杨晓春,王建鹏,白庆梅,等. 西安不同季节降水过程中大气可降水量变化特征[J]. 干旱气象,2013,31(2):278-282, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0278

西安不同季节降水过程中大气可降水量变化特征

杨晓春,王建鹏,白庆梅,惠 英,解 斌

(陕西省西安市气象局,陕西 西安 710016)

摘 要:以西安地区地基GPS站点观测资料为基础,结合地面自动气象站数据反演GPS大气可降水量(P_{WV}),在将其与探空水汽含量进行精度对比的基础上,分析GPS/P_{WV}在不同类型降水过程中的演变特征及预报指示意义。结果表明:GPS/P_{WV}与探空水汽含量随时间演变趋势一致,其相关系数达0.93;冬春季GPS/P_{WV}变化平缓,在降水之前有较长的增长期,预报指示意义强;夏季降水中则变化剧烈,降水之前无需长时间的水汽积累,预报指示意义弱。

关键词:GPS/P_{WV};精度检验;演变特征

文章编号:1006-7639(2013)-02-0278-05 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0278

中图分类号:P458.1+2 **文献标识码**:A

引 言

水汽作为大气的一种主要成分,其变化与降水的发生、发展直接相关,但水汽的分布不均匀,时空变化大,较难推测、计算。常规一日2次的探空数据很难满足气象降水预报中对水汽监测的需求。GPS遥感技术能够连续不间断的观测水汽变化,且具有成本低、精度高的优点,可被广泛应用于天气分析与预报中。Suelynn Choy利用GPS资料分析了澳大利亚一次暴雨过程,结果表明GPS/P_{WV}(Precipitable Water Vapor,大气可降水量)的时空变化与暴雨过境强度相关,并存在一条密集的P_{WV}带伴随着锋面[1];Seko发现GPS监测网对湿区探测的反应总是领先于自动气象观测站的观测[2]。近年来,我国各地区广泛建立GPS站,开展本地化试验。姚建群利用长江三角洲GPS/P_{WV}数据对一次大到暴雨过程进行了分析,得出了降水量出现50 mm的时间与当地GPS/P_{WV}变化的对应关系[3]。李廷兴等在广东汕头GPS/P_{WV}与降雨量的关系研究中发现,GPS/P_{WV}的高值时段与降雨过程高度相关,GPS/P_{WV}在数值上超过基准值以后才具备降雨条件[4]。王维佳等利用GPS/P_{WV}数据分析了川西高原地区可降水量的空间和时间的分布特征[5]。崔丽娜等研究了塔克拉玛干沙漠腹地GPS/P_{WV}在不同季节的日变化特征[6]。以上研究表明,由于气候和地形的不同,我国不同地区GPS可降水量的变化特征及其与降水的关系存在明显差异。

西安地处黄土高原区的关中盆地[7],随着社会经济的发展,该地区水资源供需失衡日益突出,为科学评估空中水资源,需要开展可降水量的研究[8-10]。西安地区地基GPS水汽解算系统建立于2010年,其目标是为本地区的大气探测、天气变化监测提供新资料,开展本地化的GPS可降水量研究。本文利用西安地区地基GPS观测网资料,获得实时、连续的高时间分辨率水汽资料,选取2011年典型个例,对关中盆地东部地区不同季节降水天气过程中地基GPS可降水量的特征进行对比分析,为在今后的降水预报中使用GPS/P_{WV}资料打下基础。

1 基本原理与计算方法

GPS信号在穿过大气层时,受电离层电子和平流层、对流层大气的折射影响,会产生信号的延迟,分为电离层延迟和对流层延迟。其中电离层延迟可通过双频或电离层模型基本消除,对流层延迟无法消除且由2部分组成:

$$Z_{TD} = Z_{HD} + Z_{WD} \tag{1}$$

收稿日期:2012-12-12;**改回日期**:2013-03-07

基金项目:陕西省气象局预报员专项项目(2013Y-18)和陕西省气象局"火车头计划"数值模式应用研究团队共同资助

作者简介:杨晓春(1984-),女,汉族,陕西安塞人,硕士,工程师,从事GPS气象及数值模拟研究. E-mail:y_xiaochun@sina.com

(1)式中 Z_{TD} 为对流层延迟,Z_{HD} 为大气干延迟,Z_{WD} 为大气湿延迟。大气干延迟 Z_{HD} 可用 Saastamoinen 模型消除其影响,因此,大气可降水量 P_{WV} 可由对流层湿延迟 Z_{WD} 计算:

