



基于GNSS的中国西南地区MODIS水汽校正研究

刘严萍, 曾昭扬, 王勇

引用本文:

刘严萍, 曾昭扬, 王勇. 基于GNSS的中国西南地区MODIS水汽校正研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(4): 389–392.

Liu Yanping, Zeng Zhaoyang, Wang Yong. MODIS Precipitable Water Vapor Correction in Southwest China Based on GNSS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(4): 389–392.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.04.011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震后水汽异常变化初探

Preliminary Study on Abnormal Changes of PWV after Earthquake

大地测量与地球动力学. 2019, 39(9): 881–883, 909 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2019.09.001>

大规模GNSS网数据处理一体化方案与中国大陆水平格网速度场模型构建研究

Research on an Integrational Scheme of Large-Scale GNSS Network Data Processing and Establishment of the Horizontal Grid Velocity Field Model in Chinese Mainland

大地测量与地球动力学. 2020, 40(9): 881–887, 897 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2020.09.001>

现今中国东北地区地球动力学环境

The Present Geodynamic Environment of Northeast China

大地测量与地球动力学. 2020, 40(11): 1101–1107 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2020.11.001>

基于动态阈值的移动终端GNSS定位阴影匹配算法

Research on Shadow Matching Algorithm for GNSS Positioning of Mobile Terminal Based on Dynamic Threshold

大地测量与地球动力学. 2021, 41(11): 1101–1105 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2021.11.001>

基于改进RBF神经网络的GNSS高程拟合

GNSS Height Fitting Based on Improved RBF Neural Network

大地测量与地球动力学. 2020, 40(3): 221–224, 241 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2020.03.001>

基于 GNSS 的中国西南地区 MODIS 水汽校正研究

刘严萍^{1,2} 曾昭扬³ 王 勇^{2,3}

1 天津城建大学经济与管理学院,天津市津静路 26 号,300384

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077

3 天津城建大学地质与测绘学院,天津市津静路 26 号,300384

摘 要:以 GNSS 水汽为标准,对中国西南地区进行 MODIS 水汽精度评价和相关性分析,构建 MODIS 水汽的区域校正模型和单站点校正模型并开展可靠性检验。分区域进行 MODIS 水汽校正和图像叠加得到校正后的中国西南地区 MODIS 水汽分布。结果表明,区域模型可替代单站点模型,中国西南地区 MODIS 水汽季节校正模型效果显著,在春、夏、秋、冬季的均方根误差 RMSE 分别优于 8 mm、9 mm、11 mm 和 4 mm。

关键词:GNSS;MODIS;水汽;中国大陆构造环境监测网络;中国西南地区

中图分类号:P228

文献标识码:A

由于水汽序列变化与地面降水变化一致,因此可用于降水监测^[1]。目前利用 GNSS 技术可反演高精度、高空间分辨率的水汽信息,水汽精度又可应用于气象研究^[2-3]。部分学者利用 GNSS 水汽时间序列对 GNSS 水汽短时频域特征、与极端天气的关系、中国西部地区大气加权平均温度模型、不同 BDS 星历反演水汽的精度进行分析^[4-7]。由于 GNSS 测站站间距离高达数十 km,且空间分辨率不高,从而限制其在气象灾害监测预警中的应用;而中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感水汽虽然空间分辨率高,但会受到降水、云层、地表反射光谱等不确定因素的影响,相对误差超过 10%^[8]。因此,多位学者利用 IGS(international global navigation satellite system service)、CMONOC(crustal movement observation network of China)和河北省区域 GNSS 资料分别构建 MODIS 水汽校正模型^[9-11]。部分学者^[12-13]使用广义回归神经网络融合 GNSS、MODIS 和 ERA5 的 PWV,获得时间分辨率为 1 d、空间分辨率优于 31 km、精度优于 2.7 mm 的中国水汽产品;Zhang 等^[14]将 GNSS 和 MODIS 测量数据集成到对流层层析成像系统中,解决了 GNSS 采集的几何缺陷问题。本文将依托 CMONOC 观测数据,开展中国西南地区 MODIS 水汽精度评定和校正研究。通过分区域进行 MODIS 水汽校正和图像叠加,实现 MODIS 水汽产品校正,为中国西南地

