引文格式：邓莹莹,范士杰,陈钰,等. 顾及日变化的山东省大气加权平均温度模型构建[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 47-50. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.12.010

顾及日变化的山东省大气加权平均温度模型构建

邓莹莹[1]，范士杰[1]，陈　钰[2*]，刘兆健[1]，臧建飞[1]
（1. 中国石油大学（华东）海洋与空间信息学院，山东 青岛 266580；
2. 山东省国土测绘院第一测绘院，山东 济南 250102）

摘　要：联合使用无线电探空和数值气象模式数据，构建了顾及日变化特征的山东省大气加权平均温度模型。以ERA5积分 T_m 值为参考，对构建 T_m 模型用于山东省卫星定位连续运行综合应用服务系统（SDCORS）的精度和适用性进行了验证。结果表明：顾及日变化的山东省 T_m 模型基本消除了系统性偏差影响，均方根误差（RMSE）为3.0 K左右，较Bevis模型和Li模型分别提升24%和16%；且该模型具有良好的稳定性，在SDCORS各站点处的RMSE的最大变化为0.3 K，能够满足SDCORS的GNSS水汽反演应用需求。

关键词：大气加权平均温度；无线电探空；ERA5；日变化
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0047-04

Weighted Mean Temperature Model Construction Considering Diurnal Variation in Shandong Province

DENG Yingying[1], FAN Shijie[1], CHEN Yu[2], LIU Zhaojian[1], ZANG Jianfei[1]
(1. School of Ocean and Spatial Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. The First Institute of Surveying and Mapping, Shandong Provincial Institute of Territorial Surveying and Mapping, Jinan 250102, China)

Abstract: In this paper, we used the radiosonde and numerical meteorological model data to construct a weighted mean temperature model for Shandong Province considering diurnal variation. By using the ERA5 integral as a reference, we verified the accuracy and applicability of T_m model for Shandong continuously operating reference stations(SDCORS). The results showthat the influence of systemic bias is basically eliminated in T_m model for Shandong Province with the consideration of diurnal variation, and the root mean square error(RMSE) is about 3.0K, which is improved by 24% and 16% compared with Bevis model and Li model, respectively. Moreover, this model has good stability, and the maximum change of RMSE at SDCORS stations is 0.3K, which can meet the application requirements of GNSS water vapor inversion of SDCORS.

Key words: weighted mean temperature,radiosonde, ERA5, diurnal variation

大气加权平均温度（T_m）是地基GNSS水汽反演的重要参量[1]，大多采用经验模型获取。现有的 T_m 经验模型主要是根据实测地表气象参数与大气加权平均温度的关系而建立的单因子、双因子和多因子模型[2]，其中大多为与地表温度 T_S 有关的线性模型[3-5]，最早由Bevis[6]提出并构建。由于 T_m 具有明显的时空差异，因此区域模型的构建尤为重要。根据各地的实测气象参数可建立区域大气加权平均温度模型，例如李建国[7]建立了适用于中国东部地区和不同月份的 T_m 模型（本文称为Li模型），文献[8]采用分段函数的形式构建了埃及地区的加权平均温度模型。

姚宜斌[9]等通过分析线性模型残差发现其存在季节性信号，钱文进[10]等对Bevis公式在中国区域的精度进行评估发现有明显的季节性变化。张迪[11]等进一步考虑 T_m 残差的季节性与日变化构建了澳洲区域的 T_m 模型，但现有的 T_m 模型的构建对 T_m 日变化的相关研究还比较少。本文利用山东省青岛和章丘2个探空站观测资料以及欧洲中尺度天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的1 h分辨率ERA5产品，联合构建顾及日变化的

收稿日期：2022-06-17。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR2019MD005）。
第一作者简介：邓莹莹（2000—），硕士研究生，研究方向为海洋GNSS水汽反演，E-mail：15136370723@163.com。
通信作者：陈钰（1975—），高级工程师，研究方向为基准站维护和应用，E-mail：ziyuchen999@sina.com。

山东省大气加权平均温度模型，并结合山东省卫星定位连续运行综合应用服务系统（shan dong continuously operating reference stations，SDCORS）站点分布与探空数据，对 T_m 模型的精度和适用性进行评价。

