

地基 GPS 水汽资料在北京“7·10” 暴雨过程研究中的应用

楚艳丽¹ 郭英华^{2,1} 张朝林¹ 王迎春¹

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 100089; 2. 美国国家大气研究中心)

提 要: 利用 2004 年 7 月 9—11 日北京房山地基 GPS 探测网逐 30 分钟柱积分水汽总量(PW, Precipitable Water Vapor)资料,通过分析和数值模拟研究了北京 2004 年 7 月 10 日暴雨天气过程。观测分析表明:地基 GPS 测站上空水汽总量值的时间变化趋势对暴雨的发生、发展以及过程降水量的分析和预报有一定指示意义。利用 NCEP 全球预报系统 GSF 分析场资料作为背景场,采用 12/4km 双向两层嵌套 WRF 模式及其三维变分系统,通过同化 7 月 9 日 1200 UTC 地基 GPS 水汽总量等观测资料进行了 36 小时数值对比试验。数值研究表明:地基 GPS 水汽总量数据资料的初值同化明显增强模式初始场湿度,明显提高模式对该暴雨过程降水时段、落区和强度的预报水平。

关键词: 地基 GPS 水汽 暴雨 降水预报

Application of the Ground-based GPS/PW Data to Investigate the “7·10” Heavy Rainfall Event in Beijing

Chu Yanli¹ Guo Yinghua^{2,1} Zhang Chaolin¹ Wang Yingchun¹

(1. Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089;

2. The National Center for Atmospheric Research, Boulder CO. 80301, USA)

Abstract: The precipitable water vapor (PW) data at 30-min intervals are analyzed and assimilated into the WRF model for the “7·10” Beijing heavy rainfall event that occurred in the period of 9-11 July, 2004. Observational results show that the temporal variation of the GPS/PW is an instructive factor for the analysis and prediction of this heavy rainfall event. Using the WRF model

资助项目:科技部社会公益类项目(2005DIB3J098),国家自然科学基金项目(40705009),财政部中央级公益性科研院所基金项目(IUMKY200601),北京区域基金项目(BRMCCJ200704),中国气象局“京津冀地区地基 GPS 大气水汽观测资料应用研究”项目和“地基 GPS/MET 可降水观测资料在数值预报模式中的应用”项目共同资助

收稿日期:2007年8月1日; 修定稿日期:2007年10月10日

and its 3D-Var system with two-way and two-nested grids of 12/4km, three 36h numerical experiments are conducted to investigate the impacts of PW with the variation analyses at 1200 UTC of July 9 as the initial fields. Numerical experimental results show that the assimilation of GPS/PW observations significantly helps to improve the moisture analysis at the initial time, then helps to improve forecasts of the location, intensity and evolution of this heavy rainfall event.

Key Words: ground-based GPS water vapor heavy rainfall precipitation forecast

引 言

尽管水汽在大气中所占的比例最多不超过 4%,但是水汽在各种大气物理过程中起着至关重要的作用,例如它是降水的基本条件。通常利用地基 GPS 方法遥感大气水汽总量的时间间隔小于 1 小时,水汽总量的反演精度稳定优于 2mm。研究结果一致表明,测站水汽总量变化与本站降水关系密切,并且连续的 GPS 水汽总量数据对降水预报有一定的指导意义。近年来,国外、北京和上海等均对地基 GPS/PW 资料的分析和应用开展了大量研究,表明地基 GPS/PW 资料在数值预报中的同化应用能够显著改善模式初始场,明显提高数值模式对短期降水过程的预报水平^[1-7]。在北京,利用环北京地基 GPS 探测网资料^[8-9],开展了对暴雨天气过程的诊断分析^[10]、卫星水汽遥感模型检证^[11]、以及观测资料通讯方法^[12-13]等方面的研究。但针对暴雨过程,利用地基 GPS/PW 资料,同时从揭示水汽演变特征,以及资料在数值模式中的同化效果两方面进行综合研究的工作仍待深入。

