



马赛<sup>1</sup> 岳迎春<sup>1</sup> 上官明<sup>1</sup> 邹玉学<sup>1</sup> 丁茂华<sup>2</sup>

# 基于 GNSS 的 MODIS 大气可降水量校正模型

## 摘要

MODIS 大气可降水量(PWV)空间分辨率高但易受云雨等环境因素影响,精度不高.GNSS PWV 空间分辨率较低但具有全天候、不受天气影响、精度高的优点.研究表明两者存在显著的线性相关性,结合两者的优点,基于 GNSS PWV 校正 MODIS PWV 可获取大面积高精度的 PWV.针对传统的线性回归校正模型没有考虑云、气溶胶等的影响使两种数据线性相关性变差的问题,本文在传统的线性校正模型上增加了使用年积日的非线性周期项的方法来构建校正模型.利用 2017—2019 年香港地区 GNSS 对流层延迟与 MODIS 近红外数据,使用频谱分析线性残差项,结果表明残差具有显著的年周期.对比传统模型,本文模型的平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差和拟合度都有明显的改善,表明本文模型可行有效且精度较高.

## 关键词

全球导航卫星系统(GNSS);MODIS 数据;大气可降水量;线性回归;频谱分析;非线性校正模型

中图分类号 P407;P426

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-12

资助项目 国家自然科学基金(41904023)

## 作者简介

马赛,男,硕士生,主要研究方向为 GNSS 气象学.masai@cug.edu.cn

上官明(通信作者),女,博士,副教授,主要研究方向多源 GNSS 水汽反演和应用.shanggm@cug.edu.cn

1 中国地质大学 地理与信息工程学院,武汉,430074

2 扬州大学 水利科学与工程学院,扬州,225009

## 0 引言

精确的大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)分布数据对于研究中小尺度灾害天气以及短时间的天气预报具有重要的意义<sup>[1]</sup>.常规的 PWV 获取手段具有一定的局限性,如地基 GNSS 探测 PWV 具有高精度、低成本、全天候观测的优势<sup>[2]</sup>,尤其是它的时间分辨率能达到秒级,但由于 GNSS 测站密度有限制,空间分辨率通常在几十千米级别,很难反映详细的空间水汽变化情况.而中分辨率成像光谱辐射计(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)探测 PWV 在空间上连续,能够覆盖全球,具有达到千米级的高空间分辨率优势,但因云层遮挡等环境因素的影响,MODIS 产品的精度不高<sup>[3-11]</sup>.因此,综合两者的优势,利用 GNSS PWV 校正 MODIS PWV 具有重要的研究价值.

国内外多位学者利用 GNSS PWV 为标准值对 MODIS PWV 进行校正.文献[3-4]验证了 GPS PWV 的精度,并通过 GPS 水汽与 MODIS 近红外无云水汽产品相关性分析,发现两者具有显著的线性相关性,但是没有给出融合两种数据的具体手段;文献[5-6]基于 GPS PWV 采用全年的一元线性回归模型改正 MODIS 近红外水汽产品的精度,结果表明可以联合两种方式大范围、低成本、不受天气影响地监测一个地区的气候变化,但没有考虑大气可降水量随季节性变化较大因素;文献[7-9]建立了季节性与区域性的 MODIS PWV 校正模型,精度可以达到毫米级;文献[10-11]建立了不同月际的线性回归模型,实现了 MODIS 水汽产品的订正.以上研究大多是在短期内用线性回归模型进行 MODIS PWV 校正,并未考虑到云、气溶胶等环境因素造成的非线性的影响.

本文选择海洋性亚热带季风气候的香港区域为研究对象.该区域地理位置在 113°49'~114°31'E、22°08'~22°35'N,四季分明,气候变化多端.春季多云雾、能见度低,夏季多云雨,秋季潮湿,冬季干燥.尤其是夏秋两季易受台风影响,云雨较多.在考虑不同季节水汽差异较大的基础上,利用香港地区 2017—2019 年长期的 GNSS 与 MODIS 数据建立线性回归校正模型,然后通过频谱分析对线性模型的残差项进行分析,结果表明,残差具有明显的年周期.因此,本文在传统的线性模型中引入使用年积日的非线性年周期项优化模型,进而得到比传统线性回归模型更符合实际情况的校正 MODIS PWV 模型,以此为

大面积水汽监测提供有效手段.

