

引文格式:黄良珂,李琛,谢劭峰,等.顾及垂直递减率的中国区域 T_m 格点产品空间插值[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(2):295-300.DOI:10.13203/j.whugis20200304



Citation: HUANG Liangke, LI Chen, XIE Shaofeng, et al. Spatial Interpolation of Atmospheric Weighted Mean Temperature Grid Products in China with Consideration of Vertical Lapse Rate[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(2):295-300. DOI:10.13203/j.whugis20200304

顾及垂直递减率的中国区域 T_m 格点产品空间插值

黄良珂^{1,2} 李琛¹ 谢劭峰^{1,2} 刘立龙^{1,2} 陈军³ 黎峻宇^{1,2,3}

1 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541006

2 广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林,541006

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:大气加权平均温度(T_m)是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)反演大气水汽(precipitation water vapor, PWV)的关键参数。当前已有 T_m 模型提供的 T_m 信息难以捕获其日周期变化,因此限制了其在高时间分辨率GNSS PWV估计中的精度。大气再分析资料可提供高时空分辨率的 T_m 格点产品,但是在使用时需要对其进行空间插值,且 T_m 在高程上的变化远大于其在水平方向上变化。同时,针对中国区域地形起伏大等特点,提出顾及垂直递减率的中国区域 T_m 格点产品空间插值方法,以分布于中国区域的2015年89个探空站资料为参考值,验证了提出的方法在全球大地测量观测系统大气中心 T_m 格点产品和美国国家航空和太空管理局提供的MERRA-2的 T_m 格点产品中的空间插值精度。结果表明:(1)在顾及垂直递减率的 T_m 格点产品空间插值中,反距离加权法的插值效果优于双线性插值法,其在中国区域全球大地测量观测系统大气中心和MERRA-2的 T_m 格点产品空间插值中的偏差分别为0.72 K和0.23 K,均方根误差分别为1.94 K和1.87 K。(2)顾及垂直递减率的空间插值效果明显优于未顾及垂直递减率的插值效果,尤其在地形起伏较大的中国西部地区。因此,顾及垂直递减率的空间插值法在中国区域的高精度、高分辨率GNSS水汽探测中具有重要的应用。

关键词:大气加权平均温度;全球大地测量观测系统大气中心;MERRA-2;垂直递减率

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-07-31

DOI:10.13203/j.whugis20200304

文章编号:1671-8860(2023)02-0295-06

Spatial Interpolation of Atmospheric Weighted Mean Temperature Grid Products in China with Consideration of Vertical Lapse Rate

HUANG Liangke^{1,2} LI Chen¹ XIE Shaofeng^{1,2} LIU Lilong^{1,2} CHEN Jun³ LI Junyu^{1,2,3}

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

2 Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541006, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Atmospheric weighted mean temperature (T_m) is a key parameter of global navigation satellite system (GNSS) to retrieve precipitable water vapor (PWV). Currently, the T_m information provided by the existing T_m model is hard to capture its diurnal cycle variation, thus its application in high time resolution GNSS PWV estimation is limited. Atmospheric reanalysis data can provide T_m grid products with high spatial and temporal resolution, but they need to be spatially adjusted when used, and the variation of T_m in elevation is much greater than that in horizontal direction. **Methods:** Moreover, for the highly undulating terrain in China, a spatial interpolation method which considering the vertical lapse rate is proposed for T_m grid products in China. The proposed method is verified with the global geodetic observing system (GGOS) atmosphere T_m grid product and the MERRA-2 T_m grid product provided by national aeronau-

基金项目:国家自然科学基金(41704027, 41664002, 41864002); 广西自然科学基金(2017GXNSFBA198139, 2017GXNSFDA198016, 2018GXNSFAA281182); 广西“八桂学者”岗位专项经费。

第一作者:黄良珂,博士,副教授,研究方向为GNSS气象学。lkhuang666@163.com

通讯作者:谢劭峰,教授。xieshaofeng@glut.edu.cn

tics and space administration using the data of 89 radiosonde stations distributed in China as reference values. **Results:** The results show that: (1) In spatial interpolation of T_m grid products considering vertical lapse rate, the performance of inverse distance weighted method is better than that of bilinear interpolation method, and the biases of the T_m grid products of GGOS atmospheric center and MERRA-2 in China are 0.72 K and 0.23 K, respectively, and the root mean square errors are 1.94 K and 1.87 K, respectively. (2) The performance of spatial interpolation which considering the vertical lapse rate is significantly better than that without vertical lapse rate, especially in western China where the terrain is undulating. **Conclusions:** Therefore, the spatial interpolation method which considering the vertical lapse rate has important applications in high-precision and high-resolution GNSS water vapor remote sensing for China.

