



### 顾及海拔影响的GNSS水汽反演及时空变化规律分析

王 航

#### GNSS water vapor inversion and spatiotemporal variation analysis considering altitude influence

WANG Hang

引用本文:

王航. 顾及海拔影响的GNSS水汽反演及时空变化规律分析[J]. 全球定位系统, 2024, 49(6): 104–111. DOI: [10.12265/j.gnss.2024147](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024147)

WANG Hang. GNSS water vapor inversion and spatiotemporal variation analysis considering altitude influence[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(6): 104–111. DOI: [10.12265/j.gnss.2024147](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024147)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024147>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 对流层映射函数对GNSS反演可降水量的影响分析

Analysis of the influence of tropospheric mapping function on GNSS inversion precipitable water vapor  
全球定位系统. 2019, 44(2): 76–83

#### 不同饱和水汽压模型对GNSS反演可降水量的影响分析

Analysis of influence of different saturated water vapor pressure models on GNSS inversion precipitable water  
全球定位系统. 2020, 45(6): 55–63

#### 基于MGEX站多系统GNSS反演大气可降水量精度评估

Performance evaluation of atmospheric precipitable water vapor inversion of multi-system GNSS at selected MGEX stations  
全球定位系统. 2022, 47(5): 100–110

#### 不同加权平均温度模型对大气可降水量影响分析

Influence analysis of different weighted mean temperature models on precipitable water vapor  
全球定位系统. 2023, 48(3): 72–76

#### 基于超快速星历反演大气降水量的精度分析

Precision analysis of atmospheric precipitation inversion based on super fast ephemeris  
全球定位系统. 2019, 44(5): 41–46

#### 基于LightGBM算法的大气可降水量预测方法研究

Research on precipitable water vapor prediction method based on LightGBM algorithm  
全球定位系统. 2024, 49(5): 110–119



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2024147

# 顾及海拔影响的 GNSS 水汽反演及 时空变化规律分析

王航

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:** 本文旨在探究研究区域内海拔对 GNSS 反演大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 精度及其时空变化规律的影响。研究通过对比分析 GNSS 反演的 PWV 数据与探空站和第五代再分析资料 (ERA5) 数据, 并结合奇异谱分析与快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 系统评估了研究区域内不同海拔区域的 PWV 反演精度, 探讨了海拔对 PWV 时空分布的综合影响。结果显示: 研究区域内 GNSS 反演的 PWV 在各海拔区域均表现出较高的可靠性, 尤其与探空站数据的吻合度优于 ERA5, 且在高海拔地区表现出更为稳定的精度。研究揭示了研究区域内 PWV 的显著变化趋势, 2011—2020 年间, PWV 呈现出非线性上升趋势, 平均增速为 0.12 mm/a, 特别是在 2015—2017 年间增长显著加速。PWV 具有明显的周年、半年和 1/3 年周期变化, 振幅分别为 8 mm、2.2 mm 和 0.7 mm。分析了研究区域内不同海拔区域 PWV 的规律, 高海拔区域的年周期影响更为显著, 低海拔区域则以长期趋势为主导, 季节性变化在高海拔地区尤为突出。空间上, 东南部低海拔区域的 PWV 值最高, 而西南部高海拔区域则最低, 反映出地形地势对 PWV 分布的显著影响。研究为高海拔地区的 PWV 反演模型优化提供了科学依据, 并为理解区域气候变化及其机制提供了新的视角。

**关键词:** GNSS; 大气可降水量 (PWV); 海拔; 时空规律

**中图分类号:** P228

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1008-9268(2024)06-0104-08

## 0 引言

全球气候变化对人类社会和自然环境的影响日益显著, 监测和分析大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 已成为气象学和气候学研究中的关键议题<sup>[1-3]</sup>。PWV 作为描述大气整层水汽含量的重要参数, 对于深入理解大气过程、改进天气预报模型以及开展气候变化研究都具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。GNSS 凭借其高精度、全天候和全球覆盖的优势<sup>[7-8]</sup>, 在 PWV 反演方面展现出显著的独特性, 已成为大气水汽监测的关键手段之一<sup>[9-10]</sup>。

近年来, GNSS 反演 PWV 的研究取得了广泛进展<sup>[11-13]</sup>。文献<sup>[14]</sup>利用中国 377 个 GNSS 站点的数据, 通过改进加权平均温度模型, 显著提高了 PWV 反演的精度。文献<sup>[15]</sup>提出了一种基于机器学习的方法,

能够在缺少气象参数的情况下, 从天顶对流层延迟 (zenith total delay, ZTD) 实时反演 PWV, 特别是在高纬度地区, 精度相比传统模型提高了 28.1% 至 22.2%。文献<sup>[16]</sup>通过结合 GNSS、中分辨率成像光谱仪和欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料 (the fifth generation ECMWF reanalysis, ERA5) 数据, 生成了更高精度和分辨率的 PWV 地图, 展示了数据融合在提升 PWV 空间分辨率和减小系统偏差方面的优势。杨鹏飞等<sup>[17]</sup>则评估了 ERA5 与 GNSS ZTD 数据在黄土高原地区的 PWV 反演中的表现, 结果表明, 基于 GAMIT/GLOBK 与 PANDA 软件得到的 ZTD 数据具有较小的误差和偏差。文献<sup>[18]</sup>通过分析 2018—2022 年中国大陆多个 GNSS 测站和探空站数据, 结合 ERA5, 成功实现了 PWV 的高精度反演, 尤其在冬季和不同气候区表现出显著提升。然而, 这些

