



顾及非线性高程归算的全球加权平均温度模型

姚宜斌¹ 孙章宇¹ 许超铃¹ 徐星宇¹

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:加权平均温度(T_m)是全球导航卫星系统技术中反演可降水量的关键参数。利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的产品对 T_m 在垂直方向上的分布特性进行分析,并构建了一种新的全球 T_m 模型。利用ECMWF和无线电探空数据对该模型进行检验,并将其与现存的高精度 T_m 模型进行比较。实验结果显示, T_m 在高程方向上存在非线性变化特征,而且该特征在高纬度地区特别是两极区域尤为明显。当利用ECMWF和探空数据检验构建的 T_m 模型时,其均方根误差分别为3.84 K和4.36 K,相比于现存的 T_m 模型精度分别提升了27%和20%。构建的模型可以显著提升 T_m 在垂直方向上的归算效果,由该模型计算出的 T_m 廓线与参考值更加接近。

关键词:加权平均温度;非线性分布;全球模型;高程归算

中图分类号:P228

文献标志码:A

水汽是对流层中一种很重要的温室气体成分,它的变化会对天气和气候产生重要影响,因此,对水汽进行监测具有重要意义^[1-2]。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)具有全天运行、全球覆盖和高时空分辨率的特点,在水汽探测方面具有独特的优势^[3]。加权平均温度(T_m)是利用GNSS技术反演可降水量(precipitable water vapor, PWV)过程中的关键参数,它的精度会直接对PWV反演精度产生影响^[4]。

对温度和湿度廓线进行数值积分是获取高精度 T_m 的方法之一^[5],然而在实际应用中,往往难以实时获取温度和湿度廓线。对于数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)模型的产品,更新会存在一个时间延迟,NWP模型产品的时间分辨率难以满足实时应用的需求^[6]。因此,学者开始构建高精度的 T_m 模型。较常见的 T_m 模型有基于地表温度(T_s)的模型和经验模型两种。基于 T_s 的模型的依据是Bevis等^[4,7]在1992年根据 T_s 和 T_m 之间的线性关系构建了 T_s-T_m 线性回归模型,并在1994年对该模型进行了改进。然而,之后的研究结果发现, T_m 和 T_s 之间的关系并不是一个定值,而是随着位置和时间发生变化,因此,许多学者建立了区域性的线性回归模

型^[1,8-10]。文献[11]还发现了 T_m 与 T_s 之间存在非线性关系。经验模型的输入参数包括年积日以及GNSS用户的经纬度和高程。姚宜斌等^[12]采用球谐函数的方式利用全球大地测量观测系统的大气格网数据构建了第三代全球 T_m 模型(global weighted mean temperature-III, GTm-III);陈鹏等^[13]利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的数据构建了基于NCEP的全球 T_m 模型。全球气压温度湿度模型(global pressure and temperature 2 wet, GPT2w)在早先的全球气压温度模型的基础上添加了 T_m 项,并将格网分辨率提高至1°^[14-15];滑中豪等^[16]对GPT2w模型进行检验和校正。

目前,大多数研究集中在如何在地表处提供高精度的 T_m 估计值,而对于 T_m 在垂直方向上的研究尚浅。 T_m 的参考高度面与GNSS用户之间往往存在一个高度差,如果忽略该高度差带来的误差,则会对最后的水汽反演产生影响。文献[17-18]指出,利用Bevis回归公式得到的 T_m 的精度与测站的海拔高度有关,海拔越高,精度越低。文献[6,10]指出,GPT2w模型只能提供参考平面处的 T_m 估计值,而该参考平面与GNSS用户往往不在同一个高度面上。本文利用欧洲中期

天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的再分析资料对 T_m 在垂直方向上的分布特性进行了研究, 构建了一种新的全球加权平均温度模型。

