

青岛 CORS 站与探空站获取的大气可降水量对比分析

刘智敏^{1,2}, 窦世标¹, 李 斐¹, 郭金运¹, 刘 新¹, 黄 磊¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室 山东 青岛 266590)

摘要:利用青岛市4个CORS站2014年观测资料,借助GPS高精度数据处理软件Bernese,反演大气可降水量(CORS/PWV),并与对应时段的由青岛探空站资料计算得到的大气可降水量(Radio/PWV)进行比较,CORS/PWV与Radio/PWV的精度相当,二者差异的差值(MEAN)均为毫米级,绝对值最大为3.42 mm;CORS/PWV与Radio/PWV具有较高的相关性,其相关系数均在0.81以上;通过分析实际降水与PWV的变化,发现PWV的短时急剧变化与降水发生具有较好的对应关系。研究表明,CORS具有全天候、高时空分辨率及连续监测大气中水汽含量变化等优势,可有效弥补高空探测的不足,对水汽监测、气象预测研究等具有重要的参考价值。

关键词:区域连续运行参考站;对流层延迟;无线电探空仪;大气可降水量;实际降水量

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2017)01-0021-08

Comparative Analysis of Precipitable Water Vapor Acquired from CORS and Radiosonde in Qingdao

LIU Zhimin^{1,2}, DOU Shibiao¹, LI Fei¹, GUO Jinyun¹, LIU Xin¹, HUANG Lei¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract:Based on the observations of 4 CORS stations in Qingdao in 2014 and with the help of high-precision GPS data processing software Bernese, precipitable water vapor (CORS/PWV) was retrieved and compared with Radio/PWV of the same period. Researches have shown that the CORS/PWV is matched with the Radio/PWV in precision, with the maximal deviation being 3.42 mm. CORS/PWV and Radio/PWV are highly correlated and the correlation coefficient is above 0.81. By analyzing PWV and the actual precipitation, it has also been found that there is a good correspondence between them. Therefore, with the advantages of all-weather observation, high temporal-spatial resolution and continuous monitoring of water vapor changes, CORS can effectively make up for the shortage of high altitude detection, and have important reference value in water vapor monitoring and weather forecasting.

Key words: CORS (continuously operating reference stations); troposphere delay; Radiosonde; PWV (precipitable water vapor); actual precipitation

水汽是大气的重要组成部分之一,具有空间分布不均匀性、时间变化迅速和变化尺度精细化等特点,是地球气候系统能量和水循环的重要因子,是影响短期降水预报的关键因素。水汽是天气和气候的主要驱动力,因此成为国内外学者的研究对象之一^[1]。

在气象学领域,探测大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的常用手段有常规探空气球、水汽

收稿日期:2016-10-18

基金项目:国家自然科学基金(41374009);青岛市博士后应用研究项目基金(2015186)

作者简介:刘智敏(1975—),女,河北唐山人,副教授,博士,主要从事 GNSS 定位理论技术及其应用方面的研究。

E-mail:liuzhimin010@163.com

辐射计(water vapor radiometer, WVR)^[2]、雷达探测、激光探测和太阳光谱分析等。常规探空气球可以收集高空大气的温度、湿度、气压、风速等因素,但地面探空站分布稀疏,一般每天进行 2 次探测,时空分辨率低。水汽辐射计探测受云层厚度、降水及温度变化的影响,具有垂直分辨率低、价格昂贵、需要定期定标、难维护等不足。雷达探测可以探测水汽的详细分布,但成本很高,难以实现全天候的普及应用。激光探测可以探测大气水汽的饱和程度,从而预报降雨时间和降雨量,但只适用于小范围区域,目前处于试验阶段。太阳光谱分析仪是一种极具发展前景的技术,可以探测高精度水汽含量,但其沿太阳方向探测水汽,对气象预报的作用有限。因此,迫切需要寻求具有高时空分辨率、全天候、高精度、设备稳定且易维护的大气水汽探测技术, GPS 获取大气可降水量应运而生^[3-4]。自 Bevis^[5]首次提出利用地基 GPS 技术探测 PWV 以来,随着 GNSS (global navigation satellite system)技术的发展,特别是区域 CORS(continuous operational reference system)的建设和运行,地基 GPS 在气象方面的应用取得了长足进步。Rocken 等^[6]利用 6 个 GPS 接收机组成 GPS/MET 网, GPS 反演大气水汽含量与微波辐射仪测量的水汽含量间的差值在 1~2 mm 范围内,并提出修正短基线观测对可降水量计算产生的系统误差; Duan^[7]在 Rocken 的基础上,发展了“绝对 PWV 算法”,指出 GPS/PWV 的探测精度为 1~1.5 mm; Ohtani and Naito^[8]在对日本利用 GNSS 获取的大气可降水量与常规探空的对比中发现,二者之间的差值在 4 mm 以内。毛节泰^[9]、王小亚^[10]、李成才^[11]、刘焱雄^[12]、袁招洪^[13]、李星光^[14]及叶其欣^[15]等在国内积极开展 GPS 观测在气象学中的应用研究,并在不同区域进行业务实验工作。研究表明, GPS/PWV 的变化特别是短时急剧升高或者下降与强降水之间具有很好的对应关系。由于大气水汽与区域的位置和对流层高度有关,对于不同的区域, GPS 获取 PWV 的精度有所差异,因此,对比分析青岛 CORS 站与探空站获取的大气可降水量对于监测青岛地区的水汽含量和研究气象具有重要现实意义。