收稿日期: 2024-08-21

资助项目: 基于北斗地基增强的铁路运维动态基准关键技术 (SKLK18-01)

通信作者: 王航 E-mail: weimulan1@126.com

研究虽然改进了反演精度,但对海拔的影响及 PWV 时空分布的深入探讨仍然不足,也未对 PWV 的时空分布规律进行深入剖析。

鉴于目前的研究现状和不足,本文基于中国中西部区域的 15 个 GNSS 测站数据反演 PWV,并利用就近的探空站和 ERA5 数据对其进行精度评定,引入奇异谱分析 (singular spectrum analysis, SSA) 和快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 方法揭示其时空变化规律,并分析海拔对 PWV 精度及其时变规律特征的影响。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区域和数据

本文的研究区域为中国中西部地区,经纬度范围为  $31^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$ ,  $93^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ ,海拔从 500 m~3 700 m 不等,研究区域主要有高原高山气候和温带大陆性气候 2 种气候类型,研究区域内的 GNSS 站和探空站分布如图 1 所示。

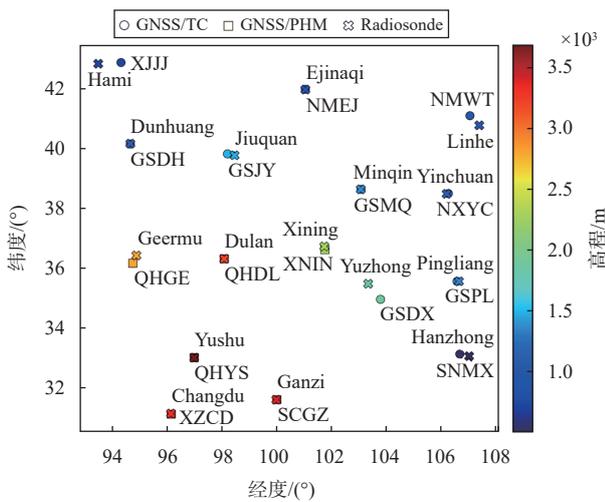


图 1 研究区域

GNSS 数据由中国陆态网提供 (<ftp://ftp.cgps.ac.cn>),时间为 2011—2020 年。数据使用 GAMIT/GLOBK 10.6 进行解算,数据解算过程中进行了固体潮、海潮和极潮的改正。为了与探空站数据进行时间匹配,取每天协调世界时 (coordinated universal time, UTC) 0 时和 UTC 12 时的 PWV 数据。

探空站数据由美国怀俄明大学气象数据网站 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) 提供,每天的 UTC 0 时和 UTC 12 时进行观测。利用探空资料提供的分层气象参数数据计算 PWV。

ERA5 数据 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) 由欧洲中尺度天气

预报中心提供,是最新一代大气再分析资料。其水平分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨为 1 h,垂直分辨率为 37 层。利用 ERA5 模型提供的分层气象参数数据计算 PWV。

### 1.2 GNSS 估计 PWV 方法

利用 GNSS 载波相位观测方程将 ZTD 作为未知参数求解。

$$L_{i,f}^j = \rho_i^j + c(dt_i - dt^j) + M \cdot \text{ZTD} - I_{i,f}^j + \lambda_f N_{i,f}^j + \varepsilon_{i,f}^j \quad (1)$$

式中:  $i$  和  $j$  分别代表接收机和卫星;  $\rho_i^j$  为接收机到卫星的几何距离;  $c$  为光速,  $dt_i$  和  $dt^j$  分别为接收器钟差和卫星钟差,  $M$  为对流层映射函数;  $I_{i,f}^j$  为电离层延迟;  $\lambda_f$  为相位观测的波长;  $N_{i,f}^j$  为相位模糊度;  $\varepsilon_{i,f}^j$  为其他误差。

对流层干延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD) 可由 Saastamoinen 模型计算。

$$\text{ZHD} = \frac{0.00227768 \cdot P}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2L) - 0.00028 \cdot H} \quad (2)$$

式中,  $P$  为大气压,  $L$  为 GNSS 站点的纬度,  $H$  为 GNSS 测站高程。

对流层湿延迟 (zenith wet delay, ZWD) 的计算公式为

$$\text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD} \quad (3)$$

PWV 可由湿延迟与水汽转换因子  $\Pi$  的乘积得到,公式为

$$\text{PWV} = \Pi \cdot \text{ZWD} \quad (4)$$

### 1.3 分层大气资料估计 PWV 方法

分别利用 ERA5 模型和探空资料提供的分层气象参数数据计算 PWV,公式为

$$q = \frac{0.622e}{P - 0.378e} \quad (5)$$

式中:  $P$  为大气压;  $q$  为比湿;  $e$  表示水汽压。

$$\text{PWV} = -\frac{1}{\rho_w \cdot g} \sum_{P_i}^{P_t} q \Delta P \quad (6)$$

式中:  $\rho_w$  为液态水的密度;  $g$  为重力加速度;  $P_t$  为气象资料最顶层气压;  $P_i$  为气象资料最底层气压;  $\Delta P$  表示相邻两层之间的气压差。

