

引文格式:朱海,黄观文,张菊清.顾及气候差异的区域加权平均温度模型——以中国陕西为例[J].测绘学报,2021,50(3):356-367. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200163.



ZHU Hai, HUANG Guanwen, ZHANG Juqing. A regional weighted mean temperature model that takes into account climate differences: taking Shaanxi, China as an example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(3): 356-367. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200163.

## 顾及气候差异的区域加权平均温度模型——以中国陕西为例

朱 海,黄观文,张菊清

长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054

### A regional weighted mean temperature model that takes into account climate differences: taking Shaanxi, China as an example

ZHU Hai, HUANG Guanwen, ZHANG Juqing

College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

**Abstract:** The weighted mean temperature  $T_m$  is a key parameter of the global navigation satellite system (GNSS) inversion of precipitation. Taking the Shaanxi area in China as an example, this paper combines the reanalysis data of the European Weather Forecast Center (ECMWF) with the data of three sounding stations, and establishes a  $T_m$  regionalized regression model considering periodicity based on the principle of least squares. The data from three radiosonde stations in Shaanxi Province were used for verification. The results show that the  $T_m$  regional model established in this paper taking into account the cycle has an average improvement rate of 16.1% compared with the traditional Bevis model. In addition, in view of the differences in regions with different climate types, this paper establishes a sub-climatic zone  $T_m$  model with a piecewise linear form that changes with latitude, and solves the problem of adaptability of the regression model in different climate zones. Compared with sounding data, the  $T_m$  model that takes into account the climate difference has an external accuracy (RMS) range of 1.47~2.06 K. Compared with the Bevis model, the average accuracy improvement rate is 44.9%, and the improvement effect is significant; using ECMWF data to select 19 each grid point evaluates the accuracy of the model. The results show that the average RMS is 3.26 K and the maximum RMS is 3.67 K; the average STD is 2.69 K and the maximum STD is 3.19 K.

**Key words:** weighted mean temperature; Shaanxi region; model regionalization

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41731066; 41774025); The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1505102); The Outstanding Youth Foundation of Shaanxi (No. 2019JC-20); The Grand Projects of the BeiDou-2 System (No. GFZX0301040308); The Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges (Nos. CHD300102268305; CHD300102268305)

**摘 要:** 加权平均温度  $T_m$  是全球导航卫星系统(GNSS)反演可降水量的关键参数。本文以中国陕西为例,结合欧洲天气预报中心(ECMWF)的再分析数据与3个探空站数据,基于最小二乘原理建立了一种顾及周期性的  $T_m$  区域化回归模型。利用陕西省内3个探空站数据进行验证。结果表明,本文所建立的顾及周期的  $T_m$  区域模型比传统 Bevis 模型精度平均提升率为 16.1%。另外,针对不同气候类型地区的差异问题,建立了随纬度变化分段线性形式的顾及气候差异的  $T_m$  模型,解决了回归模型在不同气候区的适应性问题。与探空数据比较,顾及气候差异的  $T_m$  模型其外符合精度(RMS)范围在 1.47~2.06 K 之间,与 Bevis 模型比较,精度平均提高率为 44.9%,提升效果显著;利用 ECMWF 数据选取 19 个格网点对模型进行精度评估。结果表明:平均 RMS 为 3.26 K,最大 RMS 为 3.67 K;平均 STD 为 2.69 K,最大 STD 为 3.19 K。

**关键词:**加权平均温度;陕西省;模型区域化

**中图分类号:**P228

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-1595(2021)03-0356-12

**基金项目:**国家自然科学基金(41731066;41774025);国家重点研发计划(2018YFC1505102);陕西省杰出青年基金(2019JC-20);二代导航重大专项(GFZX0301040308);中央高校科研业务费专项(CHD300102268305;CHD300102268305)

天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)是大气的一个重要参数。GNSS技术可以获取精确的ZTD、站点坐标等信息,具有时间分辨率高、站点分布广泛、精度高、不需要对仪器进行定标等特点,目前已广泛应用于灾害监测、反演大气可降水量等方面的研究。

$T_m$ 为加权平均温度,是测站天顶湿延迟(zenith wet delay)在转换可降水量(precipitable water vapor, PWV)时,水汽转换因子 $\Pi$ 中唯一的变量。 $T_m$ 的精度对PWV的精确确定起着极其重要的作用。但是,我国幅员辽阔,地形起伏较大,使得实际的大气湿廓线变化复杂,难以在大范围建立高精度的 $T_m$ 模型。因此,国内外学者针对 $T_m$ 模型展开了一系列的研究。文献[1]根据计算13个美国(27°N—65°N)范围内8718次的探空站资料,得出 $T_m$ 和 $T_s$ 的一元线性表达( $T_m = 0.72T_s + 70.2$ ),首次将加权平均温度与地表温度联系起来。该模型简单,实用,但难以保证在其他区域获取高精度 $T_m$ 估计值。文献[2]使用2001年—2010年10年的ERA-Interim数据,改进并合并了GPT(global pressure and temperature)和GMF(global mapping function),建立了新的全球GPT2模型。文献[3]改进了GPT2模型,在该模型基础上将网格分辨率提高至1°,并添加了 $T_m$ 项。文献[4]基于球谐函数构建了全球大地观测系统的大气数据建立了GTm-III(global weighted mean temperature-III),提出了新的近地大气温度全球 $T_m$ 模型<sup>[5]</sup>,并且构建了顾及非线性高程归算的 $T_m$ 模型<sup>[6]</sup>GTm-H(global weighted mean temperature-height)。文献[7—8]利用ERA5数据构建了新的全球和中国地区 $T_m$ 经验模型。文献[9]针对中国区域起伏较大的特点,构建了估计季节精细变化的 $T_m$ 垂直递减率函数模型。以上研究均对 $T_m$ 模型提出了建设性的意见,将依赖地面气象资料的难度降低,只需要地理和天文资料。但这样势必会牺牲与实时气象信息的联系,精度也会因此受损。针对区域化的 $T_m$ 模型,还有很多专家学者也提出了有建

设性的意见。一些学者基于探空资料,采用多元线性回归分析的方法分别得到了湖南<sup>[10-11]</sup>、长三角<sup>[12]</sup>、贵州<sup>[13]</sup>、新疆<sup>[14]</sup>等地区的 $T_m$ 的区域模型。以上研究拓展了 $T_m$ 的多因子模型,提高了 $T_m$ 回归模型的精度,但存在探空站分布不均,导致回归分析误差较大,且未考虑季节周期误差对模型的影响。文献[15]对中国区域 $T_m$ 分气候区进行回归分析发现, $T_m$ - $T_s$ 模型中 $a$ 、 $b$ 系数与气候相关关系明显,但未就其原因给出进一步讨论。

