

王明华<sup>1,2</sup> 曹云昌<sup>3</sup> 梁宏<sup>3</sup> 涂满红<sup>3</sup> 刘志刚<sup>4</sup>

# 中国区域性大气加权平均温度线性模型精度评估

## 摘要

以欧洲中期天气预报中心的再分析资料 ERA5 为参考数据,评估由探空数据建立的中国区域 88 个单站大气加权平均温度( $T_m$ )与地表气温( $T_s$ )线性关系模型的精度.各站  $T_m$ - $T_s$  线性模型计算的  $T_m$ (计算值)与 ERA5 气压层数据积分所得的  $T_m$ (参考值)间偏差均方根值(RMSE)为 1.8~5.5 K.不同站模型计算值与参考值间存在 -1.22~4.54 K 的系统性偏差,且绝大多数测站(82 个站)系统性偏差为正值,即模型计算值总体上大于参考值.补偿各站系统性偏差后,模型计算值与参考值间 RMSE 降为 1.5~3.5 K.与使用中国区域统一模型相比,使用单站模型平均能提高 0.6 K 的  $T_m$  计算精度,尤其在中国西部、西北和内蒙区域,精度提高可达 1~3.9 K.对所有测站模型计算值和参考值间偏差时序进行分析,发现超过半数测站的偏差存在明显季节性变化.

## 关键词

GNSS 气象学;大气加权平均温度;线性模型;ERA5;平均偏差

中图分类号 P228.4;P423

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-15

资助项目 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金(MESTA-2020-B011);南京信息工程大学人才启动基金(2020R053);中国气象局气候变化专项(CCSF202045)

## 作者简介

王明华,男,博士,副教授,研究方向为 GNSS 气象学与高精度导航定位. mhwang@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京, 210044

2 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州, 510300

3 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

4 秦皇岛市气象局, 秦皇岛, 066000

## 0 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号在穿越对流层时,会产生一定的延迟,利用该延迟量可以反演大气的重要参数——大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)<sup>[1-2]</sup>.由于具有成本低、时空分辨率高、无需校准和可全天候工作等优点,GNSS 已逐渐成为水汽探测的一种重要手段,在科学研究和气象业务中得到广泛应用<sup>[3-8]</sup>.

在将 GNSS 信号对流层湿延迟转换成 PW 时,需要已知大气加权平均温度( $T_m$ )数值. $T_m$  是水汽转换过程中的一个关键参数,其精度决定着转换系数的精度<sup>[9]</sup>.根据定义式计算  $T_m$ ,需要获取各气压层(或高度层)的水汽分压和大气温度,并在高度上进行积分<sup>[10]</sup>,应用上较为不便.实际中,常根据地表气温  $T_s$  与  $T_m$  线性关系来计算  $T_m$ .Bevis 等<sup>[11]</sup>采用北美地区 13 个探空站 2 年的数据(8 718 条廓线数据)拟合出一个线性模型  $T_m = 0.72T_s + 70.2$ ,模型的拟合精度为 4.74 K,该模型曾被作为标准模型,在全球多个地区使用.然而,文献[12-13]的研究表明,不同地区的  $T_m$ - $T_s$  线性关系存在明显的差异性,以单一的 Bevis 模型代表全球区域势必引起一定的计算误差.文献[14]表明,在欧洲区域 Bevis 模型精度低于其他本地建立的模型.文献[15]检验 Bevis 模型在全球范围的精度,结果显示,Bevis 模型计算的  $T_m$  值偏差在局部区域可达到 10 K.由于 Bevis 模型在各地区精度的不均匀性,各国家和地区分别建立适合本地的模型,如荷兰区域模型<sup>[16]</sup>、加拿大和阿拉斯加区域模型<sup>[17]</sup>、巴西区域模型<sup>[18]</sup>、印度温带区域模型<sup>[19]</sup>、中国台湾区域模型<sup>[20]</sup>和中国香港区域模型<sup>[21-22]</sup>等.在中国大陆区域,学者们也建立了类似的局地模型,如北京地区模型<sup>[23]</sup>、成都地区模型<sup>[24]</sup>和武汉地区模型<sup>[25]</sup>等.文献[8]利用中国区域 88 个探空站 14 年的数据进行建模,得到中国区域统一模型与各单站的  $T_m$ - $T_s$  线性模型,88 个单站模型斜率范围跨度较大(0.35~0.96),显示了明显的地区性差异以及各局部地区建立小范围模型的必要性.

文献[8]对中国各区域的  $T_m$ - $T_s$  线性模型精度进行了一定的研究,然而其分析是基于各模型的拟合精度,即建模精度(建模数据与所建模型之间的一致性程度),本质上属于内符合精度分析.近几年,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出第五代再分析资料 ERA5,由于采用最新的预报模型和数据同化技术,该套产品时空分辨率和数

据质量较之前版本均有所提高<sup>[26-28]</sup>.本文拟以 ERA5 数据为参考值,评估文献[8]中建立各单站  $T_m-T_s$  线性模型精度,比较单站模型与中国区域统一模型的精度差别,并对线性模型  $T_m$  计算值与参考值间偏差特性进行分析.

