

香港地区 2013—2016 年地基 GPS 大气可降水量与实际降雨量的比较*

徐晓华^{1,2}, 刘宏康¹, 罗佳^{1,3}

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北武汉 430079;
3. 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘要:在利用欧洲中尺度天气预报中心(ECMWF)的数据对由GPS观测资料计算的大气可降水量(PWV)进行精度评定的基础上,基于谐波分析的方法对香港地区不同方位5个测站2013—2016年连续4年的PWV(GPS)和实际降雨量进行比较。结果表明,地基PWV(GPS)相对于PWV(ECMWF)月均值的均方根在1.02~3.07 mm之间,偏差在-2.14~2.52 mm之间。地基PWV(GPS)和实际降雨量都呈现明显的周期性,两者每年峰值出现的时间有非常一致的对应关系。PWV的峰值出现在7月,振幅在14.65 mm与16.79 mm之间;实际降雨量峰值同样出现在7月,振幅在147.64 mm与211.01 mm之间。5个测站PWV年增长率为正表明,近4年香港地区PWV呈现出增长的趋势;而实际降雨量年增长率除HKOH测站为正外,其余站点均为负,总体呈现出逐年减少的趋势。

关键词:全球定位系统;大气可降水量;实际降雨量;谐波分析

中图分类号:P228.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-014-07

Comparison between GPS-derived precipitable water vapor and rainfall during 2013 to 2016 over Hong Kong

XU Xiaohua^{1,2}, LIU Hongkang¹, LUO Jia^{1,3}

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China;

3. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China)

Abstract: The atmospheric PWV (precipitable water vapor) was derived from GPS observations of 5 stations over Hong Kong during four years from 2013 to 2016 and the accuracy of PWV(GPS) was assessed with PWV(ECMWF). Based on harmonic analysis, the PWV(GPS) was then compared with rainfall. Taking PWV(ECMWF) monthly means as reference, results show that the RMS (root mean square) of PWV(GPS) monthly means is between 1.02 mm and 3.07 mm and the bias is between -2.14 mm and 2.52 mm. Both PWV and rainfall have similar periodic characteristics. The peaks of PWV occur in July with amplitudes varying between 14.65 mm and 16.79 mm. And the peaks of rainfall also occur in July and the amplitudes are between 147.64 mm and 211.01 mm. The annual increase rate of PWV is positive at each GPS station, which indicates that the PWV over Hong Kong has an increasing trend during the past 4 years. While the annual increase rate of the actual rainfall is negative except in HKOH station, which means a decreasing trend during the 4 years.

Key words: GPS; precipitable water vapor; rainfall; harmonic analysis

降水是一种重要的天气现象,会对人们的生活产生重要的影响。空气中充足的水汽含量是降水的先决条件,水汽含量的突然变化往往会带来降水^[1]。水汽探测通常采用无线电探空仪和水汽微波辐射计,或者卫星遥感与激光雷达的方法。然而传统的探测手段有诸多局限性,难以获得高空和时间分辨率的水汽信息。地基GPS观测具有全天候、高精度、低费用和高时间分辨率的优

势,基于地基GPS观测可获得与无线电探空及地基微波辐射计相当的水汽观测精度^[2-5]。许多学者对香港地区作了大量的GPS气象研究,陈永奇等^[6]对香港已建成的实时GPS水汽监测系统进行了介绍,并详细讨论了大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)估算中的几个关键问题。于胜杰等^[7]基于香港卫星定位参考站网的实测气压及GPS观测数据,分析了气压对天

* 收稿日期:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41374036);国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB733302)

作者简介:徐晓华(1976—),女,湖北利川人,教授,博士,博士生导师,E-mail:xhxu@sgg.whu.edu.cn;

罗佳(通信作者),男,副教授,博士,博士生导师,E-mail:jluo@sgg.whu.edu.cn

顶总延迟(Zenith Total Delay, ZTD)和天顶静力学延迟(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)解算精度的影响。王晓英等^[8]利用探空数据获取了不同年份更适合香港地区GPS水汽反演所需的加权平均温度公式。李星光等^[9-10]分析了在香港地区一次大面积降雨过程中和两次台风袭港期间PWV(GPS)分布特征。PWV与实际降雨量之间的对比体现了大气中水汽含量与降水潜力的关系。两者之间的相关性分析结果对于降水趋势和雨量分布预报具有一定的指示作用。杨军建等^[11]对武汉2012年5次暴雨和7次中雨过程中的PWV(GPS)和实际降雨量的关联性进行了讨论。Yeh等^[12]分析了台湾地区的PWV(GPS)与实际降雨量之间的关系以及各自的变化趋势。但是,鲜有文献针对香港地区的大气可降水量和实际降雨量之间的相关性进行深入研究。因此本文基于香港地区5个GPS观测站连续4年的观测数据,利用精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术估计ZTD,进而得到PWV,与同时期香港天文台5个气象站的实际降雨量进行对比分析,对两者的时序变化特征和相关性进行讨论,其结果对香港地区GPS水汽观测的应用具有参考价值。