### 1.4 PWV 趋势项和周期项提取

SSA 是一种非参数化的方法,通过对时间序列进行分解和重构,可以提取出趋势和周期成分<sup>[19]</sup>,具体步骤如下:

1) 构建轨迹矩阵:利用所选的窗口长度  $L$ ,构建

轨迹矩阵  $\mathbf{X}$ . 设 PWV 时间序列由  $x_1 \sim x_N$  构成, 嵌入维数为  $L$ , 则轨迹矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_K \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

2) 奇异值分解: 对轨迹矩阵  $\mathbf{X}$  进行奇异值分解

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  是正交矩阵,  $\mathbf{\Sigma}$  是对角矩阵, 包含奇异值. 奇异值分解的每个成分反映时间序列中的不同特征, 如趋势、年周期、半年周期等.

4) 分组重构: 将不同的时间成分组合, 以提取出趋势项和周期项. 通常成对出现的则是周期项, 单独出现的为趋势项. 分组后,

对于每个分组, 重构成分

$$\mathbf{Y}_m = \mathbf{U}_m \mathbf{\Sigma}_m \mathbf{V}_m^T \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{U}_m \mathbf{\Sigma}_m \mathbf{V}_m^T$  是对应于第  $m$  个分组的矩阵.

分析重构后的趋势和周期项, 提取出主趋势 (如长期变化趋势) 和不同频率的周期项 (如年周期和半年周期). 将重构后的周期项用于后续的 FFT 频谱分析, 以进一步确认周期特性. 公式如下:

$$\mathbf{Y}_m(k) = \sum_{t=0}^{T-1} y(n) e^{-i2\pi kn/N} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{Y}_m(k)$  为频域信号的第  $k$  个频率分量,  $N$  为采用点数,  $i$  为虚数单位,  $T$  为周期.

计算频谱的功率谱密度, 分析不同频率成分的相对能量.

$$P_m(k) = |\mathbf{Y}_m(k)|^2 \quad (11)$$

根据功率谱图, 可以识别出主要周期性信号的频率位置, 得到时间序列中的显著周期. 根据 FFT 的结果, 结合 SSA 分解得到的周期项, 确认 PWV 序列中的显著周期.

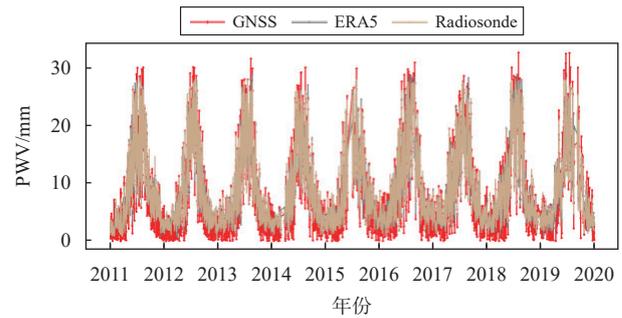
## 2 结果与分析

### 2.1 GNSS 反演 PWV 精度分析

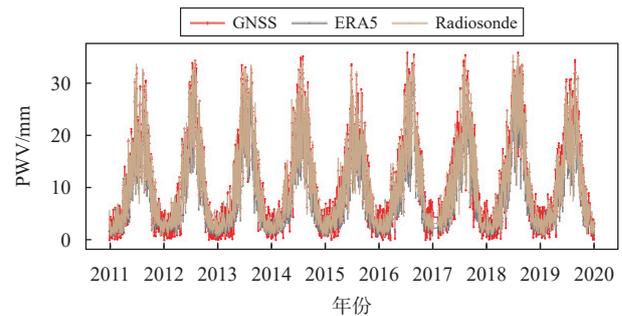
为了验证 GNSS 反演 PWV 的精度, 本文将 GNSS PWV 与就近的探空站 PWV 数据及 ERA5 PWV 数据进行对比, 由于篇幅限制, 仅展示部分测站的结果, 具体如图 2 所示.

由图 2 可见, 展示的 3 个测站处的 PWV 变化趋势非常一致, 均表现出明显的周期特性; 夏季 PWV

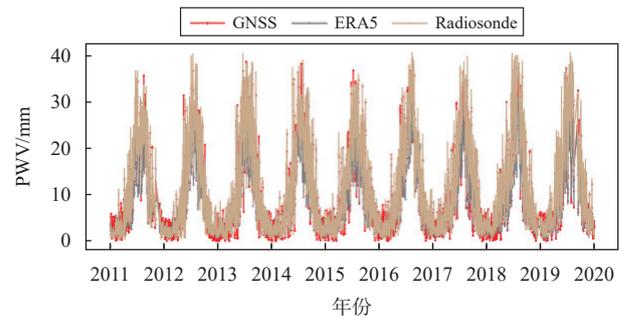
较大, 而冬季较小. 通过对 ERA5 PWV、探空站 PWV 与 GNSS PWV 的差值进行统计得知, 所有测站处 ERA5 PWV 与 GNSS PWV 差值的平均值为  $-0.85$  mm. 而探空站 PWV 与 GNSS PWV 差值的均值波动较小, 所有测站处 PWV 差值的平均值为  $0.34$  mm. 所有测站处 ERA5 PWV、探空站 PWV 与 GNSS PWV 差值标准差的均值分别为  $2.29$  mm 和  $2.07$  mm.