$$P_{WV} = Z_{WD}/\prod \tag{2}$$

(2)式中 $\prod$ 为转换系数,且

$$\prod = \frac{10^6}{\rho_w R_v (k'_2 + k_3/T_m)} \tag{3}$$

(3)式中 ρ_w 是水汽密度,R_v 是水汽比气体常数,k'_2、k_3 是大气折射指数的相关系数,T_m 是对流层大气柱的加权平均温度,在未做本地化模型建立实验前,本文采用中纬度地区常用的 Bevis 回归算法求得 $\prod \approx 0.15$[11]。

本文利用 2011 年西安地区 7 个 GPS 基准站(图 1)的观测资料和瑞士伯尔尼大学天文研究所开发的 Bernese 软件解算天顶总延迟量,再结合测站的位置坐标、对应气象数据,根据上述原理公式,即可获得各测站 60 min 间隔的大气可降水量。将反演的可降水量与探空可降水量进行精度对比的基础上,分析 GPS/P_{WV} 在不同季节降水天气过程中的演变特征及预报指示意义。

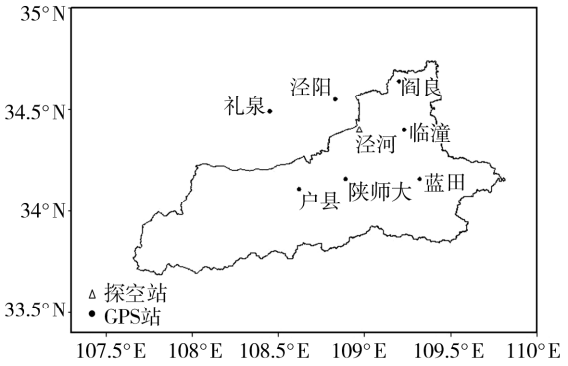

图 1　西安地区 GPS 大气探测基准站分布图

Fig. 1　The distribution of GPS sites in Xi'an area

2　GPS/P_{WV} 数据精度检验

2.1　探空可降水量的计算

为验证 GPS 反演可降水量的精度,利用西安泾河无线电探空数据中从地面到对流层顶各标准等压面 12 h 间隔的气压、气温、露点温度等资料计算探空可降水量(SOUND/P_{WV}),与 GPS 反演数据进行同时刻对比,以确定 GPS/P_{WV} 精度。

在计算 SOUND/P_{WV} 时,本文采取线性内插温度和露点的方法,把中间高度上的温度和露点作为该层的平均气象参数,然后根据公式计算水气压、平均水汽密度,再乘以该层的厚度得到该层的 P_{WV},最后计算各层的总和,得到测站上空总的可降水量。具体公式如下:

当露点 >0 ℃时:

$$e = 6.11 \times 10^{\left(\frac{7.45 \times t_d}{235 + t_d}\right)} \tag{4}$$

当露点 <0 ℃时:

$$e = 6.11 \times 10^{\left(\frac{9.5 \times t_d}{265 + t_d}\right)} \tag{5}$$

式中 t_d 为露点温度,水气压 e 的单位为 hPa。

再根据公式计算各层的水汽密度:

$$a = 217\frac{e}{T} \tag{6}$$

其中,a 的单位为 g/m^3。

2.2　精度检验

根据西安泾河探空站每天 2 次(北京时间 08 时和 20 时)获得的气压、温度和露点温度垂直分布资料,按照上节所述方法可计算 SONDE/P_{WV}。选取 2011 年水汽变幅较大的时段(7 ~ 9 月)内的陕西师范大学站 GPS/P_{WV} 与 SONDE/P_{WV} 进行比较,共配对 91 组数据,如图 2 所示。两者的平均偏差为 3.3 mm,均方根误差为 4.3 mm,相关系数为 0.93(通过信度为 0.05 的 t 检验)。目前国际发达国家的反演精度较高,均方根误差在 1 ~ 3 mm 之间,国内北京地区可以达到 3 mm 以下[12],而拉萨、武汉、汕头、阳江等地都在 4 mm 以上[13-15]。因此西安地区的 GPS/P_{WV} 数据在精度方面可以满足预报应用的需求,也有利于开展对 GPS/P_{WV} 数据的时间变化特征分析。