青岛地处山东半岛南部沿海,位于东经 119°30′~121°00′、北纬 35°35′~37°09′,属于温带季风气候,空气湿润,雨量充沛,温度适中,四季分明。于 2006 年 6 月底全面建成的 QDCORS,年运行率达 95% 以上^[16],作为山东省第一个高标准、高精度、多功能的 GPS 连续运行参考网站系统,为青岛市重大工程的建设、城市规划、土地管理、气象、农林业等部门以及灾害监测提供了实时有效的数据。由于 4 个 CORS 站与多站分析结果类似,故本文选取青岛范围内距离探空站点较近的 4 个 CORS 站数据,利用 Bernese 软件及相关气象要素解算 PWV,根据探空资料计算 PWV,并对 Radio/PWV 与 CORS/PWV 在时间序列变化和相关性进行分析,检验 CORS/PWV 在水汽监测上的可行性;对计算得到的 PWV 变化数据与实际降水数据进行分析,验证 PWV 变化与实际降水及降水量的对应关系。

1 数据与方法

1.1 数据资料

本文所用数据包括 2014 年 7—8 月青岛市 SKDR、MLJR、CJJR 和 JKRS 4 个 CORS 站数据以及同期的青岛探空站数据。CORS 数据来源于 QDCORS 网,探空数据来源于美国怀俄明州立大学网站(<http://weather.uwyo.edu/wyoming/>)。CORS 数据采样间隔为 30 s,卫星截止高度角为 15°。4 个 CORS 站和青岛探空站如图 1 所示(△代表 CORS 站,○代表探空站),CORS 站与探空站的坐标及相关距离如表 1 所示。采用瑞士伯尔尼大学研发的 Bernese 软件解算 CORS 站观测数据,结合测站的坐标、气象数据等,获取大气可降水量 PWV。利用青岛探空站每天两次(0:00 时和 12:00 时,UTC)释放的探空气球获得的气压、温度和湿度等数据,计算出大气可降水量 PWV。对 CORS

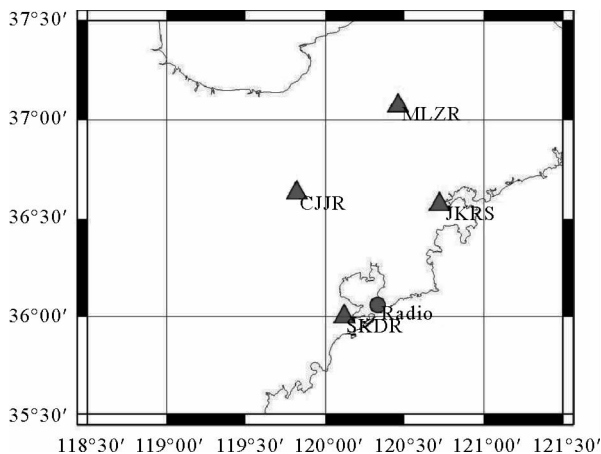


图 1 青岛 4 个 CORS 站和探空站的分布

Fig. 1 Geographical distribution of 4 CORS stations and a radiosonde station at Qingdao

