

莫智翔^{1,2} 李佳豪¹ 周吕¹ 黄良珂^{1,2} 刘立龙^{1,2}

顾及时空因素的青藏高原地区加权平均温度模型

摘要

大气加权平均温度(T_m)在 GNSS 大气水汽反演过程中扮演着关键角色.本文针对现有的 T_m 模型在青藏高原地区的适用性较差等情况,利用 2014—2017 年青藏高原地区 13 个探空站观测数据建立了一种顾及地面温度、高度、纬度及季节变化的青藏高原地区 T_m 模型(TPT_m模型).以 2018 年的探空资料为参考值,对 TPT_m 模型进行精度检验,并与常用的 Bevis 模型、局域精化后的 Bevis 模型(Bevis-TP 模型)和 GPT2w 模型进行比较分析,结果表明:TPT_m 模型具有相对较好的精度,其年均偏差和均方根误差(RMS)分别为 0.07 K 和 2.76 K,相比 Bevis、Bevis-TP、GPT2w-5(5°分辨率)和 GPT2w-1(1°分辨率)模型其精度(RMS 值)分别提高 54.5%、30.8%、36.3%和 27.6%;此外,将 TPT_m 模型用于 GNSS 水汽计算,其导致的水汽计算理论 RMS 误差和相对误差分别为 0.10 mm 和 1.02%.因此,TPT_m 模型在青藏高原地区的 GNSS 水汽反演中具有重要应用.

关键词

加权平均温度;时空因素;GNSS 大气水汽;青藏高原

中图分类号 P228

文献标志码 A

收稿日期 2021-10-13

资助项目 广西科技计划项目(桂科 AD19110107);国家自然科学基金(41864002);广西“八桂学者”岗位专项

作者简介

莫智翔,男,硕士生,研究方向为 GNSS 气象学.zxmo@glut.edu.cn

周吕(通信作者),男,博士,副教授,研究方向为 InSAR 数据处理理论及地质灾害监测.zhoulv@glut.edu.cn

0 引言

水汽及其变化是天气、气候变化的主要驱动力,是灾害性天气形成和演变过程中的重要因子.大气水汽的变化与降水直接相关,在大气能量传输、天气系统演变、大气辐射收支、全球气候变化等多种气象演变中扮演着重要的角色^[1-2].大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)又称大气水汽总量,定义为地面上大气柱中的总水汽量,是表征大气水汽含量以及空中水资源的重要指标^[3-4].目前,对大气水汽含量的探测主要依靠常规的无线电探空站、雷达观测和水汽辐射计等技术,但使用费用昂贵,且时空分辨率低,离监测和预报中小尺度灾害性天气的要求还有很大差距.全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能较好地弥补传统大气水汽探测技术在时空分辨率上的不足,并提供精细化气象预报所需要的高精度、大容量、近实时的大气水汽资料.

GNSS 反演的 PWV 的计算通常由 GNSS 卫星信号传播延迟时的对流层天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)乘以水汽转换系数得到,而水汽转换系数的关键参数就是大气加权平均温度(T_m).因此,在 GNSS 反演大气水汽中, T_m 是获取 GNSS 大气水汽的一个关键参数,准确地计算 T_m 值是提高 PWV 计算精度、实现实时 PWV 估计的重要保证. T_m 值可以利用探空资料或大气再分析产品等气象参数通过数值积分法计算获取,但受限于地理、数据获取等因素,不容易获取任意位置处的 T_m 值.为此通常需要建立一个准确的 T_m 模型来满足这些需求,为用户提供便利.目前, T_m 模型主要分为需要实测气象参数的 T_m 模型和不需要实测气象参数的 T_m 模型.在需要气象参数的 T_m 模型中,文献[5]利用北美 8 718 个探空站发现 T_m 与地表温度(T_s)具有良好的线性关系,并提出了一种常用的 T_m 计算经验模型(Bevis 模型).由于 Bevis 模型应用到其他地区会存在一定的系统偏差^[6],诸多学者针对不同地区对 Bevis 模型进行分析和改进^[7-8].文献[9]利用探空数据建立了适用于中国东部地区的 T_m 模型,并取得良好的效果;文献[10]分析了 T_m 与 T_s 、纬度、海拔、水汽压和大气压之间的关系,建立了 T_m 单因子和多因子回归模型;文献[11]则在 Bevis 公式的基础上在中国西部地区建立了一种顾及 T_s 、高程和季节变化的 T_m 模型.在不需要气象参数的 T_m 模型中,这类模型一般是基于局部或全球多年的 T_m 数据构建的经验模型.文献[12]首先构建了欧洲地区与纬度

1 桂林理工大学 测绘地理信息学院,桂林,541006

2 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室,桂林,541004

和季节相关的非气象参数 T_m 模型 (Emardson 模型), 诸多学者也对其进行了改进^[13]. 文献[14] 提出一个全球经验对流层格网模型 (GPT2w 模型), 该模型有 $1^\circ \times 1^\circ$ (GPT2w-1) 和 $5^\circ \times 5^\circ$ (GPT2w-5) 两种分辨率, 只要输入目标经纬度、高程和相应的年积日, 即可提供所需的包括 T_m 在内的对流层参数. 文献[15] 建立了中国区域顾及垂直递减率函数的非气象参数 T_m 模型. 虽然非气象参数 T_m 模型不用依赖实测的气象参数, 但与采用实测气象参数的 T_m 模型相比, 存在一定的系统误差, 其精度在局部地区的表现还有待进一步验证.