区气象灾害监测预警提供理论参考。

1 研究区域与研究数据

1.1 研究区域

中国西南地区包括四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、重庆市等 5 个省(区、市)。在 CMONOC 中西南地区 GNSS 站点共有 47 个,鉴于该地区地形复杂,综合考虑地理位置、海拔、气候类型等因素后将西南地区划分为四川盆地、云贵高原和青藏高原 3 个区域展开研究。

1.2 研究数据

利用 2016-01~12 西南地区 GNSS 连续观测数据(类型包括 GPS 和 GLONASS),与 BJFS、SHAO 和 JIXN 等同期数据联合解算获得 GNSS 水汽数据,解算软件为 GAMIT10.7。按 d 解算 IGS 精密星历和松弛解,结合每 h 的对流层延迟估计值,获得 GNSS 对流层延迟独立估计值。Saastamoinen 模型结合气象数据可计算得到静力学延迟,然后经过 Bevis 模型转换得到 GNSS 测站水汽时间序列。

从 NASA 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载得到 2016-01~12 的 MOD05 数据,空间分辨率为 1 km×1 km,单位为 mm。由于 MODIS 水汽为 d 数据,为便于比较,按照就近原则,根据中国西南地区 47 个

收稿日期:2021-07-14

项目来源:中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED-2021-2-4)。

第一作者简介:刘严萍,博士,讲师,主要从事 GNSS 气象学研究,E-mail: liuxiawy@126.com。

通讯作者:王勇,博士,教授,主要从事 GNSS 气象学研究,E-mail: wangyongjz@126.com。

GNSS 站点坐标,提取与 MODIS 水汽时间接近的 GNSS 水汽时间序列。

2 MODIS 水汽校正

2.1 MODIS 水汽与 GNSS 水汽比较

由于水汽存在明显的季节性差异,将研究数据分为春、夏、秋、冬 4 个季节,以 GNSS 水汽为标准,对 MODIS 水汽与 GNSS 水汽进行比较与精

度评价(表 1)。

由表 1 可知,大部分区域和季节 MODIS 水汽的 RMSE 超过 10 mm,夏季 RMSE 超过 20 mm,冬季水汽值较小,因此 RMSE 也相对较小。中国西南地区大部分区域全年及各季节 MODIS 水汽和 GNSS 水汽的相关性未达到 0.5,由此可知两者并非简单的线性关系,需要进一步探究不同季节不同区域两者的函数关系。

表 1 MODIS 水汽与 GNSS 水汽比较
Tab.1 Comparison between MODIS PWV and GNSS PWV

时间	相关性			RMSE /mm			样本数		
	青藏高原	四川盆地	云贵高原	青藏高原	四川盆地	云贵高原	青藏高原	四川盆地	云贵高原
全年	0.463	0.490	0.437	7.43	17.81	14.46	4 732	3 104	5 838
春季	0.526	0.282	0.350	5.78	13.82	11.44	997	763	1 492
夏季	0.292	0.116	−0.033	11.61	24.72	21.55	1 176	797	1 502
秋季	0.572	0.178	0.367	7.23	17.42	14.13	1 429	813	1 427
冬季	0.665	0.003	0.353	1.89	6.99	5.87	1 130	731	1 417

2.2 基于 GNSS 的 MODIS 水汽校正模型

由于 MODIS 水汽与 GNSS 水汽在不同区域、不同季节的相关性较小,因此需要分季节、分区域对 MODIS 水汽校正模型进行构建,并根据实际需要采用不同的校正模型。首先采用随机提取方法选择 80% 的样本数据作为构建方程的依据,剩余 20% 的样本数据用于检验方程。本文进行多次实验后最终选择二次函数模型作为最优校正模型。二次函数模型的一般表达式为:

$$y = Ax^2 + Bx + C \tag{1}$$

式中,y 为校正后的 MODIS 水汽(GNSS 水汽),x 为 MODIS 水汽,A 为二次项系数,B 为一次项系数,C 为常数项。构建的各区域各季节二次函数模型系数和 R² 如表 2 所示。