反演的大气可降水量和探空大气可降水量进行对比分析。

1.2 PWV 解算原理

1.2.1 CORS 站反演 PWV 原理

本文采用 Bernese 软件进行精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 解算模式对 CORS 站数据进行处理, 解算过程采用精密星历、精密钟差、卫星截止高度角为 15° , 获取对流层总延迟 (zenith total delay, ZTD), 使用气象数据计算静力学延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD), 总延迟与静力学延迟之差 (式 1) 即为湿延迟 (zenith wet delay, ZWD)。其中, ZHD 可采用 Saastamoinen 模型^[17] (式 2) 计算, 转换系数 Π (式 3) 与 ZWD 的乘积即为 PWV (式 4)^[18]。

$$ZWD = ZTD - ZHD, \quad (1)$$

$$ZHD(P, H, \varphi) = 22.7 \times P \times [1 - 0.26 \cos(2\varphi) - 0.00028H]^{-1}, \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{\rho_{\text{water}} R_w [(k_3/T_m) + k'_2]}, \quad (3)$$

$$PWV = \Pi \times ZWD. \quad (4)$$

式中: P 为测站表面大气压, hPa; φ 为测站纬度, $^\circ$; H 为测站大地高, km; ρ_{water} 为液态水密度; $R_w = 461 (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$, $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; $k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$; $k'_2 = 16.48 \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$; $T_m = a + bT_s$; T_s 为地面温度, 数据来源于 CORS 站临近的气象观测站。

本文采用青岛地区地面温度回归分析得到的加权平均温度模型^[19], 即 $T_m = 8.776 + 0.9287T_s$ 。

如上所述, PWV 解算流程如图 2 所示: ①采用 Bernese 软件对精密星历和 CORS 站点数据进行 PPP 解算, 得到 ZTD 值; ②用 Saastamoinen 模型计算出 ZHD, 然后通过式 (1) 得到 ZWD; ③使用气象数据的地面温度通过加权平均温度模型得到 T_m , 用式 (3) 计算转换系数 Π , 式 (4) 计算出 PWV。

1.2.2 探空获取 PWV 原理

为了分析 GPS 获取的 PWV 的精度, 验证 GPS 资料的有效性, 本文采用 CORS 反演的 PWV 与利用常规探空资料计算的 PWV 进行对比分析。探空气球通过测量不同高度大气中的温度、相对湿度、压强来获取 PWV^[20], 获取 PWV 公式^[21-22] 如下:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} x dp, \quad (5)$$

$$x = \frac{0.622 \cdot e}{P - 0.378e}, \quad (6)$$

$$e = RH \cdot e_s. \quad (7)$$

$$e_s = f \times 6.1121 \exp\left[\frac{(18.729 - T/227.3)T}{T + 257.87}\right]. \quad (8)$$

$$f = 1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} P. \quad (9)$$

式中: W 为气压在 p_1 和 p_2 之间计算的 PWV, kg/m^2 ; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; x 为混合比, g/kg ; P 为总的大气压, Pa; e 为水汽压, Pa; RH 为相对湿度, %; e_s 为饱和水汽压, Pa; T 为温度, $^\circ\text{C}$; f 为转换包含空气的水汽为饱和水汽的修正函数。

表 1 CORS 站与探空站的坐标与距离

Tab. 1 Coordinates and distances of CORS stations and the radiosonde station

测站	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	海拔/m	与探空站间距/km
青岛探空站	120.33E	36.06N	77.00	—
SKDR	120.12E	36.00N	66.47	19.94
JKRS	120.72E	36.57N	21.57	71.83
CJJR	119.82E	36.63N	17.97	78.12
MLZR	120.46E	37.07N	115.61	113.07

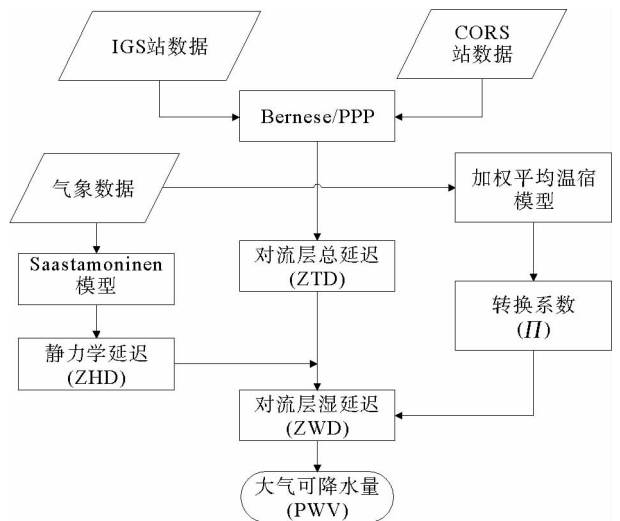


图 2 PWV 解算过程示意图

Fig. 2 The diagram of calculating PWV

探空气球的飞行高度最高值在不同天气条件下达 25~38 km,本文所采用的探空数据飞行最高值 25~32 km。由于水汽主要集中在 8 km 以下,故对获取 PWV 的精度无影响。由于探空观测的温度、气压和相对湿度误差影响,对 Radio/PWV 产生误差约 2 mm^[18]。