本文针对目前主流 $T_m$ 模型所存在的问题,建立了一种与气象信息紧密联系,顾及周期改正和气候差异的区域 $T_m$ 模型,将季节周期改正加入到传统回归模型中。陕西省是中国气象灾害最频繁的地区之一,夏季气象易变,加上黄土高原土质松软的地质特征,遇暴雨天气极容易发生泥石流、山体滑坡等地质灾害。此外,陕西省相较其他地区地形起伏较大,气候类型相较其他区域更复杂,对模型适用性的要求更高。陕西省已有大量的地基GNSS站,但目前极少用于高精度可降水量观测,缺乏气象应用<sup>[16-19]</sup>。因此,对陕西省进行高精度大气降水量的观测对于天气预报、防灾减灾,保障人民财产安全具有极其重要的意义。

## 1 数据及处理方法

### 1.1 ECMWF 网格数据

由于陕西省探空站分布过于稀疏,而根据已有的探空站得出的 $T_m$ 预测公式难以在陕西省全域实现高精度 $T_m$ 的解算。因此,本文提出利用ECMWF提供的2016—2018年空间分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,时间分辨率6h一次的气压分层数据,垂直分辨率为37层,每层气象数据有温度 $T(K)$ 、位势 $Z(m^2/s^2)$ 、比湿 $q(kg/kg)$ 、气压 $P(hPa)$ 和对应时段的表面数据:“2 m 温度(2 meter temperature)”、“表面压力(surface pressure)”(pa)结合SRTM(shuttle radar topography mission)提供的高分辨率、高精度的

数字高程模型(digital elevation model, DEM)计算陕西省所有研究格网点上的  $T_m$  弥补了探空站空间分辨率的不足。

$T_m$  的计算利用数值积分法,将水汽压  $e$  和温度  $T$  沿着测站或格网点上空天顶方向进行积分

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} dz}{\int \frac{e}{T^2} dz} \quad (1)$$

$$T_m = T_{m_0} + \beta(h - h_0) \quad (2)$$

式中,  $T$  为绝对温度(单位为 K);  $\beta$  为温度衰减率;  $h_0$  和  $T_{m_0}$  为参考点的高度和  $T_m$ ;  $h - h_0$  范围为整个对流层;  $Z$  为沿天顶方向高度(单位为 km); 水汽压  $e$  (单位为 hPa) 无法通过实测获得, 需要利用式(3)计算

$$e = q \times P / 0.622 \quad (3)$$

式中,  $q$  为比湿;  $P$  为大气压(单位为 hPa)。

## 1.2 无线电探空数据

本文利用美国怀俄明大学提供的陕西境内 Yanan (36.6°N, 109.5°E), Jinghe (34.43°N, 108.97°E), Hanzhong (33.06°N, 107.03°E) 3 个无线电探空站数据资料研究陕西省 3 个探空站点的  $T_m$ , 并对 ECMWF 数据计算的结果进行验证。同样利用数值积分法(式(3))计算  $T_m$ , 水汽压  $e$  通过露点温度  $T_d$  和饱和水汽压  $e_s$  公式间接计算<sup>[7]</sup>

$$e_s = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.62t}{243.12 + t}\right) \quad (4)$$

水汽压  $e$  的计算公式如下

$$e = 6.1078 \times \exp\left(\frac{a \times T_d}{273.16 - b}\right) \quad (5)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} a = 17.32693882; b = 35.86 & \quad T_d \geq -15^\circ\text{C} \\ a = 21.8745584; b = 7.66 & \quad T_d \leq -40^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 1.3 高程转换

气象数据在记录的时候,通常是对不同等压面进行记录。数值气象资料用位势  $Z(\text{m}^2/\text{s}^2)$  记录,无线电探空数据用位势高记录,GNSS 站点与 DEM 高程往往采用 WGS-84 坐标系。因此,在高程转换方面需要将其位势高转为大地高,步骤如下:

### 1.3.1 计算位势高度

$$h_{\text{位势}} = Z/g \quad (7)$$

式中,  $g$  为重力加速度。

### 1.3.2 位势高转换为正高

$$h_{\text{正}} = \frac{R(\phi)Y_{45}h_{\text{位势}}}{Y_s(\phi)R(\phi) - Y_{45}h_{\text{位势}}} \quad (8)$$

式中,  $R(\phi)$  为地球有效曲率半径;  $Y_s(\phi)$  表示旋转椭球正常重力值;  $Y_{45}$  为标准重力加速度 ( $Y_{45} = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ), 即在纬度  $\phi$  为  $45^\circ$  时, 海平面位置的重力加速度。  $R(\phi)$ 、 $Y_s(\phi)$  可由式(9)和式(10)获得

$$R(\phi) = \frac{6778137}{1.006803 - 0.006706\sin(\phi)^2} \quad (9)$$

$$Y_s(\phi) = 9.780325 \times \left[ \frac{1 + 0.00193185\sin(\phi)^2}{1 - 0.00669435\sin(\phi)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

### 1.3.3 正高转换为大地高

$$h = h_{\text{正}} + \eta \quad (11)$$

式中,  $\eta$  表示高程异常, 利用美国国家地理空间情报局发布的 EGM2008 (earth gravitational model 2008) 提供的高程异常信息进行改正<sup>[20]</sup>。

## 1.4 研究区域

选取包含整个陕西省的北纬  $40^\circ\text{N} - 31^\circ\text{N}$ , 东经  $105^\circ\text{E} - 111.5^\circ\text{E}$  作为研究区域。选取 19 个均匀且覆盖整个陕西省的格网点, 以及陕西境内 3 个探空站 Yanan (36.6°N, 109.5°E), Jinghe (34.43°N, 108.97°E), Hanzhong (33.06°N, 107.03°E) 构建区域化回归模型。具体分布如图 1 所示。

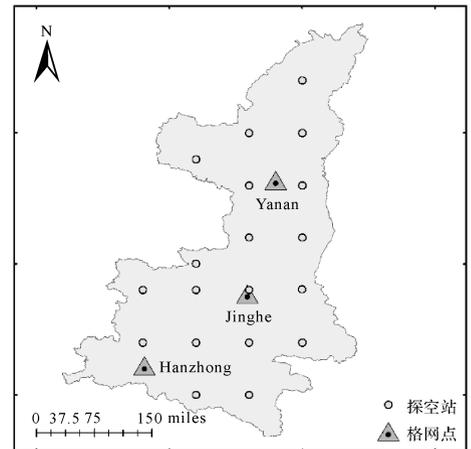


图 1 研究区域内选取格网点及探空站分布

Fig.1 Various network points and sounding stations in the study area

## 2 陕西省 $T_m$ 区域化模型建立

### 2.1 相关影响因素分析

在此研究之前,众多专家学者已得出  $T_m$  与

地表温度  $T_s$ 、露点温度  $T_d$ 、地表气压  $P$ 、地表水汽压  $e_s$  等均呈良好的相关性,如图 2(a)、(b)。除此之外,文献[21]推导出  $T_m$  与地表温度  $T_s$  存在非线性函数关系,突破了传统的  $T_m$  与地表温度  $T_s$  近似为一次函数关系的认识。但因为陕西省内并无较高海拔的地区,非线性模型增加了模型复杂程度,相较于线性模型精度却没有明显提高。在实际应用中,采用线性模型来描述陕西省  $T_m$  和地表气象因子的关系更加切合。还有专家学者