北京 2004 年 7 月 10 日(简称“7·10”)暴雨的强降水中心位于城区,暴雨过程具有显著的局地性和突发性特征,只应用常规观测数据较难得到理想的预报结果。本文揭示了北京地基 GPS 水汽总量资料在“7·10”暴雨过程分析与预报中的一些作用。

1 地基 GPS 水汽总量计算方法

柱积分水汽总量,简称水汽总量(Pre-

cipitable Water vapor, PW, 单位 mm)是将测站天顶方向气柱内所有水汽折算为液态水时的水柱高度,通常定义为

$$PW = \frac{1}{\rho_l} IWV = \frac{1}{\rho_l} \int_0^{\infty} \rho_v dz \quad (1)$$

其中 ρ_l 为液态水密度(单位 $g \cdot cm^{-3}$), ρ_v 表示水汽密度(单位 $kg \cdot m^{-3}$), dz 表示相邻两个气层间的高度差(单位 m),因此水汽总量代表测站天顶方向水汽的积分值。地基 GPS 遥感水汽总量方法并不计算大气湿度的垂直分布,而是先由专业软件求解卫星信号在中性大气中的总延迟,然后根据经验公式推导出水汽总量。本文采用 4.2 版 Bernese 软件,利用全球导航卫星系统服务局(IGS, the International GNSS Service)精密卫星轨道数据,对 IGS 的 12 个地基 GPS 跟踪站和北京房山 8 个地基 GPS 测站求解 30 分钟间隔天顶方向中性大气总延迟^[14]。

2 北京房山地基 GPS 探测网

2003 年 4 月建成了地基 GPS 大气水汽探测网,8 个地基 GPS 测站都使用 Topcon 公司 TPS LEGACY-E 型接收机和 TOPCR3_GGD_CONE 型扼流圈天线,测站 GPS 接收机天线附近架设有 Vaisala 公司 PTU200 型三要素(温度、压强、相对湿度)自动气象站^[9-10]。

房山地基 GPS 探测网中 8 个 GPS 测站分别是青龙湖、水管站、闫村、窦店、官道、窑上、韩村河和琉璃河。该探测网地处北京南部平原,西面邻山,位于北京地区南部水汽输

送通道的上游,1997—2001 年北京夏季平均降水量资料显示房山地基 GPS 探测网处于北京地区累计降水高值区。该探测网各相邻测站间的距离为 5~10km,是目前国内测站间距较小且连续实时运行的地基 GPS 大气水汽探测网,它能够探测到局地水汽含量的中小尺度变化。

3 GPS 水汽总量分析

2004 年 7 月 10 日,受南方暖湿气流和中尺度对流系统的影响,北京大部分地区出现降水,降水中心位于北京城区,降水时段集中在 7 月 10 日 0800—1200 UTC,在这 4 个小时内城区平均降水量为 50.3 mm,其中天坛、丰台、天安门地区的降水量分别达到了 109、96 和 95 mm。

房山地基 GPS 探测网测站间距为 5~

10km,全网空间尺度为 20km×20km。从图 1 可以看出,8 个 GPS 测站水汽总量随时间变化的趋势基本一致,但并不完全相同。这表明在 5~10 km 尺度上的大气水汽并非均匀分布,而是存在着细微的变化。海拔最高和最低的测站分别是青龙湖和窑上,二者的海拔高度分别为 115m 和 38m。青龙湖和窑上水汽总量平均偏差达到 -2.2mm,均方根误差超过 3mm。青龙湖的海拔明显高于其它 7 个测站,这是青龙湖水汽总量明显小于其它测站水汽总量的原因。表 1 中平均偏差表明:(1) 因为大气水汽含量随高度的增大而很快减小,所以当测站间的高度差大于 50m 时,海拔低的测站水汽总量明显偏大,海拔高的测站水汽总量明显偏小;(2) 当测站之间的高度差小于 50m 时,测站水汽总量与测站海拔高度之间没有明显的相关性,测站水汽总量间的差异细微多变。

