引文格式：李丰翔,林琳. 基于奇异谱分析的地基GPS可降水汽含量变化规律分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 69-73. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.016

基于奇异谱分析的地基GPS可降水汽含量变化规律分析

李丰翔[1]，林　琳[2*]
（1. 山东省国土测绘院，山东 济南 250013；2. 山东省水利科学研究院，山东 济南 250014）

摘　要：利用GAMIT/GLOBK10.7对日本地区20个GPS测站2010—2019年数据进行解算，并进行精度评定。首先利用奇异谱分析和快速傅里叶变换方法探测可降水汽含量（PWV）的周期项和趋势项，并提出了奇异谱分析与最小二乘拟合相结合的PWV变化速率估算方法，有效避免了周期项和噪声对PWV变化速率的影响；然后深入分析和研究了日本地区PWV的时间变化和空间分布特点。结果表明，GAMIT/GLOBK10.7对数据解算的时间序列精度为3.35 mm；2010—2019年日本地区PWV呈明显上升趋势，上升速率为0.13 mm/a；日本地区PWV存在明显的周年周期信号和半年周期信号，且周年周期的信号强度大于半年周期；PWV呈沿海高、内陆低，南北部高、中部低的特点。研究结果可为气候变化研究提供了一定的基础参考资料。

关键词：GPS；PWV；奇异谱分析；快速傅里叶变换；时空分布规律
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0069-05

Variation Law Analysis of Precipitable Water Vapor by Ground-based GPS Based on Singular Spectrum Analysis

LI Fengxiang[1], LIN Lin[2]
(1. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan 250013, China;
2. Water Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: We used GAMIT/GLOBK 10.7 to process the 10-year data of 20 GPS stations in Japan from 2010 to 2019, and evaluated their accuracy in this paper. Firstly, we used singular spectrum analysis (SSA) and fast Fourier transform (FFT) to detect the periodic term and trend term of precipitable water vapor (PWV), and proposed a PWV change rate estimation method by combining SSA and least square fitting, which could effectively avoid the influence of periodic term and noise on PWV change rate. Then, we deeply analyzed and studied the temporal variation characteristics and spatial distribution characteristics of PWV in Japan. The results show that the accuracy of time series is 3.35 mm by GAMIT/GLOBK. The PWV in Japan shows an obvious upward trend from 2010 to 2019, with an upward rate of 0.13 mm/a, accompanied by obvious periodic changes. Spatially, PWV in Japan is high in the coastal area, low in the inland area, high in the north and south, and low in the central area. The research results can provide some basic references for climate change research.

Key words: GPS, PWV, SSA, FFT, spatio-temporal distribution law

水汽是水循环中最活跃的成分，可降水量是天气预报和气候研究中的一个重要参数。可降水汽含量（PWV）可反映大气水汽变化，是大气水分和热量传递的基础，是降水、蒸发和水汽辐合平衡的结果[1]。南亚季风和西风带来的水汽在日本地区上空汇聚[2-5]。水汽在固体、液体、气体3种形态变化的过程中会产生能量的吸收或释放，对维持大气稳定性和形成强对流天气具有重要影响。水汽的移动和变化也对地区的气候干旱具有重要影响[6-8]。此外，水汽还是台风等极端灾害性天气形成和发展的重要因素[9]。因此，准确获取PWV及其时空变化特征对于研究气候变化、天气预警等具有重要意义。

无线电探空仪、微波辐射法、太阳光度法和卫星遥感[10]等PWV探测技术的空间分辨率、时间分辨率低且精度不高，其应用受到了一定的限制[11-13]。GPS具有分布广泛、观测精度高、全天候观测、观测成本低和观测方便等优点，已广泛应用于车辆和个人导航、工程和大地测量、地球物理和地球动力学研究、姿态