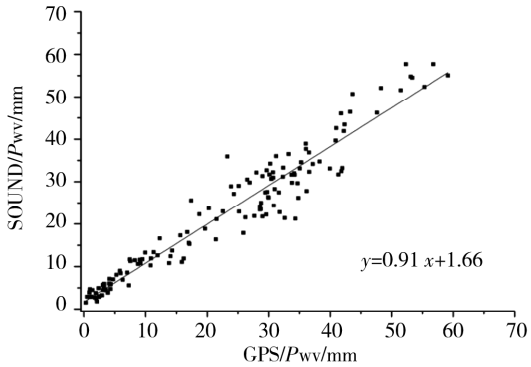

图 2　西安地区 GPS/P_{WV} 与 SOUND/P_{WV} 的散布图

Fig. 2　Scatter diagram of GPS/P_{WV} and SOUND/P_{WV} in Xi'an area

同时,西安地区 GPS 测站反演的可降水量数据能够快速连续反映测站上空的水汽变化状况,并且具有较高精度,能有效弥补常规探空数据的不足。2011 年 7 月 4 ~6 日西安地区出现了当年入汛以来最大的一次降水过程,全区普降中到大雨,秦岭山区达到大到暴雨,整个过程的降水量为 30.4 ~ 52.6 mm。图 3 是本次过程中临潼、礼泉站的 GPS/P_{WV} 与西安泾河探空站的 SONDE/P_{WV} 时间序列对比,其余 5 站的变化特征与该 2 站相同。可以看出,无论在可降水量的高值区还是低值区,两者都显示了较强的一致性。这表明西安地区的 GPS/P_{WV} 在连续的水汽监测中有较高的精度。

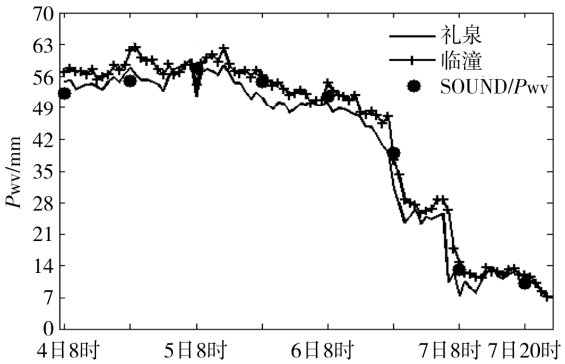

图 3 2011 年 7 月 4 ~7 日 2 站 GPS/P_{WV} 与 SOUND/P_{WV} 时间序列

Fig. 3 Time series of SOUND/P_{WV} and GPS/P_{WV} of 2 sites from July 4 to 7, 2011

3 不同季节降水天气过程中 GPS/P_{WV} 数据的演变特征

GPS 可降水量在降水天气过程中的演变特征与降水发生时间及降水量级有一定的对应关系,对降水预报具有较好的指示意义,这仍然是当前 GPS/P_{WV} 在气象中的重要应用之一[16-19]。西安属于季风气候区,雨季与干季降水发生时 GPS/P_{WV} 的变化情况有所不同,有必要分析研究不同季节、不同类型降水时 GPS/P_{WV} 的演变特征,明确预报指示意义。

3.1 冬季雨雪天气中 GPS/P_{WV} 的演变特征

2011 年 2 月 25 日至 3 月 1 日,西安地区持续阴雨雪天气,2 个主要的降水时段集中在 26 日 12 时至 15 时和 28 日 06 时至 21 时,其中 28 日的降水达到小到中雨雪的量级。从图 4 所示的 2011 年 2 月 22 日至 3 月 1 日西安地区 7 站逐小时平均 GPS/P_{WV} 变化曲线可以看出(图中 P_{WV} 的间断是由于 GPS 数据缺失所引起的,下同):GPS/P_{WV} 从 24 日 12 时开始上升,降水从 26 日 09 时开始,P_{WV} 到 25 日 16 时达到第一个峰值 17.85 mm,比月平均值高出 11.62 mm。2 次过程中的降水量峰值均与 P_{WV} 的峰值相对应。第二次降水所对应的 P_{WV} 峰值出现在 28 日 06 时,其后以 0.52 mm/h 开始下降,28 日 23 时降至月平均值以下,3 月 1 日 03 时降水结束,提前降水结束时间 4 h。

