

闫香蓉<sup>1</sup> 王晓春<sup>1</sup> 梁薇<sup>1</sup> 穆雅璇<sup>1</sup> 宋雨龙<sup>1</sup> 丁楠<sup>1</sup> 张文渊<sup>2</sup>

# 顾及 GNSS 水汽分布特性和站间距离的 优化 IDW 插值方法

## 摘要

针对大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)精细化过程中插值算法的选取,本文系统性地分析了线性插值三角网法、克里金插值法、空间反距离(Inverse Distance Weighting, IDW)插值法3种方法,并提出了顾及GNSS水汽特性和站间距离的优化IDW插值方法。该方法通过分析GNSS站点距离与大气水汽分布特性对插值结果的影响,进而对插值参数进行优化,使插值结果靠近高精度的观测值。利用2017年5—7月徐州连续运行参考站的GNSS实测数据与探空站数据对该方法进行分析,实验结果表明:顾及GNSS水汽特性和站间距离的优化IDW插值方法的标准差、平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差都要低于其他3种经典插值方法,其中均方根误差分别降低了14.88%、15.70%、4.12%。此外,本文分析了暴雨天气下不同插值算法重构高分辨率大气水汽分布图的能力,发现采用优化IDW插值方法能够显著减小采样站点分布不均及降水量激增造成的插值误差,这表明优化方法有助于重构局部地区稀疏GNSS站网的高分辨率大气水汽分布图,改进监测能力。

## 关键词

GNSS水汽反演;大气可降水量;空间插值;反距离加权法

中图分类号 P228

文献标志码 A

收稿日期 2021-05-12

资助项目 国家自然科学基金(41904013);江苏师范大学自然科学研究基金(19XSRS010);江苏省大学生创新创业训练计划(202010320126Y)

## 作者简介

闫香蓉,女,主要研究方向为GNSS水汽层析.xr\_1229@163.com

丁楠(通信作者),男,博士,讲师,主要从事GNSS精密定位和GNSS气象学的研究.metdingnan@163.com

1 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院,徐州,221116

2 中国矿业大学 环境与测绘学院,徐州,221116

## 0 引言

水汽在大气中含量很少,仅占大气总量的0~4%,同时水汽分布极不均匀,在短时间内变化速率快,常规一日两次探空气球获取的稀疏气象数据难以满足实时监测需求。台风、暴雨等极端天气都与水汽时空变化密切相关,准确快速地获取高时空分辨率的水汽观测资料对天气、气候变化研究和天气预报业务具有重要意义<sup>[1]</sup>。

目前,常见的大气水汽探测方法有:无线电探测仪、气象卫星观测、水汽辐射计、红外雷达探测、太阳光谱分析仪等<sup>[2]</sup>。相较传统的大气水汽监测方法,通过遥感(Remote Sensing, RS)红外数据和全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)数据都可以获取大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)。遥感红外数据具有大范围、高时空分辨率的优势,通过不同时空亮温和辐射传输比直接反演大气水汽含量,一般应用分裂窗方法来反演,但是,遥感数据对低层的水汽难以测量<sup>[3]</sup>。GNSS水汽探测具有连续运行、高精度、高时空分辨率等优点,利用GNSS技术进行大气水汽反演往往需要获得相应的地面气压和地面温度等气象数据,但由于大部分GNSS观测站建设时没有安装气象传感器,致使这些数据无法应用于气象变化研究<sup>[4]</sup>,且水汽信息受观测站网密度影响较大。因此,合适的插值方法可以有效改善GNSS数据空间分辨率受站网密度影响的问题。

诸多学者围绕大气降水量的季节性、区域性、变化特征与实际降水量的关系以及在暴雨预报中的应用等方面对各类插值方法进行了具体的研究<sup>[5-9]</sup>。李颖等<sup>[10]</sup>应用交叉验证法对反距离加权法、全局多项式法、局部多项式法、径向基函数法、普通克里金法5种常用空间插值方法对PWV数据进行插值,对比分析各方法的精度,得出了随着大气可降水量平均值的提高,插值的误差趋于增大而相对误差趋于减小的结论。其中空间反距离权重法(Inverse Distance Weighting, IDW)的权重幂数和搜索半径会影响插值精度,对相关参数的估计过分依赖于经验,缺乏理论支持;对未知点数据估计的好坏依赖于样本点的布局<sup>[11]</sup>,当采样点分布不均匀时, IDW方法会带来较大的插值误差。

针对上述问题,本文提出了一种顾及GNSS水汽分布特性和站间

距离的优化 IDW 插值方法,该方法通过分析 GNSS 大气水汽特性与站点间距离对插值结果的影响,来确定最优化的插值参数,进而获得高质量的大气水汽插值结果.实验利用徐州地区的大气水汽数据进行实例验证,结果表明新方法反演高分辨率大气水汽可适用于 GNSS 站网布设较为稀疏的地区,有效提高了大气水汽重构精度.