## 1 数据与方法

文中涉及的数据有中国区域无线电探空观测资料 and ECMWF 的 ERA5 再分析资料,前者用于建立  $T_m-T_s$  线性模型,后者用于模型精度分析.

### 1.1 中国区域性 $T_m-T_s$ 线性模型的建立

基于探空数据建立  $T_m-T_s$  线性模型的工作已在文献[8]中完成,以下对该部分内容进行简要回顾.

对于每一条探空廓线,以地面测站高度处观测的气温(即探空廓线数据中的首个观测值或最低高度观测值)作为地表气温  $T_s$ ,根据大气加权平均温度的定义式计算  $T_m$ ,定义式的离散形式如下:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_{wi}}{T_i} \Delta h_i}{\sum_{i=1}^N \frac{P_{wi}}{T_i^2} \Delta h_i}, \quad (1)$$

式中:  $T_m$  为大气加权平均温度;  $N$  表示将大气在垂向上划分的层数;  $i$  表示划分层中的第  $i$  层;  $P_{wi}$  表示第  $i$  层的平均水汽压;  $T_i$  表示第  $i$  层的平均气温;  $\Delta h_i$  表示第  $i$  层的厚度.从式(1)可知,要计算大气加权平均温度需要知道各高度处的水汽压  $P_w$ ,而探空数据文件中往往不直接提供水汽压数值,只提供水汽混合比  $m_x$  和大气压  $P$ ,因此需要根据以下公式计算水汽压  $P_w$ :

$$P_w = \frac{m_x}{m_x + 0.622} P, \quad (2)$$

式中,  $m_x$  的单位为 kg/kg.

由多条探空廓线可以获得多对  $(T_s, T_m)_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,从而可确定  $T_m$  与  $T_s$  的线性关系,即:

$$T_m = aT_s + b. \quad (3)$$

理论上,只要  $n \geq 2$ ,即可以确定式(3)中的系数  $a$  和  $b$ ,而实际中,为了使获取的系数更可靠,往往采取较多数据点来拟合模型.本文采用分布于中国区域的 88 个探空站(图 1a)2004—2018 年的数据建立两类  $T_m-T_s$  线性模型,一类是统一模型,即所有数据只建立一个线性模型(图 1b 中红线),结果为

$$T_m = 0.79T_s + 50.72, \quad (4)$$

该统一模型由 860 333 条探空廓线数据得出,拟合精度为 4.13 K.另一类为单站模型,即对每一个探空站分别建立  $T_m-T_s$  线性模型(图 1b 中灰线),各单站模型的系数(即式(3)中的系数  $a$  和  $b$ )如表 1 所示.

图 1b 显示,部分单站模型与统一模型存在明显差异,以单一的线性模型(统一模型)计算整个中国区域的  $T_m$  可能会带来明显的计算误差.

### 1.2 基于 ERA5 数据获取 $T_s$ 和 $T_m$

作为最新一代的 ECMWF 全球再分析资料,ERA5 目前提供了近 70 年的历史气候数据.本文下载了中国区域 2019 年的逐小时气压层数据,气压从 1 000 hPa 至 1 hPa,共 37 层,高度约 80 km,数据的水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (约 30 km),下载的变量包含重力势、比湿和气温.根据式(1)计算大气加权平均温度,各层的气温可从再分析资料中直接取出,而高度需要根据重力势计算,公式如下:

$$h = \frac{\Phi}{g}, \quad (5)$$

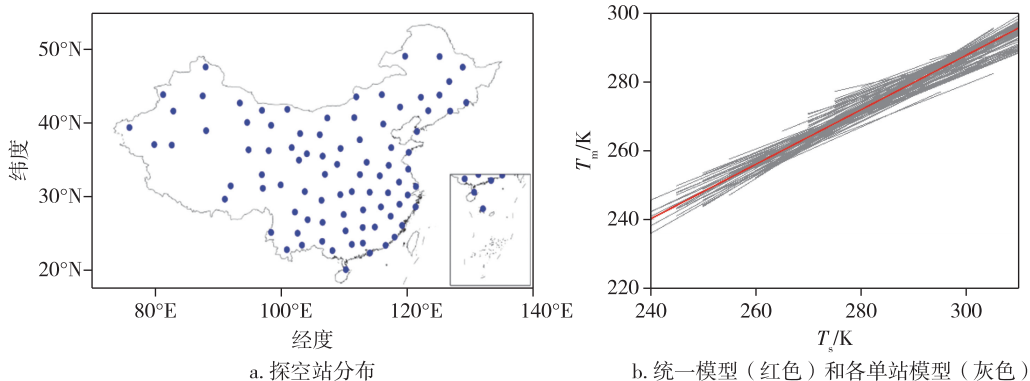


图 1 用于建模的 88 个探空站分布及所建的统一模型与单站模型

Fig. 1 Radiosonde stations (a) and radiosonde data derived  $T_m-T_s$  linear models (b), with red line for the unified model and grey lines for the 88 single-station models

式(5)中: $\Phi$ 为重力势; $g$ 为重力加速度,本文取 $9.80665\text{ m/s}^2$ .水汽压数值根据再分析资料中的比湿数据计算,比湿 $q$ 与水汽混合比 $m_x$ 的关系为

$$m_x = \frac{q}{1-q}. \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),整理得到比湿 $q$ 与水汽压 $P_w$ 的关系为

$$P_w = \frac{q}{0.378q + 0.622}P, \quad (7)$$

式中的气压 $P$ 可直接从再分析资料各气压层获取, $q$ 的单位为 $\text{kg/kg}$ .从再分析资料中直接或间接获取温度、高度和水汽压等数据后,即可采用式(1)计算 $T_m$ .