## 1 研究数据

本文数据涉及探空站的水汽、GNSS 数据以及 MODIS PWV,数据时间为 2017—2019 年.探空站 Kings Park 位置是 114.17°E、22.31°N,用于区域建模的 GNSS 站点 HKSL 的位置是 113.928°E、22.37°N, HKWS 的位置是 114.533°E、22.43°N, HKNP 位置是 113.89°E、22.24°N, HKOH 位置是 114.23°E、22.24°N.用于验证的 GNSS 站为 HKPC、HKST、HKLM、T430(图 1).

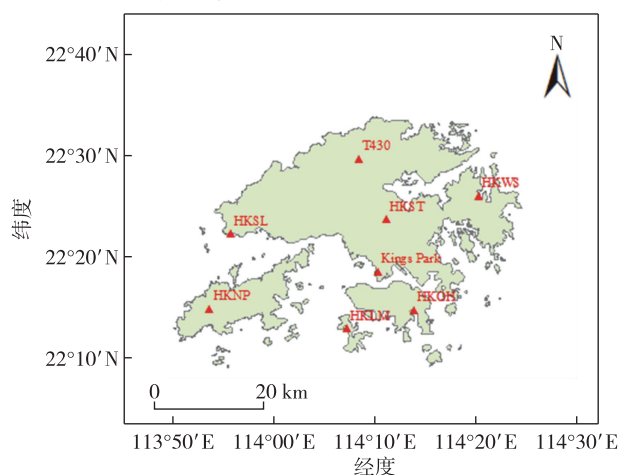


图 1 香港地区 CORS 站分布

Fig. 1 Distribution of CORS stations in Hong Kong

GNSS 的数据与 MODIS PWV 获取步骤如下:

1) 探空站的 PWV:探空数据可以用于香港地区 GNSS PWV 的验证,来源于美国怀俄明大学气象数据网(<http://weather.uwyo.edu/upperair/>),时间分辨率为 12 h.

2) GNSS PWV:GNSS 水汽由香港 CORS 观测数据反演获得,香港测绘处大地测量组能够获取香港 CORS 站点的气象数据,包括温度、压强、相对湿度、观测文件等(<ftp://ftp.geodetic.gov.hk/rinex2/>).解算软件为 GAMIT<sup>[12]</sup>,精密星历由 IGS 提供(<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/data/>),卫星高度角为 7°,同时引入 IGS 站 TWTF、JFNG、DAEJ、BJFS 等数据联合解算,站点天顶对流层延迟的解算为每 2 h 估算一个值.同时使用 IGS 提供香港 HKSL 与 HKWS 站的 GNSS 天顶对流层总延迟(ZPD)进行精度验证<sup>[13]</sup>([ftp://gssc.esa.int/gnss/products/troposphere\\_zpd/](ftp://gssc.esa.int/gnss/products/troposphere_zpd/)).GAMIT 解算中采用 Saastamoinen 模型计算静力学延迟与经验的大气加权平均温度公式计算 PWV<sup>[2,14]</sup>.

3) MODIS PWV:MODIS PWV 数据采用的是 NASA 提供二级产品 MOD05(白天)近红外的数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),数据格式为 HDF,分辨率是 1 km×1 km.采用数据的等级为“Confident Clear”,即除云率达到 95%以上,能在一定程度上清除掉由云层遮挡等环境影响产生的无效数据<sup>[15]</sup>.

## 2 GNSS 精度验证

本文以平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和 Pearson 相关系数( $R$ )作为评价指标<sup>[1-11]</sup>,来进行精度评价.