(a) GSDH 测站处 PWV



(b) XNIN 测站处 PWV



(c) NMWT 测站处 PWV

图 2 部分测站 GNSS、ERA5 和探空站 PWV 对比

### 2.2 海拔对 PWV 解算精度的影响

为了探讨测站海拔高度对 GNSS PWV 的影响, 本文将海拔高度低于  $1500$  m 的地区定义为低海拔区域, 反之则定义为高海拔区域, 并分别对高、低海拔区域 GNSS 测站反演的 PWV 与 ERA5 模型 PWV 及探空站观测的 PWV 进行对比和统计, 同时, 也对 GNSS PWV 的解算精度进行了统计, 分别对实验测站每天 2 个时刻的解算精度进行统计, 结果如表 1 所示.

表 1 不同海拔区域 PWV 解算精度对比 mm

研究对象	区域	最大值	最小值	平均值	标准差
数据解算精度	研究区域	6.51	0.32	1.24	1.85
与 ERA5 对比	低海拔地区	7.07	-8.02	-0.51	2.28
	高海拔地区	6.05	-8.41	-1.24	2.30
与探空站对比	低海拔地区	8.65	-7.74	0.43	2.40
	高海拔地区	6.86	-6.24	0.26	1.68

由表 1 可知, 研究区域内 GNSS PWV 解算精度的标准差小于 2 mm, 均值优于 1.5 mm, 数据解算精度较高. GNSS PWV 与探空站的差值均值均小于 0.5 mm, 差值的标准差小于 2.5 mm, 与 ERA 5 PWV 的差值均值小于 1.3 mm, 差值的标准差不大于 2.3 mm, 总体来看, 解算精度较高. 在低海拔地区, ERA5 与 GNSS PWV 的差异较小, 且误差更集中, 说明 GNSS 与 ERA5 的 PWV 数据在此区域的匹配度较高. 而在高海拔地区, 差值的负偏差增大, 意味着 ERA5 的 PWV 系统性地比 GNSS PWV 偏低, 这可能与高海拔地区复杂的大气条件导致的 ERA5 模型表现欠佳有关. 与 ERA5 不同, 探空站与 GNSS 的差值在高海拔地区的偏差更小, 且标准差较低, 表明探空站与 GNSS PWV 在高海拔地区的匹配度较高, 误差较为集中. 这可能反映了探空站在高海拔地区对大气条件的直接观测具有更高的准确性, 使得与 GNSS PWV 的数据更为接近. 综上所述, ERA5 与 GNSS 的差值在高海拔地区表现出更大的负偏差和更分散的误差, 而探空站与 GNSS 的差值在高海拔地区则呈现出较小的偏差和更集中的误差, 这反映了 2 种数据源在不同海拔条件下的表现差异. ERA5 模型在高海拔地区可能需要更深入的调整和优化, 而探空站在这些区域的表现则相对更为稳定可靠.

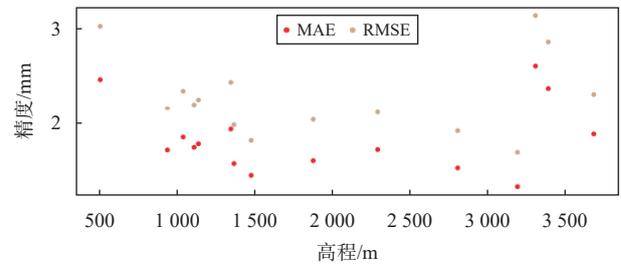
为了进一步分析不同方法得到的 PWV 的精度, 探讨影响 PWV 精度的因素, 本文计算了平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE), 并分析了 MAE 和 RMSE 与海拔的关系, 结果如图 3 所示.

MAE 反映了测量值与参考值差异的平均程度, 是评价误差范围的指标. RMSE 对异常值更为敏感, 它衡量了数据的可靠性和稳定性. 较低的 MAE 和 RMSE 指示更高的精确度, 其计算公式为

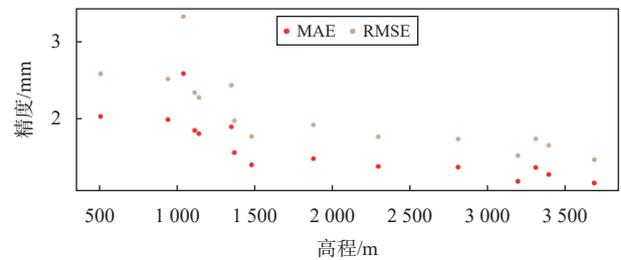
$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{PWV}_i - \text{PWV}_i^G| \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{PWV}_i - \text{PWV}_i^G)^2} \quad (13)$$

式中,  $\text{PWV}_i$  为 ERA5 或探空站第  $i$  个历元的 PWV 值,  $\text{PWV}_i^G$  为 GNSS 测站反演的第  $i$  个历元的 PWV 值,  $N$  为观测样本数.