由探空数据建立 $T_m$ - $T_s$ 线性模型时,以测站高度处的气温为 $T_s$ ,并且以此高度为起始高度,往上积分,获取 $T_m$ .测站高度与ERA5气压层高度并不一致,因此,在使用ERA5数据评估 $T_m$ - $T_s$ 线性模型时,首先需内插出各探空站高度处的数据.例如,若探空站高度为 $h_s$ ,介于ERA5数据中高度为 $h_1$ 和 $h_2$ 的两气压层之间( $h_1 < h_s < h_2$ ), $h_1$ 高度处对应的气温、比湿和气压为 $(T_1, q_1, P_1)$ , $h_2$ 高度处对应的数值为 $(T_2, q_2, P_2)$ ,若采用线性插值,则 $h_s$ 高度处的气温 $T_s$ 为

$$T_s = \frac{T_2 - T_1}{h_2 - h_1}(h_s - h_1) + T_1. \quad (8)$$

类似地, $h_s$ 高度处的比湿 $q_s$ 为

$$q_s = \frac{q_2 - q_1}{h_2 - h_1}(h_s - h_1) + q_1. \quad (9)$$

当 $h_s$ 比ERA5中的最低层的高度低,即 $h_s < h_1 < h_2$ ,由内插改为外推,此时式(8)和(9)同样适用.

对于 $h_s$ 高度处的气压 $P_s$ ,一般不采用线性形式的内插或外推,而采用以下公式计算:

$$P_s = P_1 \cdot e^{-\left(\frac{g(h_s - h_1)}{R_d T_1}\right)}, \quad (10)$$

式中, $R_d$ 为干空气气体常数,文中取值为 $287.053\text{ J/(K}\cdot\text{kg)}$ .

通过以上内插或外推,获取 $h_s$ 高度处的气象参数 $(T_s, q_s, P_s)$ ,以该层数据作为首层,采用式(1)对ERA5气压层数据向上积分,获取大气加权平均温度 $T_m$ .地表气温取 $h_s$ 高度处的气温.

气象参数的垂向内插或外推解决了探空站高度与ERA5数据层高度不一致的问题,然而,在平面上,探空站位置与ERA5格点位置并不重合,也需要一定的处理.一般认为, $T_m$ - $T_s$ 线性关系在 $50\text{ km}$ 范围内(保守估计)是一致的或变化很小,而由ERA5

数据平面分辨率可知,各探空站与最近的ERA5数据格点距离不超过 $30\text{ km}$ ,因此,可以直接采用与该探空站平面距离最近的格点数据评定该站的 $T_m$ - $T_s$ 线性模型精度,而不需要在平面上将数据内插至探空站位置.

## 2 结果与分析

以下基于ECMWF的ERA5数据,评估各单站 $T_m$ - $T_s$ 线性模型精度,比较模型的检验精度与建模精度,比较各站上使用单站模型和统一模型的精度,分析各模型计算的 $T_m$ 与ERA5 $T_m$ 间偏差特性.

### 2.1 模型检验精度与建模精度

对各测站按1.2节方法从ERA5数据中获取测站高度处的温度和对应的大气加权平均温度,分别记为 $T_{s\_ERA5}$ 和 $T_{m\_ERA5}$ ,假设测站处的 $T_m$ - $T_s$ 线性模型为 $T_m = aT_s + b$ ,则大气加权平均温度的模型计算值为 $T_{m\_Calc} = aT_{s\_ERA5} + b$ , (11)模型计算值 $T_{m\_Calc}$ 与参考值 $T_{m\_ERA5}$ 间的均方根误差RMSE(量值记为 $\eta_{RMSE}$ )为

$$\eta_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m\_Calc} - T_{m\_ERA5})^2}{n}}. \quad (12)$$

分别计算各单站模型 $T_m$ 计算值与参考值间的RMSE,即各模型的检验精度,结果如图2中红色的点所示, RMSE在 $1.8 \sim 5.5\text{ K}$ .模型检验精度反映ERA5数据与各模型的一致性程度.各单站模型的建模精度(数据来源于文献[8])如图2中蓝色的点所示, RMSE值在 $1.9 \sim 5.0\text{ K}$ .建模精度指原始建模数据与 $T_m$ - $T_s$ 线性模型值之间的RMSE,反映建模数据与所建模型的一致性程度.图2中(包括图3和图5)横坐标显示的探空站序号与具体探空站的对应关系见附表1.若整体分析,所有88个站模型检验精度与建模精度差值的平均值小于 $0.02\text{ K}$ ,说明两种精度总体上是一致的,然而,若逐站分析,则可发现部分测站上模型检验精度与建模精度有显著差别,个别站上差别达 $1.5\text{ K}$ .在2.3节中将说明,造成这些测站上两种精度显著差别的一个主要原因是 $T_m$ 模型计算值与参考值间存在明显系统性偏差.