Key words: atmospheric weighted mean temperature; global geodetic observing system (GGOS) atmospheric center; MERRA-2; vertical lapse rate

水汽是地球大气的重要组成成分,90%的水汽主要分布在对流层的底部。虽然水汽在大气中的占比很小,但却是大气中最活跃的部分^[1]。同时,水汽在全球水循环、灾害天气形成与演变、能量平衡等方面扮演着重要角色^[2-3]。因此了解水汽的精细时空特性对天气预报和气候研究具有十分重要的意义。传统的水汽探测设备主要包括水汽辐射计、无线电探空仪等测量仪器,存在价格昂贵、时空分辨率低等不足,难以满足现代气象应用中高精度、高分辨率水汽的需求。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)气象学的发展为水汽探测提供了一种新的手段。相对于传统的水汽探测,GNSS水汽(precipitation water vapor, PWV)探测具有全天候、低成本、高精度和高时间分辨率等优点。大气加权平均温度(T_m)是GNSS PWV探测中的关键参数,此外, T_m 也是影响高精度、高分辨率GNSS PWV信息反演的重要因素^[4]。

当前, T_m 主要可通过探空资料、大气再分析资料和模型等方法计算获取。探空站虽然可提供高精度的 T_m 信息,但是探空站点数量较少且分布不均,尤其在中国西部地区,难以满足任意位置处的 T_m 信息获取。而利用 T_m 模型获取 T_m 信息成为了一种较为有效的手段。文献[5]建立了 T_m 与地表温度(T_s)的线性回归公式(Bevis公式),诸多学者对Bevis公式进行不断改进,构建了一系列区域或全球的 T_m 模型,由于上述模型与实测气象参数有关,从而限制了它们在实时GNSS水汽反演中的应用。近年来,为了满足GNSS实时水汽监测要求,诸多学者构建了众多实时的区域或全球 T_m 模型,并在区域或全球的实时GNSS水汽探测中得以应用。然而, T_m 模型虽然能获取较高精度的 T_m 信息,但是难以反映 T_m 的日周期变化^[6],从而限制了其在高时间分辨率GNSS PWV

反演中的精度。如今,全球多个机构可免费提供高时空分辨率的大气再分析资料,如欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ECMWF再分析资料、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的NCEP再分析资料和美国国家航空和太空管理局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的MERRA-2再分析资料等,利用这些大气再分析资料可计算出对应格点的 T_m 产品。同时,全球大地测量观测系统(global geodetic observing system, GGOS)大气中心对ECMWF再分析资料进行处理,为全球提供了时间分辨率为6 h、水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2^\circ$ (经度 \times 纬度)的 T_m 格点产品。文献[7]利用大气再分析资料积分计算的 T_m 信息用于GNSS PWV反演,取得了较好的效果。由于大气再分析资料计算的 T_m 格点高度与用户高度不一致,这种高程差异在中国西部地区尤为显著,因此为了获得用户位置高精度、高分辨率的 T_m 信息,需要对大气格点 T_m 产品进行空间插值。文献[8]以全球无线电探空资料计算的 T_m 为参考值,利用双线性法对GGOS大气中心 T_m 格点产品进行了空间插值,获得了较好的插值效果。

近年来,中国陆态网和各城市连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)网不断建成且已应用于大地测量与地球动力学等领域,这些网络积累了长期连续的高精度GNSS监测数据,可为中国区域GNSS水汽探测提供潜在的应用。而中国区域地形起伏较大、气候复杂多样,尤其在中国西部地区,这些地方探空站稀少且分布不均。此外, T_m 在中国部分地区存在较为显著的日周期变化^[9],且 T_m 在高程上的变化远大于其在水平方向上变化。因此,本文