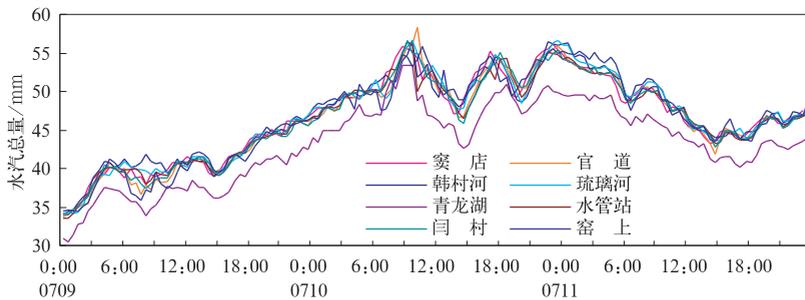


图 1 2004 年 7 月 9—11 日房山 8 个地基 GPS 测站上空水汽总量随时间的变化

表 1 2004 年 7 月 9—11 日,北京南郊站(54511)探空水汽总量及房山 7 个地基 GPS 测站水汽总量与窑上地基 GPS 水汽总量间的统计分析

| 站名 | 站点海拔/m | 平均偏差/mm | 均方根误差/mm |
|-------|--------|---------|----------|
| 54511 | 33 | -3.70 | 5.32 |
| 琉璃河 | 48 | 0.13 | 0.99 |
| 韩村河 | 51 | 0.20 | 1.18 |
| 官道 | 51 | -0.05 | 0.90 |
| 窑店 | 53 | 0.24 | 1.20 |
| 水管站 | 56 | -0.11 | 1.15 |
| 闫村 | 63 | -0.06 | 1.07 |
| 青龙湖 | 115 | -2.23 | 3.10 |

注:窑上海拔高度为 38m

房山地基 GPS 探测网各测站水汽总量

随时间变化趋势基本一致,下面只选取窑上水汽总量进一步分析。如图 2a 所示,从 9 日 0000 UTC 起窑上的水汽总量就开始持续缓慢地增加,到降水时刻 10 日 1000 UTC 为止,共计 34 个小时内,窑上水汽总量净增了 21.5 mm,同时段的卫星云图显示有南方暖湿气流持续影响北京及其周边地区。

从图 2b 可以看出,窑上 GPS 水汽总量从 9 日 0000 UTC 开始增加,地面比湿在 10 个小时后骤增至 $17\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在这 10 小时没有降水过程,之后地面比湿并不随着水汽总量的增加而继续增大,表明这期间持续的

水汽输送主要来自高空。降水始于 10 日 1000 UTC,此时地面比湿迅速下降并一直保持在 $15\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。分析相关资料表明,降水发生后北京仍然受到南方暖湿气流的影响,所以此后 GPS 水汽总量仍在高值区波动。在本次降水过程中,由于降水使得大气中的水汽转变为液态水,从而降低了大气中的水汽含量,并且水汽输送主要来自高空,因此地面比湿就难于反映出整层大气水汽含量

的变化。降水开始时伴随有地面气压的明显增大和温度的明显减小,这反映出暴雨造成了中尺度高压;降水开始后测站地面处温度露点差明显减小并趋于零,降水结束后温度露点差增大。上述观测和分析说明,尽管在本次暴雨过程中地面气象要素发生了显著的变化,但是地面气象要素难以及时准确地反映出整层大气的湿度变化。