### 2.2 单站模型与统一模型

对各站分别使用单站模型和统一模型计算 $T_m$ ,并求得各模型计算值与参考值间的RMSE.对于文中的88个站,单站模型RMSE比统一模型RMSE平均小 $0.6\text{ K}$ .图3显示,在总体上单站模型精度优于统



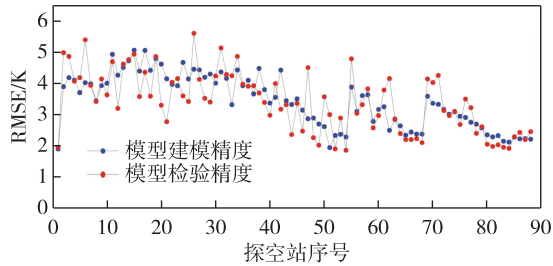


图2 各单站模型建模精度(蓝)和模型检验精度(红)  
Fig. 2 Precision (blue) and accuracy (red) of single-station  $T_m-T_s$  linear models

一模型,在65个站上,单站模型 RMSE 比统一模型 RMSE 小,然而两类模型间的精度差别因站而异,有些站上单站模型 RMSE 明显小于统一模型 RMSE,如序号为10~20的测站,而有些站单站模型 RMSE 仅略小于统一模型 RMSE,如序号为2和3的测站.另外23个站,单站模型 RMSE 略大于统一模型 RMSE,这是因为这些站采用单站模型相对于采用统一模型, $T_m$  计算值精度改进不明显,再加上检验数据本身带有误差,由此出现结果的不确定性.

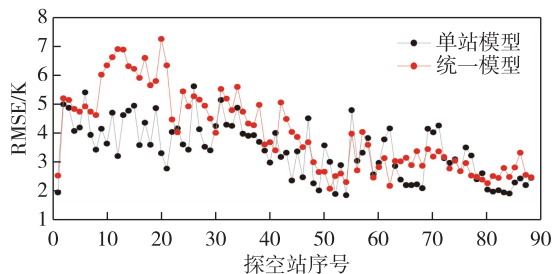


图3 单站模型(黑)、统一模型(红) $T_m$  计算值与参考值间偏差的均方根值

Fig. 3 RMSEs of  $T_m$  values derived from single-station models (black) and the unified model (red)

图3表明在部分站上单站模型相较于统一模型在精度上有明显的改进.为显示这些站的地理分布特征,将单站模型 RMSE 比统一模型 RMSE 低1K及以上的测站用红色标识,其他测站用蓝色标识,如图4所示.红色站点主要分布于中国的西部、西北和内蒙区域,这说明,采用单站模型替代统一模型,在这些区域能显著提高  $T_m$  计算精度.

### 2.3 模型计算值与参考值间偏差分析

为研究由线性模型计算的  $T_m$  值(计算值)和由 ERA5 数据积分得到的  $T_m$  值(参考值)间偏差的特性,计算各站  $T_m$  计算值与参考值间偏差,求得各站平均偏差和扣除平均偏差后的 RMSE.图5a显示,大

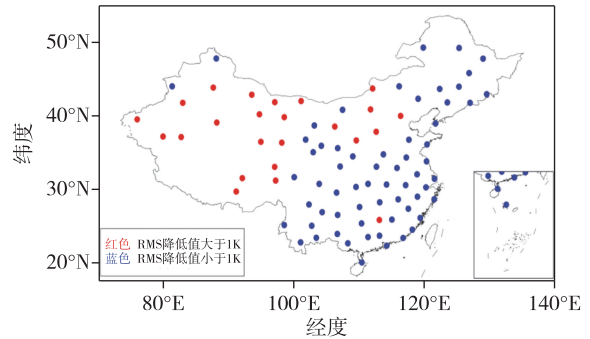


图4 单站模型 RMSE 比统一模型 RMSE 小1K以上的测站(红色)以及其他测站(蓝色)

Fig. 4 Red ones are stations where the RMSEs of  $T_m$  values from single-station models are less than those from the unified model by more than 1 K, and the blue ones denote the other stations

部分站有明显的系统性偏差,偏差值范围为-1.22~4.54 K,除了6个站,其他站均呈现正的平均偏差,说明相对于参考值,由线性模型计算的  $T_m$  值总体上偏大.文中各站  $T_m-T_s$  线性模型由探空数据建立,而检验模型时采用 ERA5 数据,因此, $T_m$  模型计算值与参考值间明显的系统性偏差揭示了探空与 ERA5 再分析资料间的不一致性.