提出了其他影响因素,文献[22]探讨了温度递减率对  $T_m$  的影响;文献[23]认为对流层顶的变化趋势对  $T_m$  存在一定程度的影响;文献[24]考虑了地形起伏对水汽转换因子的影响等;文献[25]对  $T_m$  回归公式进行了验证和分析。以上众多专家均得到了诸多有价值的结论。在本文中,考虑到陕西省地形起伏,南北温差较大,因此选择与  $T_m$  相关性较好的  $T_s$  与  $P$ ,探讨与  $T_m$  之间的关系。

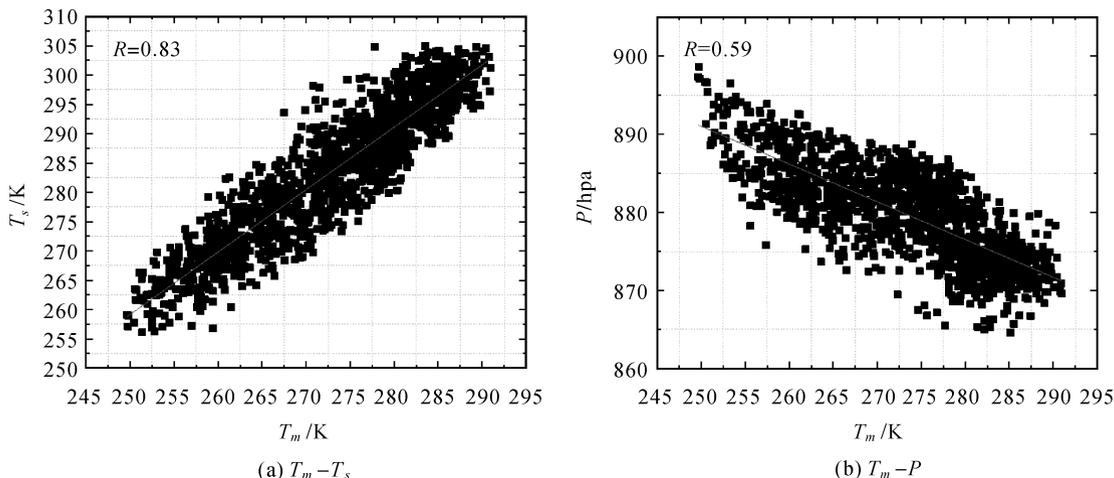


图 2  $T_m$  与相关气象因子关系图

Fig.2 The relationship between  $T_m$  and related meteorological factors

2.2 陕西省多气象因子  $T_m$  区域化模型建立

利用 ECMWF 提供的 2016—2018 年再分析数据结合 3 个探空站数据进行建模,考虑到选择较多的气象因子加入模型对精度并没有提高,而且增加了模型复杂程度以及实际应用的局限性。因此本文选择与  $T_m$  相关程度较高的地表温度  $T_s$ 、地表压强  $P$  两个气象因子,对陕西省所有研究格网点和探空站的数据进行多元线性回归分析。

设多元线性方程

$$T_m = aT_s + bP + c \tag{12}$$

则其误差方程为

$$\mathbf{V} = [T_s \quad P \quad 1] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} - T_m \tag{13}$$

根据最小二乘原理

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min \tag{14}$$

得到不同气象因子的陕西省整体的回归模型如表 1 所示。

表 1 陕西省  $T_m$  区域化模型

Tab.1 The regional model of Shaanxi province

模型	气象因子	模型
$T_s, P$ 模型	$T_s, P$	$T_m = 0.73T_s - 0.008P + 70.4245$
$T_s$ 模型	$T_s$	$T_m = 0.7256T_s + 66.2976$

2.3 陕西省单因子  $T_m$  区域化模型精化

从上述研究发现,多因子模型可以提升区域建模的精度,但效果并不显著。同时,增加气象因子意味着加大实际获取气象数据的难度。需针对单气象因子模型进行了季节周期性改正的研究。改进的单因子  $T_m$  模型表达式如下

$$T_m = T_m^t + T_m^s \tag{15}$$

$T_m$  与  $T_s$  相关性是众所周知的

$$T_m^t = \alpha_1 T_s + \alpha_2 \tag{16}$$

式中,  $T_m$  与  $T_s$  之间存在较强的相关性,且两者均呈现出随季节变化周期性,见图 3(a)、(b)。

所以,在传统回归模型中,由于  $T_m$  与  $T_s$  均呈现出随季节变化周期性,因此线性公式平滑了大部分周期。但依旧存在着一部分周期导致的误

差并未被消除,模型残差中依旧存在比较明显的

周期项,如图4所示。

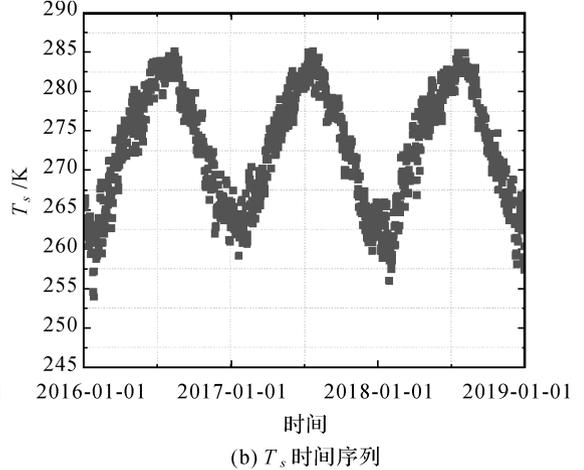
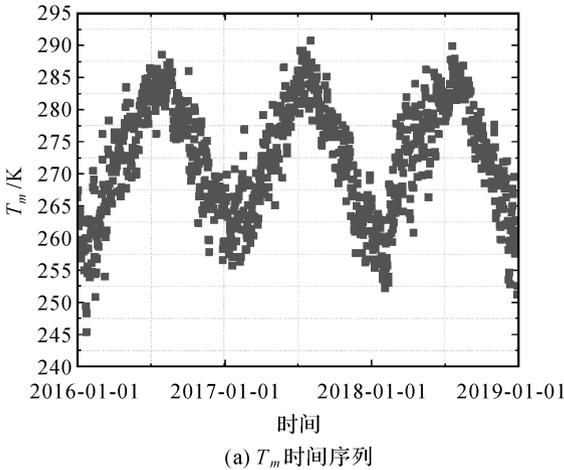