提出顾及垂直递减率的中国区域 T_m 格点产品空间插值方法,对大气 T_m 格点产品进行高精度空间插值,以满足中国区域高精度、高时空分辨率的 GNSS PWV 的反演要求。本文以分布于中国区域的探空站资料为参考值,对覆盖于中国区域的 GGOS 大气中心和 MERRA-2 的 T_m 格点产品进行空间插值,检验本文提出的 T_m 空间插值方法精度。

1 数据来源与 T_m 垂直递减率函数

1.1 数据来源

GGOS 大气中心格点产品是基于 ECMWF 再分析资料计算获得,其可向用户提供时间分辨率 6 h、水平分辨率 $2.5^\circ \times 2^\circ$ 的全球 T_m 地表格点产品及相应的大地高。MERRA-2 再分析资料由美国 NASA 提供,其水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$,在垂直方向上分辨率为 42 层,其中等压层资料和地表资料的时间分辨率分别为 6 h 和 1 h。本文利用 2015 年 MERRA-2 资料积分获取覆盖中国区域的 6 h 分辨率 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 的 T_m 格点产品,同时对 2015 年中国区域 89 个探空站资料进行积分计算,获取每个探空站时间分辨率为 12 h 的 T_m 信息,积分计算过程详见文献[10]。中国区域 89 个探空

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 \cos(2\pi D/365.25) + \beta_2 \sin(2\pi D/365.25) + \beta_3 \cos(4\pi D/365.25) + \beta_4 \sin(4\pi D/365.25) \quad (1)$$

式中, D 表示年积日; β_0 表示 T_m 垂直递减率的年均值; β_1 、 β_2 和 β_3 、 β_4 分别表示 T_m 垂直递减率的年周期和半年周期系数。

2 精度分析

本文顾及高程变化对 T_m 空间插值的影响,对 2015 年的 GGOS 大气中心和 MERRA-2 格点 T_m 数据在垂直方向和水平方向进行空间插值,并以中国区域 2015 年 89 个探空站数据为参考值,采用偏差(Bias)与均方根误差(root mean square error, RMSE)作为空间插值精度评估指标,其表达式如下:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_m^{M_i} - X_m^{R_i}), R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_m^{M_i} - X_m^{R_i})^2} \quad (2)$$

式中, B 表示模型的 Bias 值; R 表示模型的 RMSE 值; $X_m^{M_i}$ 为模型计算值; $X_m^{R_i}$ 为参考值; N 为样本数量。

2.1 中国地区年均精度分析

在中国地区选取 89 个探空站 2015 年每天

站分布如图 1 所示。

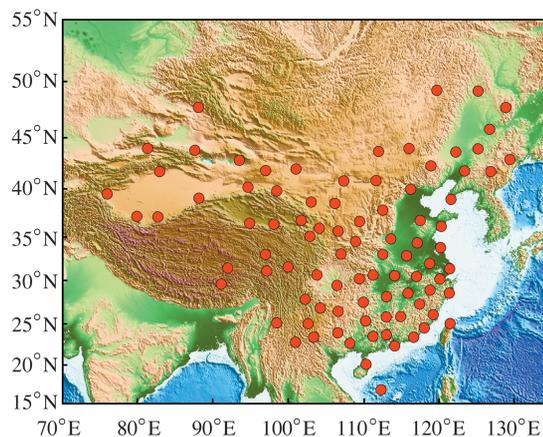


图 1 中国区域 89 个探空站分布图

Fig.1 Distribution Map of 89 Radiosondes in China

1.2 T_m 垂直递减率函数

文献[11]在构建全球 T_m 模型过程中,考虑到 T_m 与 T_m 垂直递减率存在着明显的年周期和半年周期变化特性,用户可通过空间插值的方法来获取任意位置、任意高程处的高精度 T_m 数据,且文中构建的中国地区 T_m 模型相对于 GPT2w 模型,精度得到显著提高。因此本文根据文献[11]建立的中国区域 T_m 垂直递减率函数来对格点 T_m 数据进行空间插值,其表达式如下:

UTC 0 时和 12 时的 T_m 作为参考值,使用反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)与双线性插值法(bilinear interpolation, BI)对 GGOS 大气中心和 MERRA-2 的 2015 年每天 UTC 0 时和 12 时数据进行水平插值,在垂直方向上考虑高程递减率的年周期和半年周期变化。以探空站的 T_m 数据对格点产品进行检验,对中国区域所有测站两种格点产品的年均精度进行统计,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,在顾及垂直递减率函数下, MERRA-2 格点数据使用 IDW 的年均 RMSE 值为 1.70 K, 年均 Bias 值为 0.23 K, 使用 BI 的年均 RMSE 值为 1.86 K, 年均 Bias 值为 0.36 K。在不顾及垂直递减率函数下,使用 IDW 和 BI 的年均 RMSE 值分别为 1.96 K 和 2.06 K, 年均 Bias 值分别为 -0.88 K 和 -0.82 K。就 GGOS 大气中心格点数据而言,在垂直方向顾及垂直递减率、水平方向上使用反距离加权的插值方法得到的年均 RMSE 值最小;在垂直方向顾及垂直递减率、水平方向上使用双线性插值的空间插值方法得到的年均 Bias 值最优。使用上述两种水平插值方

法对MERRA-2格点产品进行空间插值,无论在垂直方向上是否顾及垂直递减率函数,MERRA-2的两种精度标准指标均优于GGOS大气中心格点产品精度,原因可能是MERRA-2产品的格点分辨率高于GGOS大气中心格点分辨率,因此MERRA-2插值后的精度更高,且更为稳定。这说明两种格点产品的 T_m 在经过顾及高程递减率插值后,精度得到明显提升,顾及垂直递减率

改正后的IDW的空间插值性能优于BI。通过对两种插值方法的基本原理进行分析可知,反距离加权是根据格点与测站的直线距离通过确定权重来确定插值结果,双线性插值是将各格点分别进行X方向和Y方向的归算后得出测站点的数据,由于 T_m 的精度与纬度的变化密切相关,因此在理论上使用IDW对 T_m 格点产品进行插值优于BI,表1得出的结果与之相吻合。

表1 中国区域两种 T_m 格点产品年均检验结果/K

Tab.1 Annual Mean Results of Two T_m Grid Products in China/K

顾及垂直递减率	精度指标	方法	MERRA-2		GGOS大气中心	
			误差平均值	误差取值区间	误差平均值	误差取值区间
是	RMSE	IDW	1.70	(0.79, 3.48)	1.94	(0.81, 3.59)
		BI	1.86	(0.81, 2.82)	2.06	(0.73, 3.17)
	Bias	IDW	0.23	(-2.17, 2.11)	0.72	(-2.03, 2.61)
		BI	0.36	(-1.15, 1.95)	0.66	(-0.91, 2.49)
否	RMSE	IDW	1.96	(0.70, 6.17)	3.12	(1.07, 11.81)
		BI	2.06	(0.72, 4.38)	3.86	(0.75, 12.20)
	Bias	IDW	-0.88	(-5.84, 1.54)	-2.19	(-11.6, 1.69)
		BI	-0.82	(-3.93, 1.51)	-2.91	(-12.00, 2.03)

为了进一步分析各插值方法的年均Bias值和RMSE值在中国区域的分布情况,对各探空站的误差结果进行统计,结果如图2与图3所示。

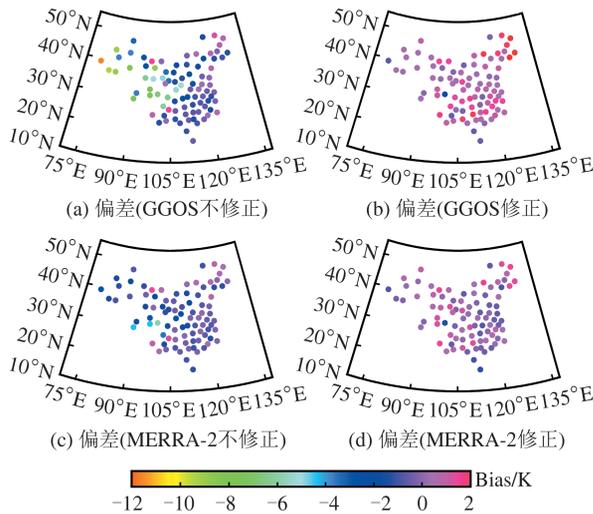


图2 中国区域两种 T_m 格点产品年均Bias值分布
Fig.2 Distribution of Annual Mean Bias of Two T_m Grid Products in China