各站  $T_m$  模型值与参考值间去均值偏差 RMSE 如图5b所示.对比图2可知,扣除偏差均值后, $T_m$  模型计算值与参考值间的一致性明显增加, RMSE 值在1.5~3.5 K.

考虑到季节可能影响  $T_m$  模型计算值与参考值间偏差,对所有测站进行分析,发现可将所有测站分为两类:一类是随着季节的变化, $T_m$  模型计算值与参考值间偏差变化不明显,如图6a北京站数据所示(这类测站共39个);另一类是随着季节变化,偏差发生明显变化,如图6b海拉尔站数据所示(这类测站共49个),在年积日第150至第270天(6—9月)期间, $T_m$  模型计算值与参考值间偏差相对较小,而其他月份偏差较大.以上现象说明,在像海拉尔这一类测站上,采用不随季节变化的  $T_m-T_s$  模型,在各个季节计算结果精度不一致,为提高总体精度,须将模型做相应的季节调整.

### 3 结束语

大气加权平均温度  $T_m$  是 GNSS 水汽计算中的一个关键参数,为提高中国区域  $T_m$  计算精度,文献[8]在88个探空站上建立各自的  $T_m-T_s$  线性模型,

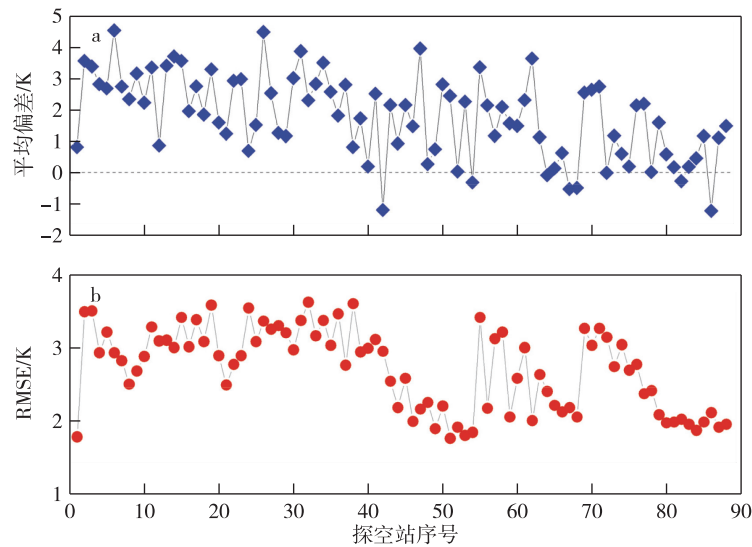


图5  $T_m$  模型计算值与参考值间的平均偏差(a)和扣除平均偏差后的 RMSE(b)

Fig. 5 Mean bias (a) and mean-bias-removed RMSE (b) between  $T_m$  from single-station linear model and from ERA5

每个模型只用于测站及周边小范围区域,以保证模型的有效性.本文以 ECMWF 最新再分析资料 ERA5 数据为参考值,检验文献[8]中各单站模型精度,比较单站模型与中国区域统一模型以及分析模型计算值与参考值间的偏差,结果显示:

1) 各站  $T_m$  模型计算值与参考值间 RMSE 为 1.8~5.5 K,模型检验精度与模型建模精度基本相当;

2) 多数站的  $T_m$  模型计算值与参考值间存在系统性偏差,且偏差值大多为正,扣除各站平均偏差后,模型计算值与参考值间 RMSE 降为 1.5~3.5 K;

3) 与使用中国区域统一的  $T_m-T_s$  模型相比,使

用单站模型在中国西部、西北和内蒙区域能明显提升  $T_m$  计算精度;

4) 在半数以上的测站上, $T_m$  模型计算值与参考值的偏差随着季节不同有明显变化,对于这些测站,使用随季节变化系数的  $T_m-T_s$  线性模型将可能提高  $T_m$  计算精度.

以上结果可为实际应用提供参考或为进一步改进  $T_m-T_s$  线性模型精度提供方向.根据较多测站  $T_m$  模型计算值与参考值间存在系统性偏差这一现象,可以推测探空数据与 ERA5 数据间存在着系统偏差,然而,具体是哪一种资料带来偏差是未知的,需要进一步研究.

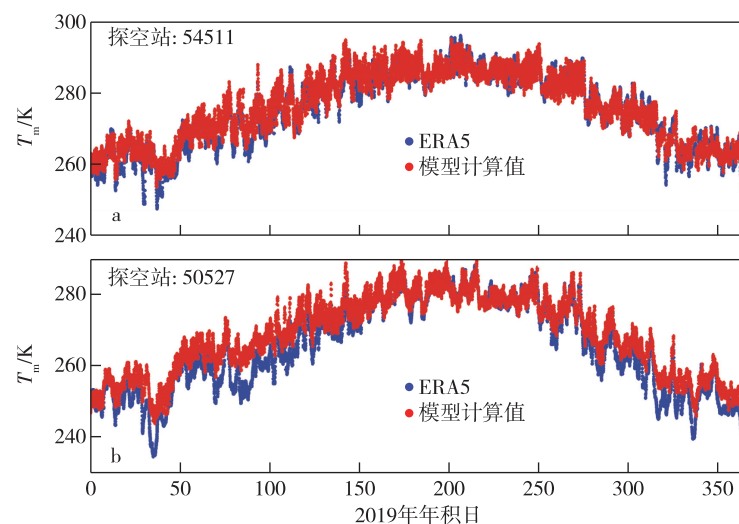


图6 模型计算的  $T_m$  值(红)和 ERA5 数据积分计算的  $T_m$  值(蓝) a.北京站数据;b.海拉尔站数据

Fig. 6  $T_m$  derived from single-station linear model (red) and from ERA5 (blue), (a) from station 54511, and (b) from station 50527