1 数据来源

本文采用了香港地政署大地测量网中的5个GPS测站2013年1月—2016年12月连续4年的观测数据进行PWV解算,这5个站分别是位于香港岛的HKOH测站、位于新界的HKKT测站、HKST测站和HKWS测站以及位于大屿岛的HKNP测站。基本覆盖香港全部陆地区域,且每个测站配备有气象观测元件。

香港天文台作为负责监测及预测天气,并就与天气有关的灾害发出预警的政府部门,在香港地区布设有48个气象站。天文台提供1997年至今的气象观测数据。本文选取GPS测站附近的5个气象站,获取2013—2016年连续4年每个月的月总降雨量数据,该数据为月份内每日降雨量数据累积之和。除HKOH站外,其余GPS测站与最近气象站站点水平距离均在3 km以内,平均高差为115 m。GPS测站与气象站点分布如图1所示。

欧洲中尺度天气预报中心(European Center for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)是国际权威天气预报研究和业务机构,提供高精度全球天气预报与再分析模式产品。其ERA-Interim模式提供自1979年1月1日以来的再分析数据产品,是目前ECMWF同化卫星观测数据最多、最

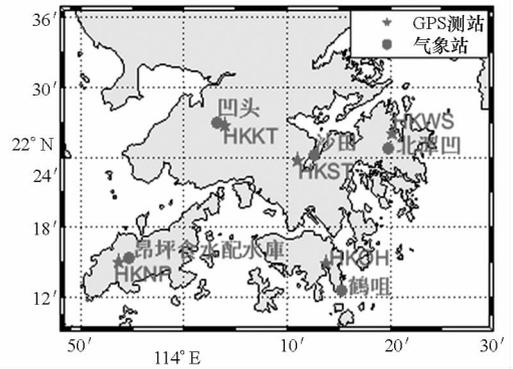


图1 GPS测站与气象站分布图

Fig. 1 Distribution map of GPS stations and weather stations

完善的再分析资料。在反映月份变化方面,ERA-Interim比先前的数据集(如ERA-40)有了较大的提高,被称为第三代再分析数据产品。自2014年开始,ERA-Interim再分析数据的最高空间分辨率达到 0.125° 。大多数ERA-Interim数据产品可以根据需要对地理区域进行设定并对空间分辨率进行选择^[13],在ECMWF的数据服务器下载(<http://data.ecmwf.int/data>)。

本文采用了ERA-Interim提供的2013年1月至2016年12月期间空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的月平均PWV对所解算的PWV(GPS)进行精度评定。考虑到香港地区面积较小,采用式(1)所示的最邻近内插法^[14]由模式格网产品内插测站处对应的月平均PWV:

$$PWV_{\text{内插}} = PWV_{\text{最近格网点}} \quad (1)$$

其中, $PWV_{\text{最近格网点}}$ 为距测站最近的格网PWV值。 $PWV_{\text{内插}}$ 为内插的PWV。再利用式(2)将其归算到GPS测站同一高程面^[15]:

$$PWV(\text{ECMWF}) = PWV_{\text{内插}} \cdot \exp\left[-(H_{\text{GPS}} - H_{\text{ECMWF}})/2000\right] \quad (2)$$

其中, $PWV(\text{ECMWF})$ 为基于内插值进行高程改正后的PWV, H_{GPS} 和 H_{ECMWF} 分别为GPS站点的高程和ECMWF的重力位势高度。

利用均方根误差(Root Mean Square, RMS)和偏差(bias)作为指标,评价PWV(GPS)的精度。RMS和bias计算公式分别如式(3)、式(4)所示。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [PWV(\text{GPS})_i - PWV(\text{ECMWF})_i]^2} \quad (3)$$

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [PWV(\text{GPS})_i - PWV(\text{ECMWF})_i] \quad (4)$$

式(3)与式(4)中 $PWV(\text{GPS})_i$ 为GPS计算的

PWV 月均值, $PWV(ECMWF)_i$ 为由 ERA_Interim 再分析内插得到的 PWV 月均值, 下标 i 为月份编号, n 为总月数。

2 数据处理

2.1 基于 PPP 的 PWV 计算

相关研究已经表明, 不论采用 GPS 相对定位技术还是 PPP 技术, 在 ZTD 的解算精度高于 6 mm, 且气压及温度数据准确的前提下, 可以获得精度为 1 mm 的大气可降水量, 与水汽辐射计和探空资料的水汽探测精度基本相当^[13]。相比于相对定位, 采用 PPP 算法无须引入远距离测站进行站间求差就可直接求得单个测站上空 ZTD 的绝对值, 保证了测站观测数据的独立性。因此采用 PPP 技术求取 ZTD(GPS)。具体解算过程是基于伪距和相位的消电离层组合观测值, 采用惯性制导系统(Inertial Guidance System, IGS)提供的精密星历和钟差, 同时估算测站坐标、接收机钟差、整周模糊度和 ZTD 等参数。ZTD 确定之后, 采用模型分离其中的 ZHD, 即可获得由于水汽产生的天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)。