表 2 MODIS 水汽区域校正模型
Tab.2 Regional MODIS PWV correction models

地区	时间	常数项	一次项系数	二次项系数	R ²	样本数 /个
青藏高原	全年	2.432	1.476	−0.023	0.439	3 786
	春季	4.713	0.732	0.000	0.276	798
	夏季	17.036	0.042	0.009	0.094	941
	秋季	1.958	1.618	−0.037	0.365	1 143
	冬季	1.333	0.756	0.005	0.442	904
四川盆地	全年	20.427	0.362	0.002	0.191	2 483
	春季	23.619	−0.372	0.017	0.129	610
	夏季	47.006	−0.540	0.009	0.140	638
	秋季	27.524	−0.183	0.008	0.046	650
	冬季	14.993	−0.829	0.042	0.092	585
云贵高原	全年	16.046	0.452	0.090	0.241	4 670
	春季	20.335	−0.296	0.016	0.174	1 194
	夏季	40.427	−0.286	0.005	0.024	1 202
	秋季	21.083	0.199	0.003	0.137	1 142
	冬季	10.945	−0.227	0.022	0.177	1 134

由表 2 可知,不同区域不同季节校正模型的二次项系数存在差异,例如青藏高原春季二次项

系数为 0,而四川盆地和云贵高原春季二次项系数分别为 0.017 和 0.016。结合表 1 可知,二次项系数与 MODIS 和 GNSS 水汽的相关性有关,当相关性系数大于 0.5 时,二次项系数等于或趋近于 0,模型变为一次线性函数。

为检验区域模型在单站点 MODIS 水汽校正中的适用性,利用相同方法对单站点进行建模(各区域随机选取 2 个站点)。单站点 80% 的数据用于构建模型,剩余 20% 的数据用于检验,模型系数如表 3 所示。

表 3 单站点 MODIS 水汽校正模型
Tab.3 Single-site MODIS PWV correction models

区域	站点	常数项	一次项系数	二次项系数	R ²	样本数 /个
青藏高原	炉霍	0.539	2.381	−0.064	0.593	266
	日土	1.402	1.476	−0.041	0.542	280
四川盆地	巴中	21.075	−0.336	0.002	0.318	271
	遂宁	21.987	0.386	0.001	0.292	246
云贵高原	通海	9.707	0.760	−0.003	0.332	260
	澜沧	33.041	−0.618	0.016	0.148	251

2.3 模型可靠性检验

采用预留的 20% 样本数据,以 GNSS 水汽为标准,将区域全年和分季节模型分别应用于 MODIS 水汽校正,以评价 MODIS 水汽校正效果(表 4)。

由表 4 可知,3 个区域各时间段 MODIS 水汽与 GNSS 水汽的 RMSE 均明显减小,MODIS 水汽精度明显提升,在春、夏、秋、冬季的 RMSE 分别优于 8 mm、9 mm、11 mm 和 4 mm。由于 GNSS 水汽变化具有年周期、半年周期以及更小尺度的周期,因此全年模型的精度低于季节模型。

为验证区域模型在单站点的适用性,利用区域和单站点校正模型分别对 GNSS 站点 MODIS

水汽进行校正,并比较校正后的 MODIS 水汽精度(表 5)。

表 4 MODIS 水汽校正模型可靠性检验
Tab. 4 Reliability test of MODIS PWV correction models

时间	青藏高原			四川盆地			云贵高原		
	平均偏差/mm	RMSE/mm	样本数/个	平均偏差/mm	RMSE/mm	样本数/个	平均偏差/mm	RMSE/mm	样本数/个
全年	4.74	6.24	946	9.94	12.11	621	9.42	11.19	1 168
春季	3.51	4.54	199	6.11	7.68	153	5.81	7.57	298
夏季	5.93	7.35	235	6.65	8.31	159	5.29	6.84	300
秋季	4.77	6.09	286	8.57	10.17	163	8.30	9.85	285
冬季	1.20	1.72	226	2.69	3.47	146	3.06	3.95	283