1 实验数据及 T_m 高程变化特性

1.1 ECMWF 格网数据

ECMWF 通过格网的形式提供数据产品, 其再分析资料的最高空间分辨率为 0.125° , 最高时间分辨率为 6 h, 并可以通过网络免费下载^[19-20]。本文使用了全球范围空间分辨率为 2.5° 每个格网点上的气压分层数据进行实验, 并分别将 1 000 ~ 250 hPa (对应高程范围大致为 0 ~ 10 km) 的气压层作为底层往顶层对温度和湿度廓线进行积分, 得到对应高度层的 T_m 。

1.2 无线电探空数据

无线电探空数据起源于国家气候数据中心的无线电探空数据集, 其可以通过全球站点无线电探空资料数据集 (integrated global radiosonde archive, IGRA) 获得。IGRA 包含了自 1960 年起的 1 500 多个无线电探空仪和探空气球的高质量观测数据, 并可以通过网络免费下载。探空数据可以在每天提供两次诸如温度、重力位势和水汽压等气象参数的垂直廓线。本实验在全球范围总共选取了 678 个探空站, 其分布如图 1 所示。对于每个探空站, 分别将高程在 0 ~ 10 km 范围内的所有高度层作为底层往顶层积分来得到对应高程范围内的 T_m 廓线。

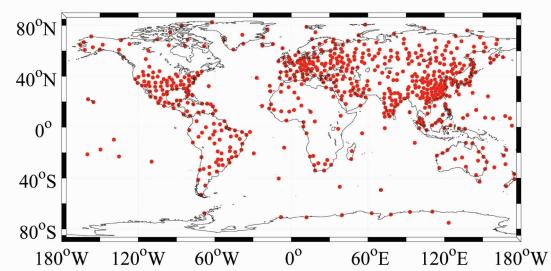


图 1 678 个探空站的分布

Fig. 1 Distribution of the 678 Radiosonde Stations

格网点的廓线情况如图 2 中蓝点所示。从图 2 可以看出, 两个低纬度地区 (30°S 和 10°N) 格网点的 T_m 廓线随高程主要呈线性下降趋势, 而两个高纬度地区 (85°S 和 70°N) 格网点的 T_m 廓线在垂直方向上却出现明显的非线性特征。其中 85°S 处格网点的 T_m 廓线在达到 7 km 时出现了一个明显的上移。本文还发现, 高纬度地区两个格网点的 T_m 廓线形状与半个周期的三角函数 (周期为 20 km) 极其相似, 本文分别利用一个线性函数和一个周期为 20 km 的三角函数对以上 4 个格网点的 T_m 廓线进行拟合。两个拟合函数如下:

$$T_m = \alpha_1 + \alpha_2 h \quad (1)$$

$$T_m = \alpha_1 + \alpha_2 \cos\left(\frac{2\pi h}{20}\right) + \alpha_3 \sin\left(\frac{2\pi h}{20}\right) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, h 代表高程 (km); α 代表拟合参数。

图 2 中还给出了两种函数的拟合均方根误差 (root mean square, RMS), 红线表示线性函数的拟合结果, 橘黄色线表示三角函数的拟合结果。从图 2 可以看出, 线性函数对两个低纬度地区格网点