## 1 常用的插值方法原理

本文使用 3 种性能良好的传统插值方法进行交叉验证,对比分析各方法的插值质量,并对 IDW 方法优化,提高计算得到的 PWV 数据质量及稳定性.

### 1.1 线性插值三角网法

线性插值三角网法(Triangulation with Linear Interpolation),是指将二维空间中具备参数值的多个空间点通过直线连接,构建若干插值三角形进行计算,建立起来的所有三角形面积覆盖整个研究区域,其中任一三角形的边不能与其他三角形相交,组成由若干个三角形拼接形成的研究网.线性插值三角网法能够很好体现原始数据的特征,它将整个研究区域内的数据进行均匀分配,分配完成后可在数据分布较少的区域得到一个拥有独特性质的三角面,以此计算得到一个最优插值结果.其计算公式为

$$y_i = y_0 + \frac{(x_i - x_0)(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)}, \quad (1)$$

式中:已知测站点的坐标为  $(x_0, y_0)$  和  $(x_1, y_1)$ ,  $y_i$  为测区内一点  $(x_i, y_i)$  处的线性插值计算结果.虽然使用线性插值三角网法能较快计算得到插值结果,但其具有一定程度的局限性<sup>[12]</sup>,受大气可降水量平均值影响较大,同时使用该方法计算的数据量少时难以保证其插值计算结果的平滑性<sup>[13]</sup>.

### 1.2 克里金插值法

克里金插值法,即 Kriging 插值法,也称空间自协方差最佳插值方法.Kriging 方法考虑观测点与估计点之间的相对位置信息,利用观测点之间的空间位置信息对待求点进行无偏和最优估计<sup>[14]</sup>.克里金插值法的公式为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n k_i Z(x_i), \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为待定(克里金)权重系数,其值之和等于 1,插值计算中观测站的个数为  $n$ ,观测站的位置为  $x_i$ ,  $Z(x_i)$  为在  $x_i$  处的观测值.

### 1.3 空间反距离加权法

空间反距离权重法,也称为反距离加权法.该方法主要依赖于反距离的幂值,它的幂参数可以根据已知点和待插值点的距离来控制已知点对插值点的精度影响.该方法用周边采样点的值,估计未知点的值,以待插点与实际观测样本点之间的距离为权重,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,其权重贡献与距离成反比.反距离加权法<sup>[15]</sup>的公式为

$$Z(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}, \quad (3)$$

式中  $S$  处的预测值为  $Z(S_0)$ ,计算过程使用的样本数量为  $n$ ,  $d_i$  为插值点与已知点间的距离,  $Z_i$  为对应样本点的值,  $p$  为幂参数,一般情况下,  $p$  取 2.

## 2 顾及 GNSS 水汽特性和站间距离的优化 IDW 插值方法

### 2.1 GNSS 数据介绍

本文以徐州市 2017 年的 GNSS 数据为基础,考虑到徐州地区夏季多雨冬季少雨的降水空间分布特性,选取 5—7 月降水相对集中且充足的时段开展实验,选取 6 个站点作为研究对象,测站名分别为:CHG0、DSH0、HJG0、SHG0、TSG0、TUG0,IGS 辅助站分别为:YAKT、GUAM、POL2,探空气象数据为 2017-05-11—2017-07-31 有完整数据的共 75 d 的数据.实验数据 GNSS 站点分布如图 1 所示.

实验数据利用 GAMIT/GLOBK 软件进行解算,以同步单天时段为单位进行,采用 GPS 和精密星历组合方式进行基线解算,最终得到全天候各测站的 PWV,各参数配置如表 1 所示.