青藏高原位于欧亚大陆中部, 是世界海拔最高的高原, 被称为“世界屋脊”. 它的冷热作用对中国、东亚乃至世界的大气环流和气候变化具有非常重要的影响^[16]. 青藏高原地形多样、水汽分布复杂, 且探空站分布稀疏, 导致青藏高原水汽的监测成为大气探测中的难题. 此外, 大多现有的 T_m 模型在青藏高原地区的适用性较差, 且未在该地区有深入的研究. 因此, 研究建立高精度的青藏高原区域 T_m 经验模型具有重要的现实意义. 本文利用 2014—2017 年分布在青藏高原地区的探空资料分析了 T_m 与 T_s 、纬度和高程在青藏高原地区的相关性, 在此基础上建立了适用于青藏高原地区的顾及时空变化因素的多因子 T_m 模型 (TPT_m 模型), 并利用 2018 年的探空数据作为参考, 验证该模型的精度, 为青藏高原地区高精度的 GNSS 水汽反演、应用提供重要的参考依据.

1 计算原理及数据来源

1.1 计算原理

GNSS 反演的大气水汽 PWV^[5] 由天顶湿延迟 ZWD 乘以水汽转换系数 Π 得到:

$$V_{PW} = \Pi \cdot Z_{WD}, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m + k_2')]}, \quad (2)$$

式中: $\rho_w = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为液态水的密度; $R_v = 461.495 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为水汽气体常数; k_2', k_3 为大气物理参数, 经验值通常分别为 22.13 ± 2.20 、 $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5 \text{ K/hPa}$; T_m 为大气加权平均温度, 可以由测站上空水汽压和绝对温度沿天顶方向的积分函数求得, 其数学表达式^[17]为

$$T_m = \frac{\int_{h_s}^{\infty} (e/T) dz}{\int_{h_s}^{\infty} (e/T^2) dz}, \quad (3)$$

式中: e 和 T 分别为测站天顶方向某高度的水汽压 (hPa) 和绝对温度 (K); z 表示测站上空的垂直高度 (m); h_s 为测站大地高 (m). 在探空资料中, 一般提供了相对湿度 H_R 和绝对温度 T , 而水汽压 e 并没有直接提供, 但可以通过饱和水汽压 e_s (hPa) 和露点温度 T_d (单位为 $^\circ\text{C}$, $T = T_d + 273.15$) 来计算得到, 公式为

$$e = \frac{H_R \cdot e_s}{100}, \quad (4)$$

$$e_s = 6.112 \times 10^{\left(\frac{7.5 \times T_d}{T_d + 273.3}\right)}. \quad (5)$$

在实际中, 式(3)采用以下积分公式离散化得到:

$$T_m = \frac{\int_{h_s}^{\infty} (e/T) dz}{\int_{h_s}^{\infty} (e/T^2) dz} = \frac{\sum_1^n \psi(e_i, T_i) \Delta h_i}{\sum_1^n \phi(e_i, T_i) \Delta h_i}, \quad (6)$$

式中: $\psi(e_i, T_i) = \frac{e_i}{T_i}$, $\phi(e_i, T_i) = \frac{e_i}{T_i^2}$; Δh_i 表示第 i 层大气的厚度; n 为探空观测层数; e_i 和 T_i 分别为第 i 大气层的平均水汽压和绝对温度. 这种计算方法叫数值积分法, 而利用该方法计算的对流层加权平均温度是目前国内外学者公认的最为精确的方法. 除了数值积分法, 还可以根据区域探空站数据采用统计回归分析方法推导出 T_m 与 T_s 的统计关系式 (经验公式), 最后通过 T_s 来计算得到相应的 T_m , 两者的关系式可表示为

$$T_m = a + b T_s, \quad (7)$$

式中, 公式系数 a 和 b 可利用最小二乘法计算得到. Bevis 等^[5] 利用北美地区探空资料构建的 Bevis 模型曾被国内外诸多学者采用, 其求取的 a, b 系数分别取值为 70.2 和 0.72.

1.2 数据源介绍

美国怀俄明州立大学网 (<http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) 可以直接下载探空站的观测资料. 其中探空站资料包括探空气球每天在 0 时和 12 时探测两次的大气分层数据, 数据包含这两个时刻的气压、温度、露点温度、相对湿度等相关气象数据, 还提供了测站的位置信息. 根据不同的等压面, 可由数值积分法计算 T_m 值, 并从探空数据中获得 T_s 值. 本文选取 2014—2017 年均匀分布在青藏高原地区 13 个探空站的观测数据来进行模型构建, 用 2018 年的相应探空资料进行评估、验证. 探空站点位分布及各站点相关信息如图 1 和表 1 所示.