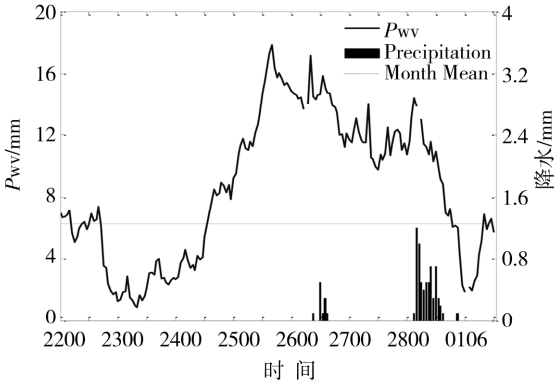

图 4 2011 年 2 月 22 日至 3 月 1 日 GPS/P_{WV} 和降水时间变化序列图

Fig. 4 Time series of GPS/P_{WV} and precipitation from Feb 22 to Mar 1, 2011

西安地区冬季干燥,空气湿度低,在降水发生之前一定会经历一段较长时间的水汽持续增长期。本次降水过程中,GPS/P_{WV} 开始增长的时间提前于降水发生时间 45 h,这个增长期对降水预报有很好的指示意义;当降水发生时,GPS/P_{WV} 持续稳定的维持在高于月平均值之上,随着降水强度的变化 GPS/P_{WV} 会出现波动,强度较大的降水则发生在不同时段 GPS/P_{WV} 的峰值。而 GPS/P_{WV} 的大幅回落(降幅 >0.5 mm/h)并降至月平均值以下可以指示降水的结束。

3.2 春季层状云稳定性降水中 GPS/P_{WV} 的演变特征

西安地区春季(3 ~5 月)的降水多为冷锋影响下的层状云稳定性降水。2011 年 4 月 1 ~2 日,西安地区出现入春以来最大的一次降水,降雨量为小到中雨。将 7 个 GPS 站的 P_{WV} 序列逐小时平均,结果如图 5 所示。降水过程开始前和结束后,可降水量分别有一段递增和递减的变化过程;降水期间,可降水量普遍高于月平值。P_{WV} 从 3 月 31 日 08 时开始上升,并超越 4 月月平均值(11.2 mm),降水开始于 4 月 1 日 15 时,P_{WV} 在 1 日 18 时达最大 23.9 mm,同时开始波动下降,至 2 日 18 时回落于月平均值以下。其上升期间增幅为 0.3 mm/h,回落期的降幅为 0.58 mm/h。本次降水过程中 GPS/P_{WV} 开始增长的时间提前于降水发生时间 31 h。

2011 年 5 月 20 ~ 21 日,西安地区出现春末的大降水,降雨量为大雨。7 个 GPS 站的 P_{WV} 逐小时平均序列(图 6)显示: P_{WV} 从 5 月 19 日 13 时开始完全超越 5 月月平均值 21.6 mm,其后持续波动上升,于 20 日 09 时达到最大 31.9 mm,增幅为 0.49 mm/h。降水开始于 20 日 11 时,GPS/P_{WV} 开始增长的时间提前于降水发生时间 22 h。P_{WV} 达到最大值后一直维持于高值区,于 20 日 16 时开始波动下降,于 21 日 09 时降至月平均值以下,同时降水逐渐停止,回落期降幅为 0.53 mm/h。