图3  $T_m-T_s$  时间序列图

Fig.3 Time series graph

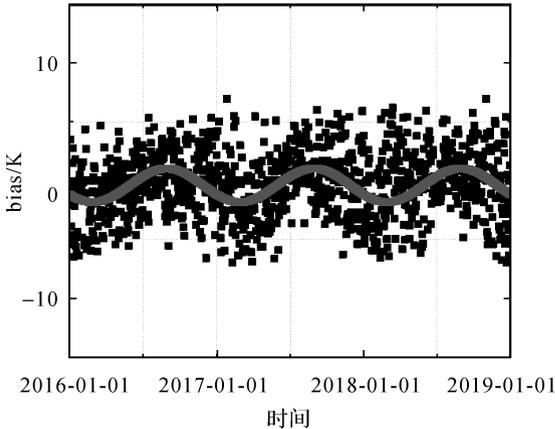


图4  $T_m-T_s$  模型残差时间序列图

Fig.4 Model residuals time series graph

$T_m-T_s$  模型的 bias 随年积日变化呈现出季节特征,这部分未被消除的周期误差对模型精度影响较大。本文参考 GPT2w<sup>[3]</sup> 采用的顾及年周期和半年周期的三角函数表达式反映  $T_m$  的季节变化。在本文中也使用该函数对模型进行修正,以消除模型中依旧存在的周期性误差。表达式如下

$$T_m = \beta_1 \cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + \beta_2 \sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + \beta_3 \cos\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) + \beta_4 \sin\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) + \beta_5 \quad (17)$$

式中,DOY 为年积日; $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为年周期振幅; $\beta_3$ 、 $\beta_4$  为半年周期振幅; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_5$  均为常数。

因此,本文利用均匀覆盖陕西省的 19 个格网点结合 3 个探空站的 2016—2018 年数据根据最小二乘原理建立了顾及周期性改正的陕西省  $T_m$  区域化模

型如下

$$T_m = 1.0058 T_s + 2.5935 \cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) - 0.6850 \sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.3512 \cos\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) + 0.0204 \sin\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) - 13.0569 \quad (18)$$

### 2.4 顾及气候差异的 $T_m$ 区域化模型

由于回归分析的方法要求研究区域的范围不能过大,否则精度将不能得到保证。而陕西省与其他省份不同,有着极大的自然地域差异。陕西省被北山和秦岭划分为三大自然区:北部为陕北黄土高原、中部为关中平原、南部为陕南秦巴山区。复杂多样的地形地貌以及海拔高度(图 5(b))也决定了陕西多样的气候特征:陕北大部地处海拔较高的黄土高原,属于中温带季风气候、关中为一马平川的平原,暖温带季风气候、陕南处山峦纵横的秦巴山区,属于北亚热带季风气候。其气候特征差异较大,而回归模型适合气候类型简单的区域,否则会影响模型精度。因为其自身局限性,使用一种回归模型在如此复杂多变的气候环境中是不合适的。因此,本文在建模时考虑了陕西省复杂的气候类型对  $T_m$  的影响。

本文以北山-秦岭为分界线将陕西省划分为 3 个气候区,北部为以黄土高原为主的中温带季风气候区,中部为以关中渭河平原为主的暖温带季风气候区,南部为以秦巴山区为主的北亚热带季风气候区。如图 5(a)所示。

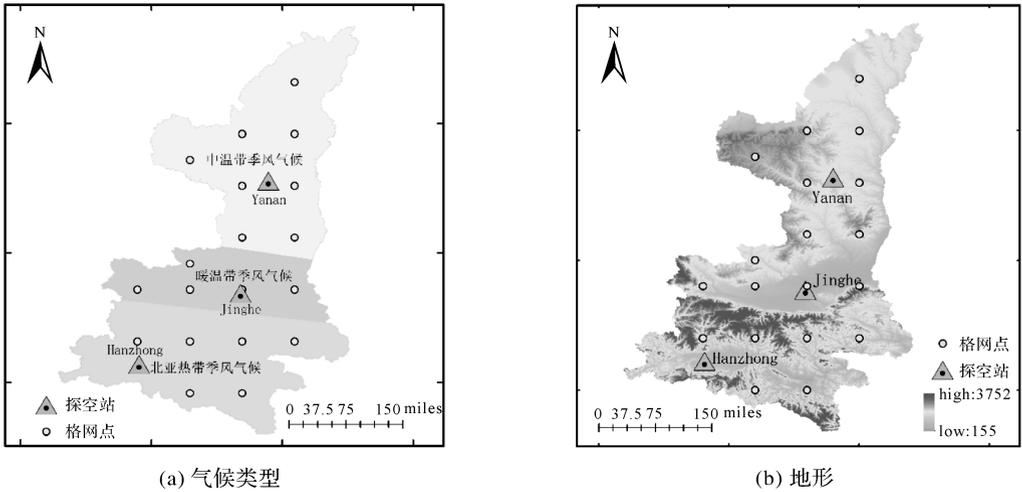


图 5 陕西省气候类型及其高程信息(DEM)

Fig.5 Climate types and digital elevation model (DEM) in Shaanxi

气候类型对  $T_m$  有着很大的影响,文献[15]对中国区域  $T_m$  分气候区进行回归分析发现,  $T_m-T_s$  模型  $a$ 、 $b$  系数与气候相关关系明显,因此在不同气候类型的区域分类进行建模对于提升模

型精度有显著的作用。本文对处于不同气候区格网点与探空站的数据进行回归分析,得到不同气候区顾及年周期单因子区域模型(表 2)。

表 2 陕西省不同气候区回归模型

Tab.2 Regression model of different climate regions in Shaanxi province

气候区	模型
中温带季风气候区	$T_{m_1} = 0.743 1T_s + 0.183 0\cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.112 5\sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.038 8\cos\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) - 0.345 6\sin\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) + 61.12$
暖温带季风气候区	$T_{m_2} = 0.766 6T_s + 0.054 9\cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.118\sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.082 3\cos\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) - 0.182 4\sin\left(\frac{4\pi DOY}{365.25}\right) + 56.76$
亚热带季风气候区	$T_{m_3} = 0.761 4T_s + 0.024 4\cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.122 4\sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 0.095 3\cos\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) - 0.088 4\sin\left(\frac{2\pi DOY}{365.25}\right) + 57.35$

通过对比,不同气候类型地区模型有所差异。这是由于中温带季风气候区(陕北地区)属半干旱区,大部地处黄土高原,气候特点为春季气温回升相对较快,干燥且温暖;夏季日照时间充足,大部较为炎热;秋季温度下降较快,凉爽且干燥;冬季寒冷干燥,气温较低。一年四季干旱少雨,日夜温差较大,因此  $T_s$  与  $T_m$  的相关性相对其他气候区较低。北亚热带季风气候区(陕南地区)属湿润区,温度适中。而暖温带季风气候区(关中地区)则属半湿润区,中和了前两者的特征,四季分明,从模型系数可以很好地看出其不同气候特征的表现以及过渡。

由陕西省整体 DEM(图 5(b))看出,不同气候区选取的格网点以及探空站纬度,格网点高程差异较大。说明这些点所处的不同气候区有着极大的气候差异,这也说明在陕西省顾及气候差异