(a) 与 ERA5 PWV 的 MAE、RMSE 和海拔的关系



(b) 与探空站 PWV 的 MAE、RMSE 和海拔的关系

图 3 MAE、RMSE 与海拔的关系

由图 3 (a) 可知, 当海拔低于 3 300 m 时, 随着海拔的增加, 误差 MAE、RMSE 呈现出明显的下降趋势. 然而, 当海拔超过 3 300 m 时, 误差反而有所增加, 这表明在极高海拔区域, ERA5 模型的表现受到限制, 误差变得更加不稳定和分散. 这一现象与表 1 中的结果一致, 进一步说明了 ERA5 与 GNSS PWV 差值在高海拔地区误差较大的原因. 图 3 (b) 展示了探空站 PWV 的 MAE 和 RMSE 随海拔的变化情况. 随着海拔的增加, 探空站 PWV 的 MAE 和 RMSE 明显降低, 表明探空站的观测精度在高海拔地区得到了提升, 与 GNSS PWV 的匹配度更高. 相较于 ERA5, 探空站的 PWV 反演精度在不同海拔条件下表现出更强的适应性. 综上所述, 图 3 (a) 和图 3 (b) 均表明 PWV 反演精度与测站的海拔密切相关. 在低、中等海拔区域, ERA5 和探空站的 PWV 误差均随海拔增加而减少, 但在极高海拔地区, ERA5 误差的增加突出其在这些区域中精度的不足, 而探空站则在更高海拔区域继续保持较高的精度. 这些结果表明在利用不同数据源进行 PWV 反演时, 应考虑海拔因素对精度的影响, 并在高海拔地区尤其注意模型选择和误差控制.

### 2.3 PWV 时空规律分析及海拔对其影响

通过 2.1 节证明了 GNSS 反演 PWV 的可靠性,

本节引入 SSA 方法和 FFT 方法分析研究区域所有测站 2011—2020 年 GNSS PWV 均值的时变特性,并对

研究区域内所有测站 PWV 均值的空间分布特征进行分析. 结果如图 4~6 所示.

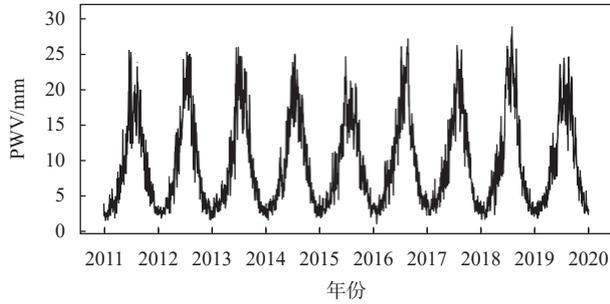


图 4 研究区域 PWV 均值时间序列

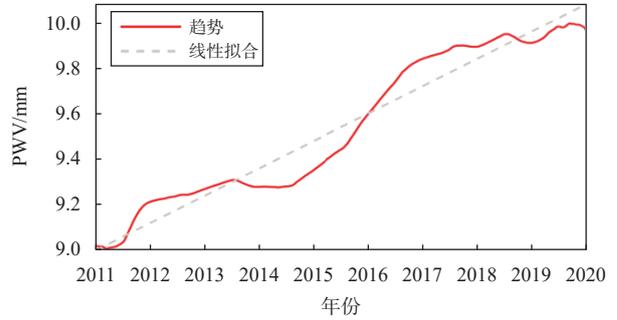
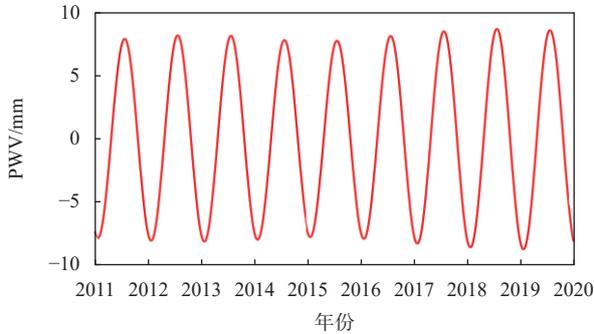
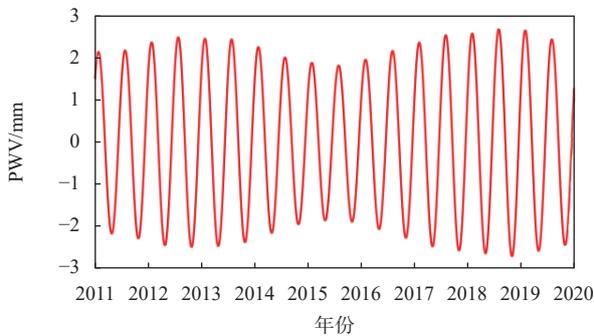
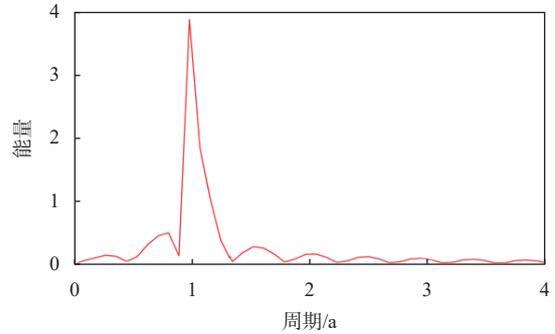