1 数据源与 T_m 值计算

1.1 无线电探空数据

无线电探空数据集（integrated global radiosonde archive，IGRA）包含全球2 700多个探空仪和探空气球的观测数据，最早的数据记录可追溯到1905年，当前大约有1 000个站点在记录并上传数据。本文选用美国国家海洋和大气管理局提供的1980—2018年青岛站探空数据和2004—2018年（该站数据记录始于2004年）章丘站探空数据（https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive），时间分辨率为12 h，垂直分辨率随站点和时间而变化。

采用数值积分法，将探空站点上空水汽压和绝对温度沿天顶方向进行积分获取 T_m 时间序列[12]，其中，绝对温度为源文件中记录参量，水汽压可利用饱和水汽压和露点温度计算得到[13]。

1.2 ERA5数据

ERA5数据是ECMWF提供的最新一代气象再分析产品，以格网形式提供位势、温度、比湿等16个气象参数，可通过哥白尼气候变化服务网站（https://cds.climate.copernicus.eu）获取，其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$，垂直分辨率为37个气压层，时间分辨率由ERA-interim产品的6 h提高至当前的1 h，为 T_m 日变化的研究奠定基础。

本文选用青岛和章丘探空站所在格网2015—2019年以及SDCORS站所在格网2019年的ERA5数据进行试验，若分层格网最底层高度低于站点高度，则采用数值积分法由站点高度至顶层对温度和湿度廓线进行积分获取格网点 T_m 时间序列；若格网最底层高度高于站点高度，则由最底层至顶层进行积分，然后以 T_m=-6.5 K/km外推至站点高度处，最后采用双线性插值法将每个格网4个格网点的 T_m 时间序列插值到待求站点[14]。

2 顾及日变化特征的山东省 T_m 模型构建

文献[2]分析了 $T_m - T_s$ 线性模型的残差，发现其存在明显的年周期和半年周期变化，可在模型中加入周期性误差改正以消除其影响。因此，本文采用该方法构建山东省大气加权平均温度模型，简记为 $T_m - A$，模型表达式为：

$$T_m - A{:}T_m = a_1 + a_2 T_s + a_3 \cos(2\pi \cdot d/365.25) + a_4 \sin(2\pi \cdot d/365.25) + a_5 \cos(4\pi \cdot d/365.25) + a_6 \sin(4\pi \cdot d/365.25) \quad (1)$$

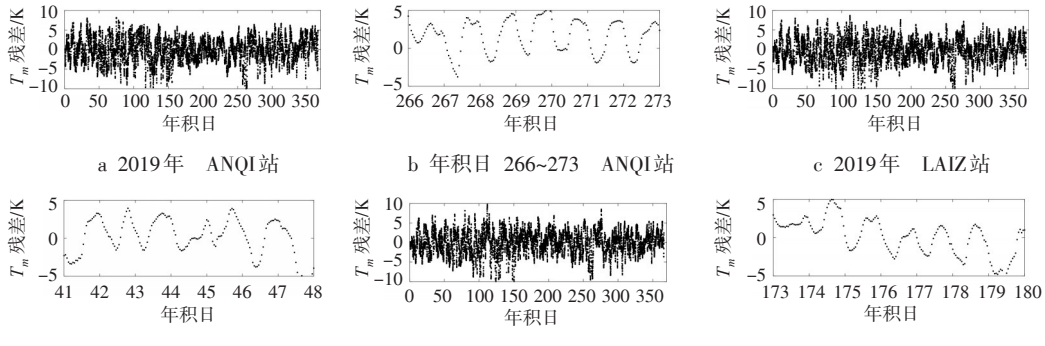
式中，T_s 为地表温度；d 为年积日。

利用青岛和章丘2个探空站2004—2018年探空数据，采用最小二乘法进行拟合，建立山东省需要地表气象参数模型，模型系数如表1所示。

表1 $T_m - A$ 模型拟合系数

模型系数	数值
a_1	70.487 2
a_2	0.717 7
a_3	-2.541 0
a_4	-1.203 5
a_5	-0.254 3
a_6	-0.367 1