附表 1 探空站位置及各单站  $T_m-T_s$  线性模型Appendix table 1 Coordinates of radiosonde stations and single-station  $T_m-T_s$  model coefficients

序号	探空站位置		线性模型		
	ID/站名	经纬度	高度/m	$a$	$b$
1	45004/Kings Park	114. 16°E, 22. 31°N	66	0. 57	118. 16
2	50527/Hailar	119. 75°E, 49. 21°N	611	0. 72	69. 55
3	50557/Nenjiang	125. 23°E, 49. 16°N	243	0. 77	55. 79
4	50774/Yichun	128. 90°E, 47. 71°N	232	0. 83	38. 75
5	50953/Harbin	126. 76°E, 45. 75°N	143	0. 85	33. 30
6	51076/Altay	88. 08°E, 47. 73°N	737	0. 65	90. 53
7	51431/Yining	81. 33°E, 43. 95°N	664	0. 65	89. 68
8	51463/Urumqi	87. 62°E, 43. 78°N	919	0. 60	103. 13
9	51644/Kuqa	82. 95°E, 41. 71°N	1 100	0. 62	97. 46
10	51709/Kashi	75. 98°E, 39. 46°N	1 291	0. 60	102. 14
11	51777/Ruoqiang	88. 16°E, 39. 03°N	889	0. 58	109. 52
12	51828/Hotan	79. 93°E, 37. 13°N	1 375	0. 61	97. 69
13	51839/Minfeng	82. 71°E, 37. 06°N	1 409	0. 58	108. 82
14	52203/Hami	93. 51°E, 42. 81°N	739	0. 62	98. 06
15	52267/Ejinqi	101. 06°E, 41. 95°N	941	0. 64	92. 16
16	52323/Maz.Shan	97. 03°E, 41. 80°N	1 770	0. 64	89. 84
17	52418/Dunhuang	94. 68°E, 40. 15°N	1 140	0. 59	105. 47
18	52533/Jiuquan	98. 48°E, 39. 76°N	1 478	0. 62	96. 06
19	52681/Minqin	103. 08°E, 38. 63°N	1 367	0. 65	89. 38
20	52818/Golmud	94. 90°E, 36. 41°N	2 809	0. 60	98. 88
21	52836/Dulan	98. 10°E, 36. 30°N	3 192	0. 75	57. 22
22	52866/Xining	101. 75°E, 36. 71°N	2 296	0. 66	86. 40
23	52983/Yuzhong	104. 15°E, 35. 87°N	1 875	0. 67	84. 57
24	53068/Erenhot	112. 00°E, 43. 65°N	966	0. 68	78. 05
25	53463/Hohhot	111. 68°E, 40. 81°N	1 065	0. 77	54. 02
26	53513/Linhe	107. 40°E, 40. 76°N	1 041	0. 76	59. 71
27	53614/Yinchuan	106. 21°E, 38. 48°N	1 112	0. 74	63. 52
28	53772/Taiyuan	112. 55°E, 37. 78°N	779	0. 77	54. 03
29	53845/Yan'an	109. 50°E, 36. 60°N	959	0. 72	68. 70
30	53915/Pingliang	106. 66°E, 35. 55°N	1 348	0. 77	56. 72
31	54102/Xilinhot	116. 06°E, 43. 95°N	991	0. 74	64. 15
32	54135/Tongliao	122. 26°E, 43. 60°N	180	0. 88	24. 00
33	54161/Changchun	125. 21°E, 43. 90°N	238	0. 87	27. 66
34	54218/Chifeng	118. 96°E, 42. 26°N	572	0. 85	32. 86
35	54292/Yanji	129. 46°E, 42. 88°N	178	0. 92	13. 44
36	54342/Shenyang	123. 43°E, 41. 76°N	43	0. 82	41. 59
37	54374/Linjiang	126. 91°E, 41. 71°N	333	0. 82	41. 93
38	54511/Beijing	116. 28°E, 39. 93°N	55	0. 87	25. 21
39	54662/Dalian	121. 63°E, 38. 90°N	97	0. 96	2. 57
40	54727/Zhangqiu	117. 55°E, 36. 70°N	123	0. 83	37. 24
41	54857/Qingdao	120. 33°E, 36. 06°N	77	0. 96	3. 35
42	55299/Nagqu	92. 06°E, 31. 48°N	4 508	0. 67	77. 83
43	55591/Lhasa	91. 13°E, 29. 66°N	3 650	0. 63	93. 57