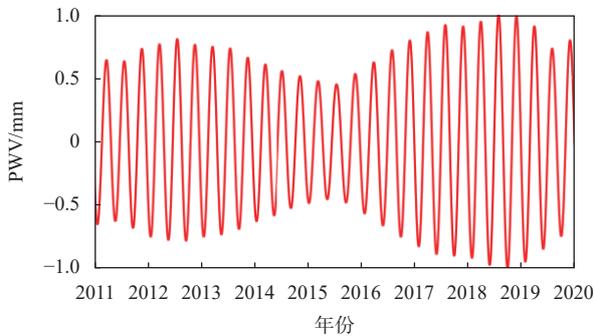
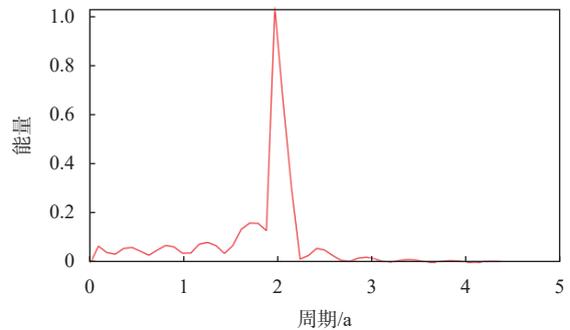
图 5 研究区域 PWV 均值趋势项



(a) 周年周期项



(b) 半年周期项



(c) 1/3周年周期项

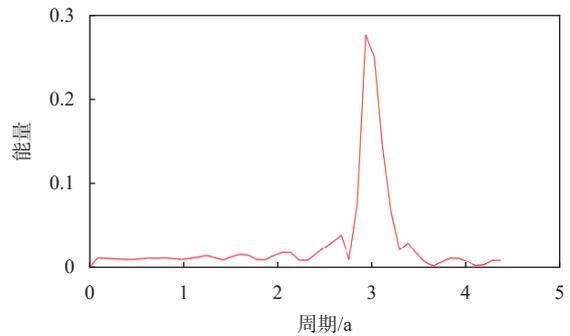


图 6 研究区域 PWV 均值时间序列 SSA 和 FFT 分析结果

由图 4 可得, 实验区域的 PWV 具有明显的周期特性, 每年的夏季 PWV 达到峰值, 峰值分布在 26~28

mm 之间. 每年冬季 PWV 较低, 约为 3 mm.

为了进一步探究研究区域 PWV 的变化趋势和

周期特性, 基于奇异谱分析方法对图4中的PWV时间序列进行分解, 提取了趋势项和多个周期项, 结果如图5~6所示。

从图5和图6可以看出, 研究区域的PWV呈现出明显的非线性上升趋势。在2015年之前, PWV的增长速率相对较小; 然而, 在2015—2017年期间, PWV的增长速率显著加快。这一时期的增长显现出明显的加速趋势。而自2017年之后, PWV的增长速率逐渐趋于平缓。通过对趋势项进行线性拟合分析, 得出2011—2020年间研究区域的PWV平均上升速率为0.12 mm/a。此外, 研究区域的PWV还表现出显著的周期性变化, 主要包括周年周期、半年周期和1/3年周期。这些周期性信号的振幅分别约为8 mm、2.2 mm和0.7 mm。这些周期性的波动可能与大气环流模式、季节性气候变化以及局部气象条件密切相关, 是影响区域PWV变化的重要因素。

计算每个测站在2011—2020年间的PWV均值; 然后, 使用克里金插值方法, 将这些离散的测站数据生成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格网, 形成区域内的连续PWV分布。对研究区域连续PWV格网的空间分布特征进行分析, 结果如图7所示。

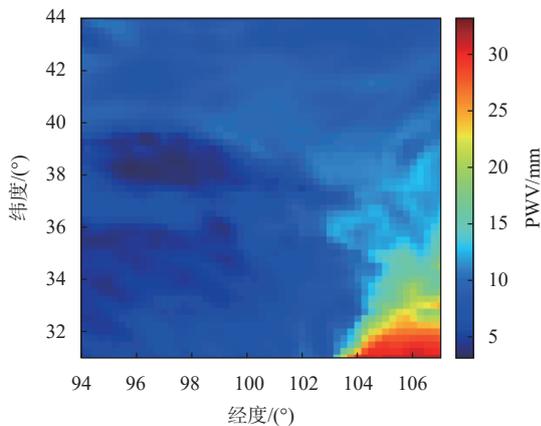


图7 研究区域2011—2020年PWV均值空间分布

从图7可以看出, 研究区域的PWV空间分布存在显著的地域差异。东南部区域的PWV值最高, 主要原因是该区域位于四川盆地, 地势低洼且降水丰沛, 导致该区域的大气水汽含量较高。相比之下, 西南部区域的PWV较低, 而东北部的PWV相对较高, 两者之间形成了一条明显的边界线。西南部的PWV值较低与其地理特征密切相关。该区域位于青藏高原, 属于高原高山气候区, 降水稀少, 加之高海拔和较薄的对流层, 使得大气中的水汽含量较低。而在青藏高原的边界区域, 由于海拔急剧下降, 地形和气候发生显著变化, 从而导致PWV值出现明显波动。研究区