表 5 区域模型与单站点模型精度
Tab. 5 Accuracy of regional model and single-site model

区域	站点	校正前 RMSE/mm	单站点模型 RMSE/mm	区域模型 RMSE/mm	样本数 /个
青藏	炉霍	6.91	4.41	4.71	66
高原	日土	3.71	2.91	3.42	70
四川	巴中	18.00	11.16	11.21	68
盆地	遂宁	19.08	12.40	12.61	62
云贵	通海	10.46	8.78	9.27	65
高原	澜沧	17.18	11.53	12.78	63

由表 5 可知,区域模型精度与单站点模型精度接近,说明可利用区域模型代替单站点模型减少 MODIS 水汽校正模型的构建工作,为下一步 MODIS 水汽校正提供基础。

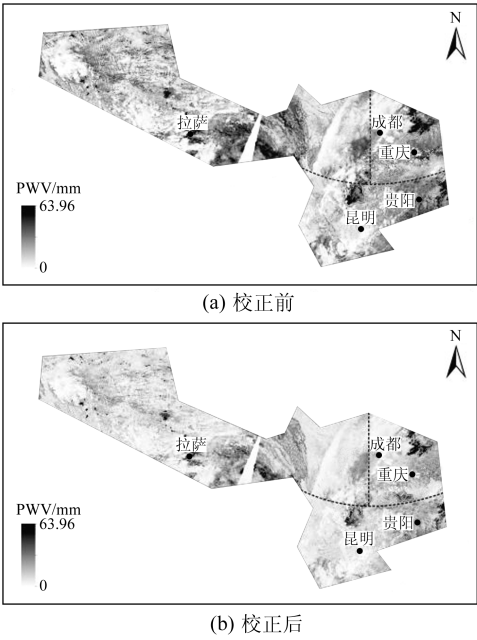
3 基于 GNSS 的中国西南地区 MODIS 水汽校正

在 MODIS 高空间分辨率基础上,对区域 MODIS 水汽产品进行整体校正。从预留的各季节样本中用随机数表选择 1 d(2016-04-25)数据开展实验。通过分区域进行 MODIS 水汽校正和图像叠加,完成 MODIS 水汽产品校正,校正前后比较如图 1 所示。

从图 1 可以看出,中国西南地区水汽分布具有明显的地理差异,校正前后的 MODIS 水汽也存在较大差别。校正效果最明显的区域为青藏高原西部、四川盆地和云贵高原东南部。青藏高原使得南半球水汽通过索马里急流到达北半球之后产生绕流和爬坡现象,一部分水汽绕流至东亚地区产生东亚雨季降水,导致青藏高原西部地区水汽值较大,因此模型校正效果明显;四川盆地和云贵高原东南部水汽值高于其他地区,MODIS 水汽原始值与 GNSS 水汽值差异较大,因此模型改正效果较为明显。由表 5 中云贵高原通海和澜沧站点校正效果对比可知,澜沧站点的校正效果优于通海站点,澜沧站点位于云贵高原南部地区,这与图 1 的结果相符。

4 结 语

1)大部分区域全年及各季节 MODIS 水汽和



黑色虚线为本文划分的青藏高原区域(上左)、四川盆地(上右)、云贵高原区域(下)分界线

图 1 校正前后的 MODIS 水汽
Fig. 1 MODIS PWV before and after correction

GNSS 水汽的相关性未达到 0.5,说明中国西南地区 MODIS 水汽与 GNSS 水汽之间并非简单的线性关系。

2)采用二次函数模型构建的 MODIS 水汽校正区域模型与单站点模型的对比分析表明,区域模型可替代单站点模型。中国西南地区 MODIS 水汽季节校正模型效果显著,在春、夏、秋、冬季的 RMSE 分别优于 8 mm、9 mm、11 mm 和 4 mm。

参考文献

[1] Shi J B, Xu C Q, Guo J M, et al. Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (6): 3 452- 3 459

[2] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. Pointed Water Vapor Radiometer Corrections for Accurate Global Positioning System Surveying [J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23):2 635-2 638