2 结果与分析

2.1 CORS/PWV 与 Radio/PWV 对比分析

CORS 单天解获得的 PWV 和探空两次获取 PWV 的平均值随时间分布及对比如图 3 所示,可以看出 CORS/PWV 与 Radio/PWV 除个别别点存在差异,整体变化趋势、峰值和谷值基本吻合,具有很好的一致性,但总体上 Radio/PWV 分布在 CORS/PWV 下方,即 CORS 反演 PWV 较探空获得的 PWV 偏大,这是由于获取的 0:00 时(UTC)的 GPS 数据资料的端部效应^[23]、“加权平均温度”的引入、CORS 站与探空站位置及海拔和水平位置不一致等造成的。

对 CORS/PWV 与 Radio/PWV 进行概率统计,对比分析如表 2 所示,可以看出 SKDR、JKRS、CJJR 和 MLZR 这 4 个站的相关系数均大于 0.815,最大为 0.901,CORS/PWV 与 Radio/PWV 具有很高的一致性。4 个测站的 CORS/PWV 和 Radio/PWV 差值的均值(MEAN)分别为 1.77、-1.80、-3.42、-3.19 mm,二者的差值为毫米级,都在 3.5 mm 以下,CORS 站获取的 PWV 与探空站获取的 PWV 精度相当。其中,MEAN 值有正值和负值,这与 CORS 站与探空站的高差有关。结合表 1 发现,MLZR 站的海拔为 115.61 m,高于探空站的 77.00 m,MEAN 值为正值;SKDR、JKRS 和 CJJR 站的海拔分别为 66.47、17.97、21.57 m,低于探空站,其 MEAN 值全为负值。SKDR、MLZR、JKRS 和 CJJR 的标准差(STD)均为 4~6 mm,数据偏离程度相差不大。

MLZR、JKRS、CJJR、SKDR 4 个站反演的 CORS/PWV 与 Radio/PWV 数据的散点图(图 4),从图中可以看出,数据基本分布在直线 $y=x$ 的两侧,尤其当水汽值较大时,这是由于探空站每天仅在 0 时和 12 时进行观测,匹配的样本较少,而水汽值较大时,往往伴随着降水天气,导致探空气球的轨迹偏离较多^[24]。由 CORS/PWV 与 Radio/PWV 数据拟合的直线斜率 K (表 2)最小值为 0.867,最大值为 0.942,二者在变化序列上具有较好的一致性,可以利用 CORS/PWV 监测和预报降水等。

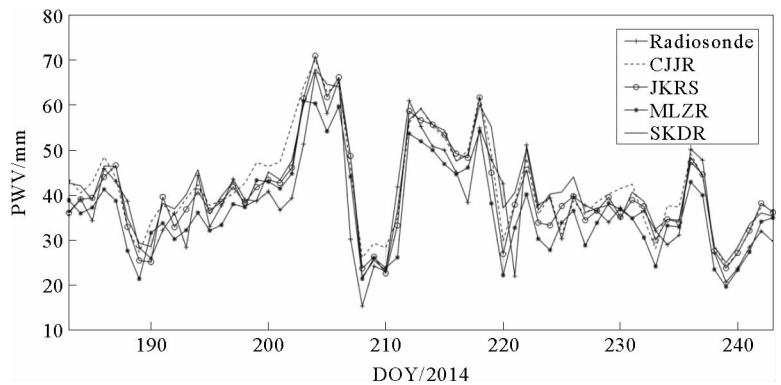


图 3 Radio/PWV 与 CORS/PWV 对比序列图

Fig. 3 Sequence diagram of Radio/PWV and CORS/PWV

表 2 Radio/PWV 与 CORS/PWV 差值的分析统计

Tab. 2 Comparison of parameters between Radio/PWV and CORS/PWV

测站	MEAN/mm	MAX/mm	MIN/mm	STD/mm	RMS/mm	R	拟合直线斜率 K
SKDR	-3.19	16.42	-12.63	5.73	5.66	0.901 3	0.942
JKRS	-1.80	18.46	-15.63	5.56	5.75	0.870 2	0.867
CJJR	-3.42	13.82	-20.34	6.41	6.59	0.857 6	0.885
MLZR	1.77	18.59	-5.40	4.76	6.55	0.815 1	0.885

