Advances in Applied Mathematics 应用数学进展, 2022, 11(1), 1-8
Published Online January 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/aam
https://doi.org/10.12677/aam.2022.111001

Hans汉斯

贵州局地T_m模型的建立及时空变化特征分析

苏　雷，张显云*，袁　炜

贵州大学矿业学院，贵州　贵阳

收稿日期：2021年12月4日；录用日期：2021年12月25日；发布日期：2022年1月7日

摘　要

加权平均温度(T_m)作为GNSS反演大气可降水量(PWV)的关键参量，具有较强的区域差异性和时域周期性。针对贵州地形起伏大和气候多变的特点，为提升贵州地区GNSS PWV的探测精度，本文基于欧洲中期天气预报中心发布的ERA5气象数据集，在揭示贵州局域T_m时域周期性的基础上，构建了一种适宜于贵州的高时空分辨率局域T_m格网模型(GZTm)，并基于无线电探空站气象资料计算的T_m，对GZTm的精度进行了评价。结果表明：相比于Bevis模型和GPT2w模型，GZTm在贵阳站的精度分别提高了24.8%和1.0%，在威宁站则分别提高了10.4%和8.1%。此外，基于选定的15个ERA5格网点，本文还对贵州T_m的时空变化特征进行了初步分析，结果显示贵州T_m的季节差异明显，且与站点高程间密切相关，呈现出较强的区域差异性。

关键词

贵州，加权平均温度，ERA5，精度，时空变化

Establishment of the Local T_m Model in Guizhou and Its Spatio-Temporal Variation

Lei Su, Xianyun Zhang*, Wei Yuan

College of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Dec. 4th, 2021; accepted: Dec. 25th, 2021; published: Jan. 7th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 苏雷, 张显云, 袁炜. 贵州局地 T_m 模型的建立及时空变化特征分析[J]. 应用数学进展, 2022, 11(1): 1-8.
DOI: 10.12677/aam.2022.111001

Abstract

As a key parameter for GNSS inversion of precipitable water vapour (PWV), the weighted mean temperature (T_m) has strong regional differences and time-domain periodicity. In view of the characteristics of large topographic fluctuation and changeable climate in Guizhou, and in order to improve the precision of GNSS PWV within the Guizhou province, based on the ERA5 meteorological data set released by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, a high spatio-temporal resolution T_m grid model (GZTm) suitable for Guizhou province was established on the basis of the revealing of the time domain periodicity for Guizhou T_m. Also, the precision of GZTm was evaluated by the T_m computed by the radiosonde dataset. Compared with the Bevis model and the GPT2w model, the results show that the precision of GZTm at Guiyang Station was increased by 24.8% and 1%, and 10.4% and 8.1% for Weining station, respectively. In addition, based on the selected 15 ERA5 grid points, this paper also conducts a preliminary analysis of the temporal and spatial characteristics of Guizhou T_m. The results show that Guizhou T_m owns obvious seasonal differences and is closely related to site elevation, showing strong regional differences.

Keywords

Guizhou, Weighted Average Temperature, ERA5, Precision, Spatio-Temporal Variation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 前言

基于地基 GNSS 技术的可降水量(precipitable water vapor, PWV)探测，由于具备连续性、全天候、低成本及高精度等优势，已发展成为传统 PWV 观测手段的强有力补充[1]。加权平均温度(T_m)作为 GNSS 技术探测 PWV 的关键参量，其精度将直接影响 PWV 反演的准确性[2]。然而，加权平均温度与季节、测站位置(主要是纬度)及高程密切相关[3] [4]，导致基于局域气象资料建立的 T_m 模型用于其它区域时势必引入较大的误差。为此，学者们分别基于本地化气象资料建立了大量的局域 T_m 模型[5] [6] [7] [8] [9]。

贵州地貌属于中国西南部高原山地，受大气环流及地形等的影响，省内气候多样性明显，素有“一山分四季，十里不同天”之说。高时空分辨率贵州局地 T_m 模型的建立，对于采用地基 GNSS 技术精确获取贵州山地气候条件下的 PWV 具有重要意义。为此，本文基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)提供的高时空分辨率 ERA5 数据集，构建了贵州局地格网 T_m 模型，并对模型的精度及时空变化特征进行了评价与分析。