ZHD 主要是指由干大气引起的延迟在天顶方向的投影, 由于干大气较为符合理想气体方程和静力学平衡方程, 可采用经验模型进行计算 ZHD。本文采用了 Saastamoinen 模型, 如式(5)所示。

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_s}{f(\varphi, H)} \quad (5)$$

式中, P_s 为地表总气压,

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.00266\cos 2\varphi - 0.00028H \quad (6)$$

其中, φ 为测站纬度, H 为测站的大地高。

本文基于 GPS 测站气象观测元件测得的气压, 利用 Saastamoinen 模型计算 ZHD, 从 ZTD 中减去 ZHD 得到 ZWD。

PWV 与 ZWD 有如下函数关系:

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (7)$$

式中, Π 是无量纲的水汽转换系数, 有如下表达式:

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left[\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right]} \quad (8)$$

其中: ρ_w 为液体水密度; R_v 为气体常数; k_3 和 k'_2 为大气折射率常数; T_m 为对流层大气加权平均温度, 是进行从 ZWD 到 PWV 转换的关键参数。

常用的加权平均温度计算方法有四种: ①数值积分; ②加权平均温度模型; ③线性回归公式; ④假定为常数。本文使用陈永奇等^[6]利用香港

地区 8 年的探空资料, 基于线性回归公式拟合的 T_m 与 T_0 的回归公式:

$$T_m(HK) = 106.7 + 0.605T_0 \quad (9)$$

式中, 地面温度 T_0 由气象站给出。

本文所采用的 PPP 数据处理软件为日本东京海洋大学高须知二开发的开源软件 RTKLIB, 版本为 2.4.3。为了方便与气象站的降雨量数据进行对比, 每小时解算一个 ZTD 参数, 然后进行 ZTD 到 ZWD 的转换, 进而得到相应的 PWV, 即 PWV(GPS)的时间分辨率为 1 h。对于每个 GPS 站, 对 ZTD 解算结果取日平均, 再在日平均的基础上取月平均, 以便和气象站月总降雨量数据进行对比分析。

2.2 谐波分析原理

本文在对 PWV(GPS)进行解算并验证的基础上, 采用了谐波分析方法^[16]对 PWV(GPS)和对应的降雨量时间序列的变化规律和趋势进行了对比分析。谐波分析是利用傅里叶级数, 将要研究的时间序列用无数个不同周期的简谐波的形式表示出来, 进而分析序列变化规律的一种方法。相应公式如下:

$$X_t = A_0 + \sum_{k=1}^N C_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (10)$$

式中: A_0 为 X_t 的平均值; C_k 为各谐波的振幅; ω_k 为各谐波的频率; φ_k 为各谐波的初相位; N 为序列总数。

基于最小二乘法原理和三角函数的正交性可以求得谐波系数:

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \quad (11)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \cos \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (12)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \sin \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (13)$$

$$C_k^2 = a_k^2 + b_k^2 \quad (14)$$

$$\varphi_k = \arctan a_k / b_k \quad (15)$$

其中, a_k 和 b_k 为傅里叶系数。

对 PWV(GPS)和时间序列进行谐波分析得到上述变量。然后根据振幅值可判断PWV(GPS)和实际降雨量的强度, 根据相位值可推算峰值出现的时间, 采用线性回归法得到PWV(GPS)和实际降雨量各自基于谐波分析的趋势线, 并基于趋势线的斜率计算PWV(GPS)和实际降雨量的年增长率。

3 结果与分析

3.1 地基 PWV(GPS)的精度验证

表 1 给出了 PWV(GPS)月均值相对于

PWV(ECMWF)月均值的平均偏差以及两者各自的年增长率。可以看出,各测站的平均偏差均在 2.40~3.26 mm 之间,这个结果与文献[2]结果一致。平均偏差最大值为 3.26 mm,发生在测站 HKOH。最小值为 2.40 mm,发生在测站 HKST。虽然 PWV(GPS)月均值和 PWV(ECMWF)月均值两者都呈现出每年增长的趋势,但是增长幅度有较大差别。PWV(GPS)增长率为 0.08~0.34 mm/yr,小于 PWV(ECMWF)计算得到的 0.37 mm/yr。PWV(ECMWF)在各测站计算得到的增长率一样,这是由于香港地区面积较小,经纬跨度均不超过 1°,而 ECMWF 模型提供的数据最小格网点为 0.125°×0.125°,ECMWF 模型在各测站数值基本一致。