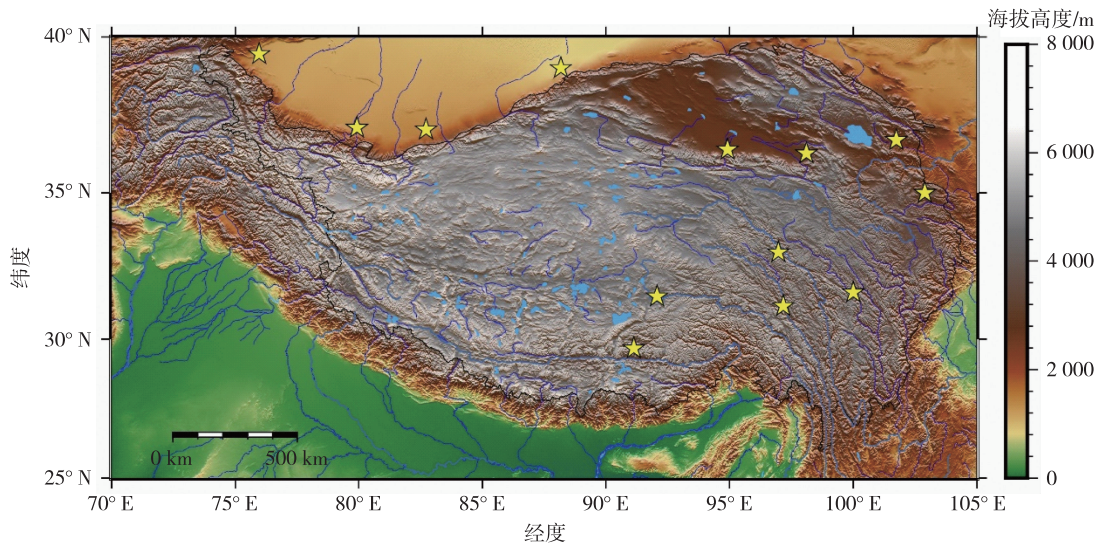


图 1 青藏高原地区 13 个探空站分布

Fig. 1 Distribution of the 13 radiosonde stations in Tibetan Plateau

表 1 青藏高原地区 13 个探空站信息情况

Table 1 Information of 13 radiosonde stations in Tibetan Plateau

测站	纬度/(°N)	经度/(°E)	海拔高度/m	测站	纬度/(°N)	经度/(°E)	海拔高度/m
喀什	39.47	75.98	1 289.4	那曲	31.48	92.07	4 507.0
若羌	39.03	88.17	887.7	拉萨	29.67	91.13	3 648.9
和田	37.13	79.93	1 375.0	玉树	33.00	96.97	3 716.9
民丰	37.07	82.72	1 409.5	合作	35.00	102.90	2 910.0
格尔木	36.42	94.92	2 807.6	昌都	31.15	97.17	3 315.0
都兰	36.30	98.10	3 189.0	甘孜	31.62	100.00	3 393.5
西宁	36.73	101.75	2 295.2				

2 模型的建立与评估

2.1 加权平均温度与地面温度、高度和纬度相关性分析

青藏高原地区地形起伏大、气候变化多端,极大地影响了 T_m 的准确计算.文献[17]表明 T_m 与 T_s 、高度和纬度具有较大的相关性.虽然 T_m 与 T_s 的线性关

系已被证实,但在一些地区有出现 T_m 与 T_s 的关系不密切的现象^[18],因此有必要分析在青藏高原地区 T_m 与 T_s 的关系.为了更好地分析 T_m 随 T_s 、高度和纬度的变化关系,本文选取了2017年青藏高原地区13个探空站数据,利用数值积分法计算出每个站点的 T_m 值并与其与相应测站的 T_s 、高度及纬度的相关性分别进行探究,结果如图2所示.

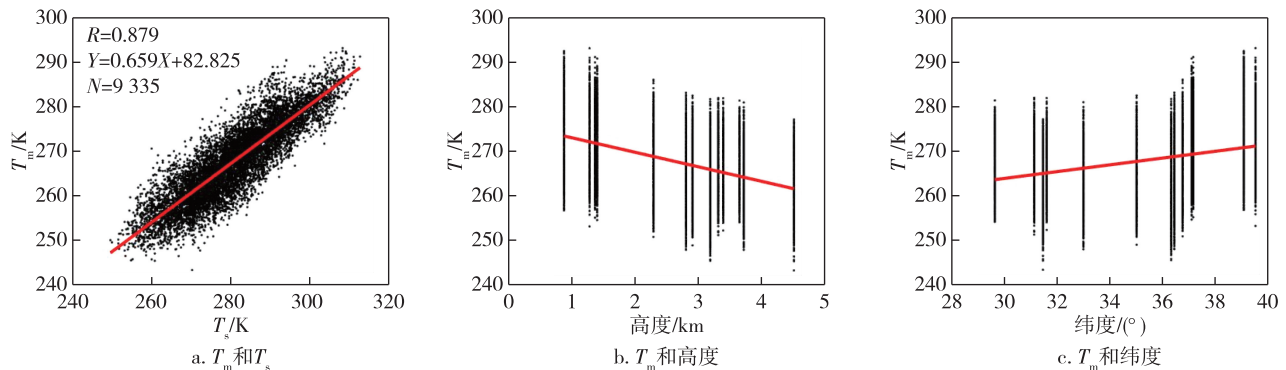


图 2 青藏高原地区 T_m 与 T_s 、高度和纬度的相关性

Fig. 2 Relationship between T_m , T_s , altitude and latitude for Tibetan Plateau

图2表明青藏高原地区的13个探空站点的 T_m 值与 T_s 、高度和纬度均存在近似的线性变化关系.其中 T_m 和 T_s 、 T_m 和纬度为正线性相关, T_m 和高度为负相关. T_m 和 T_s 的相关性最强,相关系数为0.879, T_m 和高度、纬度则次之.由此可见,考虑 T_m 随 T_s 、高度及纬度的变化并对其进行相应改正是准确计算 T_m 的关键,在建立 T_m 模型时可以考虑加入这三个要素的变化.

