引文格式：李玉霞,李建章,吴超,等. 中国西北地区加权平均温度模型构建与精度分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 85-89. doi:10.3969/j.issn.1672-4623.2026.05.016

中国西北地区加权平均温度模型构建与精度分析

李玉霞[1,2]，李建章[1,3,4*]，吴　超[5]，高志钰[1,3,4]，杜芳芳[2]
（1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 兰州资源环境职业技术大学，甘肃 兰州 730070；
3. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070；4. 甘肃省测绘科学与技术重点实验室，甘肃 兰州 730070；
5. 中国铁路设计集团有限公司，天津 300308）

摘　要：加权平均温度（T_m）的计算精度直接影响水汽反演精度。针对适用于中国西北地区的 T_m 模型较少且精度较低的问题，利用2010—2019年24个探空站的探空资料分析了 T_m 与地面温度（T_s）之间的线性关系，构建了西北地区的 T_m 模型，并结合已有 T_m 模型进行精度对比和适用性验证。结果表明，中国西北地区 T_m 与 T_s 的相关系数可达0.820 4，具有较强的线性相关性。构建的 T_m 模型的平均偏差、均方根误差、平均绝对误差和相对标准差等均优于已有 T_m 模型，说明该模型精度更高、适用性更强，可应用于中国西北地区气象预报与灾害分析。

关键词：GNSS气象学；西北地区；T_m；大气可降水量；精度分析
中图分类号：P236　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0085-05

Construction and Accuracy Analysis of Weighted Average Temperature Model in Northwest China

LI Yuxia[1,2], LI Jianzhang[1,3,4], WU Chao[5], GAO Zhiyu[1,3,4], DU Fangfang[2]
(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Lanzhou Resources & Environment VOC-TECH University, Lanzhou 730070, China;
3. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;
4. Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping of Gansu Province, Lanzhou 730070, China;
5. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: The computational accuracy of weighted average temperature (T_m) exerts a direct influence on the retrieval accuracy of atmospheric water vapor. In light of the issue that a paucity of applicable T_m models exist for northwest China, coupled with the relatively low accuracy of existing models, we analyzed the linear correlation between T_m and surface temperature (T_s) by utilizing radiosonde data from 24 radiosonde stations from 2010 to 2019, and further constructed a region-specific T_m model for northwest China. Then, we conducted accuracy comparison and validity verification with existing T_m models. The statistical results show that the correlation coefficient between T_m and T_s in northwest China can reach 0.820 4, indicating a strong linear correlation between them. The average deviation, root mean square error, average absolute error, and relative standard deviation of T_m model constructed in this paper are all better than those of the existing applicable T_m models in northwest China, demonstrating that this model has higher accuracy and stronger applicability, and can be applied to meteorological forecasting and disaster analysis in northwest China.

Key words: GNSS meteorology, northwest region, T_m, precipitable water vapor, accuracy analysis

大气水汽作为地球大气层中极具动态性的关键组成部分，其含量直接关联区域降水量，在全球气候系统的演变进程中发挥着不可替代的作用。大气可降水量（PWV）是表征大气水汽富集程度的物理量，其检测一直是气象学研究的重点内容。在全球卫星导航系统（GNSS）持续发展与技术体系日趋完善的背景下，基于GNSS观测数据开展PWV反演已获得国内外学术界的广泛关注与系统探索。基于GNSS观测数据与地

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42361073）；2023年度校级科研资助项目（X2023A-06）；2023年甘肃省高等学校创新基金资助项目（2023A-228）。
第一作者简介：李玉霞（1988—），硕士，研究方向为GNSS数据处理及理论研究，E-mail：1228491034@qq.com。
通信作者：李建章（1974—），博士，教授，研究方向为高速铁路控制网数据处理，E-mail：343529953@qq.com。