由于地表气象参数 T_s 本身具有日变化的性质，T_m 模型是否需要考虑日变化影响应做进一步分析。因此，选取SDCORS站点ANQI站、LAIZ站及WEIH站，以各站点2019年ERA5数据积分 T_m 值为参考，分析 T_m 模型的残差序列，如图1所示。



a 2019年 ANQI站　b 年积日 266~273 ANQI站　c 2019年 LAIZ站

d 年积日 41~48 LAIZ站　e 2019年 WEIH站　f 年积日 173~180 WEIH站

图1 SDCORS站点2019年及其1周的 T_m 残差时间序列

从图1可以发现，T_m-A模型在各个站点的T_m残差均有明显的日周期变化特征，说明加权平均温度与地表温度在1 d中并不是严格的线性关系，需要在原模型T_m-A中加入日周期误差改正以消除其残余影响。改正后模型记为T_m-B，模型表达式为：

$$T_m-B:T_m^{'}=T_m-A+\Delta T_m$$

$$\Delta T_m=a_7\cos(2\pi\cdot \mathrm{h}/24)+a_8\sin(2\pi\cdot \mathrm{h}/24) \quad (2)$$

由于探空数据时间分辨率为12 h，不能满足拟合T_m日变化修正的要求，因此，采用2个探空站处2015—2018年1 h分辨率的ERA5数据进行T_m日变化改正系数的拟合，拟合系数见表2。

表2　T_m-B模型日变化改正系数拟合结果

模型系数	数值
a_7	0.291 0
a_8	−0.808 1

3　山东省T_m模型的精度与适用性评价

利用青岛和章丘2个探空站并结合SDCORS站点分布，开展山东省T_m模型的精度和适用性评价。无线电探空站以及均匀选取的8个SDCORS站点如图2所示。以2019年数据为例，分别以探空站观测数据和SDCORS站点ERA5积分T_m值为参考，对山东省T_m模型进行精度验证。

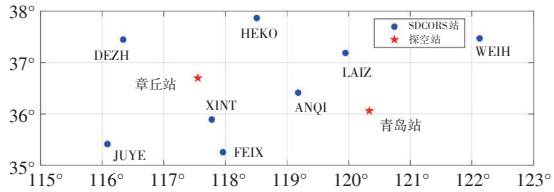


图2　无线电探空站和8个SDCORS站点分布

以青岛和章丘2个探空站2019年的观测数据为参考，将本文构建的2个模型T_m-A、T_m-B与常用Bevis模型（T_m=0.72 T_s+70.2）、Li模型（T_m=0.81 T_s+44.05）进行对比，4种T_m模型的误差统计如表3所示，其中Bias为平均偏差，RMSE为均方根误差。由表3可知，本文构建的2个T_m模型的平均偏差更小、精度更高，其平均RMSE约为3.1 K，较Bevis模型和Li模型精度分别提升约16%和7%。

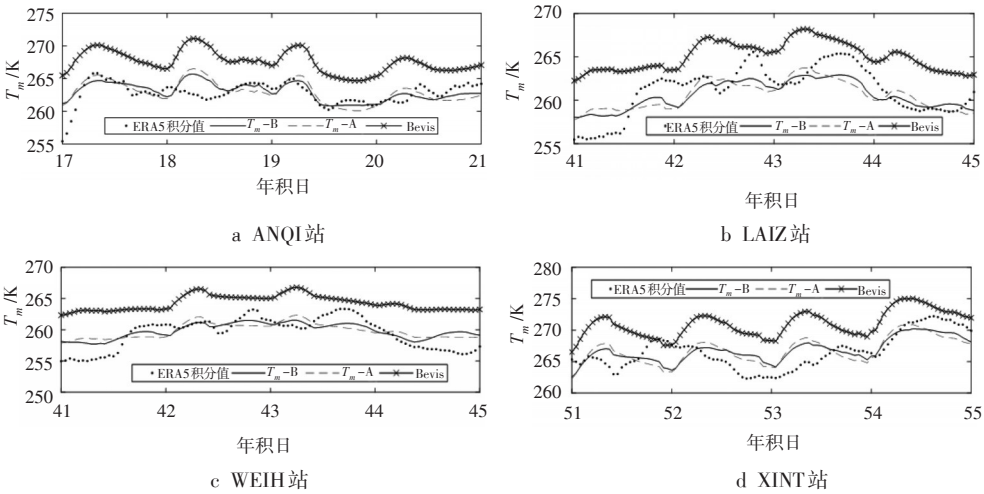
表3　4种T_m模型相对于探空数据的精度对比/K

站点	Bevis		Li		T_m-A		T_m-B	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
章丘站	−1.17	3.52	−0.8	3.16	−0.63	3.00	−0.64	2.97
青岛站	−0.53	3.82	−0.18	3.47	−0.17	3.25	−0.17	3.23
Mean	−0.9	3.7	−0.5	3.3	−0.4	3.1	−0.4	3.1