2.2 TPT_m模型的建立

文献[5]已经提出了一个简单的线性关系式 $T_m = a + bT_s$ 来表示 T_m 和 T_s 之间的关系.然而,由于 T_m 同时也与高度和纬度有显著的相关性,因此相比于简单的线性关系式,建立一个顾及多种因素的多因子 T_m 经验模型可以更精确地获取所需的 T_m 值.除空间因素外, T_m 和 T_s 存在着时间变化,其表现为年周期和半年周期变化^[17].因此,在用 T_m 和 T_s 的简单线性关系式计算 T_m 时,会引入周期残差^[19].为了探讨 T_m 残差的季节变化,以2013—2018年玉树探空站获取的 T_m 和 T_s 为例,先建立其线性关系式,然后将实测的 T_m 与关系式得到的 T_m 相减求出其 T_m 残差,结果如图3所示.

由图3可知, T_m 残差具有明显的季节变化,主要体现为年周期和半年周期的变化特性.一个好的 T_m 模型应该同时考虑空间和时间的变化,因此在构建 T_m 模型时还需顾及 T_m 残差的年周期和半年周期

变化.基于上述内容,本文对 T_m 和 T_s 线性模型进行修正,增加了调和函数,并在模型表达式中考虑高度和纬度的变化.模型公式如下:

$$T_m(T_s, h, \varphi, D_{OY}) = A_0 + A_1 T_s + A_2 h + A_3 \varphi + B_1 \cos\left(\frac{D_{OY}}{365.25} 2\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{D_{OY}}{365.25} 2\pi\right) + B_3 \cos\left(\frac{D_{OY}}{365.25} 4\pi\right) + B_4 \sin\left(\frac{D_{OY}}{365.25} 4\pi\right), \quad (8)$$

式中, h 为海拔高(km), φ 为大地纬度, D_{OY} 为年积日, $A_0, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, B_4$ 均为模型系数.本文采用均匀分布在青藏高原地区的2014—2017年13个探空站数据,利用最小二乘法对式(8)中的系数进行求解,由此得到青藏高原地区的顾及时空因素的大气加权平均温度新模型(TPT_m模型),求解的模型系数如表2所示.

TPT_m模型是一个适用于青藏高原地区的多因子局域经验模型,使用者仅需提供目标处的 T_s 、海拔高、纬度和年积日,即可通过模型计算出目标处的 T_m 值.此外,采用与TPT_m模型同样的建模数据,将式(7)中的 a, b 系数进行重新计算,构建一个青藏高原地区Bevis精化模型(Bevis-TP模型),求取的 a, b 值分别为83.2和0.66,后续将该模型与TPT_m模型进行对比,以衡量TPT_m模型中考虑时空因素所带来的改进.

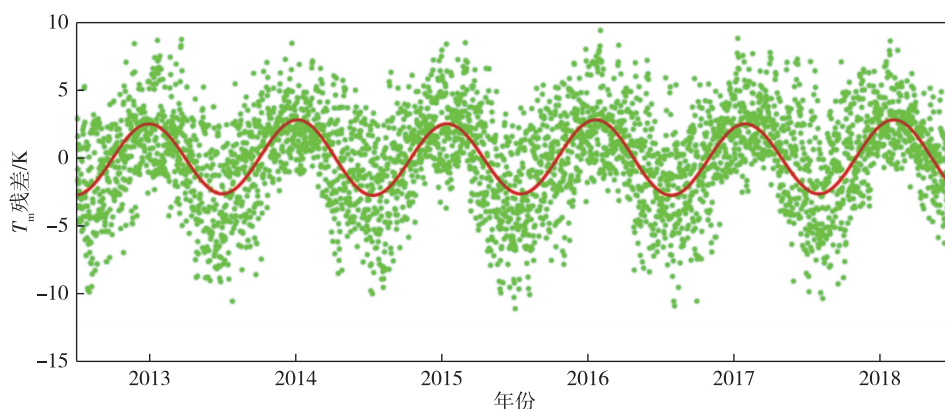


图3 玉树探空站 T_m 残差时序变化

Fig. 3 Variations of the T_m residual errors from 2013 to 2018 in Yushu radiosonde station

表2 TPT_m模型的系数

Table 2 Model coefficients of the TPT_m model

模型系数	A_0	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	B_4
值	204.629	0.318	-3.510	-0.483	-5.261	-2.534	-0.227	0.166

2.3 TPT_m 模型的精度验证

本文采用偏差(bias)和均方根误差(RMS)两种指标来作为模型的精度评估标准,其表达式为

$$E_{\text{bias}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_m^{M_i} - X_m^{R_i}), \tag{9}$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_m^{M_i} - X_m^{R_i})^2}, \tag{10}$$

式中, $X_m^{M_i}$ 为模型计算值, $X_m^{R_i}$ 为参考值, N 为数据样本数量.