面气象观测数据可反演得到天顶对流层湿延迟，再通过与转换系数Π之间的线性关系直接计算得到PWV。Π为大气加权平均温度（T_m）的函数，因此T_m的精度直接影响PWV反演结果的精度[1-2]。为获取高精度T_m，国内外学者[3-21]通过分析其与地面温度（T_s）之间的线性关系，构建了诸多模型。上述研究发现，中国西北地区降水稀少、气候干旱，大部分地区冬、夏季温湿度差异较大，夏季降水稀少，自东向西呈递减趋势，现有T_m模型在该地区的适用性较差。鉴于此，本文系统收集了2010—2019年中国西北地区24个探空站的探空数据，分析了T_m与T_s的线性关系，构建了西北地区的T_m模型，以期能更准确、更可靠地反演西北地区的PWV，进而为该地区气象应用提供依据。

1 T_m计算原理

T_m可由无线电探空资料中获得的测站上空的水汽压e（hPa）与大气温度T（K）沿天顶方向的积分得到，即

$$T_m=\frac{\int\frac{e}{T}\mathrm{d}h}{\int\frac{e}{T^2}\mathrm{d}h} \tag{1}$$

常用T_m计算方法包括常数法、近似积分法、数值积分法和经验公式法。其中，数值积分法的精度最高，计算公式为：

$$T_m=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\frac{e_i}{T_i})\Delta h_i}{\sum_{i=1}^{n}(\frac{e_i}{T_i^2})\Delta h_i} \tag{2}$$

$$e_i=rh\times e_s/100 \tag{3}$$

$$e_s=6.112\exp(\frac{17.62t}{243.12+t}) \tag{4}$$

式中，T_i为第i层大气平均温度（K）；Δh_i为第i层大气厚度（m）；e_i为第i层大气平均水汽压（hPa）；e_s为饱和水汽压（hPa）；t为露点温度（℃）；rh为相对湿度。

由于无线探空站分布稀疏，为满足GNSS水汽遥感的需求，需要采用更简洁的方法来获取T_m。Bevis等[3]发现T_m与T_s之间存在很强的线性关系，因此利用美国13个气象探空站约两年的探测资料，建立了T_m-T_s的线性回归公式，精度可达4.74 K。随着GNSS水汽探测研究的不断深入，不少学者认为：T_m与T_s的关系并不是恒定的，而是随着季节和地区不同存在差异。姚宜斌等[4]以纬度差异为划分依据，构建了覆盖全球范围的分区域T_m线性回归模型（以下简称姚宜斌全球模型）。于胜杰等[17]分析了Bevis公式与高度的联系，并对Bevis公式进行了改进，建立了可适用于中国大陆不同地区、不同海拔范围的T_m模型（以下简称于胜杰全国模型），即

$$T_{myu}=\begin{cases}T_{mb}+5.1 & h\leqslant 200\ \mathrm{m}\\ T_{mb}+3.0 & 200\ \mathrm{m}<h\leqslant 500\ \mathrm{m}\\ T_{mb}+2.1 & 500\ \mathrm{m}<h\leqslant 1\,500\ \mathrm{m}\\ T_{mb} & 1\,500\ \mathrm{m}<h\leqslant 3\,000\ \mathrm{m}\\ T_{mb}-6.6 & h>3\,000\ \mathrm{m}\end{cases} \tag{5}$$

式中，T_{mb}为根据Bevis提供的回归公式计算得到的T_m。

龚绍琦[12]利用全国不同气候区、不同季节数据建立了全国模型（以下简称龚绍琦全国模型）。上述4种模型各具特点，但在中国西北区域适用性较差。为进一步提高中国西北地区T_m模型的精度，本文基于西北地区24个探空站数据以及T_m与T_s的线性关系，建立了适用于西北区域的T_m模型，并与上述4种模型进行了精度对比和区域适用性分析。

2 西北地区T_m模型构建

2.1 数据来源

本文从美国怀俄明大学大气科学系官网（https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html）选取并下载2010—2019年中国西北地区24个探空站的数据（图1），并按时间顺序进行整理，剔除部分不完整数据，最终122 100个样本数据参与西北地区T_m模型构建。