2. 数据源及研究区

2.1. ERA5 大气再分析产品

ERA5 是 ECMWF 提供的第五代大气再分析产品，具有高空间分辨率(31 km × 31 km，亦即 0.25˚ × 0.25˚)和高时间分辨率(1 h) [10]。为采用数值积分法[11]计算贵州省境内各格网点的 T_m，本文使用了 2011~2018 年共 8 年的 ERA5 37 个压力层的逐小时温度、相对湿度、大气压及位势数据

(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset)。其中，相对湿度和大气压用于计算水汽压；位势用于计算测站点的位势高。

2.2. 无线电探空站数据

贵州省内仅有两个无线电探空站(radiosonde station, RS)，分别为贵阳(Guiyang) (26.48˚N, 106.65˚E)和威宁(Weining) (26.86˚N, 104.26˚E)。试验所用 RS 数据源于怀俄明大学 (https://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html)发布的 2019 年整年 Guiyang 和 Weining 的气象资料，用以计算各自的加权平均温度，并据此评价基于 ERA5 气象资料所建 T_m 模型的精度。

2.3. 研究区

以 ECMWF ERA5 大气再分析产品所覆盖的整个贵州省作为研究区域，区域范围为北纬 24˚37'~29˚13'，东经 103˚36'~109˚35'，其中选取了 15 个 ERA5 格网点和 2 个 RS 站(同时也为 ERA5 格网点)。格网点和 RS 站的空间分布如图 1 所示。

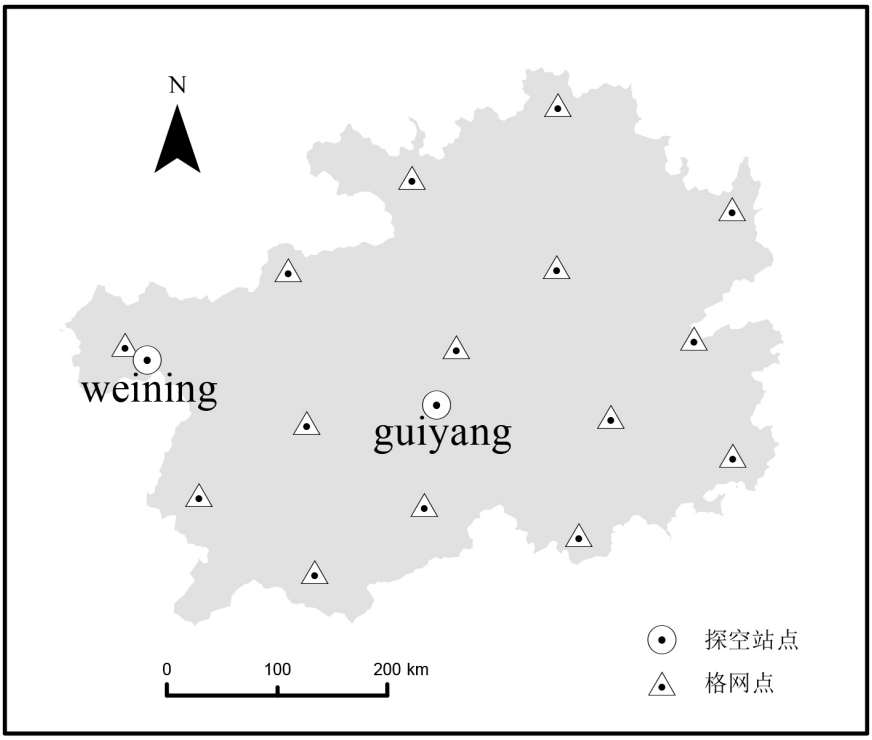

Figure 1. The distribution of grid points and radiosonde stations selected in the study area
图 1. 研究区内选取的格网点及无线电探空站分布

3. 加权平均温度模型的建立

ERA5 和 RS 的气象数据分别按位势和位势高对不同等压面进行记录，为实现二者积分高度的统一，首先需将 ERA5 的位势转换为位势高，然后基于 ERA5 气象数据采用数值积分法计算各格网点的逐小时 T_m。大量研究表明，T_m 具有时域周期特性[12] [13] [14]。为确定 T_m 各时间尺度上的周期，将 RS Guiyang 站处 ERA5 格网点 2011~2018 年的逐小时 T_m 分别按月和各年对应时刻取平均，得图 2 所示的 T_m 时间序列。