的建模方法更为合理,可靠。

为了降低实际工程应用中使用该模型的局限性,本文根据建模所利用的探空站以及格网点的空间分布提出应用于陕西省的  $T_m$  分段函数模型,在实际应用中,可以根据测站纬度来选择要使用的模型。模型表达式如下

$$T_m = \begin{cases} T_{m_1} & 40^\circ > \text{lat} \geq 35^\circ \\ T_{m_2} & 35^\circ > \text{lat} \geq 33^\circ \\ T_{m_3} & 33^\circ > \text{lat} \geq 31^\circ \end{cases} \quad (19)$$

### 3 模型可靠性验证

本文利用平均偏差(bias),标准差(STD)和均方根误差(RMS)来评价建模精度。bias 表示模型与真值的偏离程度,即模型预测的  $T_m$  与探空数据实测得到的  $T_m$  之间的偏差  $v$  累加的平均

值;STD表示误差离散的程度;RMS表示模型的稳定性以及可靠性。

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (20)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (21)$$

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (22)$$

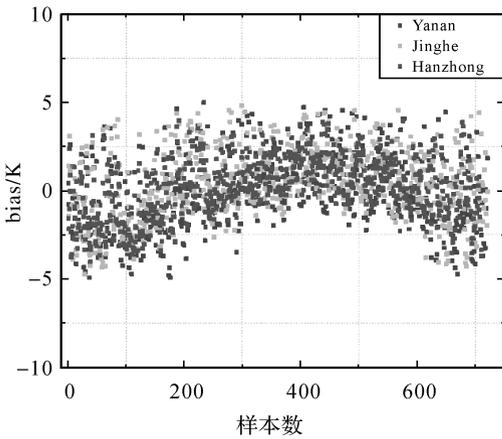
### 3.1 多气象因子模型可靠性验证

利用未参与建模的2019年1—12月无线电探空数据对计算结果进行验证。选择研究区域内3个探空站Yanan (36.6°N, 109.5°E), Jinghe (34.43°N, 108.97°E), Hanzhong (33.06°N, 107.03°E), 分别验证模型 bias、RMS 和 STD。

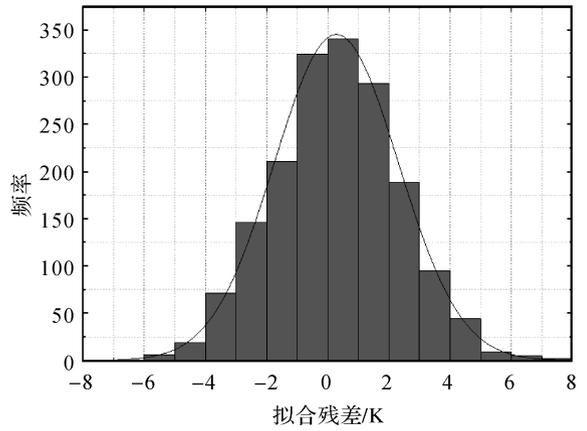
由表3可以看出,3个探空站数据的RMS变化趋势表现出一致性,双因子模型和单因子模型

精度相当,模型 STD 较稳定且均小于 3 K,说明模型可靠性较高。模型整体 RMS 与 STD 随纬度上升而降低,处于陕南地区的 Hanzhong (33.06°N, 107.03°E) RMS 范围在 2.12~2.90 K,多因子建模对精度提升较高;陕北地区的 Yanan (36.6°N, 109.5°E) RMS 范围在 2.81~3.03 K,增加的多气象因子并无带来明显的精度提升。

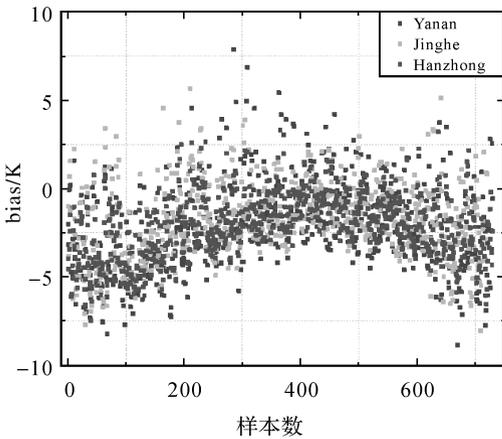
陕北地区大部地处黄土高原,属半干旱区,纬度以及海拔相对其他研究区域较高,  $T_s$ 、 $P$  变化幅度较大,  $T_s$  与  $T_m$  的相关性相对于其他研究区域较高。研究区域内随纬度变化体现出较大的气候差别,因此,分气候区对研究区域进行建模对提高模型精度是必要的。陕西省处于中低纬度地区,将单因子模型与 Bevis 模型进行比较可以间接说明建模合理性(图6)。



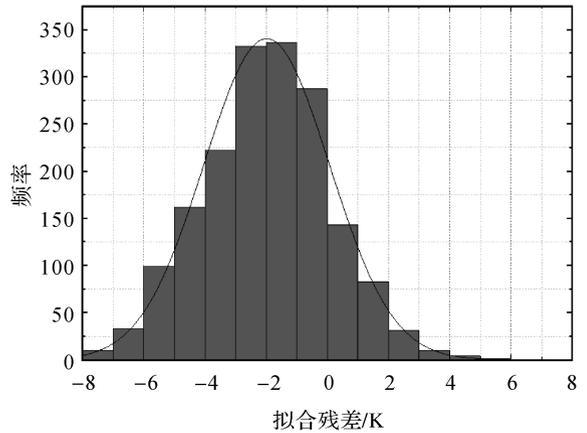
(a)  $T_m - T_s$  模型



(b) 残差统计分布



(c) Bevis模型



(d) 残差统计分布

图6 区域化  $T_m - T_s$  模型残差与 Bevis 模型比较  
Fig.6 The bias of  $T_m - T_s$  model comparison with Bevis model

表 3 陕西省  $T_m$  区域化模型误差分析

Tab.3 The error analysis of the regional model in Shaanxi province

探空站		气象因子	K		
			bias	RMS	STD
Yanan (36.6°N,109.5°E)		$T_s, P$ 模型	1.67	2.85	2.40
		$T_s$ 模型	1.33	3.13	2.42
		Bevis 公式	-2.18	3.70	2.45
Jinghe (34.43°N,108.97°E)		$T_s, P$ 模型	2.46	2.86	2.08
		$T_s$ 模型	2.48	2.91	2.15
		Bevis 公式	-1.8	3.10	2.12
Hanzhong (33.06°N,107.03°E)		$T_s, P$ 模型	2.34	2.77	1.70
		$T_s$ 模型	2.26	2.90	1.76
		Bevis 公式	-2.02	2.97	1.78

Bevis 模型是利用中低纬度的无线电探空数据建立的。从表 3 可以看出,Bevis 模型与本文建立的  $T_m-T_s$  模型精度变化表现出一致性,整体精度随纬度上升而降低。本文得出的  $T_m-T_s$  模型与 Bevis 模型一次项大致相等,但该  $T_m-T_s$  模型相较于 Bevis 模型在常数项有所修正。与探空数