从图2和图3可以看出,在空间插值模型顾及垂直递减率后,GGOS大气中心和MERRA-2格点产品的整体插值精度得到了较大提高,并且在中国西部地区,尤其是高海拔的青藏高原地区提升尤为明显。GGOS大气中心在未顾及垂直递减率的空间插值中,整体出现了负的系统偏差。两种 T_m 格点数据在进行顾及高程递减率的空间插值后,可以在中国区域获得稳定和较高的精度。

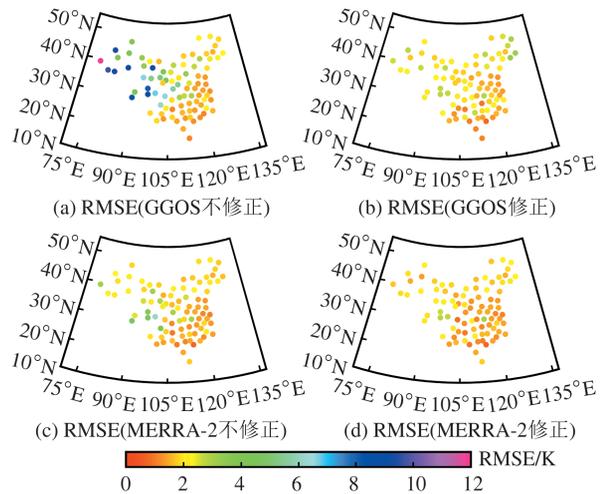


图3 中国区域两种 T_m 格点产品年均RMSE值分布
Fig.3 Distribution of Annual Mean RMSE of Two T_m Grid Products in China

2.2 中国地区年均精度分析

从MERRA-2和GGOS大气中心两种格点产品在中国区域年均精度分析可知,MERRA-2产品精度更高,且IDW的插值效果优于双线性插值。为了探究 T_m 在垂直方向与水平方向上变化的差别,并证明顾及垂直递减函数在 T_m 空间插值上的可行性与必要性,对MERRA-2格点产品数据进行提取,得到了中国区域 $1^\circ \times 1.25^\circ$ 、 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 和 $4^\circ \times 5^\circ$ 水平分辨率的 T_m 格点数据,与原始的 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 分辨率构成4种不同分辨率的格点数据,对不同格点分辨率的空间插值年均精度进行了统计,结果见表2。

表 2 不同 MERRA-2 格点分辨率空间插值的年均精度统计/K

Tab.2 Statistics of Annual Mean Precision of Spatial Interpolation for Different Resolutions of MERRA-2 Gridded Data/K

垂直递减率	类型	不同格点分辨率下的误差					
		$1^\circ \times 1.25^\circ$		$2^\circ \times 2.5^\circ$		$4^\circ \times 5^\circ$	
		误差平均值	误差取值区间	误差平均值	误差取值区间	误差平均值	误差取值区间
顾及	Bias	0.26	(-2.13, 2.08)	0.28	(-2.34, 2.26)	0.26	(-2.70, 2.26)
	RMSE	1.73	(0.84, 3.42)	1.86	(1.10, 3.51)	2.15	(1.30, 4.01)
不顾及	Bias	-1.38	(-10.21, 2.52)	-1.46	(-8.73, 3.09)	-1.57	(-11.44, 2.67)
	RMSE	2.53	(1.00, 10.46)	2.63	(1.00, 9.01)	2.96	(1.30, 11.71)

由表 2 可知,在不顾及垂直递减率的 T_m 空间插值时,随着格点水平分辨率的降低,精度分布也随之变得分散,且年均 Bias 值绝对值和 RMSE 值均逐渐增大。当顾及垂直递减率后,随着格点水平分辨率的降低,年均 Bias 值绝对值的变化较

小,尽管 RMSE 值有增大的趋势,但是相对于未顾及垂直递减率的空间插值,其 RMSE 值增大的速度明显减小。中国区域 MERRA-2 不同分辨率格点数据空间插值的 Bias 值分布和 RMSE 值分布见图 4 和图 5。