美国怀俄明大学每天提供 0 时和 12 时(UTC)的实时观测 PWV,即 Sounding PWV.后续 GNSS PWV 的时间与 MOD05 影像的时段对应,而 MOD05 的影像过境时间在 02:00—04:00(UTC)之间.为验证 GAMIT 解算 CORS 站得到的 PWV,本文选取了 2019 年的离探空站最近的香港 HKST、HKLM 两个站与 0 时的 Kings Park 的 Sounding PWV 进行对比,两者间的 RMSE 为 3~4 mm(图 2).图 2 横坐标为年积日,是仅在一年中使用的连续计算日期的方法,从当年 1 月 1 日起开始计算的天数<sup>[1]</sup>.由图 2 可知:GAMIT 解算 CORS 站得到的 PWV 与实测 PWV 的数值都很接近,两者随时间的变化趋势也基本保持一致,相关系数大于 0.980.在 HKLM 站与 HKST 站, GAMIT PWV 与 Sounding PWV 之间均呈现显著性线性关系.本文还比较了用 GAMIT 解算的 HKSL 和 HKWS 的 ZTD 与 IGS 的产品, RMSE 分别为 7.020 和 6.887 mm.对比结果表明,本实验使用的 GNSS 数据精度较高,与探空精度相似.

在此基础上,本文选取了 2017—2019 年与 MOD05 过境时间相同的 IGS 站处理得到的 PWV、GAMIT 处理得到的 PWV 以及除云等级 3 的 MOD05 近红外水汽(MODIS PWV)进行对比,三者的比较结果如图 3 所示.由图 3 可知:3 种数据随时间的变化趋势也基本保持一致, GAMIT 解算的 GNSS PWV 与由 IGS 提供数据计算得到的 GNSS PWV 数值很接近, MODIS PWV 存在明显偏差. HKSL 站 IGS 的 GNSS PWV 与 GAMIT 解算的 GNSS PWV 的标准差仅为 2.227 mm,与 MODIS PWV 的标准差为 6.830 mm; HKWS 站 IGS 的 GNSS PWV 与 GAMIT 解算的

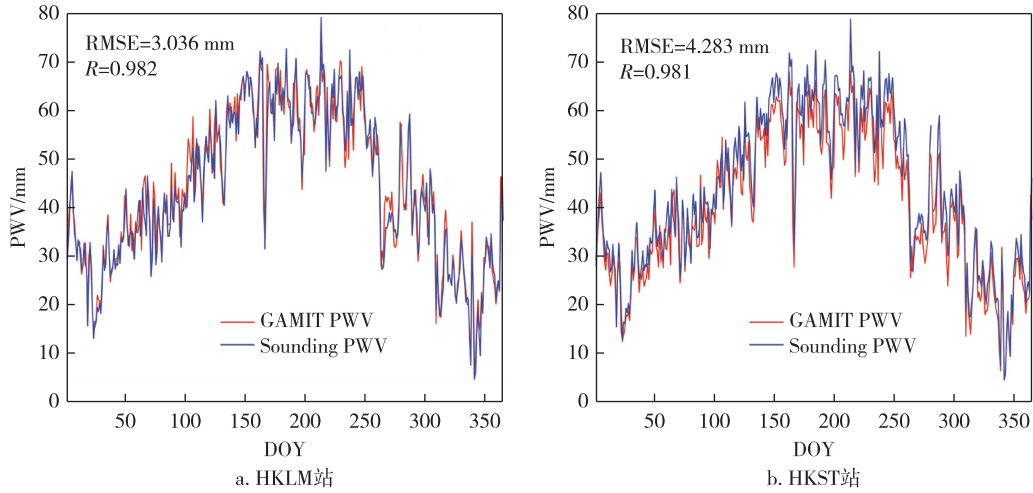


图 2 2019 年两种数据 PWV 时间序列  
Fig. 2 Time series of PWV retrieved from GAMIT and sounding data in 2019