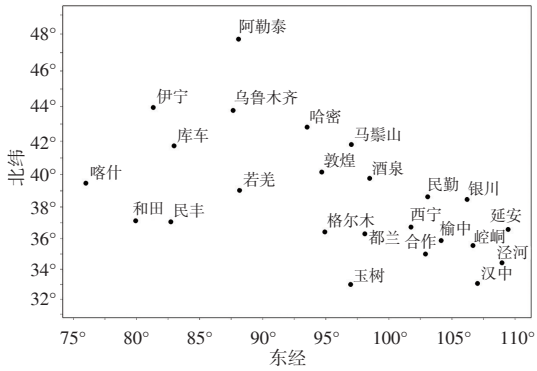


图1 中国西北地区24个探空站分布示意图

2.2 建模方法

首先，根据探空数据，利用大气平均温度、大气厚度、大气平均水汽压计算得到各探空站各采样时刻的T_m值，并根据多项式拟合法剔除相应的异常值。

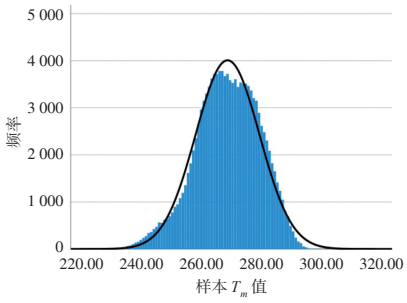
然后，计算T_m与T_s的相关系数R[7]，$R<0.3$，则二者不相关；$0.3\leqslant R<0.7$，则具有较强相关性；

0.7≤ R <1，则具有强相关性。

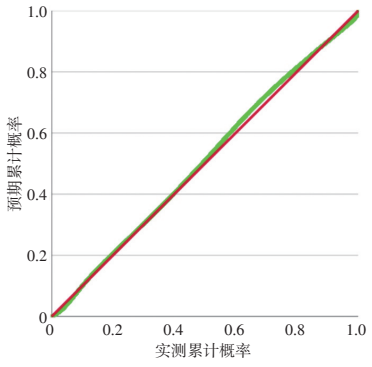
$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{s_i}-\bar{T}_s)(T_{m_i}-\bar{T}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(T_{s_i}-\bar{T}_s)^2\sum_{i=1}^{n}(T_{m_i}-\bar{T}_m)^2}} \tag{6}$$

式中，T_{m_i} 为采样时刻 i 的 T_m 值，单位为K；$\bar{T}_m=(\sum_{i=1}^{n}T_{m_i})/n$；$T_{s_i}$ 为采样时刻 i 的 T_s 值，单位为K；$\bar{T}_s=(\sum_{i=1}^{n}T_{s_i})/n$。

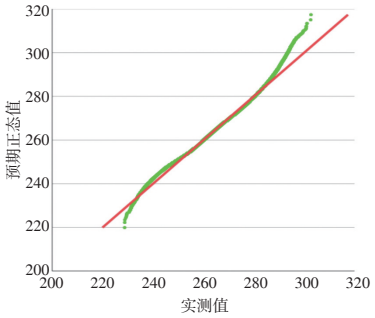
利用SPSS软件对选择的样本进行置信度（α = 0.01）检验，依次进行频数分析、置信度的探索性分析，结果见图2，可以看出，样本数据与趋势线之间偏差较小，具有较好的符合性，说明实验样本数据符合正态分布规律。置信区间计算结果：N 为122 100、平均值为268.669 4、方差为121.989、标准偏差为11.044 88、偏度为–0.292、峰度为–0.155、99% 置信区间上限为268.750 8、99% 置信区间下限为268.588 0。



a 样本频数分析图



b 累计概率分析图



c 样本 T_m 正态P–P图

图2　SPSS软件置信度检验

最后，若 T_m 与 T_s 的相关系数为强相关且通过置信度检验，则可构建 T_m 与 T_s 的线性回归模型，即

$$T_m=a+b\times T_s \tag{7}$$

其误差方程可表示为：

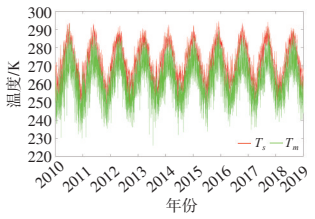
$$V=\begin{bmatrix}1 & T_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\end{bmatrix}-T_m \tag{8}$$

根据最小二乘原理计算得到回归系数：

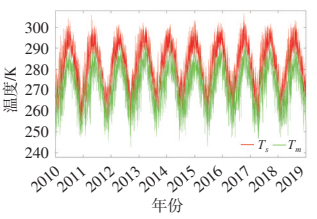
$$a=\bar{T}_m-b\bar{T}_s,\quad b=\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{m_i}-\bar{T}_m)(T_{s_i}-\bar{T}_s)}{\sum_{i=1}^{n}(T_{s_i}-\bar{T}_s)} \tag{9}$$