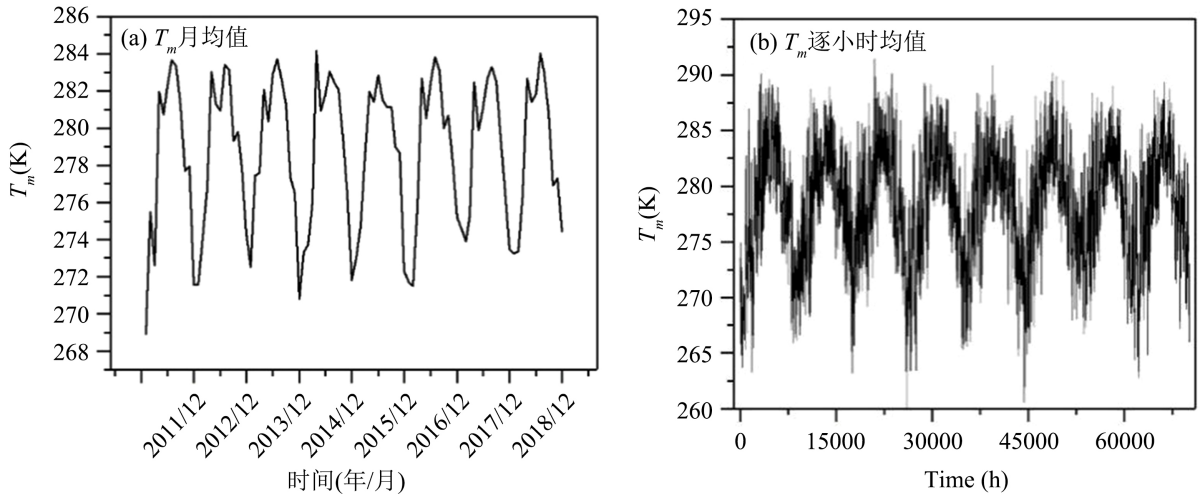

Figure 2. T_m time series of ERA5 grid points from 2011 to 2018
图 2. 2011~2018 年 ERA5 格网点 T_m 时间序列

由图 2 可看出，T_m 时间序列均具有明显的周期特性。为确定贵州本地化 T_m 的频率特征，本文采用 Lomb-Scargle 对 T_m 时间序列进行周期诊断，得图 3(a)、图 3(b)所示 T_m 的日周期和年周期特性。