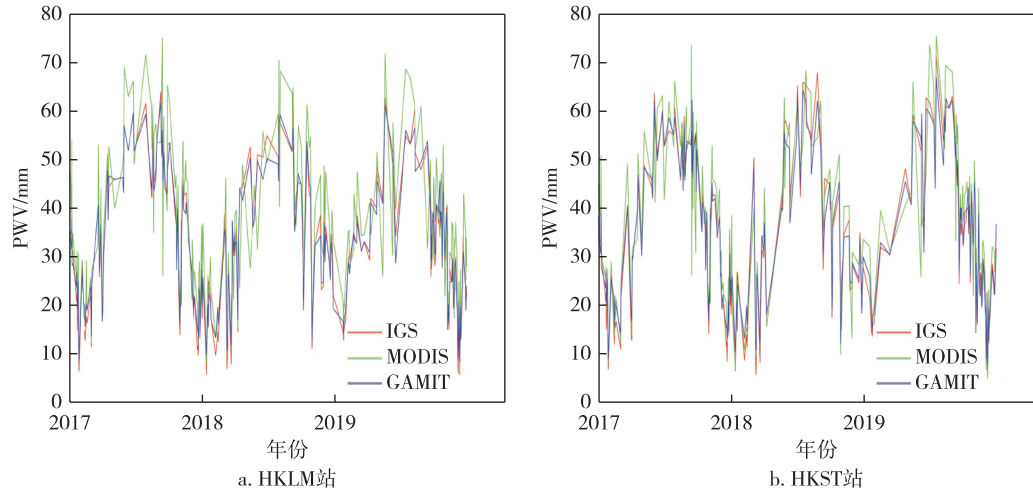


图 3 2017—2019 年三种数据 PWV 时间序列  
Fig. 3 Time series of PWV data retrieved from IGS, Modis and GAMIT during 2017-2019

GNSS PWV 的标准差仅为 2.453 mm, 与 MODIS PWV 的标准差为 6.189 mm. 结果表明, GAMIT 解算香港 CORS 站得到的 GNSS PWV 的精度与 IGS 的产品精度接近, 且远高于 MODIS PWV 的精度, 可以作为标准值校正 MODIS PWV.

### 3 基于 GNSS PWV 校正 MODIS PWV 的模型对比与分析

#### 3.1 GNSS PWV 与 MODIS PWV 相关性分析

2017—2019 年 GNSS PWV 与 MODIS PWV 建模数据共 1 028 对, 其中 HKSL 有 262 对, HKWS 有 254 对, HKOH 有 246 对, HKNP 有 266 对. 通过 Pearson 相关系数分析(表 1), 发现 4 个站都有显著的线性相关.

表 1 2017—2019 年 GNSS PWV 与 MODIS PWV 的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between GNSS PWV and MODIS PWV during 2017-2019

站点	R	数据对
HKSL	0.900	262
HKWS	0.920	254
HKOH	0.897	246
HKNP	0.901	266

#### 3.2 一元线性回归模型

基于 GNSS PWV 与 MODIS PWV 之间有显著性线性相关性, 可使用线性回归模型进行校正. 其一元线性回归校正模型为

$$y_{PWV-GNSS} = ay_{PWV-MODIS} + b, \tag{1}$$

其中  $a$  和  $b$  是回归系数,可通过最小二乘法<sup>[16]</sup>估计.

香港区域对应的回归系数  $\hat{a}$  与  $\hat{b}$  值如表 2 所示,其校正模型误差统计如表 3 所示.由表 2 可知,一

表 2 一元线性校正模型回归系数

Table 2 Regression coefficients of the unary linear regression correction model

$R^2$	$\hat{a}$	$\hat{b}$
0.813	0.826	3.665

表 3 2017—2019 年一元线性回归校正模型误差统计

Table 3 Error statistics of linear regression correction model for 2017–2019

站点	RMSE/mm		MAE/mm		MRE/%	
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
HKST	6.810	4.827	5.425	3.593	17.936	13.603
HKLM	8.024	5.602	6.284	4.288	18.554	13.274
HKPC	6.666	6.893	4.621	4.563	13.761	13.093
T430	6.955	5.405	5.345	3.679	17.390	12.275

元线性回归模型的拟合效果较好,  $R^2$  为 0.813. MODIS PWV 的模型精度在校正后均有提高,且 HKLM 站效果最好,均方根误差由 8.024 mm 减小到 5.602 mm,平均绝对误差由 6.284 mm 减小到 4.288 mm,平均相对误差由 18.554%降低到 13.274%,说明该模型拟合效果好.

### 3.3 残差频谱分析建模

为了进一步提高校正模型的精度,本文利用式(1)对 2017—2019 年间 4 个站的模型残差的周期性进行了分析,结果如图 4 所示.