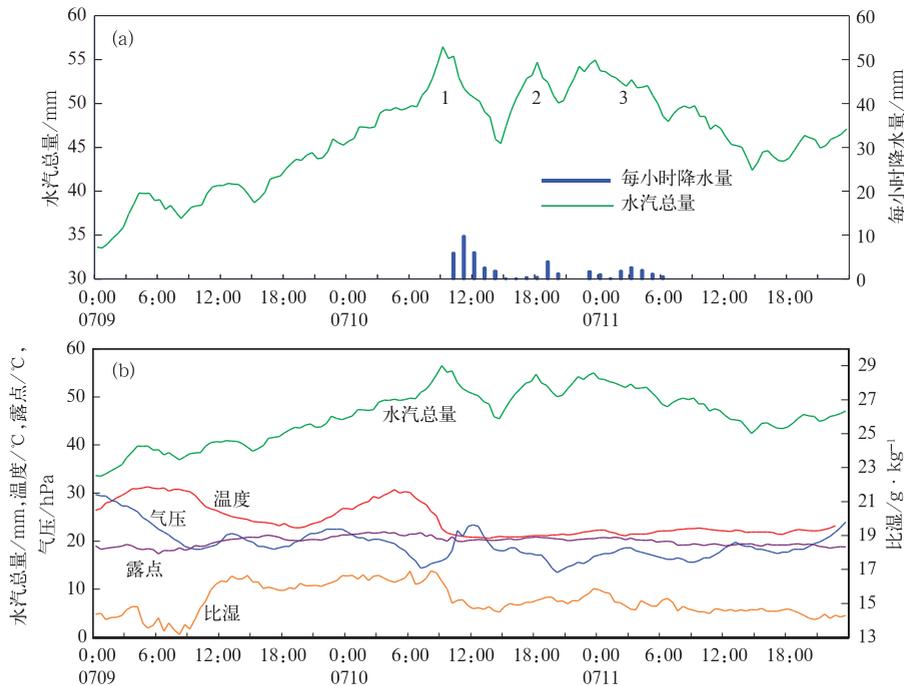


图 2 2004 年 7 月 9—11 日窑上水汽总量、房山雨量站每小时降水量(a)和 GPS 水汽总量和该站地面气象要素的时间变化(b)
1、2、3 依次表示 3 个降水时段,气压表示为观测值减去 970hPa

充足的水汽供应和大气的上升运动是降水的必备条件。暖湿空气在上升过程中伴随着巨大的潜热释放,此时若有充足的水汽供应,大气中水汽含量会迅速增加,当大气水汽含量达到饱和状态,水汽转变为降水后,大气中水汽含量会迅速下降,因此降水前后水汽总量的变化会呈现突变(急增或急降)的特征。本次强降水大致分为 3 个时段,从图 2a 可以发现:(1) 水汽总量达到 50mm 后,伴随水汽总量的急增,1~3 小时内产生了降水,

每段降水结束后,水汽总量急降;(2) 水汽总量维持在 50mm 以上的时间越长,则降水时段越长,反之则越短;(3) 水汽总量急增和急降的绝对值和梯度越大,则该时段内最大每小时降水量越大,反之越小;(4) 水汽供应显著减少,即水汽总量完全下降到 50mm 以后,整个降水过程结束。不难理解,如果降水前水汽供应越充足,上升运动越强烈,那么潜热释放就越多,水汽总量急增的幅度就越大,则易于产生较强的降水;如果降水强度越大,

水汽含量减少的速度就越快,这使得水汽总量维持在高值以上的时间变短,从而造成水汽总量急降的梯度变大。

4 GPS/PW 对“7·10”降水预报的影响和分析

本文以 NCEP 全球预报系统 (GSF, Global System of Forecasting) 分析场资料

作为背景场,利用 WRF 三维变分系统对 7 月 9 日 1200 UTC 的常规探空、常规地面、地面自动气象站及房山 8 个地基 GPS 测站水汽总量观测数据进行同化分析,然后以分析结果作为 WRF 模式初始值进行 36 小时数值预报试验。这里 WRF 模式采用 12km 和 4km 双向两层嵌套,垂直分层 35 层,4km 网格区域范围是 1680km×1680km,4km 采用 WSM-6 显示降水方案,没有采用积云参数化方案。