表 1 香港地区各 GPS 站 2013—2016 年 PWV(GPS) 相对于 PWV(ECMWF)的 RMS、bias 及各自的年增长率

Tab.1 The RMS, bias and growth rate of PWV(GPS) compared to PWV(ECMWF) during the period from 2013 to 2016 for each station over Hong Kong

站点	RMS/ mm	bias/ mm	PWV(GPS) 年增长率/ (mm/yr)	PWV(ECMWF) 年增长率/ (mm/yr)
HKKT	1.12	0.78	0.29	0.37
HKST	2.78	-2.14	0.08	0.37
HKWS	1.02	-0.71	0.34	0.37
HKNP	1.53	1.39	0.15	0.37
HKOH	3.07	2.52	0.08	0.37

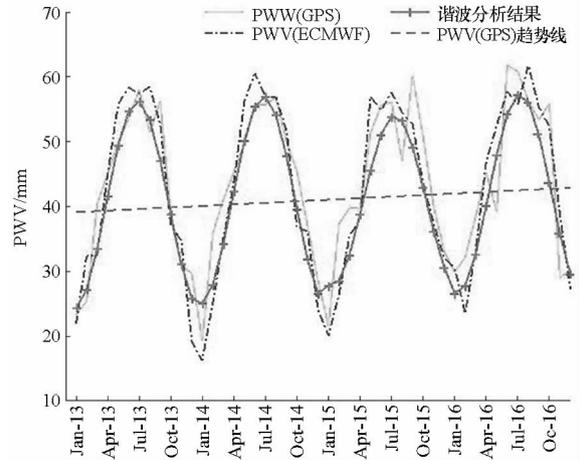
3.2 地基 PWV(GPS)谐波分析结果

图 2 给出了各测站 2013—2016 年连续 4 年的 PWV(GPS)月均值序列、PWV(GPS)月均值序列的谐波分析曲线以及基于谐波分析得到的 PWV(GPS)趋势线。作为参考,同时也给出了 PWV(ECMWF)月均值序列。

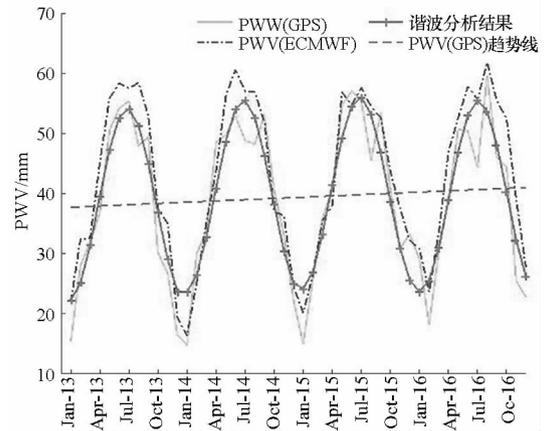
表 2 给出了所得到的各测站 PWV(GPS)月均值序列的谐波分析参数,包括振幅、相位、峰值出现的时间以及年增长率。振幅表征每年 PWV 的强度,相位表征每年达到峰值的日期。根据 PWV(GPS)趋势线可计算出各站 2013—2016 年连续 4 年的年增长率。

从图 2 可以看出,每个测站均出现了较大的季节性波动,即春夏秋冬季节的 PWV 要比夏秋季节小。以位于香港新界的测站 HKKT 为例,表 2 中 HKKT 测站的振幅为 14.85 mm。因此 PWV 最大

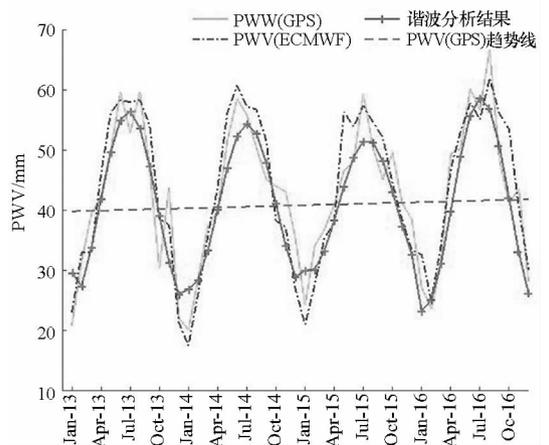
值与最小值之差为 29.7 mm,相位为 205.65°,对应峰值出现的时间在 7 月。而位于新界的 HKWS 测站的振幅为 14.85 mm。HKST、HKNP 和 HKOH 三个测站振幅分别为 16.79mm、16.48mm 和 16.90 mm,出现以上结果可能的合理解释为这三个测站都临近海洋,受海洋影响较大,空气中的水汽含量要高于内陆区域。