图 4 为 Lomb-Scargle 周期图法<sup>[17-18]</sup>的结果,一元线性模型的残差在各个站点均呈现明显的年周期项,红色线表示功率级大于 99%的阈值,说明年周期项有 99%概率是真正的信号峰值,而不是随机波动的结果.结果表明云层遮挡、气溶胶等环境因素对校正模型产生的非线性影响在残差中依然存在,因此本文在传统的线性模型基础上增加了顾及年周期的三角函数项,拟合模型为

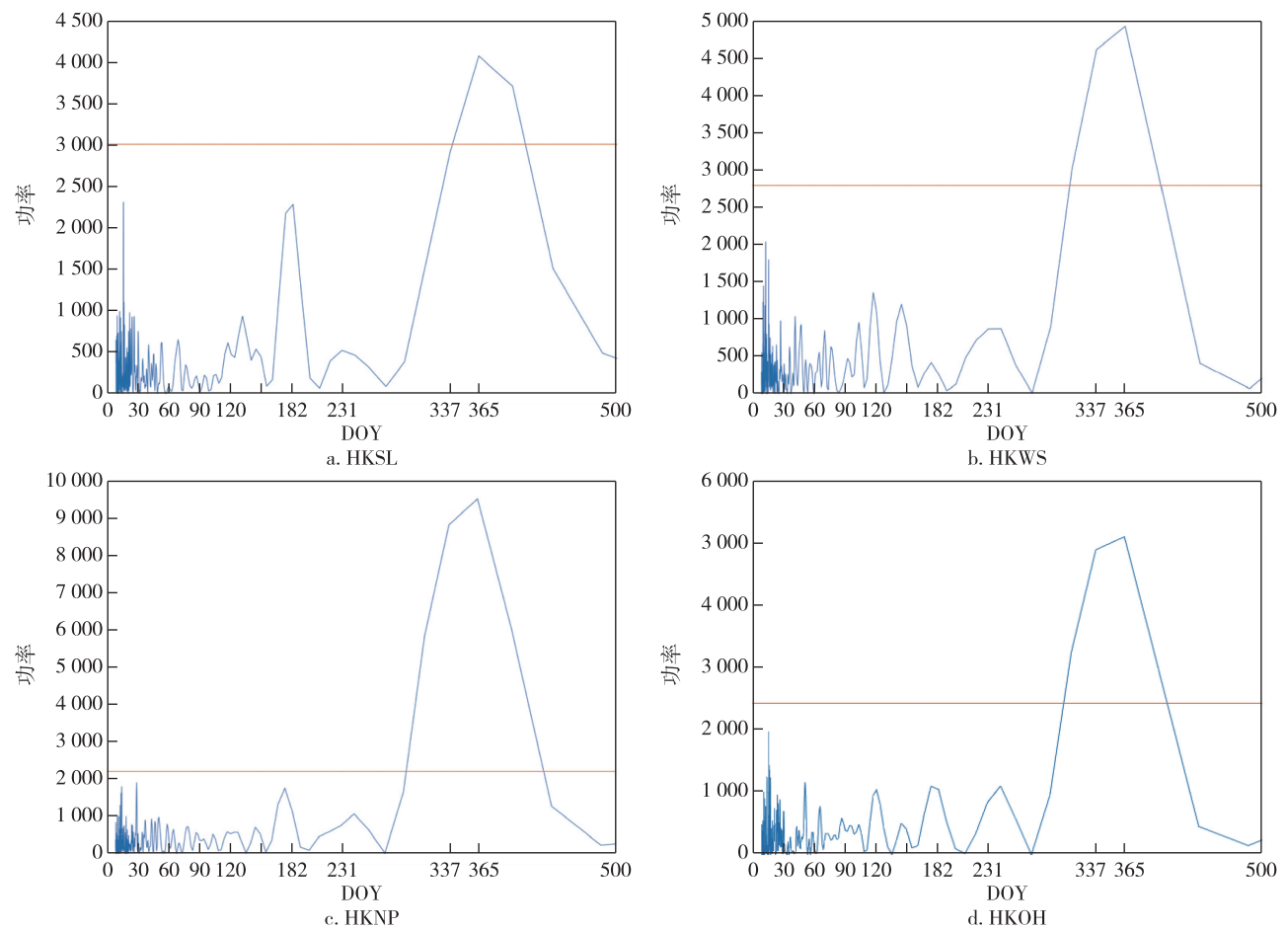


图 4 线性模型残差频谱分析

Fig. 4 Residual spectrum of linear model at 4 stations for 2017–2019

$$y_{PWV-GNSS} = ay_{PWV-MODIS} + b + a_1 \cos\left(\frac{d_y}{365.25} \times 2\pi\right) + b_1 \sin\left(\frac{d_y}{365.25} \times 2\pi\right), \quad (2)$$

式中  $d_y$  表示年积日,  $a_1, b_1$  为年周期项振幅.采用最小二乘法求得各项系数如表 4 所示,模型的决定系数为 0.875, 高于一元线性回归模型的 0.813.