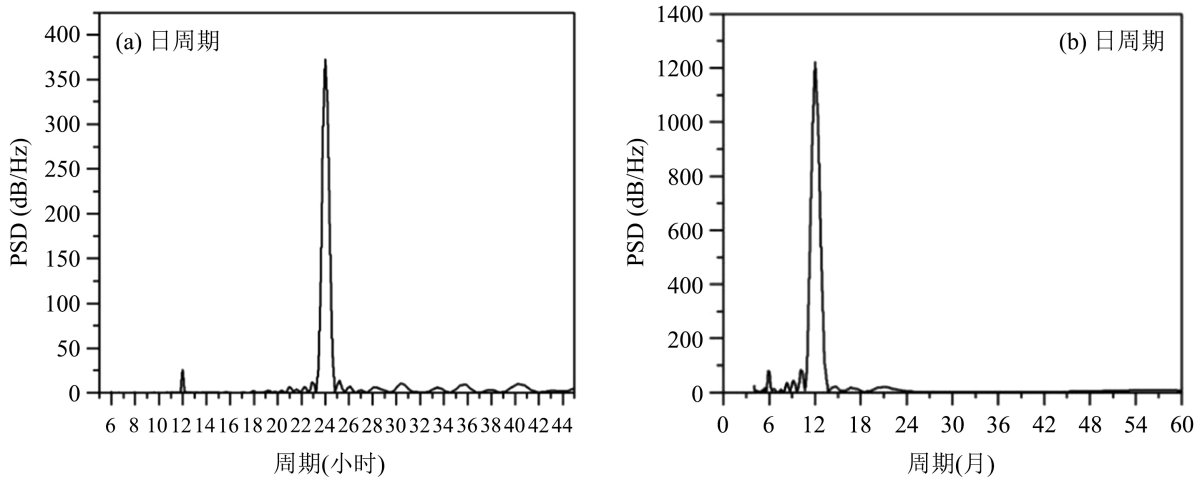

Figure 3. Periodic characteristics of grid point T_m
图 3. 格网点 T_m 的周期特性

由图 3 可知，PSD (Power Spectral Density)表现出 12 h、24 h、0.5 a 和 1 a 的周期特性，且日周期比半日周期、年周期比半年周期更为明显；此外，图 3(b)中的 PSD 明显大于图 3(a)中的 PSD，说明 T_m 的年际变化较日间变化更为显著。因此，顾及 T_m 的周期特性，采用(1)式刻画贵州本地化 T_m 的变化趋势。

$$\begin{aligned} T_m = {} & A_0 + A_1\cos\left(\frac{doy}{365.25}2\pi\right) + A_2\sin\left(\frac{doy}{365.25}2\pi\right) + B_1\cos\left(\frac{doy}{365.25}4\pi\right) + B_2\cos\left(\frac{doy}{365.25}4\pi\right) \\ & + C_1\cos\left(\frac{hod}{24}2\pi\right) + C_2\sin\left(\frac{hod}{24}2\pi\right) + D_1\cos\left(\frac{hod}{24}4\pi\right) + D_1\sin\left(\frac{hod}{24}4\pi\right) \end{aligned} \tag{1}$$

(1)式中，*hod* (hour of day)表示一天中的时间(小时)；*doy* (day of year)表示年积日；A_0、A_1、A_2、B_1、

B_2、C_1、C_2、D_1 及 D_2 为模型待求系数。

以 *hod*、*doy* 和基于 2011~2018 ERA5 气象资料求得的逐小时 T_m 为已知值，以 3 倍中误差为极限误差，在剔除 T_m 异常值的情况下，采用最小二乘平差即可求得(1)式中的模型系数，从而构建起贵州本地化的高时空分辨率格网加权平均温度模型(以下简称为 GZTm)。

4. GZTm 模型精度评价

RS 提供的大气剖面资料均为实测值，具有较高的精度和可靠性。由于探空站中的 Guiyang 站和 Weining 站同时为 ERA5 格网点，本文视贵州省境内两个仅有的 RS 站 2019 年全年气象资料所求得的 T_m 为参考值，以平均偏差(Bias)和均方根误差(RMSE)作为精度指标，对 GZTm 模型的精度进行评价。

$$\left.\begin{aligned}\text{Bias} &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - X_{ref}\right)\\ \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - X_{ref}\right)^2}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

(2)式中，n 为 T_m 个数，由于 RS 每天观测 2 次，故此处 $n = 730$；X_i 为模型计算所得 T_m 值；X_{ref} 为 T_m 参考值。

以 hod 及 doy；测站温度(由探空站气象元素得到)；测站位置及时间分别作为 GZTm 模型、Bevis 公式[11]和 GPT2w 模型[13]的输入参量，得表 1 所示的精度统计信息。

由表 1 知，GZTm 模型在各个精度指标上较其它两个模型皆有一定程度的改善。相较于 Bevis 公式，Guiyang 站和 Weining 站 GZTm 模型的 Bias 分别减少了 1.489 K 和 0.176 K；而对于 GPT2w 模型，则分别减少了 0.107 K 和 1.468 K。此外，无论是 Guiyang 站还是 Weining 站，GZTm 模型均获得了更小的 RMSE，说明 GZTm 模型具有更高的可靠性和稳定性。相较于 Guiyang 站(海拔为 1222 m)，基于 GPT2w 所得 Weining (海拔为 2236 m)站的 T_m 具有较大的 Bias 和 RMSE，这可能与 Weining 站海拔相对较高，而 GPT2w 却忽略了 T_m 的垂向改正有关。

Table 1. Accuracy evaluation of GZTm model
表 1. GZTm 模型精度评价

测站	精度评价指标	GZTm/K	Bevis/K	GPT2w/K
Guiyang	Bias	0.408	−1.897	−0.515
	RMSE	3.679	4.593	3.708
Weining	Bias	1.150	1.326	2.618
	RMSE	5.478	6.112	5.959