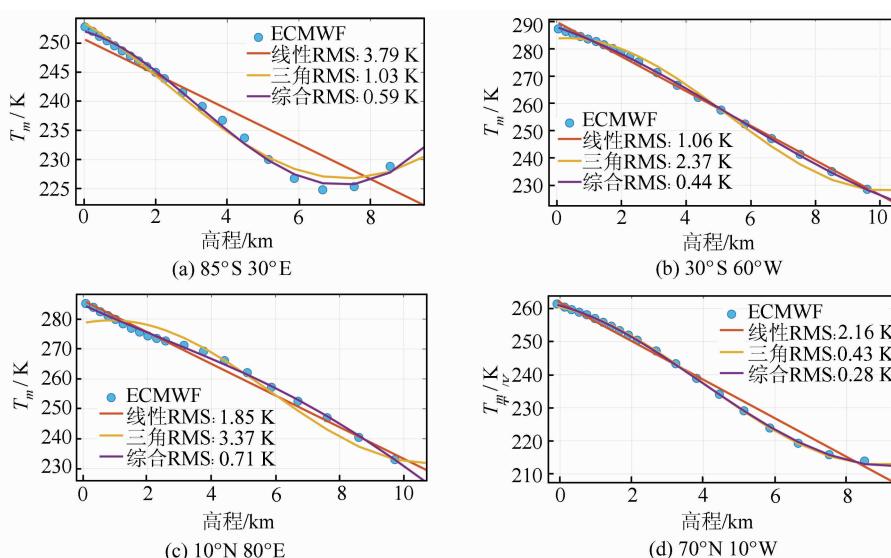


图 2 2013 年 1 月 1 日 4 个格网点的 T_m 廓线及不同函数对其的拟合结果

Fig. 2 T_m Profiles and the Fitting Results via Different Functions of Four Grid Points on Jan. 1, 2013

T_m 廓线的拟合效果较好,其拟合 RMS 分别为 1.06 K 和 1.85 K,而三角函数对两个高纬度地区格网点 T_m 廓线的拟合效果较好,其拟合 RMS 分别为 1.03 K 和 0.43 K。综合式(1)和式(2)会得到一个同时包含线性和三角函数特征的公式:

$$T_m = \alpha_1 + \alpha_2 h + \alpha_3 \cos\left(\frac{2\pi h}{20}\right) + \alpha_4 \sin\left(\frac{2\pi h}{20}\right) \quad (3)$$

利用式(3)再次对 4 个格网点的 T_m 廓线进行拟合,每个格网点的拟合 RMS 在图 2 中用紫线表示。可以看到,综合函数对 4 个格网点的 T_m 廓线都可以取得很好的拟合效果。在低纬度地区,综合函数更偏向于线性且存在微小弯曲,在高纬度地区,其非线性特性更加明显,且不是完全的三角函数形式,其拟合 RMS 分别为 0.59 K、0.44 K、0.71 K 和 0.28 K。

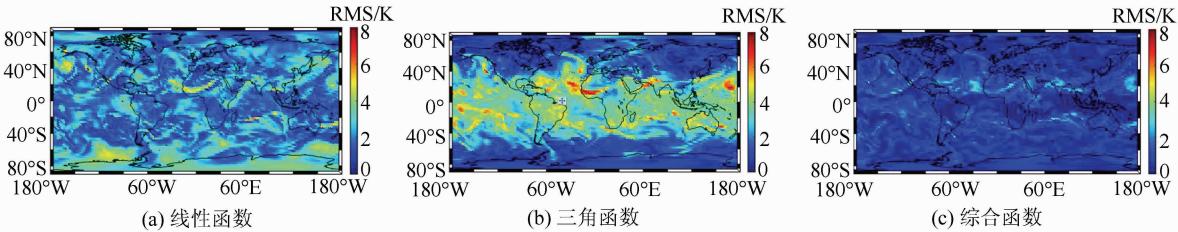


图 3 3 种函数对 2013 年 1 月 1 日全球格网点 T_m 廓线的拟合 RMS 分布

Fig. 3 Fitting RMS Distribution of Three Functions on the T_m Profiles of Global Grids on Jan. 1, 2013

2 顾及非线性高程归算的 T_m 模型

2.1 模型表达式及系数求解

本文构建了一个顾及非线性高程归算的 T_m 模型,该模型包含两个部分:平均海水面(mean sea level, MSL)处的 T_m 计算值和 T_m 在高程方向上的修正值。因为 MSL 处的 T_m 存在明显的季节性变化^[15-18],本文将其进行年周期和半年周期展开。同时,根据 § 1 的分析结果, T_m 在垂直方向上存在线性和非线性变化,所以 T_m 高程修正值将会由线性和非线性部分组成,其中的非线性部分通过一个周期为 20 km 的三角函数来表示。构建的顾及非线性高程归算的全球 T_m 模型(global weighted mean temperature-height, GTm-H)的表达式如下:

$$T_m = T_m^{\text{MSL}} + T_m^h \quad (4)$$

$$T_m^{\text{MSL}} = \beta_1 + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi \text{DOY}}{365.25}\right) + \beta_3 \sin\left(\frac{2\pi \text{DOY}}{365.25}\right) +$$

$$\beta_4 \cos\left(\frac{4\pi \text{DOY}}{365.25}\right) + \beta_5 \sin\left(\frac{4\pi \text{DOY}}{365.25}\right) \quad (5)$$

为了评估这 3 种函数在全球范围内的拟合效果,分别利用它们对 2013 年 1 月 1 日全球格网点的 T_m 廓线进行拟合,并统计每个格网点的拟合 RMS,统计结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,线性函数在高纬度地区的拟合效果相对较差,在低纬度地区的拟合效果相对较好,其全球平均 RMS 为 2.28 K;三角函数在高纬度地区的拟合效果相对较好,但是在低纬度地区的拟合效果相对较差,其全球平均 RMS 为 2.35 K;综合函数在全球范围内都可以取得很好的拟合效果,不存在误差较大的区域,其全球平均 RMS 只有 0.71 K。通过以上的分析结果可得: T_m 在垂直方向上不仅存在线性变化特征,还存在非线性变化特征,而且线性特征在低纬度区域较为明显,在高纬度区域尤其是极地区域,则可以观测到较明显的非线性特征。

$$T_m^h = \alpha_1 h + \alpha_2 \cos\left(\frac{2\pi h}{20}\right) + \alpha_3 \sin\left(\frac{2\pi h}{20}\right) \quad (6)$$

式(4)~式(6)中, T_m^{MSL} 为平均海平面处的 T_m 值 (K); T_m^h 为 T_m 高程改正值 (K); DOY (day of year) 是年积日; h 为高程 (km); α 和 β 为拟合参数,其中 β_1 代表 T_m^{MSL} 的年均值, β_2 、 β_3 代表 T_m^{MSL} 的年周期幅值, β_4 、 β_5 代表 T_m^{MSL} 的半年周期幅值; α_1 代表 T_m^h 的线性部分, α_2 、 α_3 代表 T_m^h 的非线性部分。用 2013—2015 年 3 年的 ECMWF 气压分层数据获取的 T_m 廓线格网数据求解模型系数,求解方法为最小二乘法,求解出的模型系数存储在全球格网分辨率为 2.5° 的各个格网点中。

2.2 模型的内符合精度检验

为了检验 GTm-H 建模的合理性,建模数据被用来检验其精度。根据模型精度统计结果,其平均偏差(Bias)为 0,平均 RMS 为 3.7 K,对应大约 0.55 mm 的 PWV 误差。RMS 的范围是 1.1 ~ 7.5 K,因此 GTm-H 有很高的内符合精度,这也可以说明建模过程是合理的。

2.3 利用 ECMWF 的外符合精度检验

为了检验 GTm-H 的外符合精度,将由 2016

年全球空间分辨率 2.5° 的 ECMWF 气压分层数据得到的 T_m 廓线作为参考值, 并将其与通过 GTm-H 得到的 T_m 廓线估计值进行比较。同时, 将现存的高精度 T_m 模型 GTm-III^[12] 与 GTm-H 进行比较, 计算两种模型得到的估计值与参考值的差值, 并统计每个格网点的 Bias 和 RMS, 其全球分布如图 4 所示。