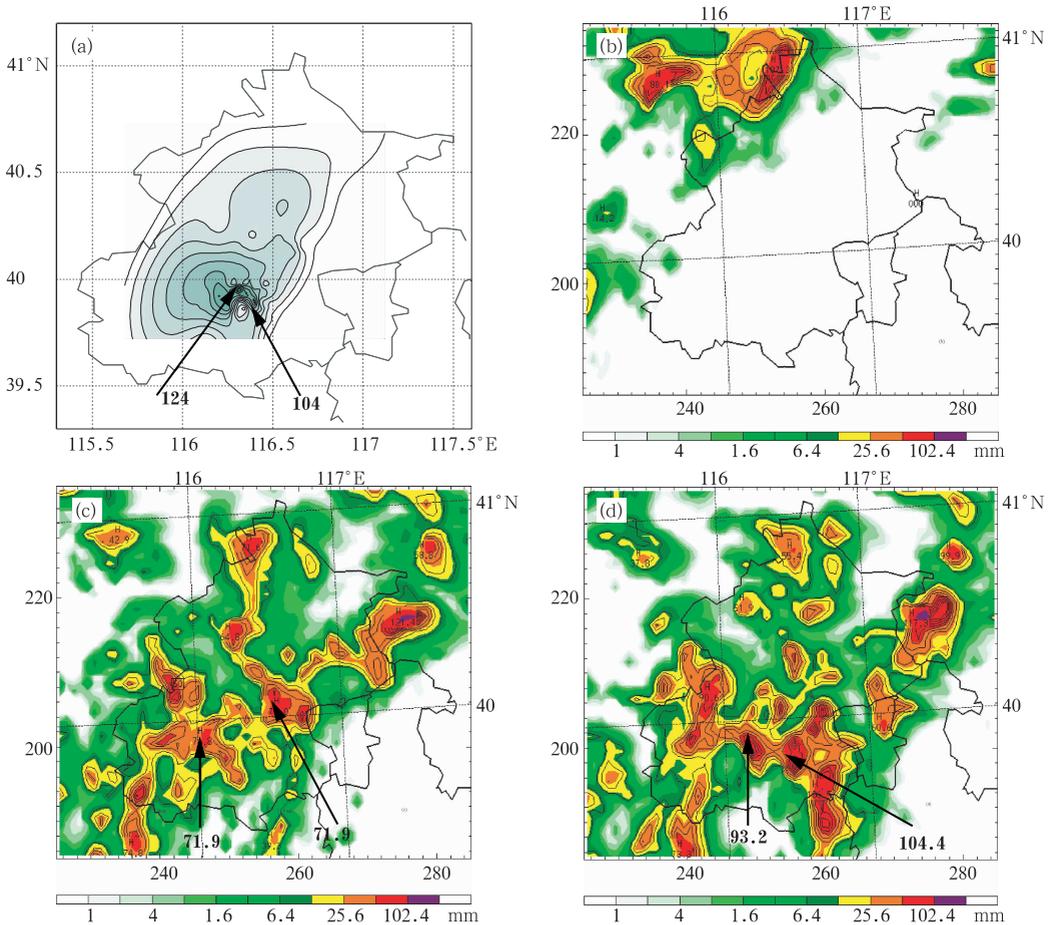


图 3 2004 年 7 月 10 日 1400—2000 UTC 6 小时累积降水实况及 WRF 预报结果
(a) 6 小时累积降水实况, (b) WRF 只采用 NCEP GSF 背景场的 6 小时累积降水, (c) WRF 以 NCEP GFS 为背景场、同化自动气象站、常规地面、54511 常规探空观测资料的 6 小时累积降水, (d) 在 (c) 的基础上 WRF 同化房山地基 GPS 水汽总量资料的 6 小时累积

