第 2 阶段的降雪主要表现为回流降雪,降雪前期 GPS 可降水量迅速增长,实际降水出现在 GPS 可降水量峰值及下降阶段。随着冷高压南压的影响,GPS 可降水量逐渐下降,实际降水也逐渐减弱至停止。

(3)在回流降雪阶段的探空层结曲线上,在地面附近和 700 hPa 的出现高湿层,而二者之间的低空却是低湿层。

需要说明的是,本文结论只是对河北省 2011 年 2 月 25 日夜间到 27 日白天的一次强降雪个例分析归纳的,随着 GPS 可降水量这种新型水汽资料的日益丰富,还有待于通过更多个例的研究来加以进一步验证和完善。

参考文献

[1] 赵桂香. 一次回流与倒槽共同作用产生的暴雪天气分析[J]. 气象,2007,33(11):41-48.  
[2] 张迎新,侯瑞钦,张守保. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验[J]. 气象,2007,33(9):25-32.  
[3] 王正旺,苗爱梅,庞转堂,等. 山西中南部区域性暴雪天气诊断分析[J]. 高原气象,2010,29(2):531-538.  
[4] 梁军,张胜军,王树雄,等. 大连地区一次区域暴雪的特征分析和数值模拟[J]. 高原气象,2010,29(3):744-754.  
[5] 杨成芳,李泽椿,李静,等. 山东半岛一次持续性强冷流降雪过程的成因分析[J]. 高原气象,2008,27(2):442-451.  
[6] 陈小雷,景华,全美然,等. 地基 GPS 遥测大气可降水量应用精度和范围[J]. 气象科技,2009,37(1):85-88.  
[7] 王皓,李国平,陈娇娜. 运用 GAMIT10.34 解算成都地区的 GPS 可降水量[J]. 成都信息工程学院学报,2009,24(5):478

- 483.

[8] 李国平,黄丁发. GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望[J]. 气象科技,2004,32(4):201-205.

[9] 符睿,段旭,刘建宇,等. 云南地基 GPS 观测大气可降水量变化特征[J]. 气象科技,2010,38(4):456-462.

[10] 杨红梅,徐宝祥,周秀骥. GPS 资料在天气分析中的应用[J]. 气象科技,2000,28(4):32-34.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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. 气象科学,2008,28(4):389-394.

# Analysis of a Return-Flow Snowfall in Hebei Province Using GPS Precipitable Water Vapor

Li Guocui<sup>1</sup> Zhang Yingxin<sup>2</sup> Li Guoping<sup>3</sup> Zhao Weiliang<sup>1</sup>

(1 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081; 2 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021; 3 College of Atmospheric Sciences, University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract:** Based on the precipitable water vapor received from the ground-based GPS and ground automatic stations, as well as weather data, a return-flow snowfall in Hebei province is studied. The results show that: (1) GPS precipitable water vapor increased from southwest to northeast before the snow, corresponding to the warm and humid southwesterly flow, and decreased from north to south after the snow because of the clod high. (2) The main effect system was the high-level trough in the first stage; GPS precipitable water vapor showed increasing trend, and the actual precipitation increased first and reduced then; the main effect system was the return-flow in the second stage, and the actual precipitation occurred at the peak of GPS precipitable water vapor or during the decreasing phase. When the cold high moved from north to south, GPS precipitable water vapor decreased, and the actual precipitation weakened and stopped. (3) In the sounding stratification of the return-flow snowfall, the high humidity layers were near the ground and the 700 hPa layer, and the low humidity layer was between the high humidity levels.

**Key words:** GPS precipitable water vapor, return-flow snowfall, sounding stratification