收稿日期：2022-01-20。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR2015EM007）；中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室开放基金资助项目（WL201903）；省级水利科研资助项目（SDSLKY201813）。
第一作者简介：李丰翔（1988—），高级工程师，主要从事基础测绘、测量数据处理等工作，E-mail：lifengxiang868@126.com。
通信作者：林琳（1979—），博士研究生，正高级工程师，主要从事GNSS数据处理、水资源变化等工作，E-mail：llin_mail686@163.com。

确定等领域[14]。GPS信号在通过对流层和电离层时会产生延迟，采用双频载波相位线性组合可估计或显著降低电离层延迟的影响，通过双差解算或精确点定位技术可实现对天顶总延迟的精确估计。Bevis M[15]等提出了GPS气象学的概念，使PWV能在全天候条件下从GNSS观测数据中高精度、高时间分辨率检索。一些研究[15-16]表明，GPS反演PWV的精度是可靠的，RMSE值为1~3 mm；且被广泛应用于极端短期灾害监测和预报[17-18]等领域。Choy S[19]等基于GPS导出的PWV监测了2010年发生在墨尔本的风暴；Tang X[20]等研究发现，GNSS反演的PWV在2016年台风逼近浙江省时呈现持续增加趋势。我国学者从20世纪90年代开始接触学习GPS/MET原理方法，并开始将这一理论知识运用到实践中，如将地基GPS反演技术应用于对PWV的探测实验中[21-22]。1999年党亚民[23]等首次选取位于北京、上海、武汉的3个GPS跟踪站进行实验研究，得到了监测站完整的PWV时间序列，误差结果小于1 mm；刘焱雄[24]等基于香港地区GPS站的观测数据，采用双差网解方法计算测站的PWV时间序列并进行精度评定，结果表明GPS反演的PWV达到了较高的精度；邹友峰[25]等通过计算GNSS测站的PWV，分析了不同区域PWV的分布特点与规律；谢娜[26]等在深入分析GPS/PWV理论的基础上，结合多普勒天气雷达在自然界观测实验中测得的液态水信号数据资料，初步研究得到GPS/PWV与自然界平均降雨量的相互关系，为研究人工降雨提供了参考资料。因此，为了研究基于GPS技术反演PWV的时空分布特点与规律，本文以日本地区为例，基于GAMIT/GLOBK 10.7软件对数据进行解算，得到高精度PWV时间序列，并利用奇异谱分析（SSA）和快速傅里叶变换（FFT）方法研究其时空变化规律。

1 研究数据和方法

1.1 研究区概况与数据

本文选取日本作为研究区域。日本位于太平洋西北部海域，亚洲大陆东部地区，主体由九州、四国、本州、北海道四大岛组成；属温带海洋性季风气候，终年温和湿润，降雨较多；6月多梅雨，夏、秋季多台风。本文选取分布在日本的20个GPS测站实测数据，数据的时间跨度为2010—2019年，数据采样间隔为30 s。实验数据来源于SONEL网站（https://www.sonel.org）。

1.2 研究方法

1.2.1 PWV反演方法

本文利用GAMIT/GLOBK 10.7对GPS数据进行解算得到PWV。其原理为利用GNSS载波相位观测方程将对流层总延迟作为未知参数求解[27-28]，即

$$L_{i,f}^{j}=\rho_{i}^{j}+c\left(dt_{i}-dt^{j}\right)+M\times ZTD-I_{i,f}^{j}+\lambda_{f}N_{i,f}^{j}+\varepsilon_{i,f}^{j} \quad (1)$$

式中，i为接收机；j为卫星；ρ_{i}^{j}为接收机到卫星的几何距离；c为光速；dt_{i}为接收机钟差；dt^{j}为卫星钟差；M为对流层映射函数；$I_{i,f}^{j}$为电离层延迟；λ_{f}为相位观测波长；$N_{i,f}^{j}$为相位模糊度；$\varepsilon_{i,f}^{j}$为其他误差。

利用Saastamoinen模型计算对流层干延迟[29]，即

$$ZHD=\frac{0.002\,277\,68\times P}{1-0.002\,66\cos(2L)-0.000\,28\times H} \quad (2)$$