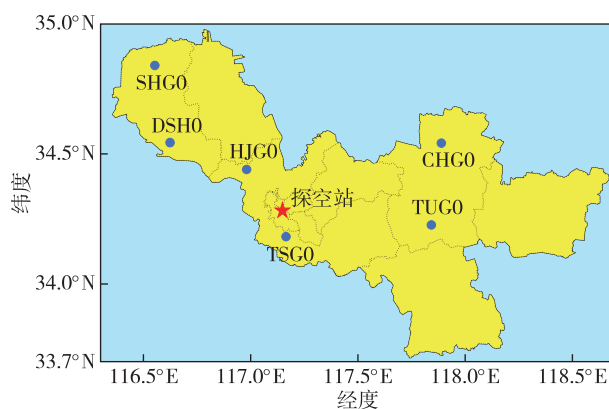


图 1 徐州地区 GNSS 测站点分布

Fig. 1 Distribution of GNSS stations in Xuzhou

表 1 GAMIT 参数配置

Table 1 Configuration of GAMIT software

参数名称	参数设置
数据采样间隔/s	30
截止高度角/(°)	15
大气映射函数	VMF1
海潮改正模型	otL_FES2004
观测值类型	LC_AUTCLN
时间分辨率/h	2

在进行插值运算前,首先对数据进行预处理,对徐州地区 6 个 GNSS 测站观测数据进行空间自相关分析,探究各 GNSS 测站的 PWV 与  $\lambda_1$ (该测站到探空站的距离)、 $\lambda_2$ (该测站的水汽密度)和  $\lambda_3$ (该测站的水汽压)3 个参数的相关性.通过单点定位的方式获取各测站坐标,根据欧氏距离计算公式解算各测站到探空站的距离.大气中的水汽绝大部分位于对流层,但它在垂直方向上随着高度的升高迅速减小<sup>[15]</sup>,在研究地区 GNSS 地表测站数据中,统一选择地面最低起始高度处的水汽压和水汽密度数据,用相关系数度量 2 个变量  $X$ (各 GNSS 测站 PWV)和  $Y(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  之间的相关性.通过表 2 发现各测站 PWV 与距离相关性最大且干扰因素较少,而与水汽密度和水汽压相关性接近,且受其他水汽参数影响较大,故本文针对上述结果提出 2 种对 PWV 插值方法的优化策略.

表 2 各采样站点 PWV 与  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  相关性

Table 2 Correlation between PWV and  $\lambda$  for each station

采样站点	PWV, $\lambda_1$	PWV, $\lambda_2$	PWV, $\lambda_3$
CHG0	0.762	0.615	0.615
DSH0	0.757	0.625	0.662
HJG0	0.732	0.665	0.741
SHG0	0.710	0.614	0.646
TSG0	0.790	0.740	0.769
TUG0	0.784	0.895	0.717

## 2.2 顾及水汽特性及其变化程度的优化策略

根据 2.1 实验, PWV 与水汽压、水汽密度相关性接近,且受水汽分布影响较大,因此提出顾及水汽特性及其变化程度的优化策略. PWV 可由天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)转换得到<sup>[16]</sup>, ZWD 主要受信号传播路径上水汽含量的影响,其中包括水汽密度和水汽压.

$$PWV = \Pi \times ZWD, \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_w (k'_2 + k_3/T_m)}, \quad (5)$$

式中,  $\Pi$  为无量纲水汽转换系数,  $\rho_w$  为液态水的密度,其值为  $1 \text{ g/cm}^3$ ,  $R_w$  为水汽的气体常数,  $k'_2, k_3$  为转换系数, ZWD 通过 GAMIT 高精度 GNSS 数据处理软件获取.

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} dz}{\int \frac{e}{T^2} dz} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{T_i} \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{T_i^2} \Delta h_i}, \quad (6)$$

$$T_m = a + bT_s, \quad (7)$$

式中,  $T_m$  为大气加权平均温度,  $e$  为水汽压,  $T_s$  为绝对温度.

通过上述公式可知,计算 PWV 需要已知  $T_m$  数值,本实验采用王明华<sup>[17]</sup>建立的中国区域统一模型与各单站的  $T_m-T_s$  线性模型,但  $T_m$  模型计算值与参考值的偏差随着季节不同有明显变化<sup>[18]</sup>.

本实验基于徐州地区 2017 年 5 月 1 日前 3 天的探空站数据,将水汽密度和水汽压分别强制约束为某一值,建立先验水汽场,通过该水汽场给定  $T_m$  模型 3 个初始值进行约束,增加模型解算结果的稳定性,从而提高水汽场的反演精度,得到高精度的 PWV,为 GNSS 站间距离优化做准备.