图 3 是 7 月 10 日 1400—2000 UTC 6 小时累积降水的实况和 WRF 的预报结果。图 3 表明,与只用 NCEP GFS 资料作为背景

场相比,同化常规地面、常规探空和自动站观测资料后 WRF 模式对降水预报有了较大的改进,在此基础上同化房山地基 GPS 水汽总

量资料后 WRF 模式对该次暴雨的降水时段、降水落区和降水强度的模拟结果最符合实际观测。从图 4 中可以看出,同化房山地基 GPS 水汽总量后, WRF 模式初始场的湿度明显增加,在降水中心及其以南的水汽输送带上水汽总量增加了 3~4mm。又如图 5 所示,尽管探空水汽总量与 GPS 水汽总量的变化趋势基本一致,但是探空水汽总量比窑上 GPS 水汽总量系统性偏小 3.7mm(表 1),在 9 日 1200 UTC 二者差值达到了 8.6mm,所以同化房山地基 GPS 水汽总量资料显著提高了 WRF 初始场的湿度。北京地区唯一的业务探空站(54511)获取的大气湿度信息有其空间代表性,它表示了探空站附近大气的湿度,但是不能精确地反映北京其它区域的大气湿度。造成探空和地基 GPS 水汽总量间存在偏差的主要原因有两点,一是测

站相距约 30km,水汽含量的中尺度变化导致出现偏差;二是无线电探空系统或 GPS 探测手段对水汽总量的测量差异导致出现偏差^[15]。

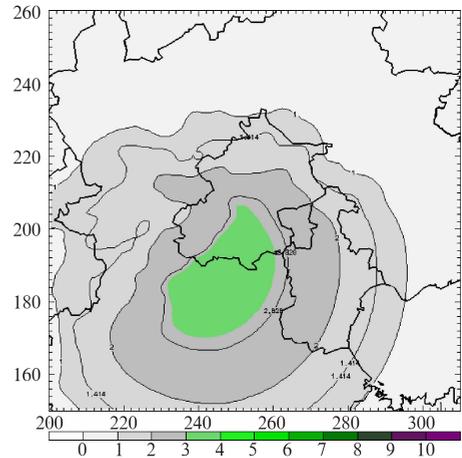


图 4 2004 年 7 月 9 日 1200UTC 同化房山地基 GPS 水汽总量后初始场湿度的变化

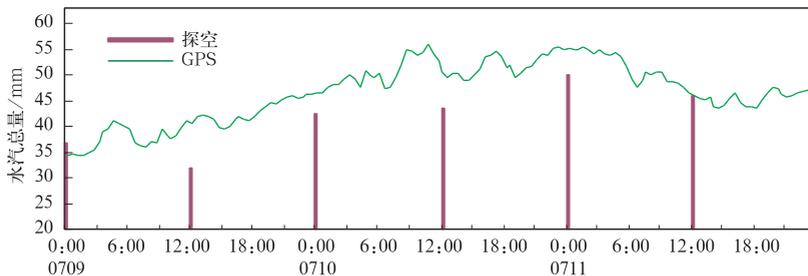


图 5 2004 年 7 月 9—11 日窑上 GPS 水汽总量和 54511 探空水汽总量的对比

5 结 论

利用 2004 年 7 月 9—11 日北京房山地基 GPS 水汽总量资料,分析了大气水汽的时空变化及其与降水过程的关系,并利用 WRF 及其三维变分系统进行了地面自动站、常规探空、常规地面观测和房山地基 GPS 水汽总量的同化分析和降水预报试验,主要得到以下结论:

(1) 对于地处平原且测站间距离小于

10km 的局地地基 GPS 探测站网,各测站水汽总量变化趋势基本一致,较大的海拔高度差异会造成测站间水汽总量的系统性偏差(海拔高的测站对应较小的水汽总量);海拔高度相近各测站间水汽总量的差异细微多变,不存在明显的系统性差异。