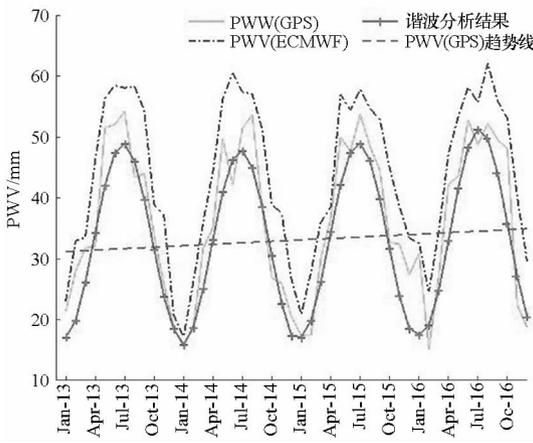
(a) HKKT 测站的 PWV
(a) PWV of station HKKT



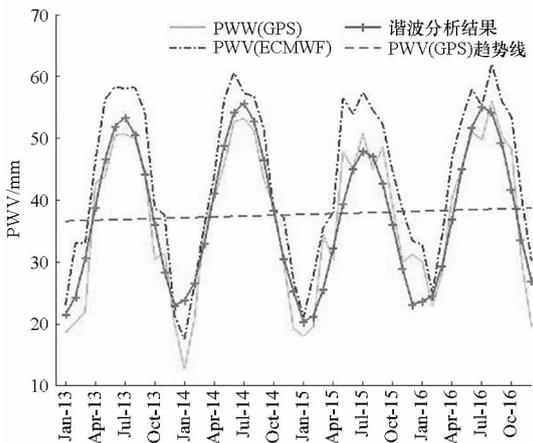
(b) HKST 测站的 PWV
(b) PWV of station HKST



(c) HKWS 测站的 PWV
(c) PWV of station HKWS



(d) HKNP 测站的 PWV
(d) PWV of station HKNP



(e) HKOH 测站的 PWV
(e) PWV of station HKOH

图 2 各测站 2013—2016 年 PWV(GPS)、PWV(ECMWF)、PWV(GPS) 月均值的谐波分析曲线及其趋势线
Fig. 2 Time series of monthly average PWV(GPS), PWV(ECMWF), PWV(GPS) harmonic analysis and its trend line during 2013 to 2016 in each station

表 2 香港地区 2013—2016 年基于谐波分析的 PWV 月均值振幅、相位、峰值日期以及年增长率

Tab. 2 The amplitudes, phases, peak time and growth rates for the monthly average PWV based on harmonic analysis during the years of 2013 to 2016 for each station over Hong Kong

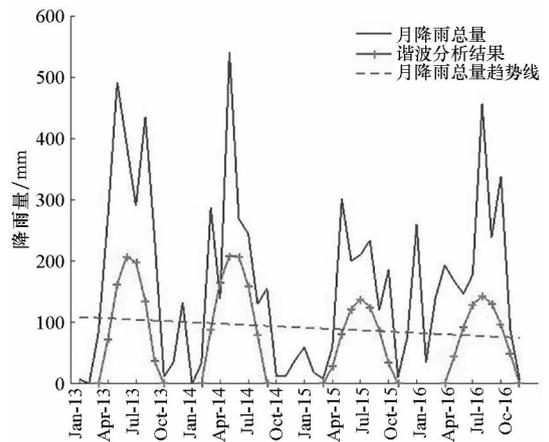
站点	振幅/mm	相位/(°)	峰值月份	PWV 年增长率/(mm/yr)
HKKT	14.85	205.65	7	0.96
HKST	16.79	188.01	7	0.84
HKWS	14.65	207.24	7	0.50
HKNP	16.48	208.77	7	0.95
HKOH	16.19	188.60	7	0.54

5 个测站中最大振幅为 16.79 mm,最小振幅为 14.65 mm,两者仅相差 2.14 mm。振幅非常接近的原因可能主要是由于各测站非常相似的地理环境:本文中测站间水平距离较小(约 20~30 km),并且各测站高程接近(高差约 30~200 m)。

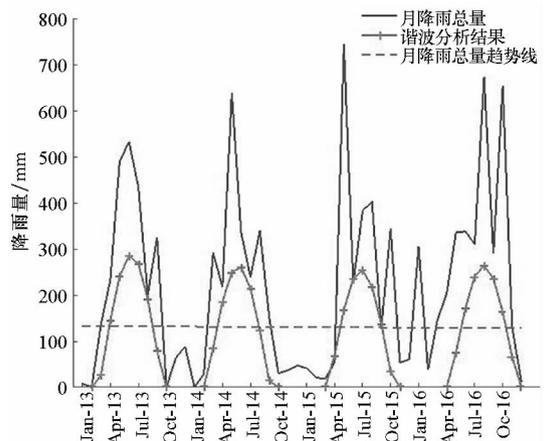
从表 2 中相位一栏可见各测站 PWV 峰值均出现在 7 月。这是由于香港地处亚热带,7 月是香港地区温度最高的月份,各测站 PWV 峰值出现在这个时段与温度有关。5 个测站的 PWV 增长率均在 0.50~0.96 mm/yr 之间,增长率最大的站为 HKKT,为 0.96 mm/yr。各测站的增长率都为正表明,近 4 年来香港地区的 PWV 呈现增长趋势。这一结果与文献[17]的结果相一致。