均方根误差 RMS(表 2)最大值出现在距探空站次远的 CJJR 站(相距 78.12 km)为 6.59 mm,最小值出现在距探空站最近的 SKDR 站(相距 19.94 km)为 5.66 mm,此外 MLZR 站(相距 113.07 km)为 6.55 mm, JKRS 站(相距 71.83 km)为 5.75 mm。距探空站较远的两个 CORS 站 RMS 值较大,这说明由于距离的增大导致了 CORS/PWV 与 Radio/PWV 之间的 RMS 值的增大,即数据间的离散程度增大。7—8 月份的

CORS/PWV 与 Radio/PWV 的差值图,如图 5 所示,横轴为年积日(DOY),从图中可以发现,CORS/PWV 与 Radio/PWV 差值的最大值 20.33 mm 同样出现在距探空站最远的 MLZR 站,这同样证明了 CORS 站与探空站之间的距离对 RMS 的影响。

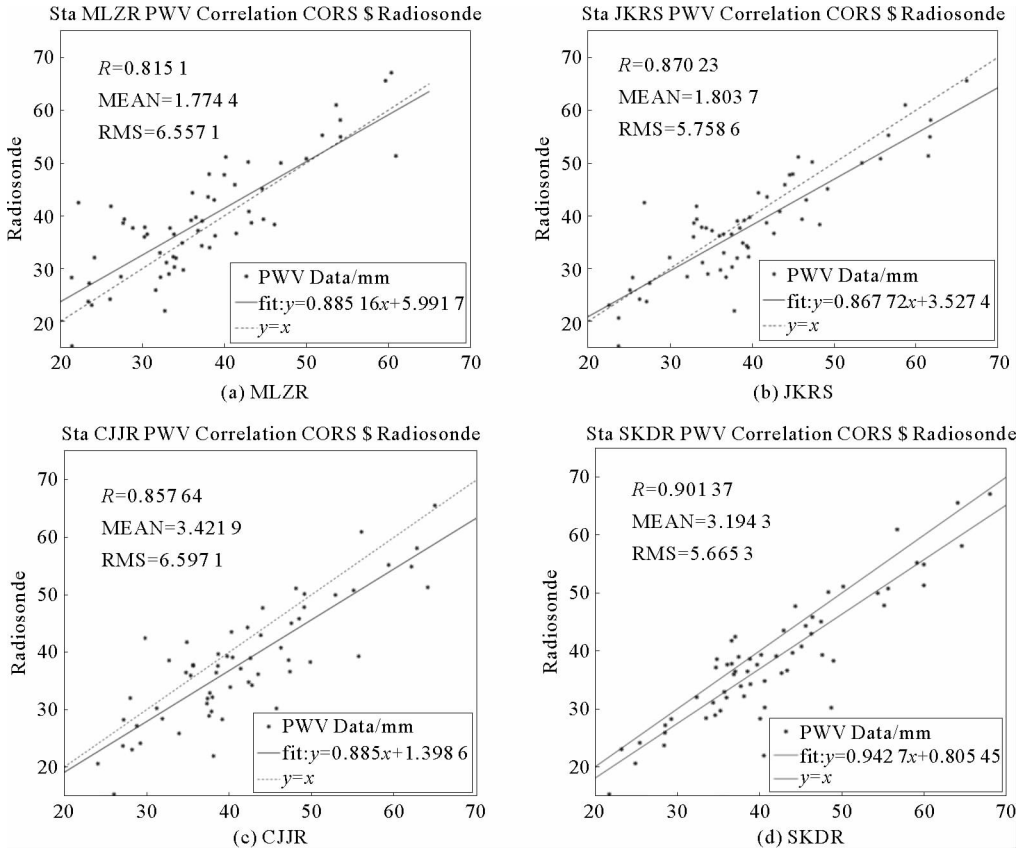


图 4 CORS 站 PWV 与探空站 PWV 相关性分析图

Fig. 4 The correlation analysis of CORS/PWV and Radio/PWV

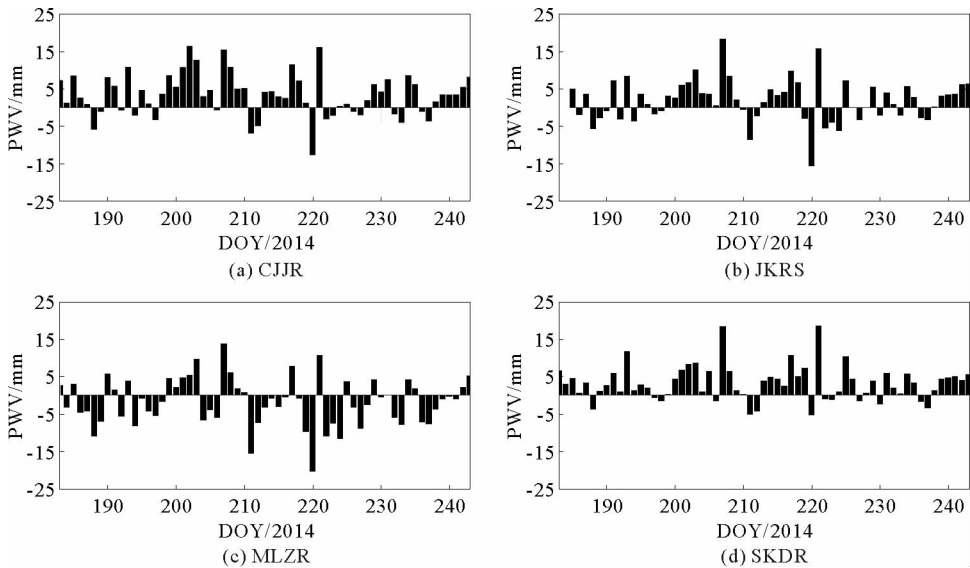


图 5 CORS 站与探空站 PWV 差值图

Fig. 5 The differential chart between CORS/PWV and Radio/PWV

通过以上分析得出, CORS/PWV 与 Radio/PWV 在变化序列上具有很好的 consistency。随着 CORS 站与探空站之间距离的增大, 对应的相关系数 R 减小, PWV 之差的 MEAN、RMS 随之增大。

2.2 PWV 变化与实际降水分析

将 Radio/PWV 与 CORS/PWV 序列图(图 6)和 Radio/PWV 与 CORS/PWV 变化率分别与同期青岛气象站(120.42E, 36.05N)的实际降水量序列(图 7)进行对比分析, 发现 CORS/PWV 值同 Radio/PWV 的变化趋势相同; PWV 与实际降水量存在明显的相关性, 降水多发生在 PWV 峰值或谷值出现的附近, 且一般情况下, PWV 变化率越大, 降水量越大, PWV 的变化率和降水量间具有很好的吻合性。