域的东北部相对青藏高原地势较低, 气候条件更为湿润, 因此PWV值也相应较高。这表明, 研究区域内PWV的空间分布与地形地势有着紧密的联系, 海拔的变化对大气水汽含量的分布有显著影响。

为了分析不同海拔区域GNSS PWV的时变特征, 本文分别对高海拔和低海拔区域内2011—2020年所有测站的GNSS PWV取均值, 并使用SSA提取趋势项和周期项, 对高低海拔区域PWV序列中各个成分的贡献率进行了分析, 结果如图8所示。

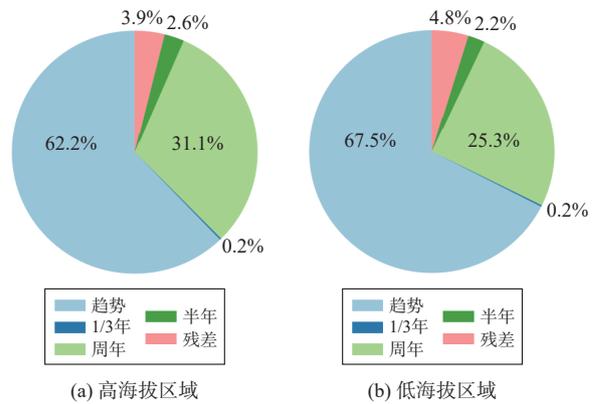


图8 高、低海拔区域PWV序列中各个成分的贡献率

在高海拔区域(图8(a)), 趋势项占主导地位, 贡献率高达62.2%, 表明高海拔区域的PWV变化主要受长期趋势影响。其次是周年周期, 贡献率为31.1%, 说明在高海拔地区, 季节性的年周期变化也对PWV有显著影响。相比之下, 半年周期和1/3年周期对PWV变化的贡献较小, 分别为2.6%和0.2%。残差部分占3.9%。在低海拔区域(图8(b)), 趋势项的贡献率更高, 达到了67.5%, 表明低海拔区域的PWV变化也主要受长期趋势的驱动。周年周期次之, 贡献率为25.3%, 同样说明季节性变化在低海拔区域仍然显著, 但相较于高海拔区域, 其贡献有所减少。1/3年周期和半年周期的贡献分别为0.2%和2.2%, 这与高海拔区域类似, 表明这些短周期成分在不同海拔区域对PWV的影响相对较小。综合来看, 趋势项在高低海拔区域中均占据主导地位, 表明长期变化趋势是影响GNSS PWV的主要因素。然而, 周年周期的影响在高海拔区域更为显著, 而低海拔区域的趋势项占比更高, 可能与低海拔区域气候和环境的相对稳定性有关。短周期成分(如半年和1/3年周期)对两种海拔区域的PWV影响相对较小。

### 3 结论

本文以中国大陆中西部区域15个GNSS站为

例,分析了 GNSS 反演 PWV 的精度,探讨了海拔对 PWV 反演精度的时空分布和综合影响,并揭示 PWV 的时空变化规律,得到如下结论:

1) GNSS 反演的 PWV 在高低海拔地区均表现出较高可靠性,与探空站数据一致性优于 ERA5. 海拔对 PWV 精度影响显著:低至中等海拔区域,ERA5 和探空站误差随海拔增加而降低;但在高海拔地区,ERA5 误差增大且分散性增强,而探空站保持较高精度,表明高海拔区域需优化 ERA5 模型以改善其适应性.

2) 研究区域的 PWV 呈现明显的周期特性,主要表现为周年、半年和 1/3 年周期性波动,振幅分别为 8 mm、2.2 mm 和 0.7 mm. 整体趋势显示 PWV 在 2011 年至 2020 年间以 0.12 mm/a 的速率非线性上升,尤其在 2015—2017 年间增长显著加快,之后趋于平缓.

3) 海拔对 PWV 的时空分布有显著影响. 在空间分布上,东南部低海拔区域因地势低洼、降水丰沛, PWV 值最高;西南部高海拔区域,受青藏高原高山气候影响, PWV 值最低,且高原边界处因海拔骤降导致 PWV 剧烈波动. 东北部因地势较低、气候湿润, PWV 较高. 在时间分布上,高低海拔区域的 PWV 变化均以长期趋势为主导,高海拔区域相对于低海拔区域受年周期影响更显著,低海拔区域则趋势项占比更高,显示出更为稳定的气候特征. 短周期(半年和 1/3 周年)对两者的影响均较小,表明季节性变化在高海拔地区相对明显.