为了评估新建立的 TPT_m 模型的精度,本文以 2018 年的青藏高原地区相应的 13 个探空站数据作为参考值,来验证 TPT_m 模型的精度,同时与常用的 Bevis 模型、Bevis-TP 模型和目前表现不错的 GPT2w 对流层模型进行对比分析.TPT_m 模型和 Bevis 模型所需要的 T_s 值均由相应的探空站提供.不同模型计算出的 T_m 值分别与参考值进行差值对比分析,由此可计算出 2018 年不同模型的年均偏差和 RMS 值,结果分别见表 3、图 4 和图 5.

由表 3 可知:Bevis 模型表现出最大的正偏差值和年均偏差值,分别为 6.45 K 和 4.68 K,GPT2w-5 表现出显著的负偏差值,其大小变化范围从-12.1

表 3 使用 2018 年探空站数据验证不同模型的精度对比

模型	bias/K			RMS/K		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
Bevis	6.45	1.75	4.68	7.32	4.73	6.07
Bevis-TP	2.78	-2.27	0.90	5.06	3.04	3.99
GPT2w-5	2.50	-12.10	-2.18	12.78	2.15	4.33
GPT2w-1	2.87	-5.13	-1.68	5.51	2.71	3.81
TPT _m	1.07	-1.35	0.07	3.52	1.82	2.76

K 至 2.5 K,而 TPT_m 模型具有最小的年均偏差值,为 0.07 K,其偏差变化范围也是 4 个模型里最小的,大小变化范围从-1.35 K 至 1.07 K;对于 RMS 值,Bevis 表现出最大的 RMS 值,为 6.07 K,而 TPT_m 模型的年均 RMS 值最小,为 2.76 K.局域精化后的 Bevis-TP 模型比 Bevis 模型在精度上有明显的提升,表明基于本地数据构建的 Bevis-TP 模型相比外地数据构建的 Bevis 模型可靠性更高.相比于 GPT2w-5 模型,GPT2w-1 模型的偏差值和 RMS 值都有明显改善,没有出现过大的绝对偏差值和 RMS 值,表明水平分辨率较高的 GPT2w-1 模型相比水平分辨率低

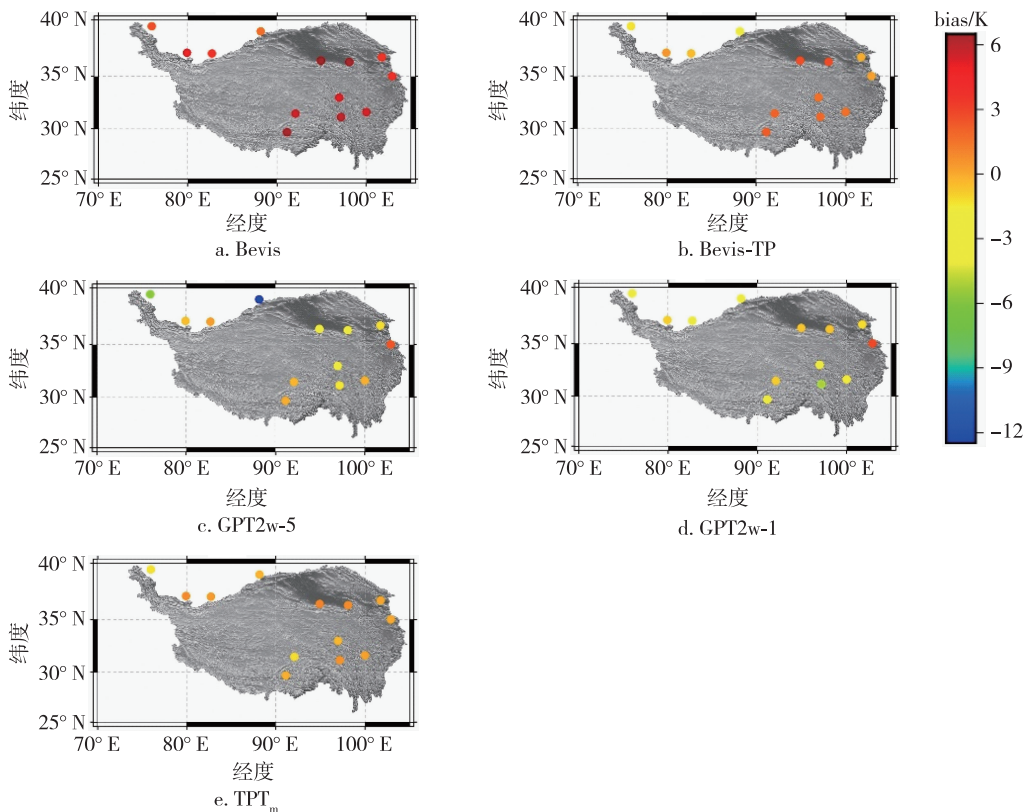


图 4 使用 2018 年探空站数据检验不同模型的偏差分布

Fig. 4 Distribution of biases for different models tested using radiosonde profiles of 2018