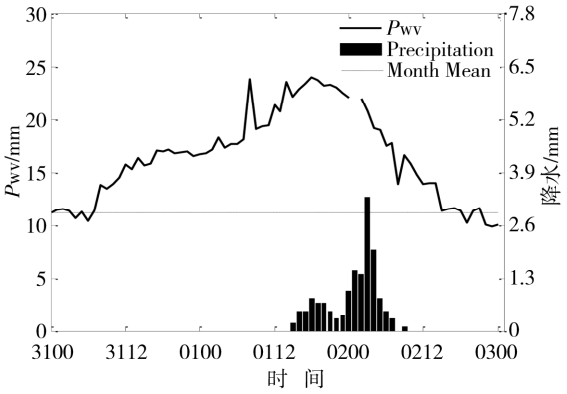

图 5　2011 年 3 月 31 日至 4 月 3 日 GPS/P_{WV} 和降水时间变化序列图

Fig. 5　Time series of GPS/P_{WV} and precipitation from Mar 31 to Apr 3, 2011

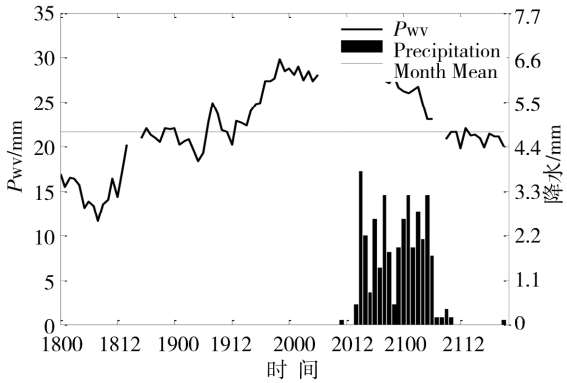

图 6　2011 年 5 月 18 日至 5 月 21 日 GPS/P_{WV} 和降水时间变化序列图

Fig. 6　Time series of GPS/P_{WV} and precipitation from May 18 to 21, 2011

春季的层状云对应着稳定性降水,多具有系统性,这与冬季降水相似,所以其 P_{WV} 的演变特征也相似:降水开始前大幅增长,其后在高值区波动,降水结束前持续回落。但春季降水极值与 P_{WV} 峰值出现的时间不一定吻合,这说明在春季降水中,冷空气的活动及其他动力条件对春季降水的加强作用超越了水汽条件。由于月平均 P_{WV} 的上升,降水发生之前可降水量的增长期时段变短,降水预报指示时间也就变短。春冬季层状云降水中,在降水结束之前 P_{WV} 都会快速下降并回落至月平均值以下,四川盆地可降水量的下降速度为 0.7 mm/h[19],略高于西安地区 0.5 mm/h 的降幅。

3.3　夏季积状云降水中 GPS/P_{WV} 的演变特征

西安地区夏季(6 ~ 8 月)气温较高,能量较大,强降水主要是由积状云所产生。2011 年 7 月 28 日至 8 月 1 日的,受高原槽与西南暖湿气流的共同影响,西安地区出现持续的降水过程,其中 7 月 31 日 08 时至 8 月 1 日 08 时全区普降大雨,局地达暴雨。对 7 站逐小时平均 GPS/P_{WV} 序列(图 7)进行分析,相比较冬春季节降水过程中 GPS/P_{WV} 的平缓变化,本次降水中 GPS/P_{WV} 随着降水的开始、间断、结束以及降水强度的变化而变化频繁且变幅较大。这主要是因为积状云产生的降水多具有突发性,时间短变率大的特点。对于降水过程中 4 个较为集中时段,GPS/P_{WV} 均出现波峰与之对应,而降水间歇或减弱区则为明显波谷,甚至会降至月平均值以下,这与冬春季降水形成明显对比。P_{WV} 2 个显著的增长过程:7 月 28 日 03 时至第一次降水发生的 28 日 23 时,P_{WV} 增幅为 1.73 mm/h,提前时间为 14 h;7 月 30 日 13 时至 7 月 31 日降水发生的 31 日 06 时,P_{WV} 增幅为 0.9 mm/h,提前时间为 18 h。降水结束后 2 次明显的回落过程:7 月 29 日 20 时至 7 月 30 日 08 时,P_{WV} 降幅为 1.8 mm/h;8 月 1 日 00 时至 08 时,P_{WV} 降幅为 1.3 mm/h。夏季持续性降水中 GPS/P_{WV} 开始增长的时间提前于降水发生时间较之冬春季明显缩短,且降水结束前的降幅增加。