表 4 顾及非线性模型各项系数

Table 4 Regression coefficients of involving nonlinear model

$R^2$	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{a}_1$	$\hat{b}_1$
0.875	0.603	12.942	-7.151	-1.058

### 3.4 模型验证精度对比与分析

为了进一步验证新模型精度,同样使用 3.2 实验中的 4 个测站进行验证对比,得到的误差统计如表 5 所示.顾及非线性的校正模型与传统的线性模型相比在 4 个测站均有较好的订正效果,经过校正后的 RMSE 降低了 0.4~1.1 mm.顾及非线性的校正模型在 4 个站的 MRE 和 MAE 也均小于传统线性模型,尤其是 HKLM 和 T430 两站.HKPC 站在使用线

性模型订正时 RMSE 由订正前的 6.666 mm 增加到 6.893 mm,应是由模型误差引起的,而顾及非线性的校正模型在此站有较好的订正效果, RMSE 降低到了 5.765 mm,也验证了新模型更稳定.即使在其他线性模型效果较好的站点,新模型的平均相对误差与平均绝对误差相比一元线性回归校正模型,精度也均有所提高.

所得的结果进一步与 GNSS PWV 对比,结果如图 5 所示(图 5 的横坐标 Row numbers 为各个站点 PWV 按时间顺序排列的行号).由图 5 可知:GNSS PWV、一元线性回归校正模型、顾及非线性的校正模型 3 种曲线在 4 个站点的变化趋势基本一致.香港地区春秋两季温暖凉爽、阳光充沛,冬季清凉干燥,夏季多云雨,因此顾及非线性的校正模型与一元线性回归校正模型的校正效果都很显著.顾及非线性的模型校正后的 MODIS PWV 与 GNSS PWV 变化趋势更为接近,考虑到香港地区夏季潮湿、常有暴雨且降雨量高,经常受台风影响与热带气旋吹袭,所以 MODIS PWV 也受云层遮挡、气溶胶等非线性环境因素影响.因此,香港地区实验结果表明:顾及非线性