式中，P为大气压；L为GNSS站点纬度；H为GNSS站点高程。

对流层总延迟减去干延迟得到对流层湿延迟，再根据式（3）可求得GNSS反演PWV值[15]。

$$PWV_{GNSS}=ZWD(\rho_{W}\times g_{s}\times(k_{2}+\frac{k_{3}}{T_{m}}))\times 10^{-6} \quad (3)$$

式中，g_{s}为气体常数（461 ± 0.003 $Jkg^{-1}K^{-1}$）；ρ_{w}为液体水密度；k_{2}、k_{3}为折射常数，$k_{2}=24\pm11$ Kpa^{-1}，$k_{3}=3.75\pm0.03$ $K^{2}Kpa^{-1}$；T_{m}为大气垂直面的加权平均温度。

1.2.2 PWV时间序列预处理方法

本文先对PWV时间序列进行粗差探测和剔除，再对剔除的数据和原本缺失的数据进行插值处理。本文采用的粗差探测和剔除方法为3倍标准差方法，首先对时间序列进行扣除趋势项和中心化处理，然后求取序列的标准差，将超过3倍标准差的值认定为粗差并剔除，统计分析发现，粗差剔除率为3.96%。本文采用SSA插值方法。SSA[30]是一种对非线性、非平稳时间序列进行分析和预测的方法，可从具有未知先验信息的时间序列中提取出变化缓慢的趋势、周期、噪声等有效信息，已被应用于气候学、测量学[31]和海洋学[32]。SSA迭代插值[33-36]的主要步骤为：①采用符号“99999”对PWV时间序列中的缺失数据进行补全并进行中心化处理；②利用SSA对补全后的PWV时间序列进行分解；③采用加权相关分析方法确定前n阶为序列的主成分，将第1个重构成分中的值代替序列中缺失值，重复该步骤，直至前后两次插补数据残差的RMSE小于0.01 mm；④对第2个重构成分重复步骤③，直至

完成第 n 个重构成分的插值。

1.2.3　利用SSA和FFT探测趋势项和周期项的方法

PWV变化具有明显的周期项和趋势项，为探测日本地区PWV序列的周期项和趋势项，本文引入SSA和FFT进行时间序列分析，具体步骤为：①输入预处理后的PWV时间序列；②基于PWV时间序列构建时滞矩阵；③奇异值分解，步骤②和③称为SSA分解；④分组；⑤对角平均化，步骤④和⑤称为SSA重构；⑥利用FFT探测子序列的周期信号。

2　研究结果与分析

2.1　PWV解算和精度评定

本文采用高精度数据处理软件GAMIT/GLOBK 10.7，在Linux系统下运行，具体解算策略见表1。逐年平均的PWV解算结果见图1，可以看出，2010年起PWV均在100 mm以上，其中2010年、2014年、2015年和2016年的PWV均高于平均水平，这可能与全球变化的气候大环境有一定关系；PWV含量呈现先减后增再减的趋势，具有明显的周期现象，2015年达到最大值，约为110.2 mm，2012年达到最小值，约为100.6 mm。

表1　GAMIT解算策略

参数	设置	参数	设置
卫星高度角	15°	对流层估计时间间隔	1 h
数据采集率	30 s	对流层模型	SAAS
映射函数	GMF	海潮改正模型	FES2004
解算模式	RELAX		