## 2.3 顾及 GNSS 站间距离的优化策略

由相关性分析实验可知,  $\lambda_1$ (测站到探空站的距离)是 3 种参数中对 PWV 插值精度影响最大的因子,只受空间分布的影响,因此提出顾及 GNSS 站间距离的优化策略.根据 IDW 的数学特性,采样站点距离与插值精度有关<sup>[19]</sup>,且距离权重函数与采样点到观测点的距离次幂成反比<sup>[20]</sup>.本次实验采样站点距离探空站由近及远依次是: TSG0、HJG0、DSH0、TUG0、CHG0、SHG0.为确定哪几个测站的联合插值精度最高,依据采样点距离相关性依次减少测站数来设计实验,各个实验测站数量和位置如图 2 所示.

本次实验比较不同插值方法计算得出的最大值、最小值、平均值和标准偏差 4 项指标.根据表 3,表明方案 B:TSG0、HJG0、DSH0、TUG0、CHG0 这 5 个测站插值效果最佳.

本实验利用徐州地区采样站点分布不均的空间特性,对 IDW 插值参数优化,并基于本地区的先验信息加以约束,提出了顾及 GNSS 水汽特性和站间距离的优化 IDW 插值方法.具体过程如下:

1) 基于实验数据前 3 天的探空站水汽密度和水汽压数据建立先验水汽场,对  $T_m$  模型附加初值进行

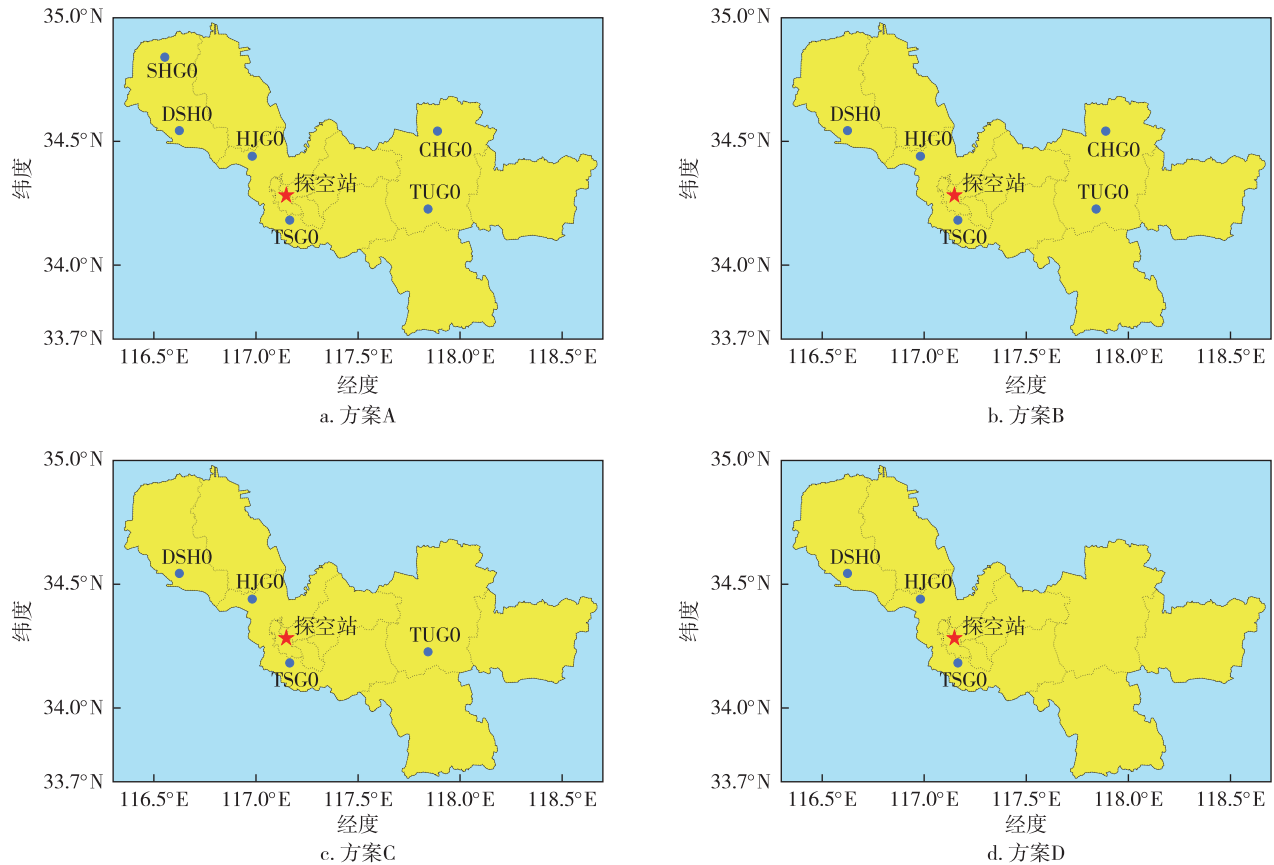


图 2 各方案测站数量和站点分布

Fig. 2 Number of stations and station distribution map for 4 schemes

表 3 不同个数采样站点插值效果统计

Table 3 Performance of 4 interpolation schemes mm

方案	最大值	最小值	平均值	标准偏差
A	3.62	0.22	10.98	2.78
B	3.51	0.01	11.26	2.48
C	3.64	0.04	10.79	2.72
D	4.08	0.05	10.03	3.15

约束,对 IDW 参数优化;

2) 对方案 B 的 5 个测站进行反距离权重插值,在以格点为中心的 360°方位上,改变搜索椭圆的长短半径,使其全部覆盖实验区,实验区不规则时可将搜索椭圆旋转一定角度;