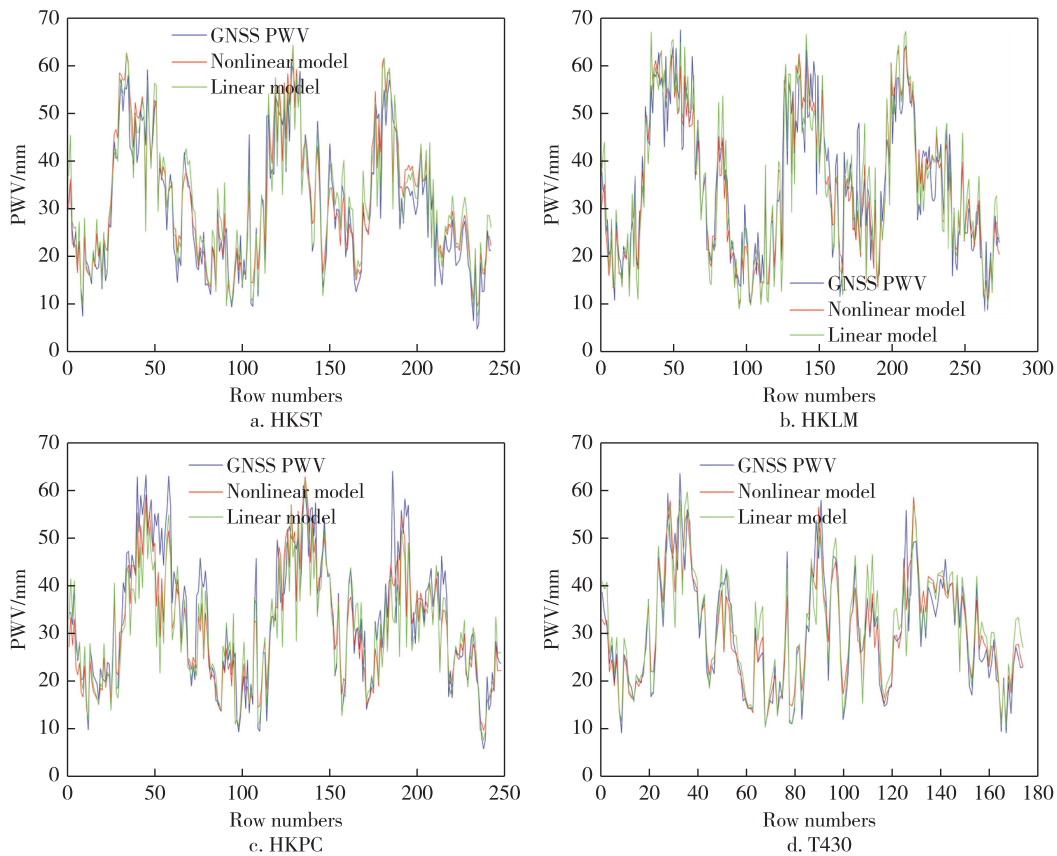


图 5 2017 年 4 个验证站的 2 种模型校正后 MODIS PWV 与 GNSS PWV 比较

Fig. 5 Comparison of MODIS PWV and GNSS PWV after correction by two models at 4 verification stations for 2017

的模型能够较好地校正非线性因素影响造成的误差,比传统线性模型的校正效果更好、精度更高。

表5 2017—2019年顾及非线性校正模型误差统计

Table 5 Error statistics of involving nonlinear correction model for 2017-2019

站点	数据对	MAE/mm	MRE/%	RMSE/mm
HKST	242	3.353	13.256	4.413
HKLM	273	3.893	12.295	5.176
HKPC	248	4.176	13.032	5.765
T430	174	3.130	11.107	4.528

## 4 结论

本文以香港地区为研究区域,开展了 GNSS PWV 与 MODIS PWV 的相关性分析,首次利用频谱分析线性校正模型的残差,根据分析结果,建立了顾及非线性的校正模型。主要得到以下结论:

1) GNSS PWV 与探空数据精度相近,可以作为标准值,MODIS PWV 的精度存在明显偏差,二者全年的变化趋势一致。建模站 HKSL、HKWS、HKOH、HKNP 的 GNSS PWV 与 MODIS PWV 的相关系数分别为 0.900、0.920、0.897、0.901,表明二者的线性关系显著,能够用线性模型进行校正。

2) 针对一元线性回归模型的残差进行了频谱分析,分析结果表明残差存在显著的年周期性,表明残差中包含 PWV 受云层遮挡、气溶胶等非线性因素影响。本文在一元线性回归模型的基础上增加了使用年积日的年周期项,对比传统一元线性回归模型,顾及非线性的新的校正模型精度更好,区域适用性更强。

本文首次提出的加入年周期项校正的线性回归模型可以获取更精确的区域性连续的大气可降水量信息,为大面积水汽监测提供了有效手段。大气可降水量具有区域性特点,下一步准备扩大研究区域和增加研究数据,对校正模型的适用范围做进一步研究。

致谢:感谢香港大地测量处提供的 GNSS 观测文件的(<ftp://ftp.geodetic.gov.hk/>),NASA 提供的 MODIS 数据(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。

## 参考文献

### References

[1] 王勇,刘严萍.地基 GPS 气象学原理与应用研究[M].北京:测绘出版社,2012

WANG Yong, LIU Yanping. Ground-based GPS meteorology principle and application research[M]. Surveying and Mapping Press, 2012

[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] Cahyadi M N, Audah S, Mutia N, et al. Analysis of weather changes in the region of Surabaya in 2015 and 2016 using water vapor data from GPS and terra MODIS satellite image[C]//AIP Conference Proceedings, 2017, 1857(1):080003

[4] Gui K, Che H Z, Chen Q L, et al. Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China[J]. Atmospheric Research, 2017, 197:461-473