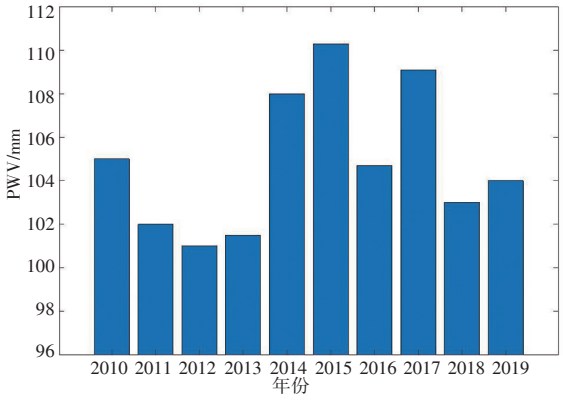


图1　2010—2019年逐年平均PWV

本文采用RMSE来评价PWV的精度，对10年的PWV时间序列进行精度统计，结果见表2，可以看出，日本地区20个GPS站10年数据反演的PWV的RMSE的平均值、最大值、最小值和标准差分别为3.41 mm、4.42 mm、2.07 mm和0.58 mm，PWV的解算精度较高，满足时空分布规律研究的精度需求。

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{I}(y_i-\hat{y})^2/I} \tag{4}$$

式中，y_i 为第 i 年的PWV；$\hat{y}$ 为2010—2019年PWV均值；I 为待分析的PWV总年数，本文取10。

表2　2010—2019年PWV精度统计结果/mm

测站	RMSE	测站	RMSE
P101	3.12	P211	3.61
P103	2.07	P104	3.74
P210	4.10	P107	3.12
P110	3.98	P111	3.19
P112	2.64	P209	3.91
P206	4.12	P115	3.84
P116	3.09	P117	3.03
P120	3.02	P207	3.01
P204	4.06	P201	4.42
P202	2.98	P203	3.29

2.2　PWV时空规律分析

本文首先利用SSA方法对2010—2019年日本地区20个测站的PWV年平均值序列进行分解，并利用FFT方法对分解所得的子序列进行周期探测，提取序列中存在的趋势项和周期项；然后利用SSA和最小二乘拟合相结合的方法拟合线性趋势，该方法能避免周期项和噪声对线性趋势的影响，尽可能高精度地估计PWV年变化速率。分析结果见图2，可以看出，日本地区PWV存在明显的上升趋势，上升速率约为0.13 mm/a；日本地区PWV存在明显的周期现象，较突出的周期为周年周期（b1、b2）和半年周期（c1、c2），周年周期的振幅约为2 mm，振幅较大，半年周期的振幅存在明显变化，2014年之前振幅约为0.5 mm，2014—2016年振幅约为0.8 mm，2017—2018年振幅约为0.3 mm，2018年以后振幅出现明显增大趋势，最大达到1 mm，半年周期的振幅总体比周年周期小。

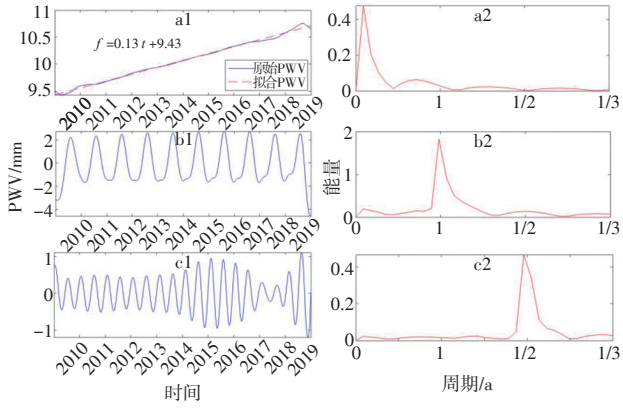


图2　2010—2019年日本地区PWV的SSA和FFT分析结果

同时，本文分析了2010—2019年日本地区PWV均值的空间分布特点，结果见图3，可以看出，日本地区PWV变化随纬度变化呈先减后增的趋势，且PWV的最低点出现在中部地区，北部PWV总体最高；且沿海区域PWV比内陆地区高。