3) 平均划分成 4 个象限,在每个象限区选择测站点,每个象限都有站点数据参与插值;

4) 优化幂参数,将  $p$  从 2 到 10 分别实验,通过交叉检验比较插值误差大小,基于基础数据,取  $p$  为 5.875 474 8 时,插值误差较小。

### 3 结果分析

本文插值检验主要采用交叉验证的方法来对比

分析插值结果,即假定一个已知气象站点的数据未知,使用其他气象站点的实测值来估算该点的数据,并进行误差分析.研究过程中采用标准差(Standard Deviation, SD)、平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)及均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为评估插值方法精度的标准。

#### 3.1 插值方法精度分析

本文采用线性插值三角网法(方法 1)、IDW 插值法(方法 2)、Kriging 插值法(方法 3)和顾及 GNSS 水汽特性和站间距离的优化 IDW 插值方法(方法 4) 4 种插值方法对数据进行计算。

以往的观测实验表明, PWV 与局地降水存在密切的关系,每次降水过程都对应着 PWV 的迅速增加<sup>[21]</sup>.由图 3 可知,徐州地区大气可降水量总体呈现西北至东南逐渐增加的空间格局,西北少、东南多,梯度变化较为明显, PWV 值相差较大.不同插值方法所得结果在色彩平滑程度以及局部地区的空间分布上存在一定差异:方法 3 和方法 4 色彩过渡较为强

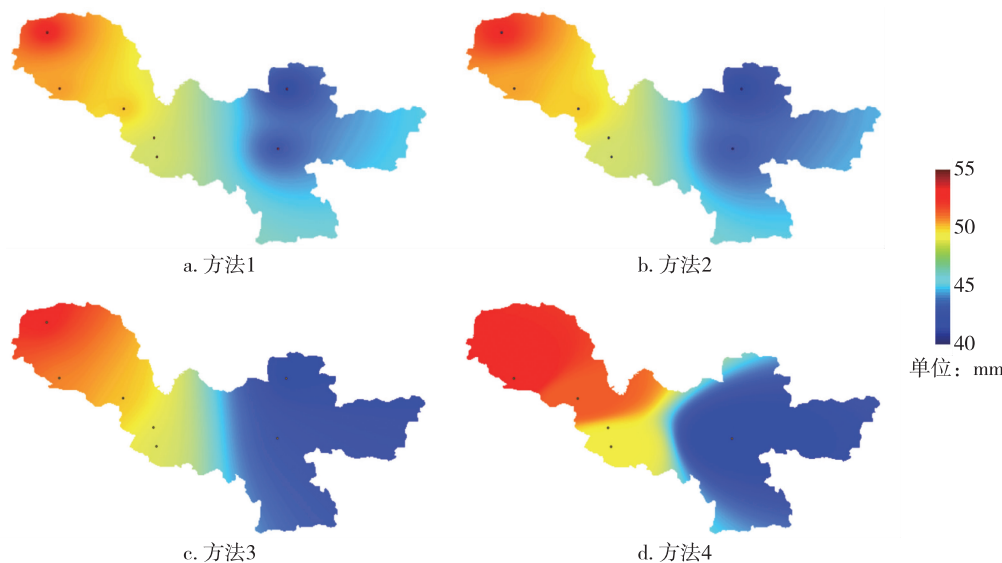


图3 4种不同插值方法的色彩

Fig.3 Color images of four interpolation methods a.linear interpolation triangulation; b.Kriging interpolation;c.IDW;d.the improved IDW interpolation