[5] Sam Khaniani A, Nikraftar Z, Zakeri S. Evaluation of MODIS Near-IR water vapor product over Iran using ground-based GPS measurements[J]. Atmospheric Research, 2020, 231:104657

[6] Joshi S, Kumar K, Pande B, et al. GPS-derived precipitable water vapour and its comparison with MODIS data for Almora, Central Himalaya, India[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2013, 120(3/4):177-187

[7] 王勇,徐肖遥,刘严萍,等.基于 GPS 的河北省冬春季 MODIS 水汽校正模型研究[J].大地测量与地球动力学,2018,38(10):1001-1004,1010

WANG Yong, XU Xiaoyao, LIU Yanping, et al. The correction model of MODIS PWV in spring and winter of Hebei Province based on GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(10):1001-1004,1010

[8] 王勇,董思思,刘严萍,等.区域 MODIS 水汽季节修正模型[J].遥感信息,2020,35(1):9-14

WANG Yong, DONG Sisi, LIU Yanping, et al. Seasonal corrected model of regional MODIS precipitable water vapor[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(1):9-14

[9] 段茜茜,曲建光,高伟,等.基于 GPS 的 MODIS 近红外可降水量季节性模型建立[J].测绘工程,2017,26(12):21-26

DUAN Xixi, QU Jianguang, GAO Wei, et al. Seasonal model establishment of MODIS near infrared precipitable water vapor based on GPS[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2017, 26(12):21-26

[10] 杨娇,史岚,王茜雯,等.基于 GPS 数据的 MODIS 近红外水汽线性回归模型[J].热带地理,2020,40(1):137-144

YANG Jiao, SHI Lan, WANG Qianwen, et al. Moderate resolution imaging spectroradiometer near-infrared water vapor linear regression model based on the global positioning system data[J]. Tropical Geography, 2020, 40(1):137-144

[11] 王茜雯.地基 GPS 融合多源数据的香港地区水汽含量估算研究[D].南京:南京信息工程大学,2018

WANG Qianwen. Estimation of water vapor content in Hongkong area based on GPS fusion with multi source data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Sci-

- ence & Technology, 2018
- [12] Herring T A, King R W, Floyd M A, et al. Introduction to GAMIT/GLOBK, release 10.7 [EB/OL]. [2020-11-18]. [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf)
- [13] Byun S H, Bar-Sever Y E. A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4): 1-7
- [14] 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  $T_m$  in Hong Kong [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 3(1): 47-52
- [15] Wei J, Sun L, Huang B, et al. Verification, improvement and application of aerosol optical depths in China Part 1: inter-comparison of NPP-VIIRS and Aqua-MODIS [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 175: 221-233
- [16] Chatterjee S, Hadi A S. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(3): 379-393
- [17] Lomb N R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2): 447-462
- [18] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II - statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1982, 263(2): 835-853

## A correction model for MODIS precipitable water vapor based on GNSS data

MA Sai<sup>1</sup> YUE Yingchun<sup>1</sup> SHANGGUAN Ming<sup>1</sup> ZOU Yuxue<sup>1</sup> DING Maohua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074

<sup>2</sup> College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009

**Abstract** MODIS Precipitable Water Vapor (PWV) has high spatial resolution but is easily affected by environmental factors such as clouds and rain, and its accuracy is not high. GNSS PWV has low spatial resolution but has advantages of all-weather, weather-free, and high accuracy. Previous researches have shown a significant linear correlation between the two. Combining the advantages of both, correcting MODIS PWV based on GNSS PWV data can obtain PWV for large area with high precision. Yet traditional linear regression correction model does not take into account the deterioration of the linear correlation due to influences from environmental factors such as clouds and aerosols. To address this, a non-linear term of Day of Year is added to traditional linear model thus construct a new correction model. The GNSS tropospheric delay and MODIS near-infrared data in Hong Kong during 2017–2019 are used to verify the proposed correction model, and the result of linear residual spectrum shows a significant annual cycle. Compared with traditional correction model, the new model is significantly improved in aspects of average absolute error, average relative error, root mean square error, and fitting, which verifies the new model in feasibility and accuracy for MODIS PWV correction.

**Key words** Global Navigation Satellite System (GNSS); MODIS; Precipitable Water Vapor (PWV); linear regression; spectrum analysis; non-linear correction model