## 参考文献

- [1] 刘严萍,冯文力,刘宇博,等. 多源数据融合的京津冀地区水汽校正模型研究[J]. 遥感信息, 2024, 39(3): 61-66.
- [2] 崔许睿,王苗苗,卞桂阳,等. GNSS 水汽反演层析及其对降雨监测的分析[J]. 导航定位学报, 2024, 12(2): 129-138.
- [3] 高枫林,丁楠,张克非,等. 基于多系统的 GNSS 三维水汽层析质量评价方法[J]. 全球定位系统, 2024, 49(3): 107-114.
- [4] 王帅民. 基于 GNSS 和再分析资料的 ZTD/PWV 精度评定与模型构建方法研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(6): 1037.
- [5] 高颖,许思怡,李黎,等. 利用 GPT3 模型的 GNSS-PWV 计算方法[J]. 测绘通报, 2023(3): 44-48, 103.
- [6] LI H B, WANG X M, WU S Q, et al. A new method for determining an optimal diurnal threshold of GNSS precipitable water vapor for precipitation forecasting[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(7): 1390. DOI: [10.3390/rs13071390](https://doi.org/10.3390/rs13071390)
- [7] 王勇,黄靖,占伟,等. 基于 GNSS 的中国大陆地区 COSMIC-2 PWV 精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(11): 1101-1104.
- [8] HAN S H, LIU X, JIN X, et al. Variations of precipitable water vapor in sandstorm season determined from GNSS data: the case of China's Wuhai[J]. *Earth, planets and space*, 2023, 75(1): 126. DOI: [10.1186/s40623-023-01879-4](https://doi.org/10.1186/s40623-023-01879-4)
- [9] 张克非,李浩博,王晓明,等. 地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1172-1191.
- [10] HUANG L K, PENG H, LIU L L, et al. GNSS precipitable water vapor retrieval with the aid of NWM data for China[J]. *Earth and space science*, 2021, 8(9): e2020EA001550. DOI: [10.1029/2020EA001550](https://doi.org/10.1029/2020EA001550)
- [11] HE Q M, ZHANG K F, WU S Q, et al. Precipitable water vapor converted from GNSS-ZTD and ERA5 datasets for the monitoring of tropical cyclones[J]. *IEEE access*, 2020(8): 87275-87290. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2991094](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991094)
- [12] WU Z L, LU C X, ZHENG Y X, et al. Evaluation of shipborne GNSS precipitable water vapor over global oceans from 2014 to 2018[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2022(60): 1-15. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3142745](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3142745)
- [13] 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.
- [14] WU M L, JIN S G, LI Z C, et al. High-precision GNSS PWV and its variation characteristics in China based on individual station meteorological data[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(7): 1296. DOI: [10.3390/rs13071296](https://doi.org/10.3390/rs13071296)
- [15] ZHENG Y X, LU C X, WU Z L, et al. Machine learning-based model for real-time GNSS precipitable water vapor sensing[J]. *Geophysical research letters*, 2022, 49(3): e2021GL096408. DOI: [10.1029/2021GL096408](https://doi.org/10.1029/2021GL096408)
- [16] ZHANG B, YAO Y B, XIN L Y, et al. Precipitable water vapor fusion: an approach based on spherical cap harmonic analysis and Helmert variance component estimation[J]. *Journal of geodesy*, 2019(93): 2605-2620. DOI: [10.1007/s00190-019-01322-1](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01322-1)
- [17] 杨鹏飞,赵庆志,苏静,等. 黄土高原地区 PWV 影响因素分析及精度评定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1470-1478.
- [18] 郑志卿,张克非,师嘉奇,等. 中国不同气候区域 GNSS 水汽探测精度及时序特征分析[J]. 测绘科学, 2023, 48(10): 68-77.

- [19] 卢辰龙, 匡翠林, 易重海, 等. 奇异谱分析滤波法在消除 GPS 多路径中的应用 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40(7): 924-931.

#### 作者简介

王航 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为铁路工程测量. E-mail: [weimulan1@126.com](mailto:weimulan1@126.com)

## GNSS water vapor inversion and spatiotemporal variation analysis considering altitude influence

WANG Hang

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an, 710043)

**Abstract:** This study aims to investigate the influence of altitude on the accuracy and spatio-temporal variation of atmospheric precipitable water vapor (PWV) derived from the GNSS. By comparing GNSS-derived PWV data with radiosonde and ERA5 data, and utilizing singular spectrum analysis and fast Fourier transform (FFT), the accuracy of PWV retrieval in regions with varying altitudes was systematically assessed, and the comprehensive effects of altitude on the spatiotemporal distribution of PWV were explored. The results indicate that GNSS-derived PWV exhibits high reliability across different altitude regions, with a better agreement with radiosonde data than ERA5, and shows more stable accuracy in high-altitude areas. The study reveals a significant trend of PWV variation, with a nonlinear increase observed between 2011 and 2020 at an average rate of 0.12 mm/a, particularly accelerating between 2015 and 2017. PWV demonstrates distinct annual, semi-annual, and 4-month periodic variations, with amplitudes of 8 mm, 2.2 mm, and 0.7 mm, respectively. The impact of altitude on the spatiotemporal patterns of PWV was analyzed, showing that annual cycles are more pronounced in high-altitude areas, while long-term trends dominate in low-altitude regions, with seasonal variations being especially prominent in high-altitude regions. Spatially, PWV values are highest in the southeastern low-altitude regions and lowest in the southwestern high-altitude regions, reflecting the significant influence of topography on PWV distribution. This research provides scientific support for optimizing PWV retrieval models in high-altitude areas and offers new perspectives for understanding regional climate change and its mechanisms.

**Keywords:** GNSS; precipitable water vapor; height; temporal-spatial patterns