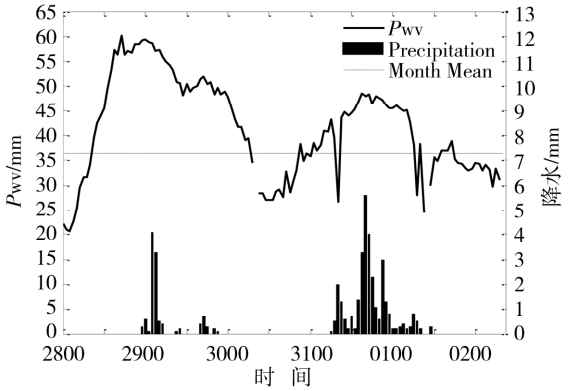

图 7　2011 年 7 月 28 日至 8 月 2 日 GPS/P_{WV} 和降水时间变化序列图

Fig. 7　Time series of GPS/P_{WV} and precipitation from Jul 28 to Aug 2, 2011

2011 年 8 月 25 日西安地区出现短时强降水过程,并伴随雷电、大风。由 7 站逐小时平均 GPS/

P_{wv} 分析可得(图8):25 日 16 时可降水量开始增长并超过 8 月月平均值 31.8 mm,19 时降水开始,GPS/P_{wv} 开始增长的时间提前于降水发生时间仅为 3 h,且 P_{wv} 的峰值为 32.0 mm,高于月平均值 0.2 mm,表明对流降水所需水汽不一定太充足,这与李国翠对华北区域的研究结果相同[20]。同时,这个现象也大大减弱了 GPS/P_{wv} 对降水预报的指示意义。

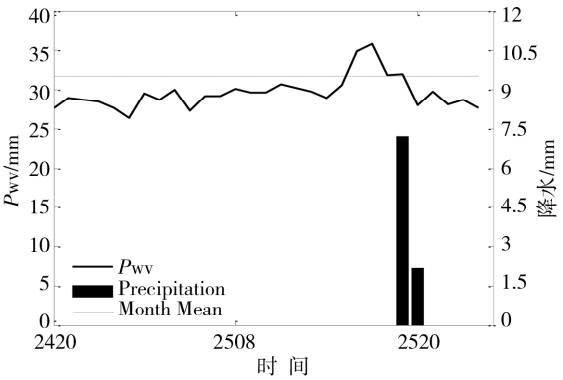

图 8 2011 年 8 月 24 日至 8 月 25 日 GPS/P_{wv} 和降水时间变化序列图

Fig. 8 Time series of GPS/P_{wv} and precipitation from Aug 24 to 25, 2011

夏季积状云降水中 GPS/P_{wv} 的变化特征与冬春季有较大差异,在持续性降水中,可降水量变化剧烈且频繁;在短时强降水中,水汽变化微弱,且预报指示意义降低。夏季的持续性降水结束前同样会出现 P_{wv} 的大幅度回落,且降幅较冬春季大。

4 结 论

(1)西安地区 GPS/P_{wv} 与探空可降水量变化趋势基本一致,其相关系数 0.93,与国内反演精度相比,西安地区的 GPS/P_{wv} 可以满足预报应用的需求。

(2)不同季节和类型的降水过程中 GPS 可降水量的演变特征表明:冬春季 GPS/P_{wv} 变化平缓,降水发生之前会经历一段较长时间的水汽持续增长期,GPS/P_{wv} 的增长作为降水预报指标的指示意义强。夏季的持续性降水中 GPS/P_{wv} 变化剧烈,降水发生之前 GPS/P_{wv} 增长的时间较之冬春季明显缩短;而短时强降水中 GPS/P_{wv} 变化微弱,降水发生之前 GPS/P_{wv} 增长的时间仅为 1 ~3 h,降水预报指标的指示意义弱。

(3)在绝大数情况下,西安地区在降水发生前,GPS/P_{wv} 均超过月平均可降水量,而当 GPS/P_{wv} 以 >0.5 mm/h 的降幅回落时,即预示降水过程的结束。该指标可用作西安地区的降水预报分析。

参考文献:

[1] Suelynn C, Kefei Z, Chuan Sheng W, et al. Remote Sending of the Earth's Lower Atmosphere During Severe Weather Events Using GPS Technology: A Study in Victoria Australia[A]. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation[C]. Portland:2011.559 - 571.

[2] Seko H, Nakamura H, Shoji Y, et al. The meso - γ scale water vapor distribution associated with a thunderstorm calculated from a dense network of GPS receivers[J]. Mete Soc Japan, 2004, 82(1B):569 - 586.

[3] 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.

[4] 李廷兴, 徐宝祥,胡新康,等. 用地基 GPS 观测站遥测大气水汽含量和可降雨量的理论基础与试验结果[J]. 中国科学(A 辑) 2002,30(增刊):107 - 110.

[5] 王维佳,赵兴炳. 川西高原地基 GPS 遥测可降水量特征[J]. 干旱气象,2010,28(3):279 - 296.