烈,而方法2的插值结果较为平滑,但基于所选数据为突降暴雨前,说明采用方法4对徐州地区PWV进行插值,能够减弱采样站点分布不均及大气总水汽量激增的误差。

### 3.2 与探空站数据对比

本次实验采用SD、MAE、MRE、RMSE作为评估插值方法精度的标准,将徐州地区探空站每天UTC12:00的数据作为参考标准,对4种插值方法进行精度评定.由表4可知:方法4的SD数值较小,数据集分布较均匀;相较传统的IDW插值方法(方法2),方法4的MAE和MRE分别提高了19.48%、19.16%.RMSE可以反映误差分布大致情况以及误差在基准线的集中程度,表4表明方法4误差较集中,其RMSE较方法1、方法2、方法3分别提高了14.88%、15.70%、4.12%。

表4 4种不同插值方法计算误差交叉验证结果

Table 4 Cross-validation of calculation errors of four interpolation methods

方法	SD/mm	MAE/(g/m <sup>3</sup> )	MRE/%	RMSE/(g/m <sup>3</sup> )
1	4.13	1.49	2.98	4.10
2	4.16	1.54	3.08	4.14
3	3.66	1.41	2.82	3.64
4	3.51	1.24	2.49	3.49

进一步对比不同插值方案反演PWV误差的大小,以探空站数据为参考值对各插值结果求残差值,

并绘制箱型图.由图4可以看出,4种方法的误差对应的箱型图具有自身的特点,线性插值三角网法和IDW方法具有的异常值数值较大,离散程度也较大,而Kriging和优化IDW插值方法的异常值较小,也较集中.箱型图各个层上优化IDW插值方案的误差分布较其他方案更为集中,残差数据较小。

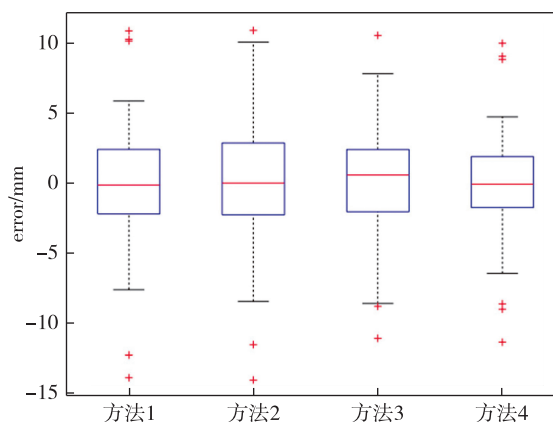


图4 4种不同插值方法的箱形图

Fig.4 Box-plot of four interpolation methods

## 4 结语

本文提出顾及GNSS水汽特性和站间距离的优化IDW插值方法,基于徐州地区的先验信息,比较分析GNSS大气水汽特性与站点间距离对插值结果的影响,对插值参数进行优化,主要结论如下:

1) 在 3 种传统插值方法中,插值精度的 RMSE 值均超过  $3.5 \text{ g/m}^3$ ,其中线性插值三角网法与 IDW 插值法的插值精度较低.与传统算法相比,本文所提出的顾及 GNSS 水汽特性和站间距离的优化 IDW 插值方法能够有效改善插值结果的质量,其 RMSE 值为  $3.49 \text{ g/m}^3$ ,而稳定性方面,新方法的误差分布相较 3 种传统方法更加集中,且异常值也较少.

2) 在大气总水汽量激增的情况下,该方法反演的三维水汽色彩图更能反映真实情况,结合表 4 可知拟合后探空站位置处的插值精度较高.大气总水汽量激增常伴随着降水过程的发生,此时水汽含量不同区域 PWV 分界明显,在图上表现为色彩过渡强烈,表明该方法能够减小采样站点分布不均及大气总水汽量激增带来的误差.