由 Bias 绝对值的区间统计图(图 4)可知，无论是 Guiyang 站还是 Weining 站，GZTm 模型和 GPT2w 模型的 Bias 绝对值位于 0~4 K 间的个数相当，Bevis 公式则相对较少；位于 4~8 K 间的个数由多到少分别为 Bevis 公式、GZTm 模型和 GPT2w 模型；Bias 绝对值大于 12 K 的个数以 GZTm 模型为最少；随着海拔的增加，GPT2w 模型 Bias 绝对值大于 12 K 的个数较 Bevis 公式有所增加。

因此，综合 Bias、RMSE 及 Bias 绝对值区间统计可知，三个模型的整体性能按高到低顺序排列分别为 GZTm、GPT2w 及 Bevis 公式。

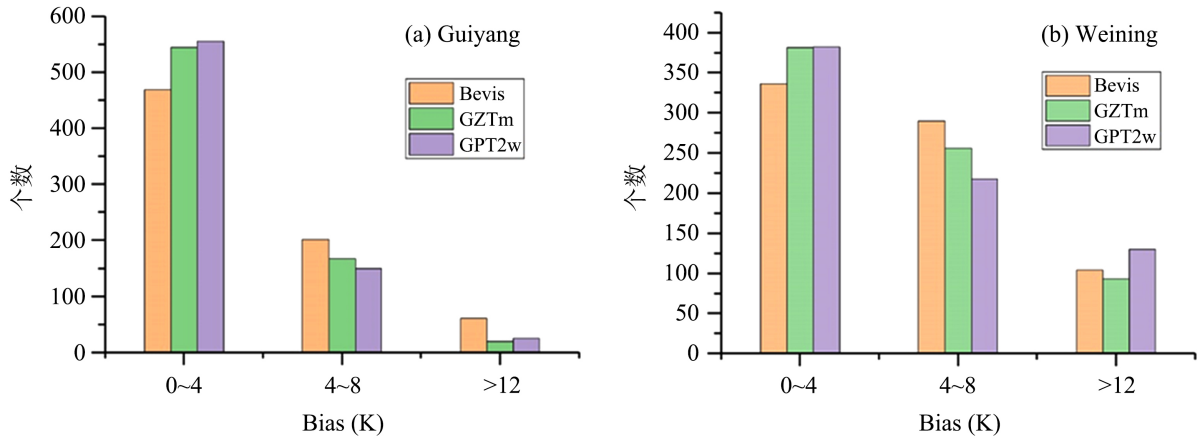

Figure 4. Average deviation statistics
图 4. 平均偏差统计

5. 贵州 T_m 时空变化特征分析

为分析贵州 T_m 的时空变化特征，对 15 个格网点 2019 年的逐小时 T_m 按春、夏、秋、冬分别求取均值，得图 6 所示的 T_m 时空分布图。图 6 中高程源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)提供的 30 m × 30 m 分辨率 DEM 数据。

由图 6 可看出，受贵州地形起伏大的影响，四个季节贵州 T_m 均呈现出明显的地域差异性，总体表现为贵州东部和南部区域高，而西部和北部区域低。春季、夏季、秋季、东季 T_m 的最大均值与最小均值间的差值分别为 13.62 K、14.33 K、12.36 K 和 12.86 K。为更好地分析贵州 T_m 随高程和季节的变化，绘制图 5 所示的折线图。

由图 6 可看出，15 个格网点各季节 T_m 均值序列与格网点高程密切相关，随高程的增加总体呈下降趋势。春季、夏季、秋季 T_m 均值序列与高程间的相关系数分别为−0.82、−0.95 和−0.84，统计学上表现为极强相关，而冬季 T_m 均值序列与高程间表现为中等程度相关，相关系数为−0.46。此外，各格网点 T_m 均值季节上也表现出明显的差异性，T_m 均值由高到低排列分别为夏季、春季、秋季和冬季。