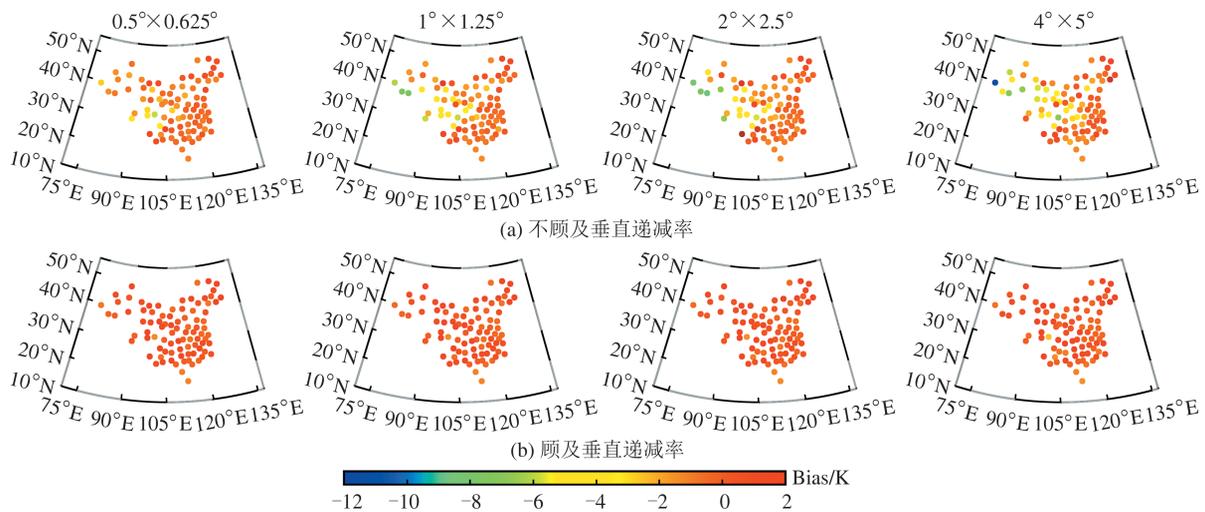


图 4 中国区域 MERRA-2 不同分辨率格点数据空间插值的 Bias 值分布

Fig.4 Distribution of Bias Values of Spatial Interpolation for Different MERRA-2 Gridded Data Resolutions

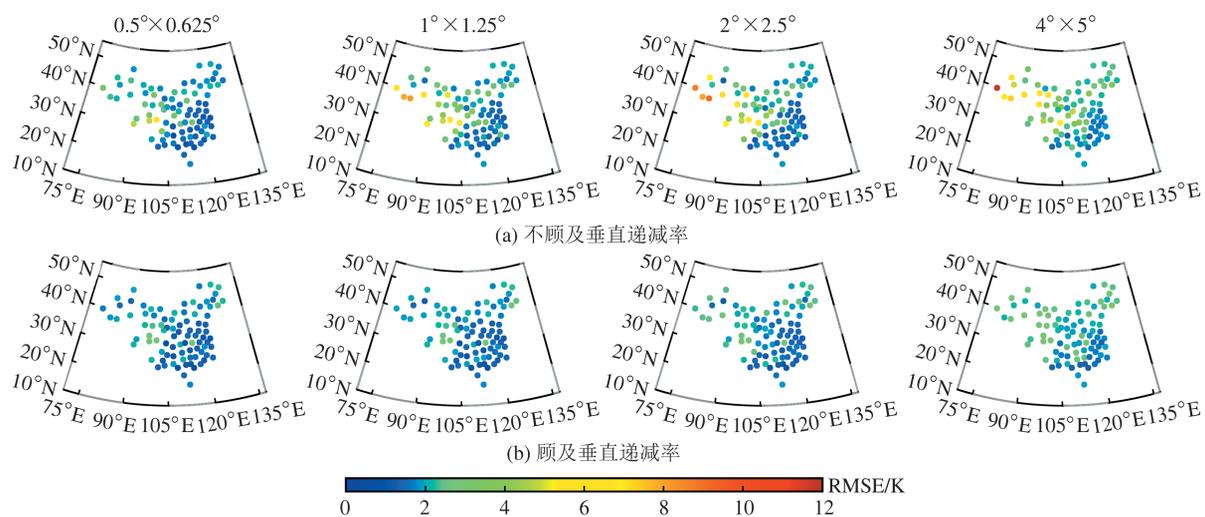


图 5 中国区域 MERRA-2 不同分辨率格点数据空间插值的 RMSE 值分布

Fig.5 Distribution of RMSE Values of Spatial Interpolation for Different MERRA-2 Gridded Data Resolutions