3) 新方法反演大气水汽可适用于 GNSS 站网布设较为稀疏的地区,采用该方法能够在计算结果上减弱大气可降水量平均值的影响,有效提高大气水汽时空分辨率精度,估值准确率高.该方法基于一个地区的先验信息,通过对其地区 GNSS 大气水汽特性和站网间距离统计分析,对 IDW 参数优化,有效提高了插值精度.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 石小龙,尚伦宇,尹远渊,等.大连地区 GPS 反演大气可降水量的变化特征[J].高原气象,2014,33(6):1648-1653  
SHI Xiaolong, SHANG Lunyu, YIN Yuanyuan, et al. Variation characteristics of precipitable water vapor inverted by GPS in Dalian [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6):1648-1653
- [ 2 ] 毛健.地基 GPS 网准实时反演水汽的初步研究[D].焦作:河南理工大学,2009  
MAO Jian. Preliminary study on quasi-real time water vapor inversion from ground-based GPS network [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2009
- [ 3 ] 刘安伟,韩立钦.基于高光谱遥感影像的水汽反演波段敏感性分析[J].矿山测量,2017,45(3):8-11  
LIU Anwei, HAN Liqin. Sensitivity analysis of water vapor inversion band based on hyperspectral remote sensing image [J]. Mine Surveying, 2017, 45(3):8-11
- [ 4 ] 莫智翔,黄玲,郭希,等.利用 ERA5 资料进行桂林地区 GNSS 水汽反演精度分析[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2021,13(2):131-137  
MO Zhixiang, HUANG Ling, GUO Xi, et al. Accuracy of ERA5 reanalysis data in retrieving GNSS precipitable water vapor over Guilin [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(2):131-137
- [ 5 ] 马思琪,周顺武,王烁,等.基于 GPS 资料分析西藏中东部夏季可降水量日变化特征[J].高原气象,2016,35(2):318-328  
MA Siqi, ZHOU Shunwu, WANG Shuo, et al. Diurnal variation characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor over mid-east Xizang in summer [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2):318-328
- [ 6 ] 杨磊,蒋大凯,王瀛,等.辽宁省汛期 GPS 大气可降水量的特征分析[J].干旱气象,2016,34(1):82-87  
YANG Lei, JIANG Dakai, WANG Ying, et al. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning province based on GPS remote sensing data [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1):82-87
- [ 7 ] Wu S S, Zou H B, Wu J J. The diurnal variations of GPS PWV near Poyang Lake in China during midsummer [J]. Advances in Meteorology, 2020 (3):1-11
- [ 8 ] 杨露华,叶其欣,邬锐,等.基于 GPS/PWV 资料的上海地区 2004 年一次夏末暴雨的水汽输送分析[J].气象科学,2006,26(5):502-508  
YANG Luhua, YE Qixin, WU Rui, et al. Analyses of water vapor transport in a heavy rain in the late summer of 2004 in Shanghai based on GPS/PWV data [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, 26(5):502-508
- [ 9 ] 苗运玲,李如琦,卓世新.天山北坡东段 GPS 反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J].干旱气象,2016,34(6):989-994,1046  
MIAO Yunling, LI Ruqi, ZHUO Shixin. Temporal variation characteristics of precipitable water vapor based on GPS and their relation with precipitation in eastern section of the northern slope of Tianshan Mountains [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6):989-994, 1046
- [ 10 ] 李颖,张俊东,陈庆涛. GPS 大气可降水量空间插值方法对比研究[J].气象与环境科学,2013,36(1):1-6  
LI Ying, ZHANG Jundong, CHEN Qingtao. Comparative research on spatial interpolation model for GPS precipitable water vapor [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2013, 36(1):1-6
- [ 11 ] 熊敏途. Delaunay 三角剖分法在降水量插值中的应用[J].气象学报,2012,70(6):1390-1400  
XIONG Minquan. Delaunay triangulated method with an application to the precipitation interpolation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(6):1390-1400
- [ 12 ] 刘慧,孙波,曾凡勇,等.基于线性插值法的年径流总量控制率与设计降雨量快速估算[J].水利规划与设计,2019(10):41-43,148  
LIU Hui, SUN Bo, ZENG Fanyong, et al. Fast estimation of annual runoff total control rate and designed rainfall based on linear interpolation method [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(10):41-43, 148
- [ 13 ] 郭瑞,李素敏,陈娅男.基于 MATLAB 的多种插值算法在地表时序监测中的应用研究[J].软件,2019,40(4):18-24  
GUO Rui, LI Sumin, CHEN Yanan. Application research of multiple interpolation algorithms based on MATLAB in surface timing monitoring [J]. Computer Engineering & Software, 2019, 40(4):18-24
- [ 14 ] Wang Y X, Hua G, Tao W G, et al. Improved RSS data generation method based on Kriging interpolation algorithm [J]. Wireless Personal Communications, 2020, 115(3):2457-2469
- [ 15 ] 赵庆志.地基 GNSS 水汽反演关键技术研究及其应用[D].武汉:武汉大学,2017