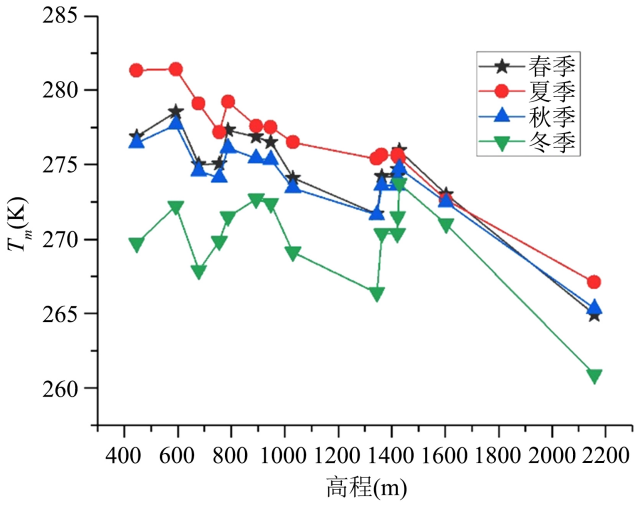

Figure 5. The relationship between T_m and elevation
图 5. T_m 与高程间的关系

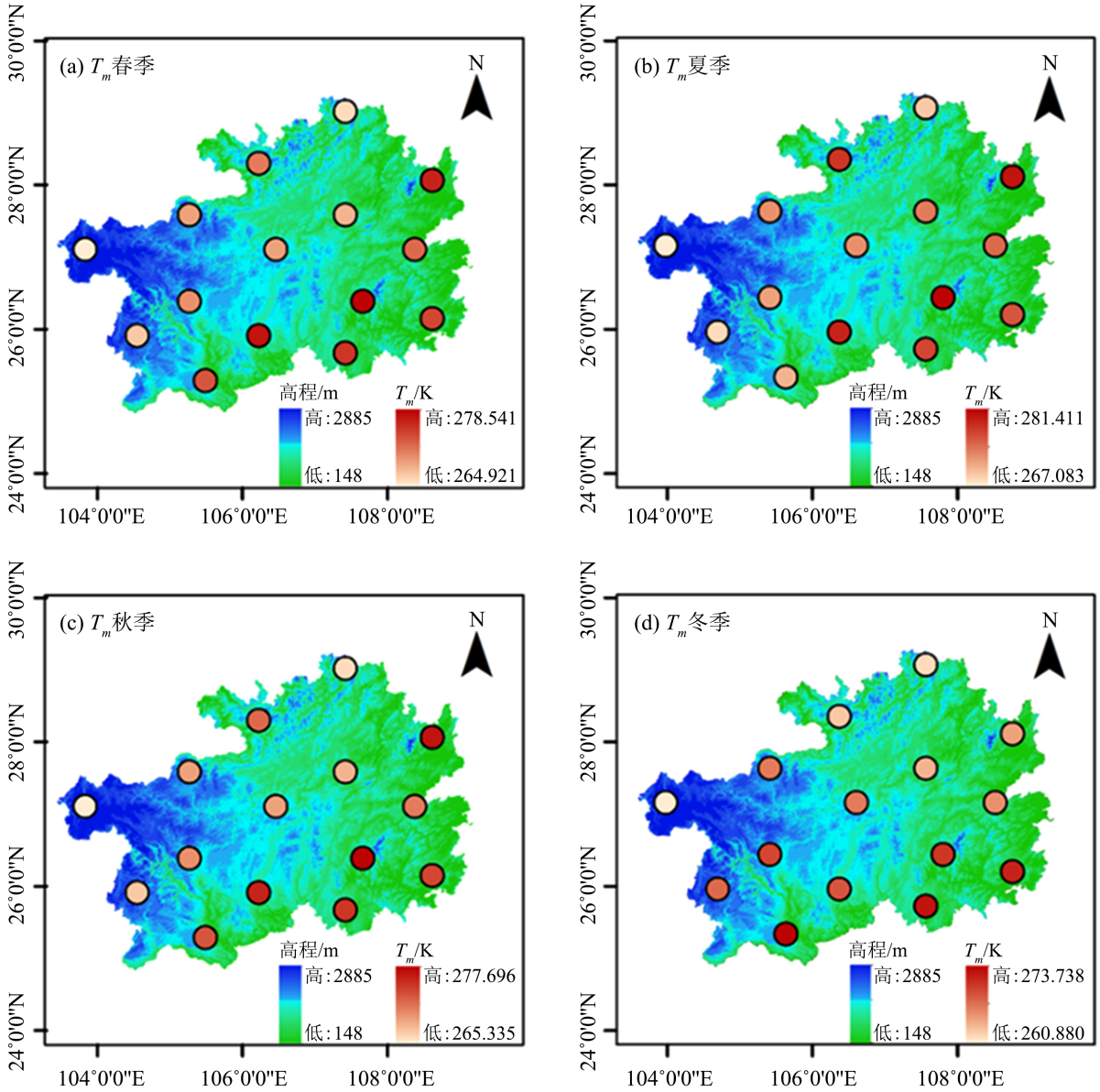

Figure 6. Temporal and spatial changes of T_m in Guizhou
图 6. 贵州 T_m 时空变化

6. 结语

针对贵州地形起伏大、区域气候差异明显的特征，本文基于 2011 年~2018 年共 8 年的高时空分辨率 ERA5 气象资料，在顾及 T_m 周期特性的基础上，建立了一种贵州本地化加权平均温度格网模型(GZTm)。通过对 GZTm 的精度评价和贵州 T_m 的时空变化特征分析，得出以下结论：1) 基于 ERA5 本地化气象资料所构建的 GZTm 模型，精度较 Bevis 公式和 GPTm 模型均得到了不同程度的改善，且 GZTm 具有更高的可靠性和稳定性；2) 贵州 T_m 季节差异性明显，15 个格网点夏季与冬季 T_m 的最大差值和最小差值分别为 11.60 K 和 1.61 K；3) 受贵州地形起伏大和区域性气候的影响，贵州 T_m 呈现出较强的区域差异性，四个季节不同格网点处 T_m 的最大差值均达到了 12 K 以上；4) 不同季节 T_m 与高程间的相关程度存在差异，相关系数由大到小排列依次为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。

基金项目

国家自然科学基金项目(41901225、52064005)；贵州大学测绘科学与技术研究生创新实践基地建设项目(贵大研 CXJD [2014] 002)。

参考文献

[1] 李宏达，张显云，王晓红，等. 贵州局地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.

[2] Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., *et al.* (1992) GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **97**, 15787-15801. https://doi.org/10.1029/92JD01517

[3] 龚绍琦. 中国区域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.

[4] Chen, P., Yao, W. and Zhu, X. (2014) Realization of Global Empirical Model for Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water Using NCEP Re-Analysis Data. *Geophysical Journal International*, **198**, 1748-1757. https://doi.org/10.1093/gji/ggu223

[5] 罗桢，吴良才. 南昌地区地基 GPS 水汽反演中区域加权平均温度模型[J]. 南昌大学学报(理科版)，2016，40(3): 264-268.