[6] 崔丽娜,史玉光,崔彩霞,等. 塔克拉玛干沙漠腹地 2009 年大气水汽含量的日变化特征[J]. 干旱气象,2010,28(4):407 - 410.

[7] 肖舜,沈瑾,刘璐,等. 西安世园会园区大气环境质量与气象因子关系分析[J]. 干旱气象,2012,30(1):1 - 7.

[8] 王维佳. 四川地区近 60 a 大气可降水量分析[J]. 干旱气象,2009,27(4):346 - 357.

[9] 刘世祥,王遂缠,刘碧,等. 兰州市空中水汽含量和水汽通量变化研究[J]. 干旱气象,2006,24(1):18 - 22.

[10] 张良,王式功,尚可政,等. 祁连山区空中水资源研究[J]. 干旱气象,2007,25(1):14 - 20.

[11] 张京江,楚艳红,张朝林. 地基 GPS 实时水汽反演系统建设速成[M]. 北京:气象出版社,2011.164.

[12] 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.

[13] Takagi T, F Kimura, S Kono. Diurnal variation of GPS precipitable water at Lhasa in pre - monsoon and monsoon periods[J]. Meteor Soc Japan, 2000,78:175 - 179.

[14] 李成才,毛节泰,李建国,等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报,1999,44(3):333 - 336.

[15] 何平,徐宝祥,周秀骥,等. 地基 GPS 反演大气水汽总量的初步试验[J]. 应用气象学报,2002,13(2):179 - 183.

[16] 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.

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

[18] 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.

[19] 郭洁,李国平,黄文诗,等. 不同类型降水过程中 GPS 可降水量的特征分析[J]. 水科学进展,2009,20(6):763 - 767.

[20] 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):1065 - 1073.

(下转至第 289 页)

Contrast Analysis of Temperature Data Before and After the Relocation of the Observation Station in Zhangye of Gansu Province

PANG Cheng[1,2], WANG Fucun[1,2], LU Weirong[3], ZHENG Xuejin[1], DAI Debin[1]

(1. *Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye* 734000, *China*;
2. *Institute of Arid Meteorology, CMA; Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou* 730020, *China*; 3. *Minle Meteorological Station of Gansu Province, Minle* 734500, *China*)

Abstract: According to the comparative daily temperature data in 2011 in new and old site of the Zhangye national basic meteorological station, the difference between the new and the old site observations and its causes were analyzed systematically by using statistical analysis methods including mean differences, correlation and regression and significant test, etc. Results show that there was obvious positive temperature difference at the old site because of the significant urban heat island effect, and this effect was greater at night than that during day, and most obvious in winter and early spring and weakest in late spring and early summer, the increasing effect of urban heat island on minimum temperature was more significant. Statistical results show that there was significant positive correlation between the new and the old site observations, and the difference of temperature was not significant, so temperature can be incorporate. But there was significant difference in January and March between the old and the new site observations in recent 20 years, therefore, in order to represent the local temperature accurately, we need to have a revision to the old site observations .

Key words: the new and the old site; air temperature; comparative analysis

(上接第 282 页)

Characteristic Analysis of GPS /Pwv Changes During Seasonal Precipitation Processes in Xi' an of Shaanxi Province

YANG Xiaochun, WANG Jianpeng, BAI Qingmei, HUI Ying, XIE Bin

(*Xi' an Meteorological Bureau of Shaanxi Province*, *Xi' an* 710016, *China*)

Abstract: GPS – retrieved atmospheric precipitable water vapor named GPS/*P*wv is obtained on the basis of the combination of observations from ground – based GPS sites and data from ground automatic weather stations in Xi' an of Shaanxi Province, and then it is compared with the radiosonde observations for the consideration of accuracy. Furthermore, the evolution characteristics and forecasting indication significance of GPS/*P*wv are analyzed in precipitation processes with different rainfall types. The results show that the evolution trends of GPS/*P*wv and radiosonde observations are basically the same, and the correlation coefficient is approximately 0. 93. The GPS/*P*wv changed gently in winter and spring and increased in a long period before precipitation, which could be strongly used for forecasting indication. However, the situation was just opposite in summer, the forecast indication was relatively weak.

Key words: GPS/*P*wv; accuracy test; evolution characteristics