- ZHAO Qingzhi. Studies on the key technologies in water vapor inversion using ground-based GNSS and its applications [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017
- [16] 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
- [17] 王明华. 基于 GPS PPP 的高时空分辨率 ZTD/PW 精度评估及气象学应用 [D]. 上海: 同济大学, 2019: 78-92
- WANG Minghua. The assessment and meteorological applications of high spatiotemporal resolution GPS ZTD/PW derived by precise point positioning [D]. Shanghai: Tongji University, 2019: 78-92
- [18] 王明华, 曹云昌, 梁宏, 等. 中国区域性大气加权平均温度线性模型精度评估 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(2): 161-169
- WANG Minghua, CAO Yunchang, LIANG Hong, et al. On the accuracy of regional weighted mean temperature linear models over China [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(2): 161-169
- [19] 范玉洁, 余新晓, 张红霞, 等. 降雨资料 Kriging 与 IDW 插值对比分析: 以漓江流域为例 [J]. 水文, 2014, 34(6): 61-66
- FAN Yujie, YU Xinxiao, ZHANG Hongxia, et al. Comparison between Kriging interpolation method and inverse distance weighting tension for precipitation data analysis: taking Lijiang river basin as a study case [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(6): 61-66
- [20] 陈许霞, 季民, 宁方志. 基于 GIS 的格点精细化预报插值方法的研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(10): 69-71, 74, 78
- CHEN Xuxia, JI Min, NING Fangzhi. Research on interpolation for fine forecast of meteorological grid [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(10): 69-71, 74, 78
- [21] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54-59
- CAO Yunchang, FANG Zongyi, XIA Qing. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(1): 54-59

## An improved IDW interpolation method based on GNSS water vapor distribution and interstation distance

YAN Xiangrong<sup>1</sup> WANG Xiaochun<sup>1</sup> LIANG Wei<sup>1</sup> MU Yaxuan<sup>1</sup>  
SONG Yulong<sup>1</sup> DING Nan<sup>1</sup> ZHANG Wenyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116

<sup>2</sup> School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116

**Abstract** To select the interpolation algorithm for the refinement of Precipitable Water Vapor (PWV), this paper systematically analyzes three interpolation methods including the linear interpolation triangulation, the Kriging interpolation and the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation, and then proposes an improved IDW interpolation approach. First, both the influence of GNSS station distance and the distribution characteristics of atmospheric water vapor on the interpolation result is analyzed, which is then used to optimize the interpolation parameters thus make the interpolation result close to the high-precision observation value. Second, this approach is tested using GNSS data of Xuzhou continuously operated reference stations as well as the radiosonde data during the period of May to July 2017. The results demonstrate that the improved IDW interpolation approach outperforms the above three classical interpolation methods in standard deviation, mean absolute error, mean relative error, and Root Mean Square Error (RMSE). Specifically, the RMSE is lowered by 14.88%, 15.70% and 4.12%, compared with the linear interpolation triangulation, the Kriging and the IDW interpolation, respectively. Moreover, the proposed interpolation approach has excellent ability in reconstructing the high-resolution atmospheric water vapor distribution map during storms, which can significantly reduce the interpolation error caused by the uneven distribution of sampling sites and the precipitation surge. The comparisons indicate that the improved IDW interpolation approach is conducive to reconstruct the high-resolution atmospheric water vapor distribution map for areas with sparse GNSS station network, thus to improve the capacity of extreme weather monitoring.

**Key words** GNSS precipitable water vapor retrieval; precipitable water vapor (PWV); spatial interpolation; inverse distance weighting (IDW)