从图 4(a) 和图 4(c) 可以看出, GTm-III 在两极区域存在较大的正向偏差, 而在中纬度地区的部分区域则存在较大的负向偏差, 导致这些区域

的 RMS 较大, 根据统计结果, 其全球平均 RMS 为 5.27 K。而由图 4(b) 和图 4(d) 可以看出, GTm-H 在全球范围内没有较明显的偏差, 而且其在大多数区域的 RMS 都小于 GTm-III, 根据统计结果, GTm-H 的全球平均 RMS 只有 3.84 K, 相对于 GTm-III, 取得了 27% 的精度提升。GTm-III 在全球范围内采取同一个递减率进行修正, 而 GTm-H 不仅针对每一个格网点给出了一个线性修改系数, 还考虑了 T_m 廓线在高纬度地区的非线性垂直分布特性, 所以其精度更高。

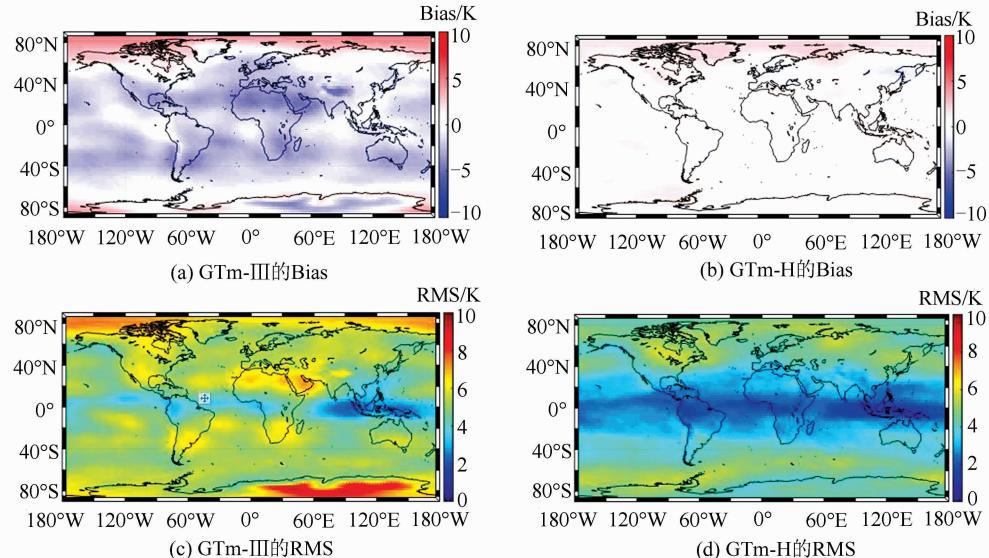


图 4 利用 ECMWF 的外符合精度检验

Fig. 4 External Accuracy Tested with ECMWF

2.4 利用探空数据的外符合精度检验

为了进一步验证模型的精度, 利用 678 个探空站 2016 年的数据计算 T_m 廓线, 并将其作为参考值。对从 GTm-III 和 GTm-H 获取的 T_m 廓线估计值与该参考值进行比较, 计算差值并统计 Bias 和 RMS。在得到所有探空站的 Bias 和 RMS 后, 对其分纬度带进行统计(每 20° 为一个纬度带)。每个纬度带的平均 Bias 和 RMS 如图 5(a) 所示。从图 5(a) 可以看出, 低纬度区域的精度高于高纬度区域的精度。GTm-III 相对于参考值主要存在负向偏差, GTm-H 主要存在正向偏差, 而在南极区域, 两个模型都存在较大的正向偏差。GTm-H 在任意一个纬度带的精度都高于 GTm-III。根据统计结果, 对于 GTm-III, 所有探空站的平均 RMS 为 5.43 K, GTm-H 的平均 RMS 为 4.36 K, 其相对于 GTm-III 的精度提升了 20%。

为了从时间尺度上评估模型精度, 对 678 个探空站的 Bias 和 RMS 分月份进行统计, 其在

2016 年 12 个月份的平均 Bias 和 RMS 如图 5(b) 所示。可以看出, 夏季的精度比冬季的精度稍好。GTm-III 存在较大的负向偏差, GTm-H 虽然存在正向偏差, 但是其值较小。GTm-H 的精度在 2016 年的任意一个月份的精度都比 GTm-III 高。