降水的形成原因复杂, 弱降水的随机性较大, 与水汽的相关性也较弱, 本文选用 DOY200~225 d 的强降水分析 PWV 与实际降水量的关系。结合图 6 和图 7, 每隔 2~3 d 就有一次降水过程, 对应一次 PWV 的突变。从图中可见当 7—8 月出现降水的 PWV 阈值 ≥ 50 mm, PWV 变化率的阈值 ≥ 10 mm/d, 发生降水过程, 表 3 显示阈值预报降水的概率, 即在 PWV 阈值范围的天数中, 发生降水过程所占的比例。PWV 变化率预报降水的能力较 PWV 强, 除 Radiosonde 的 PWV 变化率外, 预报准确性都在 80% 以上。在 201~203 d 期间, 无论是 CORS/PWV 还是 Radio/PWV 变化率均为正值, 基本超过 10 mm/d, 即该段时间的 PWV 呈急剧上升的趋势, 且均达 60~70 mm, 为强降水积累了充分的水汽条件。在降水发生的 204 d, PWV 变化率为负值且达到谷值, 即 PWV 突变剧烈, 与前几天积累的水汽共同造成了当天的强降水过程。在 206 d, PWV 的变化率为 -20 mm/d, PWV 值急剧下降, 而 202~205 d PWV 值均超过 50 mm, 充足的水汽和 PWV 的剧烈突变使该天产生高达 129.9 mm 的降水。在 219 d 和 220 d, PWV 日变化率为负, 且绝对值超过 10 mm/d, PWV 呈急剧下降趋势, 发生了强降水过程。在 222 d, Radio/PWV 与 CORS/PWV 均大于 50 mm, 充足的水汽导致降水。总体来看, 强降水与 PWV 值和其大幅变化具有一定对应关系, 当 PWV 值超过 50 mm 或 PWV 变化率的绝对值超过 10 mm/d 时, 一般会形成强降水天气, 且 PWV 变化率的绝对值越大, 即 PWV 发生突变越大, 越易发生强降水过程。