3.3 实际降雨量谐波分析结果

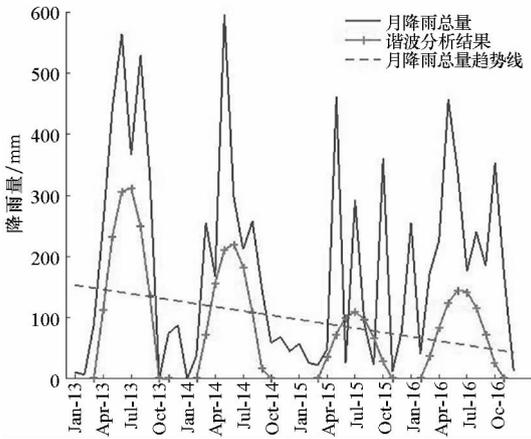
图 3 给出了香港地区 5 个测站 2013—2016 年连续 4 年的月总降雨量序列、月总降雨量序列的谐波分析曲线以及基于谐波分析得到的月总降雨量趋势线。表 3 给出了月总降雨量序列的谐波分析参数,包括振幅、相位、峰值出现的时间以及年增长速率。各个变量的具体含义同表 2。



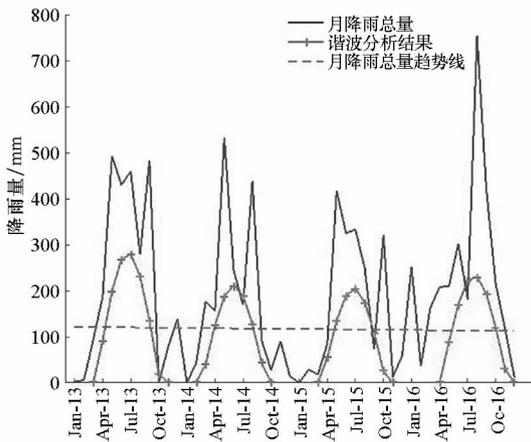
(a) HKKT 测站的降雨量
(a) Rainfall of station HKKT



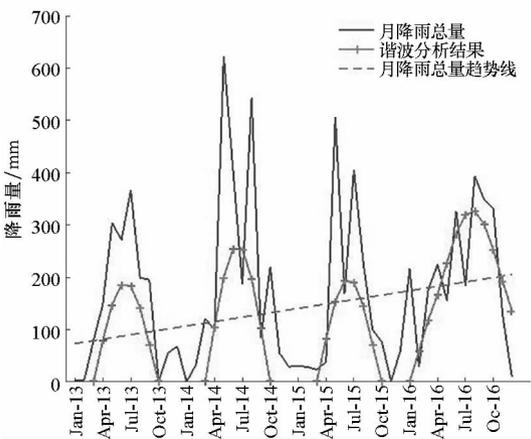
(b) HKST 测站的降雨量
(b) Rainfall of station HKST



(c) HKWS 测站的降雨量
(c) Rainfall of station HKWS



(d) HKNP 测站的降雨量
(d) Rainfall of station HKNP



(e) HKOH 测站的降雨量
(e) Rainfall of station HKOH

图3 各测站 2013—2016 年实际月降雨量、降雨量谐波分析曲线及其趋势线

Fig.3 Time series of monthly rainfall, actual rainfall harmonic analysis and its trend line during the years of 2013 to 2016 in each station

与图2类似,从图3可以看出,降雨量也呈现明显的季节性变化,降水主要集中在夏秋季节,春

冬季节雨水较少。仍以位于香港新界的测站 HKKT 为例,表3中该站点振幅为 147.64 mm, HKKT 站点的最大降雨量与最小降雨量之差为 295.28 mm,相位为 204.89°。降雨量峰值均出现在 7 月。

表3 香港地区 2013—2016 年基于谐波分析的月降雨量振幅、相位、峰值日期以及年增长率

Tab.3 The amplitude, phase, peak time and growth rate for the monthly average of rainfall based on harmonic analysis during the years of 2013 to 2016 for each station over Hong Kong

站点	振幅/mm	相位/(°)	峰值月份	实际降雨量增长率/(mm/yr)
HKKT	147.64	204.89	7	-11.55
HKST	211.01	204.15	7	-1.16
HKWS	152.53	198.19	7	-26.90
HKNP	183.94	196.02	7	-6.57
HKOH	161.58	197.55	7	31.17