序号	探空站位置		线性模型		
	ID/站名	经纬度	高度/m	<i>a</i>	<i>b</i>
44	56029/Yushu	97. 01°E,33. 01°N	3 682	0. 73	64. 51
45	56080/Hezuo	102. 90°E,35. 00°N	2 910	0. 74	63. 76
46	56137/Qamdo	97. 16°E,31. 15°N	3 307	0. 70	74. 10
47	56146/Garze	100. 00°E,31. 61°N	3 394	0. 72	70. 94
48	56187/Wenjiang	103. 83°E,30. 70°N	541	0. 71	72. 29
49	56571/Xichang	102. 26°E,27. 90°N	1 599	0. 58	110. 66
50	56691/Weining	104. 28°E,26. 86°N	2 236	0. 62	102. 15
51	56739/Tengchong	98. 48°E,25. 11°N	1 649	0. 52	130. 75
52	56778/Kunming	102. 68°E,25. 01°N	1 892	0. 45	148. 44
53	56964/Simao	100. 98°E,22. 76°N	1 303	0. 35	181. 68
54	56985/Mengzi	103. 38°E,23. 38°N	1 302	0. 49	138. 31
55	57083/Zhengzhou	113. 65°E,34. 71°N	111	0. 81	46. 17
56	57127/Hanzhong	107. 03°E,33. 06°N	509	0. 78	54. 11
57	57131/Jinghe	108. 97°E,34. 43°N	411	0. 75	60. 92
58	57178/Nanyang	112. 58°E,33. 03°N	131	0. 80	48. 24
59	57447/Enshi	109. 46°E,30. 28°N	458	0. 77	56. 77
60	57461/Yichang	111. 30°E,30. 70°N	134	0. 80	48. 09
61	57494/Wuhan	114. 13°E,30. 61°N	23	0. 75	64. 14
62	57516/Chongqing	106. 48°E,29. 51°N	260	0. 81	47. 57
63	57679/Changsha	113. 08°E,28. 20°N	46	0. 70	78. 60
64	57749/Huaihua	110. 00°E,27. 56°N	261	0. 68	83. 41
65	57816/Guiyang	106. 65°E,26. 48°N	1 222	0. 62	101. 20
66	57957/Guilin	110. 30°E,25. 33°N	166	0. 63	99. 24
67	57972/Chenzhou	113. 03°E,25. 80°N	185	0. 62	101. 09
68	57993/Ganzhou	114. 95°E,25. 85°N	125	0. 63	98. 02
69	58027/Xuzhou	117. 15°E,34. 28°N	42	0. 84	37. 63
70	58150/Sheyang	120. 25°E,33. 76°N	7	0. 86	32. 34
71	58203/Fuyang	115. 73°E,32. 86°N	33	0. 84	37. 86
72	58238/Nanjing	118. 80°E,32. 00°N	7	0. 81	44. 31
73	58362/Shanghai	121. 46°E,31. 40°N	4	0. 82	42. 85
74	58424/Anqing	117. 05°E,30. 53°N	20	0. 79	51. 17
75	58457/Hangzhou	120. 16°E,30. 23°N	43	0. 79	50. 87
76	58606/Nanchang	115. 91°E,28. 60°N	50	0. 74	67. 77
77	58633/Quxian	118. 86°E,28. 96°N	71	0. 73	70. 12
78	58665/Hongjia	121. 41°E,28. 61°N	2	0. 78	54. 31
79	58725/Shawu	117. 46°E,27. 33°N	219	0. 69	81. 32
80	58847/Fuzhou	119. 28°E,26. 08°N	85	0. 73	69. 83
81	59134/Xiamen	118. 08°E,24. 48°N	139	0. 68	84. 50
82	59211/Baise	106. 60°E,23. 90°N	175	0. 64	95. 58
83	59265/Wuzhou	111. 30°E,23. 48°N	120	0. 58	114. 12
84	59280/Qingyuan	113. 05°E,23. 66°N	19	0. 59	111. 25
85	59316/Shantou	116. 66°E,23. 35°N	3	0. 63	100. 81
86	59431/Nanning	108. 21°E,22. 63°N	126	0. 54	125. 08
87	59758/Haikou	110. 35°E,20. 03°N	24	0. 56	121. 84
88	59981/Xishadiao	112. 33°E,16. 83°N	5	0. 47	149. 53