同时, 从图 7 中也可看到, 202、214、217 d 的 PWV 大于 50 mm, 202、207、210、217、221 d 的 PWV 变化率的阈值大于 10 mm/d, 但这些天并没有发生降水过程, 阈值有一定的伪警率。这是因为 PWV 值与实际降水量并不是简单的正比关系, CORS 测得的是大气中的总水汽含量, 对云中的液态水并不敏感, 而水汽梯度值、水汽辐合辐散及天气系统等也对降水的大小和维持的时间有重要影响^[25], 需综合考虑前期平均水平、峰值大小和增幅等条件^[26]。因此, CORS/PWV 的突变能对降水起到一定的预报作用。

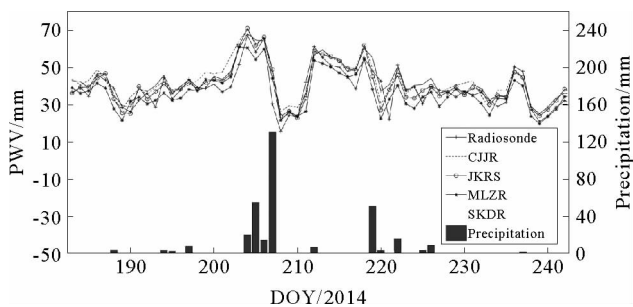


图 6 PWV 序列图和实际降水量图

Fig. 6 PWV sequence and actual precipitation diagram

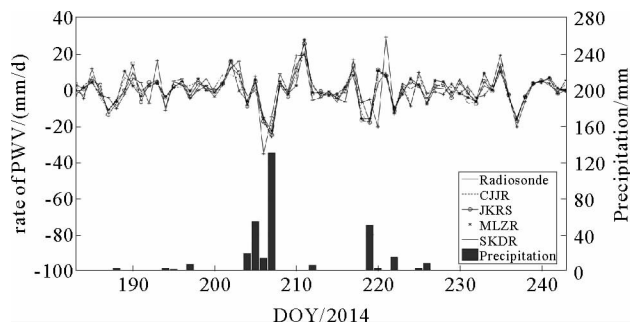


图 7 PWV 变化率和实际降水量图

Fig. 7 PWV gradient and actual precipitation diagram

表 3 阈值预报降水统计表

Tab. 3 The statistics of threshold forecasting rainfall %

	Radiosonde	CJJR	JKRS	MLZR	SKDR
PWV ≥ 50 mm	83.33	90	88.89	100	90.91
PWV 变化率 ≥ 10 mm/d	77.78	100	100	100	80

3 结论

本文通过对青岛市 4 个 CORS 站和青岛探空站所获取的 PWV 在时间序列和各项精度进行分析,得出以下结论:

1)CORS/PWV 与 Radio/PWV 虽然在个别点差别较大,但在整体上具有较强的一致性,相关系数均大于 0.815,拟合直线斜率平均为 0.9,具有相当的精度,且 CORS/PWV 总体上较 Radio/PWV 偏高约 2~3 mm;

2)通过距探空站不同距离的 CORS 获取的数据进行分析发现,随着距离的增大,数据之间的相关性逐渐减小,但在 110 km 的距离上相关系数 R 仍可以达到 0.8 以上;

3)PWV 的突变较好地与实际降水对应,PWV 值的短时变化对降水预报具有一定参考价值。

需要说明的是,本文研究中处理的 Radio/PWV 与 CORS/PWV 数据处于青岛地区的夏季多雨期,且在 DOY 为 203~206 d 期间,经历了麦德姆(Matmo)台风^[27]。由于台风的影响,探空气球存在漂移误差^[28],导致 CORS/PWV 与 Radio/PWV 的相关系数 R 偏低,均方根误差 RMS 和平均偏差 MEAN 偏高,但数据对比分析得到的各项参数仍表明,CORS/PWV 与 Radio/PWV 基本吻合,既弥补了常规探空资料在时空分辨率上的不足,又避免了水汽辐射计昂贵的成本和复杂的维修,对大气监测和预报具有参考价值。

参考文献:

- [1]ROCKEN C, WARE R, HOVE T V, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23): 2631-2634.
- [2]WONG M S, JIN X M, LIU Z Z, et al. Multi-sensors study of precipitable water vapour over mainland China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 35: 3146-3159.
- [3]HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, et al. A new strategy for real-time integrated water vapor determination in WADGPS networks[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 3267-3270.
- [4]BOKOYE A I, ROYER A, O'NEILL N T, et al. Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D15): 1199-1210.
- [5]BEVIS M, BUSINGER S, HEMING T A, et al. GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [6]ROCKEN C, HOVE T V, JOHNSON J, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1995, 12(3): 468-478.
- [7]DUAN J, BEVIS M, FANG P, et al. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(6): 830-838.
- [8]OHTANI R, NAITO I. Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(D22): 26917-26930.
- [9]毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 1993(4): 45-49
MAO Jietai. The meteorological application of GPS[J]. Meteorological Science and Technology, 1993(4): 45-49
- [10]王小亚, 朱文耀, 严豪健, 等. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 605-612.
WANG Xiaoya, ZHU Wenyao, YAN Haojian, et al. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(5): 605-612.
- [11]李成才, 夏青. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 333-336.
LI Chengcai, XIA Qing. Remote sensing of water vapor amount in GPS[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(3): 333-336.
- [12]刘焱雄, 陈永奇. 地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 245-248.
LIU Yanxiong, CHEN Yongqi. Monitoring the water vapor content in the atmosphere in Hong Kong through ground-based GPS technique[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1999, 24(3): 245-248.
- [13]袁招洪, 丁金才, 陈永林. 中尺度数值预报模式预报水汽与 GPS 观测的比较研究[J]. 大气科学, 2004, 28(3): 433-440.
YUAN Zhaohong, DING Jincai, CHEN Yonglin. A Comparison study of precipitable water simulated by NMP and GPS observations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2004, 28(3): 433-440.
- [14]李星光, 郑南山, 狄利娟. GPS/PWV 资料在两次台风袭港期间的特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(2): 298-

302.

LI Xingguang, ZHENG Nanshan, DI Lijuan. Application of GPS/PWV data to analysis two typhoons in Hong Kong[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(2): 298-302.

- [15] 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等. GPS/PWV 资料在强对流天气系统中的特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 141-148.
YE Qixin, YANG Luhua, DING Jincai, et al. Application of GPS/PWV data to forecast strong convection weather in Shanghai[J]. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(2): 141-148.
- [16] 赵亮, 叶世榕, 王建. 基于青岛 CORS 系统下的实验场地的精度分析[C]//第四届中国卫星导航学术年会电子文集. 武汉: 中国卫星导航学术年会组委会出版社, 2013.
- [17] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin Géodésique, 1972, 105(1): 279-298.
- [18] 丁金才. GPS 气象学及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 17-18, 52-55, 59-61.
- [19] 黄磊. 利用青岛 CORS 资料反演区域大气可降水量的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2016: 18-29
- [20] EASTERLING D R, PETERSON T C. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series[J]. International Journal of Climatology, 1995, 15(4): 369-377.
- [21] LIU Z, MAN S W, NICHOL J, et al. A multi-sensor study of water vapour from radiosonde, MODIS and AERONET: A case study of Hong Kong[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(33): 109-120.
- [22] ROSS R J, ELLIOTT W P. Tropospheric water vapor climatology and trends over north America: 1973-93[J]. Journal of Climate, 1996, 9(12): 3561-3574.
- [23] 宋淑丽, 朱文耀. 区域 GPS 网实时计算可降水量的若干问题[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2003(24): 20-27.
SONG Shuli, ZHU Wenyao. Some problems about real-time retrieving PWV from local GPS network[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2003(24): 20-27.
- [24] 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.
FU Rui, DUAN Xu, LIU Jianyu, et al. Characteristics of ground-based GPS-retrieved PWV in Yunnan[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(4): 456-462.
- [25] SOLHEIM F S, VIVEKANANDAN J, WARE R H, et al. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(104): 9663-9670.
- [26] 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.
LIANG Feng, LI Chengcai, WANG Yingchun, et al. An analysis of atmospheric precipitable water based on regional ground-based GPS network in Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 236-244.
- [27] 刘智敏, 窦世标, 黄超, 等. 基于单站 CORS 的台风麦德姆造成的降水量分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 56-60.
LIU Zhimin, DOU Shibiao, HUANG Chao, et al. Precipitation caused by typhoon Matmo based on single-station CORS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2015, 34(5): 56-60.
- [28] 陈哲. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. 气象, 2010, 36(2): 22-27.
CHEN Zhe. Characteristics of the overall sounding data drift in China[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(2): 22-27.

(责任编辑:高丽华)