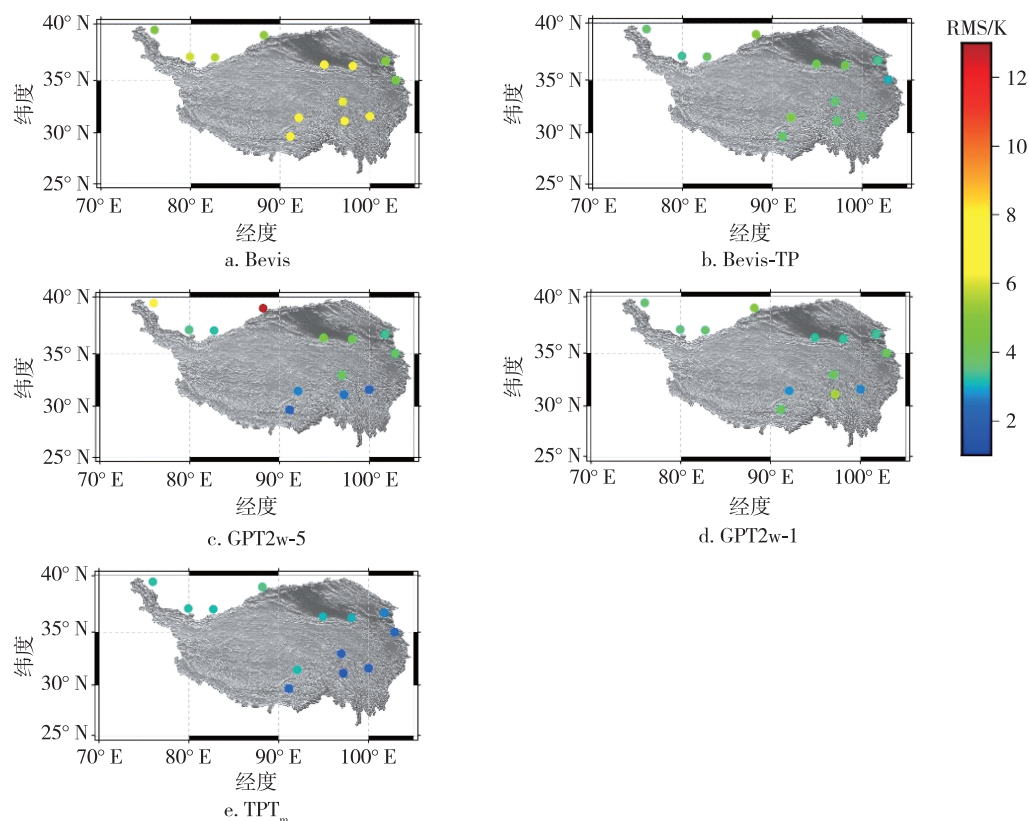


图5 使用2018年探空站数据检验不同模型的RMS误差分布

Fig. 5 Distribution of RMS errors for different models tested using radiosonde profiles of 2018

的GPT2w-5其精度有一定改善且相对稳定.相比于Bevis、Bevis-TP、GPT2w-5和GPT2w-1模型,TPT_m模型的精度分别提高54.5%(3.31 K)、30.8%(1.23 K)、36.3%(1.57 K)和27.6%(1.05 K),表明TPT_m模型在青藏高原地区计算的 T_m 值明显比其他模型的精度高,特别是对Bevis模型其精度有较好的改善.

由图4可以看出,Bevis模型在青藏高原地区多个站点存在显著的正偏差,GPT2w-5和GPT2w-1模型则存在明显的负偏差,而TPT_m模型在青藏高原地区整体表现出较小的偏差和良好的稳定性.由图5可知,Bevis模型在青藏高原地区的RMS误差整体偏大.其中在青藏高原地区的东部,Bevis模型的RMS值明显大于其他地区,且这些误差大的站点位于海拔较高的地区,表明在对于像青藏高原那样的高海拔地区,Bevis模型不能准确地计算当地的 T_m 值.而利用青藏高原局地的探空资料构建的Bevis-TP模型精度表现相比Bevis模型有明显的改善,尤其在青藏高原东部高原地区改善明显.这是由于Bevis模型是利用美国本土(27°~65°N地区)探空资料建立的,该模型在青藏高原地区使用时可能会

产生局域模型系统误差,使获得的 T_m 值并非最优.因此,在有气象资料条件下最好采用当地气象数据来构建 T_m 模型.但Bevis-TP模型与TPT_m模型相比,其偏差和RMS误差相对较大.除了青藏高原地形起伏较大的原因外,Bevis和Bevis-TP模型没有考虑 T_m 和 T_s 的季节变化也是导致其误差大的主要因素之一.GPT2w模型与Bevis模型相比其表现相对较好,但还存在个别偏大的RMS误差.GPT2w模型虽然考虑了年周期和半年周期变化,但由于忽略了 T_m 随高程的变化^[20],从而导致其在地形起伏较大的青藏高原地区使用时出现显著的系统误差.且GPT2w模型提供逐日的 T_m 值,无法满足获取逐小时 T_m 值的需求.然而,TPT_m模型克服了这些缺点,它在建模时同时考虑了 T_s 、地理位置(海拔和纬度)和时间的变化,只要用户提供逐小时的 T_s 值,就可得到对应每小时的 T_m 值.与其他模型相比,TPT_m模型的总体RMS误差较小,且相对稳定,特别是在高海拔地区表现良好.这些评估结果表明TPT_m模型在青藏高原地区具有较好的性能,表现出较高的精度和良好的稳定性.