2.3　模型结果

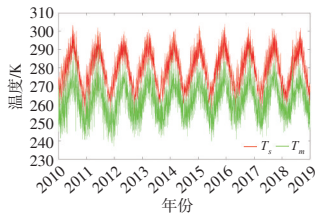
绘制各探空站、各省（自治区）以及中国西北地区2010—2019年 T_m-T_s 时间演变关系图，因图幅限制，仅列举中国西北地区各省（自治区）一个探空站结果（图3）。各探空站、各省（自治区）和中国西北地区的特征为：① T_m 普遍低于 T_s；② T_m 与 T_s 之间的变化趋势、升降幅度基本保持一致。据此可初步推断 T_m 与 T_s 之间存在良好的相关性。绘制 T_m 与 T_s 散



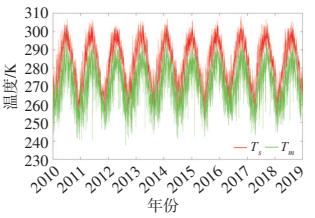
a 甘肃马鬃山 T_m-T_s 时间演变关系



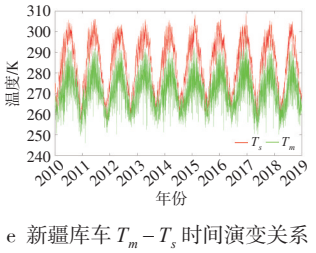
b 陕西延安 T_m-T_s 时间演变关系



c 青海格尔木 T_m-T_s 时间演变关系



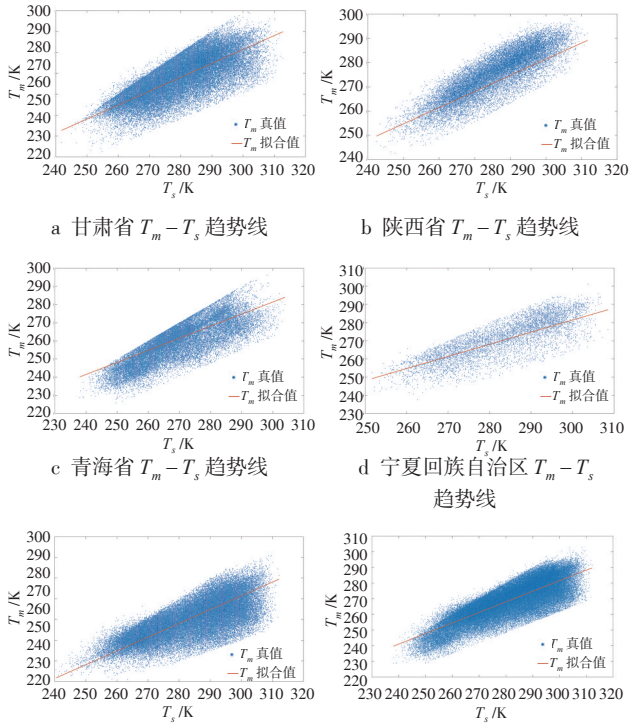
d 宁夏银川 T_m-T_s 时间演变关系



e 新疆库车 T_m-T_s 时间演变关系

图3　2010—2019年 T_m 与 T_s 的时间演变关系

点分布图与趋势线（图4），可以看出，各探空站、各省（自治区）和中国西北地区所有散点均分布在趋势线附近，说明 T_m 与 T_s 之间具有良好的相关性。计算 T_m 与 T_s 的相关系数，对其相关性进行进一步探讨。结果表明，2010—2019年中国西北地区 T_m 与 T_s 的相关系数为0.820 4，且通过 a =0.01的置信度检验，回归系数 a、b 分别为79.140 5、0.674 5，即可构建中国西北地区 T_m 模型。