## 参考文献

## References

- [ 1 ] 李征航,黄劲松.GPS 测量与数据处理[M].2 版.武汉:武汉大学出版社,2010  
LI Zhenghang, HUANG Jingsong. GPS surveying and data processing [ M ]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2010
- [ 2 ] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more[M]. Vienna: Springer, 2007
- [ 3 ] 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): 2631-2634
- [ 4 ] Liang H, Cao Y C, Wan X M, et al. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 6(2): 135-142
- [ 5 ] Wang M H, Wang J X, Bock Y, et al. Dynamic mapping of the movement of landfalling atmospheric rivers over southern California with GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(6): 3551-3559
- [ 6 ] Wang J H, Zhang L Y. Climate applications of a global, 2-hourly atmospheric precipitable water dataset derived from IGS tropospheric products[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3): 209-217
- [ 7 ] Birkenheuer D, Gutman S. A comparison of GOES moisture-derived product and GPS-IPW data during IHOP-2002 [ J ]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(11): 1838-1845
- [ 8 ] 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
- [ 9 ] 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
- [ 10 ] 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): 1593-1607
- [ 11 ] 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 ): 15787-15801
- [ 12 ] Ross R J, Rosenfeld S. Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for global positioning system applications [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102( D18 ): 21719-21730
- [ 13 ] Ross R J, Rosenfeld S. Correction to “Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for global positioning system applications” by Rebecca J. Ross and Simon Rosenfeld [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104 ( D22 ): 27625. DOI: 10.1029/1999JD900967
- [ 14 ] Emardson T R, Derks H J P. On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere [ J ]. Meteorological Applications, 2000, 7(1): 61-68
- [ 15 ] Wang J H, Zhang L Y, Dai A G. Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110 ( D21 ): D21101
- [ 16 ] Baltink H K, van der Marel H, van der Hoeven A G A. Integrated atmospheric water vapor estimates from a regional GPS network [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107( D3 ): ACL3-1-ACL3-8
- [ 17 ] Bokoye A I, Royer A, O'Neill N, et al. Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108( D15 ): 4480
- [ 18 ] Sapucci L F. Evaluation of modeling water-vapor-weighted mean tropospheric temperature for GNSS-integrated water vapor estimates in Brazil [ J ]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(3): 715-730
- [ 19 ] Singh D, Ghosh J K, Kashyap D. Weighted mean temperature model for extra tropical region of India [ J ]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2014, 107: 48-53
- [ 20 ] Liou Y A, Teng Y T, van Hove T, et al. Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes [ J ]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2001, 40(1): 5-15
- [ 21 ] Liu Y X, Chen Y Q, Liu J N. Determination of weighted mean tropospheric temperature using ground meteorological measurements [ J ]. Geo-Spatial Information Science, 2001, 4(1): 14-18
- [ 22 ] 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
- [ 23 ] 李建国, 毛节泰, 李成才, 等. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析 [ J ]. 气象学报, 1999, 57(3): 283-292  
LI Jianguo, MAO Jietai, LI Chengcai, et al. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression  $t_m$  in eastern region of China [ J ]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(3): 283-292
- [ 24 ] 吕弋培, 殷海涛, 黄丁发, 等. 成都地区大气平均温度建模及其在 GPS/PWV 计算中的应用研究 [ J ]. 测绘科学, 2008, 33(4): 103-105  
LÜ Yipei, YIN Haitao, HUANG Dingfa, et al. Modeling of weighted mean atmospheric temperature and application in GPS/PWV of Chengdu region [ J ]. Science of



- Surveying and Mapping,2008,33(4):103-105
- [25] 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  
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
- [26] Hersbach H,Bell B,Berrisford P,et al.The ERA5 global reanalysis[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(730):1999-2049
- [27] Ssenyunzi R,Oruru B,D'ujanga F,et al.Performance of ERA5 data in retrieving precipitable water vapour over east African tropical region [J].Advances in Space Research,2020,65(8):1877-1893
- [28] Zhang W X,Zhang H,Liang H,et al.On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93 ( 10 ): 1897-1909

## On the accuracy of regional weighted mean temperature linear models over China

WANG Minghua<sup>1,2</sup> CAO Yunchang<sup>3</sup> LIANG Hong<sup>3</sup> TU Manhong<sup>3</sup> LIU Zhigang<sup>4</sup>

1 School of Remote Sensing & Geomatics Engineering,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application,Ministry of Natural Resources,Guangzhou 510300

3 Meteorological Observation Center,China Meteorological Administration,Beijing 100081

4 Qinhuangdao Meteorological Bureau,Qinhuangdao 066000

**Abstract** We used the ERA5 data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts to evaluate the accuracy of regional weighted mean temperature ( $T_m$ ) linear models over China. These models were derived from historical radiosonde data of 88 Chinese stations. For these stations, the root mean square errors (RMSEs) between single-station model derived  $T_m$  and ERA  $T_m$  are 1.8–5.5 K, and –1.22–4.54 K of which are system biases. For 82 out of the total 88 stations, the system biases are positive, indicating that the model derived values are generally larger than ERA  $T_m$ . The RMSEs can be reduced to 1.5–3.5 K after removal of the system biases. On average, the RMSE of  $T_m$  from single-station model is smaller than that from the unified model by 0.6 K, suggesting that single-station models are generally more accurate than the unified model. In western China, northwestern China and Inner Mongolia, the accuracy can be improved by 1–3.9 K using single station models compared with the unified model. Time series of the biases between model derived  $T_m$  and ERA  $T_m$  show obvious seasonal cycles for over half of the stations.

**Key words** GNSS meteorology; weighted mean temperature of the atmosphere; linear model; ERA5; mean bias