据比较,精度提升幅度 0.07~0.57 K 不等,说明本文提出的建模方法是正确以及可靠的。同时,本地化的  $T_m$  模型很好地修正了 Bevis 模型的系统偏差,使得区域化  $T_m$  模型准确性更高,更适用于陕西省。

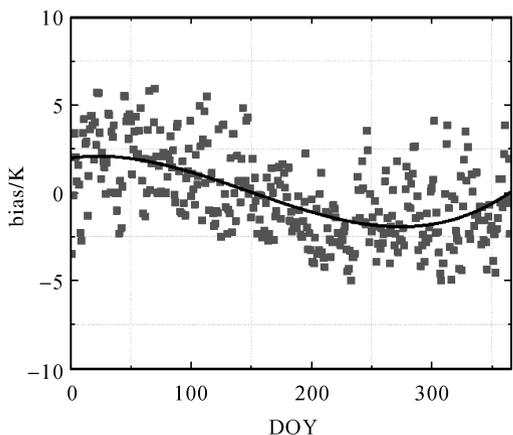
### 3.2 顾及周期性改正的 $T_m$ 区域化模型可靠性验证

利用未参与建模的 3 个无线电探空站 2019 年 1—12 月的数据(对一天内两次采样取平均值)评估顾及周期性改正的  $T_m$  区域化模型精度,见表 4、图 7。

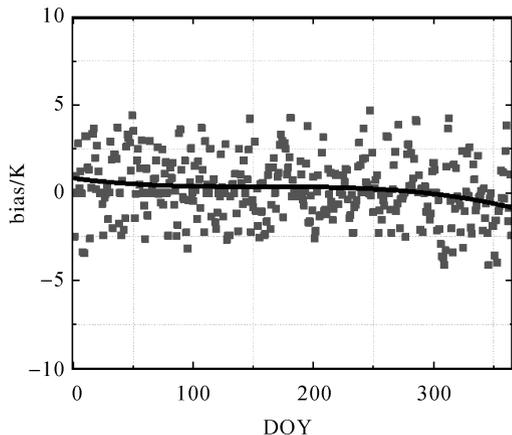
表 4 顾及周期性改正  $T_m$  区域化模型精度

Tab.4 Accuracy of improved regional model of single factor in Shaanxi province

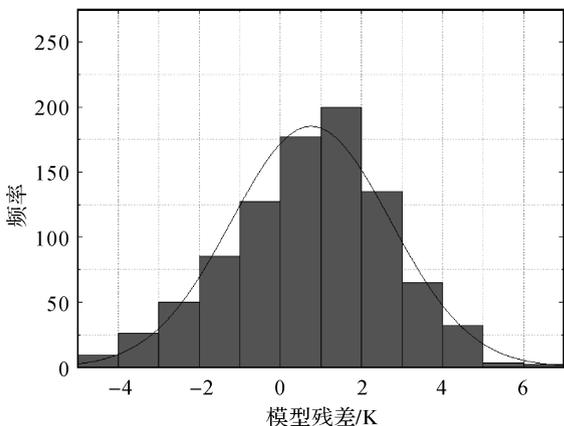
检验数据	K		
	bias	RMS	STD
Yanan(36.6°N,109.5°E)	0.42	3.07	2.81
Jinghe(34.43°N,108.97°E)	0.47	2.79	2.41
Hanzhong(33.06°N,107.03°E)	0.31	2.33	2.52



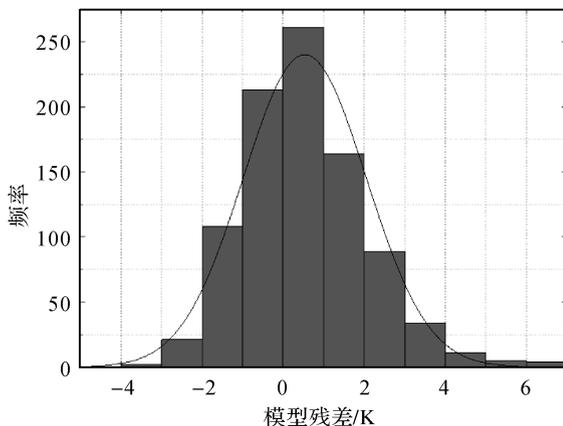
(a)  $T_m-T_s$  模型残差



(b) 加上周期项改正的  $T_m$  模型残差



(c)  $T_m-T_s$  模型残差统计分布



(d) 加上周期性改正  $T_m$  模型残差统计分布

图 7 加周期项前后残差变化

Fig.7 Residual variation of periodic correction

如图 7(b)所示,顾及周期性的陕西省  $T_m$  区域化模型虽然同样呈现出一定的周期性,但相比之前明显减小。说明在增加了周期项之后,使得残差的周期特性减弱,残差随高程变化特性降低,模型精度变高。由表 4 可知,精度分别提升 17%、10%和 21%,提升幅度较为显著。

### 3.3 顾及气候差异 $T_m$ 模型可靠性验证

#### 3.3.1 利用无线电探空数据验证

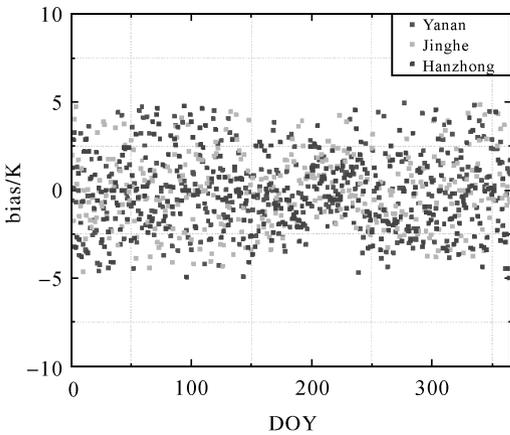
从表 5 可以看出,考虑气候差异对  $T_m$  进行建模有着明显的优点,利用探空数据验证顾及气候差异的  $T_m$  模型,其 RMS 明显小于整体模型。因为陕西省气候类型复杂,这是其在建立区域化  $T_m$  模型需要区别于其他省份的主要特点,同时证明了分气候区建模的必要性(图 8)。

表 5 顾及气候差异的  $T_m$  模型精度

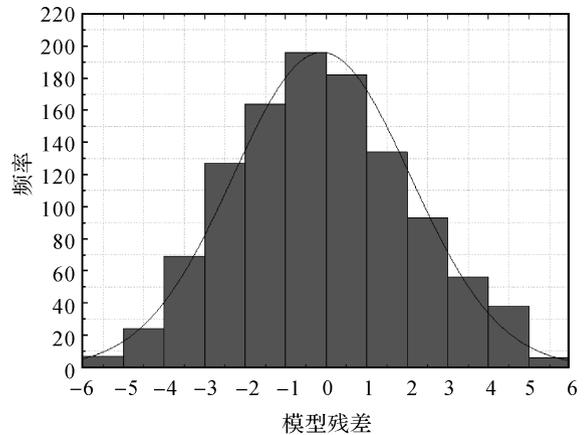
气候区	bias	RMS	STD
中温带季风气候区	0.68	2.06	2.78
暖温带季风气候区	0.37	1.86	2.63
北亚热带季风气候区	0.66	1.47	2.44