a 甘肃省 T_m-T_s 趋势线　b 陕西省 T_m-T_s 趋势线

c 青海省 T_m-T_s 趋势线　d 宁夏回族自治区 T_m-T_s 趋势线

e 新疆维吾尔自治区 T_m-T_s 趋势线　f 西北地区 T_m-T_s 趋势线

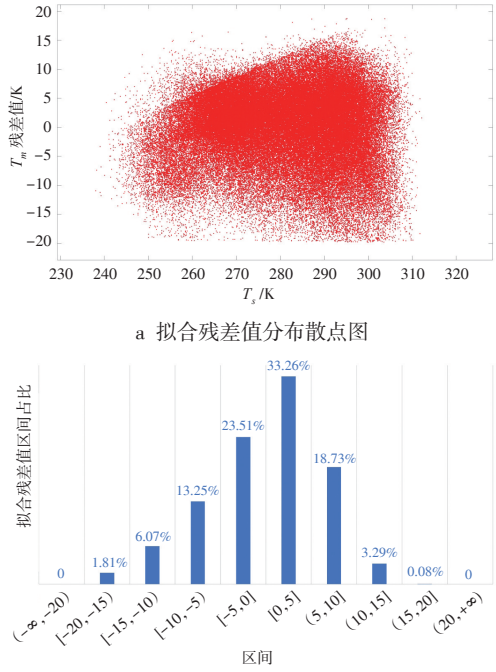
图4　2010—2019年 T_m-T_s 的散点分布图与趋势线

3　模型精度对比与检验

3.1　区域模型精度对比

为了验证所构建的西北地区 T_m 模型的精度，首先以2010—2019年探空站数据计算得到的 T_m 作为真值，与区域模型计算结果进行对比，统计其残差值。由图5可知，残差分布范围分布在−20~20 mm区间，将误差分布划分为[−20,−15)、[−15,−10)、[−10,−5)、[−5,0]、[0,5]、(5,10]、(10,15]、(15,20]8个区间，分别统计各区间残差值分布占比结果，可以看出残差值在[−5,5]区间的占比为56.77%，占比最大，残差值在(15,20]区间的占比为0.08%，占比最小。

结合Bevis等4个适用于西北地区的模型绘制不同模型的残差值正态分布图，结果表明（图6），本文构



a 拟合残差值分布散点图

b 拟合残差值区间占比图

图5　拟合残差值分布图

建的模型相对于纵轴有更好的对称性，且残差值较小部分占比非常大，初步判断本文构建的西北地区 T_m 模型较可靠。为更加直观地验证上述模型的精度差异，选取平均偏差（Bias）、均方根误差（RMS）、平均绝对误差（MAE）、相对标准差（SPE）4个指标进行精度检验，计算在Matlab软件中进行，结果见表1，可以看出，本文模型对应的Bias、RMS、MAE、SPE分别为0、6.315 4、5.052 6、0.023 7；均小于Bevis经验公式、姚宜斌全球模型、于胜杰全国模型和龚绍琦全国模型。

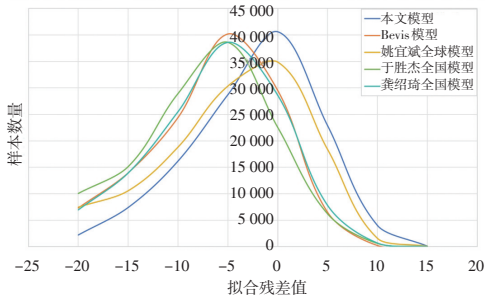


图6　不同模型残差值正态分布图

表1　西北地区 T_m 模型精度检验/mm

模型	Bias	RMS	MAE	SPE
本文模型	0	6.315 4	5.052 6	0.023 7
Bevis经验公式	−3.843 6	7.418 3	5.603 7	0.028 3
姚宜斌全球模型	−2.002 1	7.610 5	5.839 0	0.028 6
于胜杰全国模型	−4.776 4	8.239 5	6.362 1	0.031 2
龚绍琦全国模型	−3.688 9	7.393 3	5.698 9	0.028 4

3.2 区域模型精度检验

为进一步验证本文模型在西北地区的适用性，通过2020年1月的数据集进行验证，并与Bevis等4个模型进行比较，结果见表2，可以看出，本文模型的Bias、RMS、MAE、SPE均小于其他模型，与模型精度对比结果相同。综上所述，本文模型的精度与估算可靠性均有所提升，可应用于西北地区大气PWV反演、极端天气预测等研究中。