2.4 T_m 对 GNSS-PWV 计算的影响

建立青藏高原地区的新 T_m 模型是为了提高 T_m 的计算精度,其最终目的是提高 GNSS 反演 PWV 的精度.但是一般情况下,GNSS 基准站与探空站不在同一地址,且大多数 GNSS 基准站主要用于大地测量研究,未安装气象传感器,所以难以全面、可靠地研究 T_m 对 GNSS-PWV 计算的影响.为此,本文采用文献[17]提出的计算 T_m 对 GNSS-PWV 的影响的方法,并对计算结果进行分析:

$$\frac{E_{\text{RMS,PWV}}}{V_{\text{PW}}} = \frac{E_{\text{RMS},\Pi}}{\Pi} = \frac{k_3 \cdot E_{\text{RMS},T_m}}{\left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m}\right) T_m^2} = \frac{k_3}{\left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m}\right) T_m} \cdot \frac{E_{\text{RMS},T_m}}{T_m}, \quad (11)$$

式中: $E_{\text{RMS,PWV}}$ 是 PWV 的 RMS 误差; $E_{\text{RMS},\Pi}$ 为转换系数 Π 的 RMS 误差; E_{RMS,T_m} 是 T_m 的 RMS 误差; $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$ 定义为 PWV 的相对误差. T_m 和 PWV 采用年均值计算.各模型在 13 个探空站上的 $E_{\text{RMS,PWV}}$ 和 $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$ 的计算结果如图 6 所示.

从图 6 可知,Bevis 模型和 GPT2w-5 模型在多数站点上均表现出较大的 $E_{\text{RMS,PWV}}$ 和 $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$

值, $E_{\text{RMS,PWV}}$ 最大值分别为 0.28 mm 和 0.56 mm, $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$ 最大值分别为 2.67% 和 4.86%.而 TPT_m 模型的整体 $E_{\text{RMS,PWV}}$ 值均小于 0.15 mm,平均 $E_{\text{RMS,PWV}}$ 值为 0.10 mm. TPT_m 模型的 $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$ 平均值为 1.02%,范围为 0.67% 至 1.27%,比其他模型更稳定且更小.因此,TPT_m 模型计算出来的 T_m 值所带来的误差对计算出的 GNSS-PWV 的影响,相比其他模型要小且较稳定,可以为青藏高原地区的 GNSS 反演出精确的 PWV 值提供更为准确的 T_m 信息.

3 结语

1) 本文采用 2014—2017 年 13 个探空站数据,建立了顾及 T_s 、高度、纬度和季节变化的青藏高原地区大气加权平均温度模型(TPT_m 模型),并以 2018 年探空站获取的 T_m 作为参考值,模型的平均偏差和平均 RMS 分别为 0.07 K 和 2.76 K.

2) 通过将 TPT_m 模型与常用的 Bevis 模型、局域精化后的 Bevis 模型和 GPT2w 模型相比较可知,TPT_m 模型相比其他模型在青藏高原地区的平均偏差和 RMS 更小、精度更高,对青藏高原地区有着更好的适应性、稳定性.

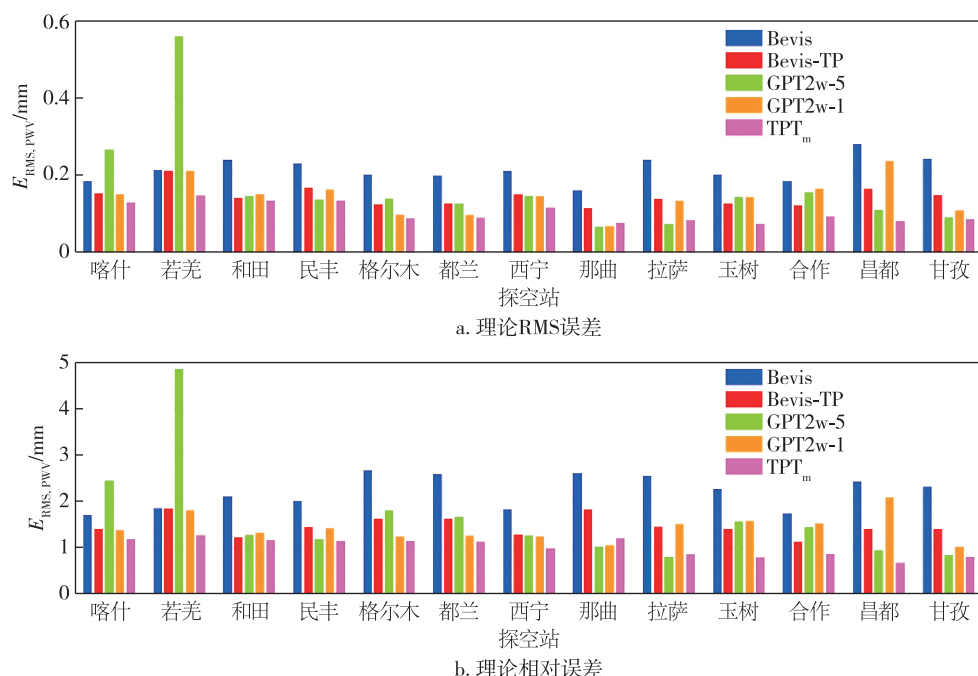


图 6 利用 2018 年探空站资料检验 Bevis 模型、Bevis-TP 模型、GPT2w 模型及 TPT_m 模型计算 PWV 的理论 RMS 误差和相对误差