#### 3.3.2 利用 ECMWF 数据验证

为了更好地验证顾及气候差异的  $T_m$  模型在陕西全域的精度,除验证 3 个探空站的精度以外,本文利用未参与建模的 2019 年 1—8 月 ECMWF 数据对陕西省所有研究格网点上的气象数据进行了模型精度验证,见表 6、图 9。



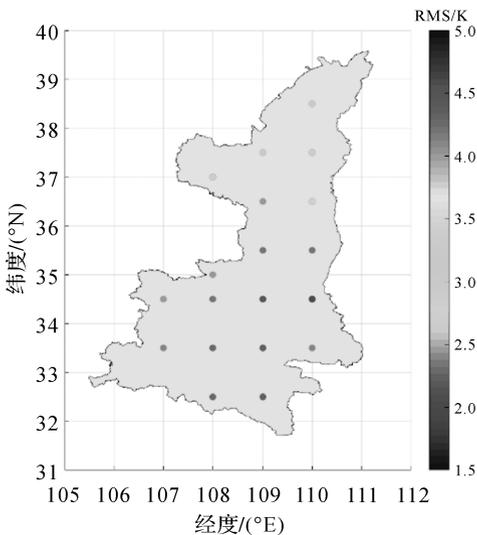
(a) 顾及气候差异的  $T_m$  模型残差



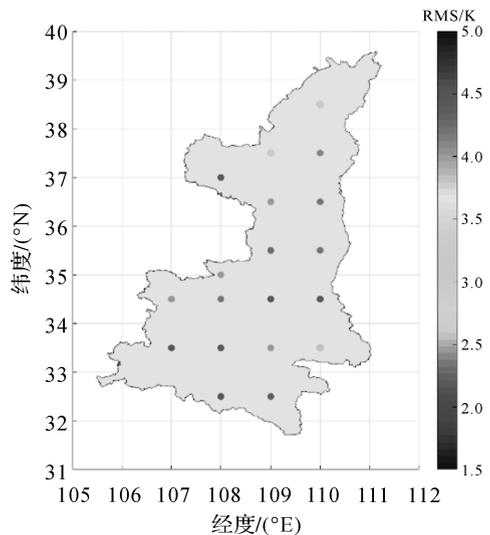
(b) 顾及气候差异的  $T_m$  模型残差统计分布

图 8 顾及气候差异的  $T_m$  模型日均残差变化

Fig.8 Daily residual variation of the model



(a) 顾及气候差异的  $T_m$  模型RMS



(b) 顾及气候差异的  $T_m$  模型STD

图 9 顾及气候差异的模型 RMS 与 STD

Fig.9 STD and RMS of the model in different climatic regions

从表 6 可以看出,最大 RMS 为 3.67 K,即对应 PWV 的误差大约为 0.55 mm。考虑区域气候差异可以在不同气候类型的地区有效减小误差,提高模型精度,从图 9(a)、(b)可以看出,顾及气候差异的  $T_m$  模型在整个陕西省都有很高的精度,在陕西省均可以满足高精度  $T_m$  的获取。

### 3.4 $T_m$ 模型综合精度评价比较

为了便于 GPS 气象学应用,获得最为适合陕

西省的  $T_m$  模型,本文将所建立的模型与 Bevis 模型进行统一模型精度评价,结果见表 7。在实际工程应用中,可以根据实际情况选择合适的模型。

表 6 顾及气候差异的  $T_m$  模型精度

Tab.6 Accuracy of climate division model K

数据源	平均 RMS	RMS 最大值	平均 STD	STD 最大值
ECMWF	3.26	3.67	2.69	3.19

表 7 模型综合精度评价

Tab.7 Model comprehensive accuracy evaluation

探空站	气象因子	bias/K	STD/K	RMS/K	提升比率/(%)
Yanan (36.6°N,109.5°E)	$T_s$ 、 $P$ 模型	1.67	2.40	2.85	22.9
	$T_s$ 模型	1.33	2.42	3.13	15.4
	顾及周期改正 $T_m$ 模型	0.42	2.81	3.07	17.0
	顾及气候差异 $T_m$ 模型	0.68	2.78	2.06	44.3
	Bevis 公式	-2.18	2.45	3.70	
Jinghe (34.43°N,108.97°E)	$T_s$ 、 $P$ 模型	2.46	2.08	2.86	7.7
	$T_s$ 模型	2.48	2.15	2.91	6.1
	顾及周期改正 $T_m$ 模型	0.47	2.41	2.79	10.0
	顾及气候差异 $T_m$ 模型	0.37	2.63	1.86	40.0
	Bevis 公式	-1.8	2.12	3.10	
Hanzhong (33.06°N,107.03°E)	$T_s$ 、 $P$ 模型	2.34	1.70	2.77	6.7
	$T_s$ 模型	2.26	1.76	2.90	2.3
	顾及周期改正 $T_m$ 模型	0.31	2.52	2.33	21.5
	顾及气候差异 $T_m$ 模型	0.66	2.44	1.47	50.5
	Bevis 公式	-2.02	1.78	2.97	

注:提升比率为当前模型相较于 Bevis 模型精度的提升百分比。

## 4 结 论

(1) 试验结果显示,本文利用 ECMWF 数据结合无线电探空数据建立的多气象因子和单气象因子的陕西省  $T_m$  模型。相较于传统仅使用无线电探空数据进行区域建模的方法,本文方法明显增加了站点空间分布,提升了数据采样率以及可靠性,使气象数据过渡更平滑,建模结果更加合理可靠。

(2) 利用研究区域内未参与建模的 3 个探空站的数据进行验证。陕西省区域化单因子模型比 Bevis 模型整体精度分别提升了 2.3%、6.1% 和 15.4%,而加上周期性改正的  $T_m$  区域化模型,精度分别提升 17%、10% 和 21%,提升幅度显著。这主要得益于加上周期改正  $T_m$  模型相较于传统回归模型,考虑了季节周期性改正,显著降低了模型随年积日变化和程高变化导致的误差,使得模型精度更高。

(3) 本文提出将陕西省划分为 3 个气候区,在不同气候区分别建立  $T_m$  回归模型,并与探空数据进行比较,外符合精度范围为 1.47~2.06 K, PWV 误差约为 0.22~0.309 mm,相较于 Bevis 模型精度提升 40% 左右,效果明显好于对于研究区域整体建模。这说明建模时考虑不同气候差异可以有效减小模型误差,从而进一步提高模型精度。利用未参与建模的 ECMWF 数据对模型进行精度评估,平均 RMS 为 3.26 K,最大 RMS 为 3.67 K;平均 STD 为 2.69 K,最大 STD 为 3.19 K。模型内外符合精度较高,说明顾及气候差异的  $T_m$  模型在整个陕西省均可以获取高精度  $T_m$ 。

## 参考文献:

- [1] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1994, 33(3): 379-386.
- [2] LAGLER K, SCHINDELEGGGER M, BÖHM J, et al.