(2) 水汽总量与降水过程之间关系密切。水汽总量达到阈值并急增后 1~3 小时内有阶段性降水;水汽总量急降至阈值以下,阶段性降水结束。水汽总量急增和急降的幅度越大,对应时段内的最大每小时降水量也

越大。

(3) 利用 WRF 及其三维变分系统对房山地基 GPS 水汽总量进行了同化分析和降水预报试验,结果表明房山地基 GPS 水汽总量显著增强了初始场湿度,明显提高 WRF 模式降水预报准确率。

(4) 在“7·10”暴雨过程中,地面气象要素很难反映出整层大气的湿度变化,这从另一方面揭示出地基 GPS 水汽总量在暴雨监测和预报中具有重要的作用。

需要说明的是,这里只是针对一次暴雨过程的分析,表明地基 GPS/PW 对分析和预报本次降水过程有重要的价值。在今后的工作中应该分析总结更多降水过程,以揭示出地基 GPS/PW 在降水预报中的普遍作用。

参考文献

- [1] 曹云昌,方宗义,李成才,等. 利用 GPS 和云图资料监测北京地区中小尺度降水的研究[J]. 高原气象, 2005,24(1):91-96.
- [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] Guo Y. R., Y. H. Kuo, J. Dudhia, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case[J]. Mon. Weather Rev., 2000;128, 619-643.
- [4] Zhang C. L., M. Chen, Y. H. Kuo, et al. Numerical assessing experiments on the individual components impact of the meteorological observation network on the “July 2000” torrential rain in Beijing [J]. Acta. Meteor. Sinica., 2006,20(4):389-401.
- [5] Zhang C. L., C. P. Ji, Y. H. Kuo, et al. Numerical simulation of topography effects on the “00.7” severe rainfall in Beijing[J]. Progress in Nature Science, 2005,15 (9):818-826.
- [6] 袁招洪. GPS 可降水资料应用于 MM5 模式的变分同化试验[J]. 气象学报, 2005, 63(4):391-404.
- [7] 姚建群,丁金才,王坚捍,等. 用 GPS 可降水量资料对一次大一暴雨过程的分析[J]. 气象, 2005,31(4):48-52.
- [8] 张朝林. “环北京四维大气水汽实时监测的“天眼”——环北京地基全球定位系统气象监测平台投入应用[J]. 中国高校科技与产业化, 2006,8:44-45.
- [9] 谢璞,张朝林,王迎春,等. 北京地区单双频地基 GPS 大气水汽遥测试验与研究进展[J]. 应用气象学报, 2006,17(suppl.):28-34.
- [10] 李青春,张朝林,楚艳丽,等. GPS 遥感大气可降水量在暴雨天气过程分析中的应用[J]. 气象, 2007, 33(6):51-58.
- [11] Liu S. W., C. L. Zhang, X. F. Guo, et al. Comparison of MODIS Atmospheric Water Vapor Retrieval, Meteorological Models Tropospheric Delay Estimation with the Results Derived from GPS[G]. Proceeding of 2006 IEEE International Geoscience&Remote Sensing Symposium&27th Canadian Symposium on Remote Sensing (IGARSS2006).
- [12] 张京江,张朝林,王迎春,等. 地基 GPS 水汽遥测系统远程通讯与控制系统及其初步应用[J]. 气象科技, 2005,33(3):271-274.
- [13] 张京江,江武鹏,张朝林,等. GPRS/CDMA 无线通讯技术在 GPS 数据传输中的应用[J]. 气象科技, 2007,35(1):139-142.
- [14] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.
- [15] Chu Y. L., Y. H. Kuo, J. Braun, et al. Dry Bias in the Beijing Radiosonde Soundings Revealed by GPS and WVR Measurements[G]. 2006 AGU Western Pacific Meeting, Beijing.