[6] 谢劭峰，黎峻宇，刘立龙，等. 新疆地区 GGOS Atmosphere 加权平均温度的精化[J]. 大地测量与地球动力学，2017, 37(5): 472-477.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Xia, P., Ye, S., Chen, B., *et al.* (2019) Improving the Weighted Mean Temperature Model: A Case Study Using Nine Year (2007-2015 Radiosonde and COSMIC Data in Hong Kong. *Meteorological Applications*, **27**, 1-13. https://doi.org/10.1002/met.1864

[10] Albergel, C., Dutra, E., Munier, S., *et al.* (2018) ERA-5 and ERA-Interim Driven ISBA Land Surface Model Simulations: Which One Performs Better?. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 3515-3532. https://doi.org/10.5194/hess-22-3515-2018

[11] Bevis, M., Businger, S. and Chiswell, S. (1994) GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 379-386. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2

[12] Yao, Y., Xu, C., Zhang, B., *et al.* (2014) GTm-III: A New Global Empirical Model for Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water Vapour. *Geophysical Journal International*, **197**, 202-212. https://doi.org/10.1093/gji/ggu008

[13] Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., *et al.* (2015) Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, **19**, 433-441. https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7

[14] Chen, P. and Yao, W. (2015) GTm_X: A New Version Global Weighted Mean Temperature Model. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, **341**, 605-611. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46635-3_51