图 4 和图 5 表明,在不顾及垂直递减率的 T_m 空间插值时,随着格点分辨率降低,在中国西部地区的 Bias 值和 RMSE 值均逐渐增大,且出现了

显著的 Bias 值和 RMSE 值,而其他地区的 Bias 值和 RMSE 值变化相对较小,主要原因是中国西部地区的地形起伏较大。当在 T_m 空间插值中顾及

垂直递减率后,在整个中国区域均获得了稳定和较小的 Bias 值和 RMSE 值,由此说明 T_m 在高程上的变化比其在水平方向上的变化更显著。因此,在中国区域顾及垂直递减率的 T_m 空间插值可显著提升中国西部等高海拔地区的空间插值精度。

3 结 语

本文以中国地区探空站 2015 年实测的 T_m 作为参考值,对 GGOS 大气中心 T_m 格点产品和 MERRA-2 的 T_m 格点数据在中国区域的空间插值精度进行了分析。结果表明,高程是影响 T_m 空间插值精度的重要因素。在顾及垂直递减率的 T_m 垂直改正后,在水平方向上使用 IDW 的插值效果优于双线性插值。通过对顾及垂直递减率与未顾及垂直递减率的 T_m 空间插值结果分析可知,相对于未顾及垂直递减率的 T_m 空间插值,顾及垂直递减率的 GGOS 大气中心 T_m 空间插值 Bias 值和 RMSE 值分别减少了 67% 和 38%,而 MERRA-2 格点 T_m 数据的空间插值 Bias 值和 RMSE 值分别减少了 74% 和 13%。此外,分析了不同格点水平分辨率对 T_m 格点空间插值的影响,结果表明,未顾及垂直递减率函数的空间插值精度会随着格点分辨率的降低而下降,其精度下降的速度显著大于顾及垂直递减率的 T_m 空间插值结果,在不同的格点分辨率 T_m 空间插值中,在整个中国区域顾及垂直递减率的空间插值均保持了稳定和较高的精度。由此说明在进行 T_m 格点产品的空间插值时,顾及垂直递减率可显著减小 T_m 在高程上引起的插值误差。因此,顾及垂直递减率的 T_m 格点产品空间插值在中国区域的高精度、高时空分辨率的 GNSS 水汽探测中具有重要的应用,尤其在中国西部等高海拔地区。

参 考 文 献

- [1] Jin S G, Luo O F. Variability and Climatology of PWV from Global 13-Year GPS Observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 1918-1924.
- [2] Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q. GPS-Based PWV for Precipitation Forecasting and Its Application to a Typhoon Event [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, 167: 124-133.
- [3] Suparta W, Rahman R. Spatial Interpolation of GPS PWV and Meteorological Variables over the West Coast of Peninsular Malaysia During 2013 Klang Valley Flash Flood [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168: 205-219.
- [4] 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.
- [5] Bevis M, Businger S, Herring T, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (D14): 15787.
- [6] 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.
- [7] Zhao Jingyang, Song Shuli, Zhu Wenyao. Accuracy Assessment of Applying ERA-Interim Reanalysis Data to Calculate Ground-Based GPS/PWV over China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 935-939. (赵静阳, 宋淑丽, 朱文耀. ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(8): 935-939.)
- [8] Xu Chaoqian, Yao Yibin, Zhang Bao, et al. Accuracy Analysis and Test on the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere Grid Data Offered by GGOS Atmosphere [J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(4): 13-16. (许超钤, 姚宜斌, 张豹, 等. GGOS Atmosphere 大气加权平均温度数据的精度检验与分析 [J]. 测绘地理信息, 2014, 39(4): 13-16.)
- [9] Huang L, Liu 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): 51.
- [10] Yao Yibin, Zhang Bao, Xu Chaoqian, et al. Correlation Analysis of T_m-T_s and Construction of Linear Relationship Model Related to Global Latitude [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(9): 816-824. (姚宜斌, 张豹, 许超钤, 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.)
- [11] 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. (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.)