将两种模型在 678 个探空站处估计的 T_m 廓线分高度层进行精度统计(每 1 km 为一个高度层), 两种模型在 0~10 km 高程范围内不同高度层的 Bias 和 RMS 均值统计情况见图 5(c)。可见, 随着高程的增加, GTm-III 的精度逐渐下降, 而 GTm-H 的精度在整个高程范围内基本保持不变。这主要是因为随着高程的增加, GTm-III 的估计值相对于参考值的负向偏差越来越大, 而 GTm-H 的估计值相对于参考值的正向偏差却一直处于一个较低的水平。综上可知, 相对于 GTm-III, GTm-H 可以显著提升 T_m 在高程方向上的归算效果, 根据 GTm-H 计算出的 T_m 廓线与参考值更加接近。

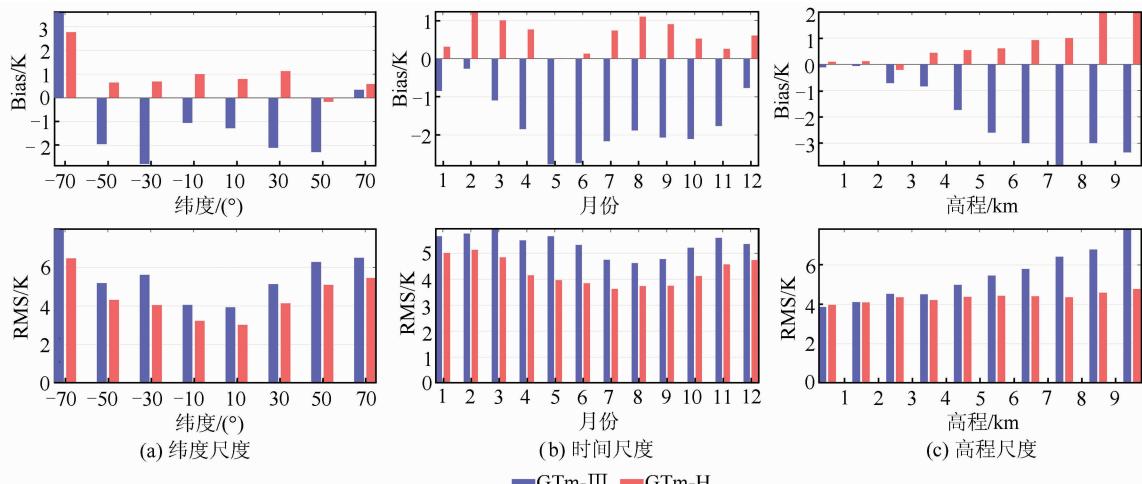


图5 利用探空数据的外符合精度检验

Fig. 5 External Accuracy Tested with Radiosonde Data

3 结语

本文利用 ECMWF 再分析资料对 T_m 在高程方向上的分布特性进行分析发现, T_m 在垂直方向上不仅存在线性变化特性, 还存在非线性变化特性, 而且在低纬度地区主要呈线性变化, 在高纬度地区非线性垂直变化特性更加明显。本文构建了一个顾及非线性高程归算的全球 T_m 新模型——GTm-H, 并利用 ECMWF 和无线电探空数据对该模型进行检验, 检验结果表明, 当分别利用 ECMWF 和无线电探空数据进行检验时, 其 RMS 分别为 3.84 K 和 4.36 K, 相对于现存的高精度 T_m 模型 GTm-III 的精度分别提升了 27% 和 20%。GTm-H 可以显著提升 T_m 在垂直方向上的归算效果, 由该模型计算出的 T_m 廓线与参考值更加接近。