Fig. 6 Theoretical $E_{\text{RMS,PWV}}$ and $E_{\text{RMS,PWV}}/V_{\text{PW}}$ errors from the Bevis, Bevis-TP, GPT2w and TPT_m models tested using radiosonde data of 2018

3)从理论上分析了各模型计算的 T_m 对GNSS-PWV估计的影响,得到TPT_m模型的 $E_{RMS,PWV}$ 和 $E_{RMS,PWV}/V_{PW}$ 的平均值分别为0.10 mm和1.02%,比其他模型更小且更稳定。

总之,TPT_m模型得到的 T_m 精度可靠,可以满足青藏高原地区GNSS水汽探测的要求,从而进一步改善青藏高原地区GNSS大气水汽反演的精度,更好地服务于青藏高原地区气象学的研究工作。

参考文献

References

- [1] 姚宜斌,张顺,孔建.GNSS空间环境学研究进展和展望[J].测绘学报,2017,46(10):1408-1420
YAO Yibin, ZHANG Shun, KONG Jian. Research progress and prospect of GNSS space environment science[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1408-1420
- [2] 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
- [3] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 2-27
- [4] 黄良珂,莫智翔,刘立龙,等.顾及及时变递减因子的中国大陆地区大气可降水量垂直改正模型[J].测绘学报,2021,50(10):1320-1330
HUANG Liangke, MO Zhixiang, LIU Lilong, et al. An empirical model for the vertical correction of precipitable water vapor considering the time-varying lapse rate for mainland China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1320-1330
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 龚绍琦.中国区域大气加权平均温度的时空变化及模型[J].应用气象学报,2013,24(3):332-341
GONG Shaoqi. The spatial and temporal variations of weighted mean atmospheric temperature and its models in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(3): 332-341
- [11] 莫智翔,黎杏,黄良珂,等.顾及多因子影响的中国西部地区大气加权平均温度模型精化研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(2):145-151
MO Zhixiang, LI Xing, HUANG Liangke, et al. Refinement of atmospheric weighted mean temperature model considering the effects of multiple factors for western China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 145-151
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
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
- [16] 姚宜斌,雷祥旭,张良,等.青藏高原地区1979—2014年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J].科学通报,2016,61(13):1462-1477

- YAO Yibin, LEI Xiangxu, ZHANG Liang, et al. Analysis of precipitable water vapor and surface temperature variation over Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2014 [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(13): 1462-1477
- [17] Huang L K, Jiang W P, Liu L L, et al. A new global grid model for the determination of atmospheric weighted mean temperature in GPS precipitable water vapor [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(2): 159-176
- [18] 姚宜斌, 张豹, 许超铃, 等. $T_m - T_s$ 的相关性分析及全球纬度相关的线性关系模型构建 [J]. 科学通报, 2014, 59(9): 816-824
- YAO Yibin, ZHANG Bao, XU Chaoqian, 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(9): 816-824
- [19] Yao Y B, Zhang B, Xu C Q, et al. Improved one/multi-parameter models that consider seasonal and geographic variations for estimating weighted mean temperature in ground-based GPS meteorology [J]. Journal of Geodesy, 2014, 88(3): 273-282
- [20] Huang L K, Liu L L, Chen H, et al. An improved atmospheric weighted mean temperature model and its impact on GNSS precipitable water vapor estimates for China [J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 1-16

An atmospheric weighted mean temperature model considering temporal and spatial factors for Tibetan Plateau

MO Zhixiang^{1,2} LI Jiahao¹ ZHOU Lü¹ HUANG Liangke^{1,2} LIU Lilong^{1,2}

¹ College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006

² Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004

Abstract Atmospheric weighted mean temperature (T_m) plays a key role in GNSS atmospheric precipitable water vapor (PWV) retrieval. In view of the poor applicability of the existing T_m models in Tibetan Plateau, a new T_m model considering surface temperature, altitude, latitude and seasonal variation, named as TPT_m, is established using the observation data of 13 radiosonde stations from 2014 to 2017 in Tibetan Plateau. Then, the TPT_m model is assessed by comparing with the widely used Bevis model, the local refined Bevis model (Bevis-TP model) and GPT2w model using the radiosonde data in 2018 as reference values. The results show that the TPT_m model has better performance with annual bias and Root Mean Square (RMS) error being 0.07 K and 2.76 K, respectively, of which the RMS errors is improved by 54.5%, 30.8%, 36.3% and 27.6% compared with Bevis, Bevis-TP, GPT2w-5 (5° resolution) and GPT2w-1 (1° resolution) models, respectively. In addition, when used to estimate GNSS-PWV, the TPT_m model has theoretical $E_{\text{RMS}, \text{PWV}}$ and $E_{\text{RMS}, \text{PWV}}/V_{\text{PW}}$ values of 0.10 mm and 1.02%, respectively. Therefore, the TPT_m model will have critical applications in GNSS-PWV retrieval in Tibetan Plateau.

Key words weighted mean temperature; temporal and spatial factors; GNSS precipitable water vapor (GNSS-PWV); Tibetan Plateau