[3] Wang Y, Liu Y P, Liu L T, et al. Retrieval of the Change of Precipitable Water Vapor with Zenith Tropospheric De-

- lay in the Chinese Mainland[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(1):82-88
- [4] 刘严萍, 王勇, 丁克良, 等. 基于 CMONOC 的 GNSS 水汽短时频域特征研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(11):118-122 (Liu Yanping, Wang Yong, Ding Kelian, et al. Short Term Frequency Domain Characteristics of GNSS PWV Based on CMONOC[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(11):118-122)
- [5] 王勇, 于腾丽, 刘严萍, 等. 基于 FFT 与小波变换的 SOI 与 GNSS ZTD 的周期变化影响研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(3):254-261 (Wang Yong, Yu Tengli, Liu Yanping, et al. Study on the Periodic Variation of SOI and GNSS ZTD Based on FFT and Wavelet Transform[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(3):254-261)
- [6] 莫智翔, 黎杏, 黄良珂, 等. 顾及多因子影响的中国西部地区大气加权平均温度模型精化研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(2):145-151 (Mo Zhixiang, Li Xing, Huang Liangke, et al. Refinement of Atmospheric Weighted Mean Temperature Model Considering the Effects of Multiple Factors for Western China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(2):145-151)
- [7] 尹恒毅, 郭春喜, 惠哲, 等. 不同 BDS 星历反演大气可降水量精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(11):182-187 (Yin Hengyi, Guo Chunxi, Hui Zhe, et al. Precision Analysis of Precipitable Water Vapor in Different BDS Ephemeris[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(11):182-187)
- [8] Oliveira G, Brunsell N A, Moraes E C, et al. Evaluation of MODIS-Based Estimates of Water-Use Efficiency in Amazonia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19):5291-5309
- [9] 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
- [10] 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)
- [11] 刘备, 王勇, 姜泽生, 等. CMONOC 观测约束下的中国大陆地区 MODIS PWV 校正[J]. *测绘学报*, 2019, 48(10):1207-1215 (Liu Bei, Wang Yong, Lou Zesheng, et al. The MODIS PWV Correction Based on CMONOC in Chinese Mainland[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(10):1207-1215)
- [12] Zhang B, Yao Y B. Precipitable Water Vapor Fusion Based on a Generalized Regression Neural Network[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(3)
- [13] Xiong Z H, Zhang B, Sang J Z, et al. Fusing Precipitable Water Vapor Data in China at Different Timescales Using an Artificial Neural Network[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9)
- [14] Zhang W Y, Zhang S B, Zheng N S, et al. A New Integrated Method of GNSS and MODIS Measurements for Tropospheric Water Vapor Tomography[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2)

MODIS Precipitable Water Vapor Correction in Southwest China Based on GNSS

LIU Yanping^{1,2} ZENG Zhaoyang³ WANG Yong^{2,3}

¹ School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, 26 Jinjing Road, Tianjin 300384, China

² State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China

³ School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, 26 Jinjing Road, Tianjin 300384, China

Abstract: According to the GNSS precipitable water vapor(PWV), we carry out accuracy evaluation and correlation analysis of MODIS PWV in southwest China, construct the regional correction model and single-site correction model of MODIS PWV, and carry out a reliability test. After sub-regional MODIS PWV correction and image superposition, we obtain the corrected MODIS PWV distribution in southwest China. The results show that the regional model can be used to replace the single-site model, and the seasonal correction model of MODIS PWV in southwest China has a significant effect. The root mean square error(RMSE) in spring, summer, autumn and winter are better than 8 mm, 9 mm, 11 mm and 4 mm, respectively.

Key words: GNSS; MODIS; precipitable water vapor; CMONOC; southwest China

Foundation support: Open Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, No. SKLGED-2021-2-4.

About the first author: LIU Yanping, PhD, lecturer, majors in GNSS meteorology, E-mail: liuxiawy@126.com.

Corresponding author: WANG Yong, PhD, professor, majors in GNSS meteorology, E-mail: wangyongjz@126.com.