参 考 文 献

- [1] Rocken C, Ware R, van Hove T, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(23): 2 631-2 634
- [2] Askne J, Nordius H. Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data [J]. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379-386
- [3] Li X, Dick G, Ge M, et al. Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor: Precise Point Positioning with Orbit, Clock, and Phase Delay Corrections [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(10): 3 615-3 621
- [4] 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): 15 787-15 801
- [5] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length [J]. *Radio Science*, 1985, 20(6): 1 593-1 607
- [6] Wang X, Zhang K, Wu S, et al. Water Vapor-Weighted Mean Temperature and Its Impact on the Determination of Precipitable Water Vapor and Its Linear Trend [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(2): 833-852
- [7] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386
- [8] Wang Xiaoying, Dai Ziqiang, Cao Yunchang, et al. Weighted Mean Temperature T_m Statistical Analysis in Groud-based GPS in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 412-416 (王晓英, 戴仔强, 曹云昌, 等. 中国地区地基 GPS 加权平均温度 T_m 统计分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 412-416)
- [9] Yao Y, Zhang B, Xu C, et al. Analysis of the Global T_m - T_s Correlation and Establishment of the Latitude-Related Linear Model [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(19): 2 340-2 347
- [10] Zhang H, Yuan Y, Li W, et al. GPS PPP-Derived Precipitable Water Vapor Retrieval Based on T_m/P_s from Multiple Sources of Meteorological Data Sets in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(8): 4 165-4 183
- [11] Yao Yibin, Liu Jinghong, Zhang Bao, et al. Non-linear Relationships Between the Surface Tempera-

- ture and the Weighted Mean Temperature [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 112-116 (姚宜斌, 刘劲宏, 张豹, 等. 地表温度与加权平均温度的非线性关系 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1): 112-116)
- [12] Yao Y, Xu C, Zhang B, et al. GTm-III: A New Global Empirical Model for Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water Vapour [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 197 (1): 202-212
- [13] Chen P, Yao W, Zhu X. Realization of Global Empirical Model for Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water Using NCEP Re-analysis Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198 (3): 1 748-1 757
- [14] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1 069-1 073
- [15] Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w) [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 433-441
- [16] Hua Zhonghao, Liu Lintao, Liang Xinghui. An Assessment of GPT2w Model and Fusion of a Troposphere Model with in Situ Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1 468-1 473 (滑中豪, 柳林涛, 梁星辉. GPT2w 模型检验以及对流层模型的参数互融 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1 468-1 473)
- [17] Yu Shengjie, Liu Lintao. Validation and Analysis of the Water-Vapor-Weighted Mean Temperature from T_m - T_s Relationship [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(6): 741-744 (于胜杰, 柳林涛. 水汽加权平均温度回归公式的验证与分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(6): 741-744)
- [18] Ding M. A Neural Network Model for Predicting Weighted Mean Temperature [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1 187-1 198
- [19] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597
- [20] Simmons A. ERA-Interim: New ECMWF Reanalysis Products from 1989 Onwards [J]. *ECMWF Newsletter*, 2006, 110: 25-36

Global Weighted Mean Temperature Model Considering Nonlinear Vertical Reduction

YAO Yibin¹ SUN Zhangyu¹ XU Chaoqian¹ XU Xingyu¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Weighted mean temperature (T_m) is a critical parameter in global navigation satellite system technology to retrieve precipitable water vapor. In this paper, the products from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) are used to analyze the distribution trait of T_m along the vertical direction, and to establish a new global T_m model. The ECMWF and radiosonde data are used to validate this newly built model, and an existing high-accuracy T_m model is employed for comparison. The results show that T_m has nonlinear variation trait along the vertical direction, and this trait is specifically apparent in the high-latitude regions, especially in the polar areas. When tested with the ECMWF and the radiosonde data, the root mean square (RMS) of the newly built model are 3.84 K and 4.36 K, respectively, achieving accuracy improvements of 27% and 20% compared to the existing model. The correction performance for T_m along the vertical direction is increased noticeably and the T_m profile calculated by the model proposed in this paper is much closer to the reference.

Key words: weighted mean temperature; nonlinear distribution; global model; vertical reduction

First author: YAO Yibin, PhD, professor, specializes in surveying data processing. E-mail: ybyao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41574028.