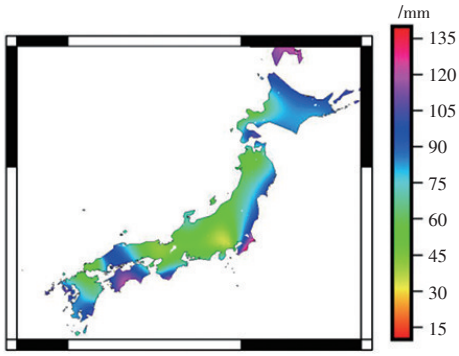


图3 2010—2019年日本地区PWV均值的空间分布

综上所述，从时间维度分析，2010—2019年日本地区PWV变化具有明显的增长趋势，且伴有明显的周期现象；从空间维度分析，日本地区沿海区域PWV比内陆高，且南北地区PWV含量高、中部地区含量低。

3 结 语

本文利用GAMIT/GLOBK 10.7软件对日本地区2010—2019年GPS数据进行解算得到高精度PWV数据。首先利用3倍标准差和SSA方法对数据进行预处理；然后利用SSA和FFT方法提取PWV序列的趋势项和周期项，并利用SSA与最小二乘拟合相结合的方法估计PWV变化速率，有效避免了周期项和噪声对PWV变化序列的影响，得到高精度的PWV变化速率。本文的主要结论为：①利用GAMIT/GLOBK软件对GPS数据进行解算，解算精度为3.35 mm，精度较高；②通过对PWV时间序列的粗差探测发现，2010—2019年日本地区PWV数据的粗差剔除率为3.98%，数据质量较好；③日本地区PWV存在明显上升趋势，上升速率为0.13 mm/a，且存在明显的周年周期和半年周期信号，周年周期信号强度高于半年周期，空间上内陆地区PWV低于沿海地区。

参考文献

[1] 余志鹏,王鸣鹤,吴晓倩. 台风“安比”袭鲁期间GPS-PWV时空特性分析[J]. 地理空间信息,2020,18(5):93-95

[2] Chen B, Xu X, Yang S, et al. On the Origin and Destination of Atmospheric Moisture and Air Mass over the Tibetan Plateau[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110:423-435

[3] Feng L, Zhou T. Water Vapor Transport for Summer Precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata Set Analysis[J]. Journal of Geophysical Research-biogeosciences, 2012, 117:D20114

[4] Tian L, Yao T, MacClune K, et al. Stable Isotopic Variations in West China: A Consideration of Moisturesources [J]. Journal of Geophysical Research-biogeosciences, 2007,112:D10112

[5] Zhang C, Tang Q, Chen D. Recent Changes in the Moisture Source of Precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate,2016,30:1 807-1 819

[6] Bin C, Xu X, Zhao T. Main Moisture Sources Affecting Lower Yangtze River Basin in Boreal Summers During 2004-2009 [J]. International Journal of Climatology,2013, 33:1 035-1 046

[7] Xu X, Miao Q, Wang J, et al. The Water Vapor Transport Model at the Regional Boundary During the Meiyu Period [J]. Advances In Atmospheric Sciences, 2003, 20: 333-342

[8] Zhang S, Xu X, Peng S, et al. Three-dimensional Variational Data Assimilation Experiments for a Heavy Rainfall Case in the Downstream Yangtze River Valley Using Automatic Weather Station and Global Positioning System Data in Southeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,2014,92:483-500

[9] 范士杰. GPS海洋水汽信息反演及三维层析研究[D]. 武汉:武汉大学,2013

[10] Gilford D, Randel W. Analyzing Nearly Four Decades of Historical Radiosonde Observations of Tropical Tropopause Layer and Cold-point Temperatures[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, American Geophysical Union: Washington, DC,2017

[11] Boone C, Walker K, Bernath P. Speed-dependent Voigt Profile for Water Vapor in Infrared Remote Sensing Applications[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2007,105:525-532

[12] Pérez-Ramírez D, Navas-Guzmán F, Lyamani H, et al. Retrievals of Precipitable Water Vapor Using Star Photometry: Assessment with Raman LiDAR and Link to Sun Photometry[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres,2012,117:D05202