表2　西北地区 T_m 模型适用性验证/mm

模型	Bias	RMS	MAE	SPE
本文模型	0.599 7	3.809 8	3.029 3	0.014 8
Bevis经验公式	−2.596 2	4.534 0	3.532 2	0.017 9
姚宜斌全球模型	2.571 6	4.570 7	3.708 4	0.017 5
于胜杰全国模型	−3.600 5	5.154 1	4.243 2	0.020 1
龚绍琦全国模型	−4.237 8	5.749 2	4.613 7	0.022 8

4 结　语

本文主要利用中国西北地区24个探空站2010—2019年探空资料分析了 T_m 与 T_s 之间的线性关系，构建了适合于西北地区的 T_m 模型，并与已有模型进行精度对比，同时采用2020年西北地区1月探空资料对模型的适用性进行了验证。

1）基于中国西北地区24个探空站2010—2019年探空资料，计算得到 T_m 与 T_s 的相关系数为0.820 4，说明二者之间具有强相关性。

2）将本文模型与Bevis经验公式、姚宜斌全球模型、于胜杰全国模型和龚绍琦全国模型进行精度对比，结果表明本文模型的Bias、RMS、MAE、SPE均优于上述4个模型。

3）利用中国西北地区2020年1月24个探空站的探空数据对模型的适用性进行验证。结果表明，本文模型的Bias、RMS、MAE、SPE在5个模型中最小，进一步说明本文模型的精度更高，在中国西北地区的适用性更强。

参考文献

[1] 李国平,黄丁发,郭洁,等. 地基GPS气象学[M]. 北京:科学出版社,2010

[2] 王勇,刘严萍. 地基GPS气象学原理与应用研究[M]. 北京:测绘出版社,2012

[3] Bevis M ,Businger S,Herring A T,et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysica Research: Atmospheres,1992,97(D14):15787-15801

[4] 姚宜斌,张豹,许超钤,等. Tm-Ts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

[5] 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):28-37

[6] 高志钰,李建章,寇瑞雄,等. 甘肃省加权平均温度时空分布特征分析与模型建立[J]. 全球定位系统,2018,43(3):70-76

[7] 孙天红,高志钰,蒋玉祥. 银川地区加权平均温度模型的建立及精度分析[J]. 导航定位学报,2020,8(4):80-84

[8] Li L,Wu S Q,Wang X M,et al. Modeling of Weighted-mean Temperature Using Regional Radiosonde Observations in Hunan China[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences,2018,29(2):187-199

[9] 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

[10] 谢劭峰,靳利洋,王新桥,等. 广西地区大气加权平均温度模型[J]. 科学技术与工程,2017,17(12):133-137

[11] 黎峻宇,刘立龙,蔡成辉,等. 新疆地区地基GPS加权平均温度模型的建立与分析[J]. 桂林理工大学学报,2017,37(1):108-113

[12] 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

[13] 张洛恺,杨力,王艳玲,等. 郑州地区大气加权平均温度模型确定[J]. 测绘科学技术学报,2014,31(6):566-569

[14] 狄利娟,李星光,郑南山. 徐州地区加权平均温度模型研究[J]. 导航定位学报,2015,3(2):81-84

[15] 朱爽. 北京地区地基GPS加权平均温度计算本地化模型研究[J]. 测绘工程,2014,23(4):28-32

[16] 李斐,刘智敏,李洋洋,等. 青岛地区CORS反演水汽中大气加权平均温度模型的建立[J]. 全球定位系统,2018,43(3):88-94

[17] 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] 石灵璠,王萍,黄良珂. 青藏高原地区大气加权平均温度模型的构建[J]. 测绘通报,2021(4):52-59

[19] 郭彬洋,李黎,谢威,等. 长三角地区加权平均温度本地化模型拟合[J]. 导航定位学报,2019,7(2):61-67

[20] 舒志亮,桑建人,刘士军,等. 六盘山地区大气加权平均温度本地化模型研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(3):289-294

[21] 韩永清,宋晓蛟,赵峰. 基于GNSS数据反演云南及周边地区PWV及其精度分析[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(9):89-91