以SDCORS站点2019年ERA5积分T_m值为参考，4种T_m模型的误差统计如表4所示。从表4中可以看出，T_m-A和T_m-B模型在SDCORS各站点的平均偏差均较小，基本消除了系统性误差影响，而其他2种模型则存在1~2 K的系统偏差；T_m-B模型的均方根误差较T_m-A模型略有减小，T_m模型的日变化改正效果得以体现；通过图3中T_m-A、T_m-B、Bevis 3种模型的计算值以及ERA5积分T_m值的对比，可以更加清楚地发现加入日变化改正的T_m-B模型比T_m-A模型更接近参考值，两者都明显优于Bevis模型；顾及日变化改正的T_m-B模型的均方根误差为3.0 K左右，较Bevis模型和Li模型精度分别提升约24%和16%；T_m-B模型在SDCORS各站点均方根误差的最大变化为0.3 K，验证了该模型用于SDCORS的稳定性。

表4　4种T_m模型相对于ERA5数据的精度对比/K

站点	Bevis		Li		T_m-A		T_m-B	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
ANQI	−1.54	3.85	−1.32	3.52	−0.12	3.13	−0.12	2.98
DEZH	−2.06	4.29	−1.89	3.95	−0.64	3.29	−0.63	3.16
FEIX	−1.16	3.59	−0.98	3.30	0.26	3.09	0.26	2.95
HEKO	−1.94	4.22	−1.66	3.71	−0.52	3.10	−0.52	3.05
JUYE	−1.66	3.90	−1.57	3.70	−0.24	3.28	−0.24	3.12
LAIZ	−1.68	4.02	−1.40	3.63	−0.26	3.14	−0.26	3.03
WEIH	−1.49	3.94	−1.13	3.47	−0.07	3.02	−0.07	2.95
XINT	−1.55	3.67	−1.39	3.34	−0.13	2.94	−0.12	2.83
Mean	−1.6	3.9	−1.4	3.6	−0.2	3.1	−0.2	3.0



a ANQI站 b LAIZ站

c WEIH站 d XINT站

图3 SDCORS站点3种 T_m 模型计算值与ERA5参考值的对比

4 结 语

本文联合使用无线电探空和ERA5两种数据源，利用ERA5数据的高时间分辨率（1 h）特点，建立了山东省顾及日变化改正的大气加权平均温度模型，并利用青岛和章丘探空站以及部分SDCORS站点，对上述 T_m 模型的精度和适用性进行了评价。结果表明本文构建的顾及日变化的 T_m 模型基本消除了系统性偏差影响，与ERA5积分 T_m 值更为符合，其平均RMSE约为3.0 K，较Bevis模型和Li模型精度分别提升了24%和16%；且该模型在SDCORS各站点处的RMSE的最大变化为0.3 K，表明该模型具有良好的稳定性，能够满足SDCORS的GNSS水汽反演应用需求；本文方法可为其他地区 T_m 模型的构建及GNSS水汽反演提供参考。

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, 1994, 33(3):379-386

[2] 臧建飞,彭秀英,胡卓,等. 顾及周期性误差修正的加权平均温度模型构建[J]. 测绘科学,2019,44(8):149-153

[3] 刘焱雄,陈永奇,刘经南. 利用地面气象观测资料确定对流层加权平均温度[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000(5):400-404

[4] Lan Z, Zhang B, Geng Y. Establishment and Nalysis of Global Gridded Tm-Ts Relationship Model[J]. Geodesy and Geodynamics, 2016, 7(2):101-107

[5] 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

[6] Bevis M, Businger S, Herringt 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(14):15 787-15 801

[7] 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(3):28-37

[8] Elhaty N M, Abdelfatah M A, Mousa A E, et al. GNSS Meteorology in Egypt: Modeling Weighted Mean Temperature from Radiosonde Data[J]. Alexandria Engineering Journal, 2019, 58(2):443-450

[9] Yao Y, Bao Z, Xu C, 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

[10] 钱文进,张琳,刘洪波,等. 大气加权平均温度模型在中国区域的精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(7):36-38

[11] 张迪,袁林果,黄良珂,等. 澳大利亚区域大气加权平均温度建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(7):1 146-1 153

[12] 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 Radio Science, 1985, 20(6):1 593-1 607

[13] 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

[14] Wang J , Zhang L , Dai A . Global Estimates of Water-vapor-weighted Mean Temperature of the Atmosphere for GPS Applications[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(21):D21101