[13] Chen B, Liu Z. Analysis of Precipitable Water Vapor (PWV) Data Derived from Multiple Techniques: GPS,

WVR, Radiosonde and NHM in Hong Kong[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings: Volume I, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014: 159-175

[14] 刘平利,申晓丹,刘家橘,等. GPS技术在地面沉降监测中的应用[J]. 地理空间信息,2020,18(10):52-54

[15] Bevis M, Businger S, Herring T, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres,1992,97:15 787-15 801

[16] Zhang W, Lou Y, Huang J, et al. Multiscale Variations of Precipitable Water over China Based on 1999-2015 Ground-based GPS Observations and Evaluations of Reanalysis Products[J]. Journal of Climate, 2018, 31: 945-962

[17] Zhao Q, Yao Y, Yao W. GPS-based PWV for Precipitation Forecasting and Its Application to a Typhoon Event[J]. The Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,2018,167:124-133

[18] Yao Y, Shan L, Zhao Q. Establishing a Method of Short-term Rainfall Forecasting Based on GNSS-derived PWV and Its Application[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 12 465

[19] Choy S, Wang C, Zhang K, et al. GPS Sensing of Precipitable Water Vapour During the March 2010 Melbourne Storm [J]. Advances in Space Research, 2013, 52: 1 688-1 699

[20] Tang X, Hancock C, Xiang Z, et al. Precipitable Water Vapour Retrieval from GPS Precise Point Positioning and NCEP CFSv2 Dataset During Typhoon Events[J]. Sensors,2018,18:3 831

[21] 徐杰,孟黎,任超,等. 对流层延迟改正中投影函数的研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(5):120-124

[22] 李延兴,徐宝祥,胡新康,等. 应用地基GPS技术遥感大气柱水汽量的试验研究[J]. 应用气象学报,2001,12(1): 61-69

[23] 党亚民,王权,冯金涛. 利用GPS资料反演大气水汽含量的研究[J]. 测绘科技动态,1999,24(3):2-5

[24] 刘焱雄,陈永奇,刘经南. 利用地面气象观测资料确定对流层加权平均温度[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000,25(5):400-404

[25] 邹友峰,王勇,闻德保,等. 利用不同气候类型的GPS可降水量比较研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2012, 37(5):573-576

[26] 谢娜,李国平,李昕翼,等. 地基GPS水汽总量在人工增雨中的应用[J]. 气象科技,2012,40(4):666-670

[27] 薛天云. 藏南地区GPS时间序列分析[J]. 地理空间信息, 2020,18(9):66-69

[28] 谭阳涛,岳建平. 基于超快速星历的GAMIT高精度基线解算研究[J]. 地理空间信息,2019,17(3):75-78

[29] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[J]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, 1972, 15: 247-251

[30] 王思捷,黄腾,周立俊,等. 奇异谱分析在地铁沉降预测中的应用[J]. 地理空间信息,2021,19(3):118-120

[31] Chen Q, Dam V T, Sneeuw N, et al. Singular Spectrum Analysis for Modeling Seasonal Signals from GPS Time Series[J]. Journal of Geodynamics, 2013, 72(12): 25-35

[32] Kondrashov D, Berloff P. Stochastic Modeling of Decadal Variability in Ocean Gyres[J]. Geophysical Research Letters,2015,42(5):1 543-1 553

[33] Schoellhamer D H. Singular Spectrum Analysis for Time Series with Missing Data[J]. Geophysical Research Letters,2001,28(16):3 187-3 190

[34] Beckers J M, Rixen M. EOF Calculations and Data Filling from Incomplete Oceanographic Datasets[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(12): 1 839-1 856

[35] Kondrashov D, Ghil M. Spatio-temporal Filling of Missing Points in Geophysical Data Sets[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2006,13(2):151-159

[36] Kondrashov D, Shprits Y, Ghil M. Gap Filling of Solar Wind Data by Singular Spectrum Analysis[J]. Geophysical Research Letters,2010,37(15):1 510-1 512