从表3可见,位于香港岛的测站 HKST 振幅最大,为 211.01 mm,明显高于其他几个测站。与之对应的,该站的 PWV 振幅也最大。分析原因,这与该测站地理环境有关,香港地势北高南低,面向浩瀚的南海,由于地形的动力抬升作用导致北部新界地区降雨多于香港半岛和各岛屿,而该站恰好位于香港高程最高的大帽山区域。这与文献[18]的结果相对应。5个测站中最小降雨量发生在 HKKT,其振幅为 147.64 mm,这是因为与其他几个测站相比, HKWS 站更近内陆。与之相对应的,最小的大气可降雨量振幅也出现在该站。

降雨时间序列谐波分析的相位结果表明,5个测站降雨的峰值都出现在7月下旬。降雨量的年增长率除了在 HKOH 测站为正外,其余测站均为负。以 HKWS 测站 -26.9 mm/yr 的增长率绝对值最大。上述结果表明,在香港地区 2013—2016 年连续 4 年期间,与 PWV 微弱增长趋势不同,实际降雨量总体呈现下降趋势,与文献[19]结果一致。分析原因,这与近些年来香港地区气候持续变暖有关。已有研究结果表明,温度升高导致降雨量下降的趋势^[18,20]。除此之外,城市化产生的热岛效应可能是香港雨量呈现下降趋势及区域差异的原因之一。同样地, PWV 呈现出增长的趋势也与城市化有关,城市的高温加强对流活动,城市活动引致的悬浮粒子浓度增加亦有助于雨云的形成和发展^[21],从而导致 PWV 出现增长的趋势。

HKOH 测站呈现出增长趋势可能与该测站所

处的地理位置有关。一方面,由于地形的动力抬升作用,位于香港北部的大帽山附近多雨,而位于南部的横润岛少雨,HKOH 测站位于降雨较少的南部,靠近海洋,蒸发旺盛,湿度较大^[18]。另一方面,HKOH 测站所处位置远离市区,城市化产生的热岛效应在该站作用并不明显。因而,该测站降雨量出现增长的趋势。

4 结论

本文利用香港地区不同方位 5 个 GPS 站的观测数据,基于 PPP 解算模式,得到了 2013—2016 年连续 4 年的 PWV(GPS) 序列。在利用 ERA_Interim 再分析模式产品对 PWV(GPS) 进行精度验证的基础上,结合香港天文台发布的实际气象观测资料,对 PWV(GPS) 和实际降雨量时间序列进行谐波分析,并对分析结果进行了比较。发现 PWV 和实际降雨量在 5 个测站均表现出明显的季节性变化,春冬季节要比夏秋季节小。两者的峰值总是出现在 7 月。同时本文发现, PWV 的振幅和实际降雨量的振幅具有较强的相关性,即 PWV 振幅从大到小依次为 HKST, HKNP 和 HKOH 测站,而实际降雨量振幅从大到小也为这 3 个测站。5 个测站的 PWV 年增长率均为正;而实际降雨量增长率除了测站 HKOH 为正,其余测站均为负。这表明,与 PWV 的微弱增长趋势不同,香港地区近 4 年的实际降雨量呈下降趋势。

参考文献 (References)

- [1] 李黎, 匡翠林, 朱建军, 等. 基于实时精密单点定位技术的暴雨短临预报[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1129–1136.
LI Li, KUANG Cuilin, ZHU Jianjun, et al. Rainstorm nowcasting based on GPS real-time precise point positioning technology [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1129–1136. (in Chinese)
- [2] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D14): 15787–15801.
- [3] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. 测绘学报, 1998, 27(2): 113–118.
CHEN Junyong. On the error analysis for the remote sensing of atmospheric water vapor by ground based GPS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(2): 113–118. (in Chinese)
- [4] Rocken C, Braun J J, Vanhove T, et al. Developments in ground-based GPS meteorology [C]//Proceedings of International Workshop on GPS Meteorology, 2003: 1–6.
- [5] Gendt G, Dick G, Reigber C H, et al. Demonstration of NRT GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2003, 82: 360–370.
- [6] 陈永奇, 刘焱雄, 王晓亚, 等. 香港实时 GPS 水汽监测系统的若干关键技术[J]. 测绘学报, 2008, 36(1): 9–12.
CHEN Yongqi, LIU Yanxiong, WANG Xiaoya, et al. GPS real-time estimation of precipitable water vapor-Hong Kong experiences [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 36(1): 9–12. (in Chinese)
- [7] 于胜杰, 万蓉, 付志康. 气压对 GPS 大气可降水量解算的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 87–90, 95.
YU Shengjie, WAN Rong, FU Zhikang. Impact analysis of pressure parameter on inversion of GPS precipitable water vapor [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2): 87–90, 95. (in Chinese)
- [8] 王晓英, 宋连春, 戴仔强, 等. 香港地区加权平均温度特征分析[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3(1): 47–52.
WANG Xiaoying, SONG Lianchun, DAI Ziqiang, et al. Feature analysis of weighted mean temperature Tm in Hong Kong [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 3(1): 47–52. (in Chinese)
- [9] 李星光, 郑南山, 狄利娟. 浅析香港地区一次大面积降雨过程中的 GPS 可降水量特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(3): 368–372.
LI Xingguang, ZHENG Nanshan, DI Lijuan. Analysis of the characteristics of GPS precipitable during a large area of rainfall in Hong Kong [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(3): 368–372. (in Chinese)
- [10] 李星光, 郑南山, 狄利娟. PWV(GPS) 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 PWV(GPS) data to analysis two typhoons in Hong Kong [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(2): 298–302. (in Chinese)
- [11] 杨军建, 姚宜斌, 许超铃, 等. 大气可降水量与实际降水量的关联性分析[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(1): 18–21.
YANG Junjian, YAO Yibin, XU Chaoqian, et al. Analysis of the correlation between PWV and actual rainfall [J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(1): 18–21. (in Chinese)
- [12] Rowntree P R, Bolton J A. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1983, 109(461): 501–526.
- [13] Haas R, Elgered G, Gradinarsky L, et al. Assessing long term trends in the atmospheric water vapor content by combining data from VLBI, GPS, radiosondes and microwave radiometry [C]//Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, 2003: 279–288.
- [14] 张靖. GIS 空间内插方法与应用研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008.
ZHANG Jing. GIS spatial interpolation methods and application research [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008. (in Chinese)