- GPT2: empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1069-1073.
- [3] 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.
- [4] YAO Yibin, XU Chaoqian, ZHANG Bao, 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.
- [5] 姚宜斌, 孙章宇, 许超铃. Bevis 公式在不同高度面的适用性以及基于近地大气温度的全球加权平均温度模型[J]. *测绘学报*, 2019, 48(3): 276-285. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20180160.
- YAO Yibin, SUN Zhangyu, XU Chaoqian. Applicability of Bevis formula at different height level and global weighted mean temperature model based on near-earth atmospheric temperature[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 276-285. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019.20180160.
- [6] 姚宜斌, 孙章宇, 许超铃, 等. 顾及非线性高程归算的全球加权平均温度模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(1): 106-111.
- YAO Yibin, SUN Zhangyu, XU Chaoqian, et al. Global weighted mean temperature model considering nonlinear vertical reduction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 106-111.
- [7] SUN Zhangyu, ZHANG Bao, YAO Yibin. A global model for estimating tropospheric delay and weighted mean temperature developed with atmospheric reanalysis data from 1979 to 2017[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1893.
- [8] SUN Zhangyu, ZHANG Bao, YAO Yibin. An ERA5-based model for estimating tropospheric delay and weighted mean temperature over China with improved spatiotemporal resolutions[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1926-1941.
- [9] 黄良珂, 彭华, 刘立龙, 等. 顾及垂直递减率函数的中国区域大气加权平均温度模型[J]. *测绘学报*, 2020, 49(4): 432-442. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190168.
- HUANG Liangke, PENG Hua, LIU Lilong, et al. An empirical atmospheric weighted mean temperature model considering the lapse rate function for China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 432-442. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190168.
- [10] 李黎, 田莹, 谢威, 等. 基于探空资料的湖南地区加权平均温度本地化模型研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(3): 282-286, 291.
- LI Li, TIAN Ying, XIE Wei, et al. Localization model research of weighted average temperature in Hunan area based on radiosonde data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(3): 282-286, 291.
- [11] 李黎, 樊奕茜, 王亮, 等. 湖南地区加权平均温度的影响因素分析及建模[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(1): 48-52.
- LI Li, FAN Yixi, WANG Liang, et al. Influence analysis of multi-factor on weighted average temperature and its modeling in Hunan region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(1): 48-52.
- [12] 李媛, 李黎, 张振, 等. 长三角地区分季节多因子本地化  $T_m$  模型研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(2): 140-145.
- LI Yuan, LI Li, ZHANG Zhen, et al. Research on seasonal and multifactor model of weighted average temperature in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 140-145.
- [13] 李宏达, 张显云, 王晓红, 等. 贵州局地大气加权平均温度模型的建立与精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(5): 496-501.
- LI Hongda, ZHANG Xianyun, WANG Xiaohong, et al. Model establishment and accuracy analysis of atmospheric weighted mean temperature in Guizhou region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(5): 496-501.
- [14] 李经纬, 陈刚, 李水平, 等. 新疆地区对流层加权平均温度模型分析[J]. *测绘科学*, 2019, 44(4): 60-65.
- LI Jingwei, CHEN Gang, LI Shuiping, et al. Analysis of weighted mean tropospheric temperature model in Xinjiang region[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(4): 60-65.
- [15] 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.
- WANG Xiaoying, DAI Ziqiang, CAO Yunchang, et al. Weighted mean temperature  $T_m$  statistical analysis in ground-based GPS in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 412-416.
- [16] 王勇, 柳林涛, 郝晓光, 等. 武汉地区 GPS 气象网应用研究[J]. *测绘学报*, 2007, 36(2): 141-145. DOI: 10.3321/j. issn:1001-1595.2007.02.005.
- WANG Yong, LIU Lintao, HAO Xiaoguang, et al. The application study of the GPS meteorology network in Wuhan region [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 141-145. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.02.005.
- [17] 李国平, 黄丁发, 刘碧全. 成都地区地基 GPS 观测网遥感大气可降水量的初步试验[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(12): 1086-1089.
- LI Guoping, HUANG Dingfa, LIU Biquan. Experiment on driving precipitable water vapor from ground-based GPS network in Chengdu plain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12): 1086-1089.
- [18] 罗宇, 罗林艳, 吕冠儒. 加权平均温度模型对 GPS 水汽反

- 演的影响[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 6-9, 15.
- LUO Yu, LUO Linyan, LÜ Guanru. Impact analysis on localization of  $T_m$  model in GPS precipitable water vapor retrieval[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 6-9, 15.
- [19] 陈永奇, 刘焱雄, 王晓亚, 等. 香港实时 GPS 水汽监测系统的若干关键技术[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 9-12, 25. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.002.
- CHEN Yongqi, LIU Yanxiong, WANG Xiaoya, et al. GPS real-time estimation of precipitable water vapor-Hong Kong experiences [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 9-12, 25. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.002.
- [20] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM 2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289. DOI:10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.001.
- ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM 2008 and its application analysis in Chinese mainland [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.001.
- [21] 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.
- YAO Yibin, LIU Jinhong, ZHANG Bao, et al. Nonlinear relationships between the surface temperature and the weighted mean temperature [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(1): 112-116.
- [22] 刘劲宏, 姚宜斌, 桑吉章. 温度递减率对加权平均温度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(6): 639-642.
- LIU Jinghong, YAO Yibin, SANG Jizhang. Temperature lapse rate and its influence on weighted mean temperature [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(6): 639-642.
- [23] 刘劲宏, 姚宜斌, 桑吉章, 等. 对流层顶的变化趋势对加权平均温度的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1430-1435.
- LIU Jinghong, YAO Yibin, SANG Jizhang, et al. Effect of the changes of tropopause on weighted mean temperature [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1430-1435.
- [24] 姚朝龙, 罗志才, 刘立龙, 等. 顾及地形起伏的中国低纬度地区湿延迟与可降水量转换关系研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(7): 907-912.
- YAO Chaolong, LUO Zhicai, LIU Lilong, et al. On the relation between the wet delay and the water precipitable vapor in consideration of topographic relief in the low-latitude region of China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(7): 907-912.
- [25] 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.
- 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.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-04-27

修回日期: 2020-07-16

第一作者简介: 朱海(1996—),男,硕士生,研究方向为GNSS气象学。

First author: ZHU Hai (1996—), male, postgraduate, majors in GNSS meteorology.

E-mail: 2018126050@chd.edu.cn

通信作者: 黄观文

Corresponding author: HUANG Guanwen

E-mail: huang830928@163.com