- in-phase pre-filtering to mitigate amplitude scintillation effects[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 263–276.
- [10] Zhang L, Morton Y T. Tracking GPS signals under ionosphere scintillation conditions [C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009: 227–234.
- [11] Barreau V, Vigneau W, Macabiau C, et al. Kalman filter based robust GNSS signal tracking algorithm in presence of ionospheric scintillations [C]//Processing of Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal, 2012: 3420–3434.
- [12] Vilà-Valls J, Closas P, Fernández-Prades C. On the identifiability of noise statistics and adaptive KF design for robust GNSS carrier tracking [C]//Processing of Aerospace Conference, 2015.
- [13] Won J H. A novel adaptive digital phase-lock-loop for modern digital GNSS receivers [J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(1): 46–49.
- [14] Mosavi M R, Pashaian M, Rezaei M J, et al. Jamming mitigation in global positioning system receivers using wavelet packet coefficients thresholding [J]. *IET Signal Processing*, 2015, 9(5): 457–464.
- [15] Jin T, Liu Y. A novel GNSS weak signal acquisition using wavelet denoising method [C]//Processing of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2008: 303–309.
- [16] Tiwari R, Strangeways H J, Tiwari S, et al. GPS L1 phase scintillation using wavelet analysis at high latitude [C]//Processing of the 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, 2011: 227–230.
- [17] Liu T, Li S, Wang R, et al. Adaptive detection and modification algorithm of GPS cycle slips based on wavelet analysis [C]//Processing of International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011: 1907–1910.
- [18] Kintner P M, Ledvina B M, de Paula E R. GPS and ionospheric scintillations [J]. *Space Weather*, 2007, 5(9): 1–23.
- [19] Humphreys T E, Psiaki M L, Kintner P M. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1624–1637.
- [20] Humphreys T E, Psiaki M L, Ledvina B M, et al. A data-driven testbed for evaluating GPS carrier tracking loops in ionospheric scintillation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1609–1623.

(上接第 20 页)

- [15] 曹娜. 基于 PPP 的地基 GPS 水汽反演及其应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
CAO Na. Precipitable water vapor retrieval with ground-based GPS based on PPP and its application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [16] 迟道才, 王琦, 张旭东, 等. 基于谐波分析的降水量预测模型研究 [J]. *节水灌溉*, 2011(10): 42–44.
CHI Daocai, WANG Qi, ZHANG Xudong, et al. Research on precipitable prediction model based on harmonic analysis [J]. *Water Saving Irrigation*, 2011(10): 42–44. (in Chinese)
- [17] Yeh T K, Hong J S, Wang C S, et al. Determining the precipitable water vapor with ground-based GPS and comparing its yearly variation to rainfall over Taiwan [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(12): 2496–2507.
- [18] 董慧涵. 香港降水分析 [J]. *广州师院学报: 自然科学版*, 1999, 20(7): 81–87.
DONG Huihan. Analysis of Hongkong's precipitation [J]. *Journal of Guangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 1999, 20(7): 81–87. (in Chinese)
- [19] Ginn W L, Lee T Z, Chan K Y. Past and future changes in the climate of Hong Kong [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2010, 24(2): 163–175.
- [20] 董慧涵, 黄洁玫, 朱红梅. 香港气候的基本特征 [J]. *广州师院学报: 自然科学版*, 1994(1): 42–49.
DONG Huihan, HUANG Jiemei, ZHU Hongmei. The basic characteristic of Hongkong climate [J]. *Journal of Guangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 1994(1): 42–49. (in Chinese)
- [21] Shi K. Detrended cross-correlation analysis of temperature, rainfall, PM 10 and ambient dioxins in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97: 130–135.