引文格式：郝伟涛,周慧敏,许光辉. GPT系列模型在HNCORS水汽反演中的适用性评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):75-78. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.04.016

GPT 系列模型在 HNCORS 水汽反演中的适用性评估

郝伟涛[1,2,3]，周慧敏[4]，许光辉[5]
（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006；2. 河南省天空地遥感智能监测工程技术研究中心，河南 郑州 450006；
3. 河南省自然资源科技创新中心（天空地遥感智能监测研究），河南 郑州 450006；
4. 河南省自然资源厅，河南 郑州 450006；5. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006）

摘　要：针对对流层延迟影响全球卫星导航系统（GNSS）水汽反演精度的问题，借助河南省连续运行参考站综合服务系统观测数据（HNCORS）对GPT系列模型（GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型）在河南地区的适用性进行系统评估，实验结果表明：GPT3模型获取的气温、气压、水汽压及反演PWV结果精度最高，GPT2模型和GPT2w模型获取结果精度相当，GPT模型获取结果精度最差；与GPT模型相比，GPT3模型获取的气温、气压和水汽压结果BIAS值精度分别提升了43.05%、39.50%、48.92%，RMS值精度分别提升了48.28%、33.01%、43.50%；GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型基于HNCORS获取的PWV结果平均RMS值分别为3.96、3.17、3.04、2.35 mm，GPT3模型获取PWV结果总体精度优于3 mm，因此在河南地区进行GNSS水汽反演推荐使用GPT3模型。

关键词：全球卫星导航系统；GPT模型；大气可降水量；适用性
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0075-04

Applicability Evaluation of GPT Series Models in HNCORS Water Vapor Inversion

HAO Weitao[1,2,3], ZHOU Huimin[4], XU Guanghui[5]
(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China;
2. Henan Remote Sensing Intelligent Monitoring Engineering Technology Research Center for Satellite, Aircraft and Land Survey, Zhengzhou 450006, China;
3. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Research on Remote Sensing Intelligent Monitoring for Satellite, Aircraft and Land Survey), Zhengzhou 450006, China;
4. Department of Natural Resources of Henan Province, Zhengzhou 450006, China;
5. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: In response to the impact of tropospheric delay on the accuracy of water vapor inversion in the global navigation satellite system (GNSS), we used observation data from the Henan continuously operating reference stations (HNCORS) to systematically evaluate the applicability of GPT series models (GPT model, GPT2 model, GPT2w model, and GPT3 model) in the Henan region. The experimental results show that the GPT3 model has the highest accuracy in obtaining temperature, pressure, water vapor pressure, and inverted PWV results, the GPT2 model and GPT2w model have the same accuracy in obtaining results, while the GPT model has the worst accuracy in obtaining results. Compared with the GPT model, the accuracy of BIAS values for temperature, air pressure and water vapor pressure obtained by the GPT3 model has been improved by 43.05%, 39.50% and 48.92%, respectively. The accuracy of RMS values has been improved by 48.28%, 33.01% and 43.50%, respectively. The average RMS values of PWV results obtained from the GPT model, GPT2 model, GPT2w model and GPT3 model based on HNCORS are 3.96 mm, 3.17 mm, 3.04 mm and 2.35 mm, respectively. The overall accuracy of PWV results obtained from the GPT3 model is better than 3 mm. Therefore, it is recommended to use the GPT3 model for GNSS water vapor inversion in Henan region.

Key words: GNSS, GPT model, PWV, applicability

全球卫星导航系统（global navigation satellite system，GNSS）在为用户提供导航、定位过程中受到对流层延迟误差的影响[1-2]，与电离层延迟误差不同的是对流层延迟误差只能削弱不能完全消除[3]，目前削弱对流层延迟误差主要采用模型修正法，模型修正法是将温度、压强、水气压、地理位置等影响因子与对流层延迟构建函数关系，从而获取高精度的对流层延迟[4-5]。根据使用的参数类型将模型修正法分为2大类，一类是实测气象数据的改正模型，一类是非实测气象数据的改正模型，与非实测气象数据的改正模型相比，实测气象

项目来源：国家自然科学基金资助项目（41704019）。
第一作者简介：郝伟涛（1986—），硕士，高级工程师，主要研究方向为大地测量、无人机测绘、工程测量等，E-mail：houtao888666@163.com。

数据的改正模型具有较高的精度，但由于需要实测气象数据作为参数，限制了模型的发展和使用[6-8]。

进入20世纪以来，国内外学者就建立对流层延迟改正模型削弱对流层的影响进行了一系列探索研究[9-14]，但目前单一针对河南地区对流层改正模型的研究文献相对较少，同时考虑到目前已有文献都是对单一GPT模型进行评估，缺少系统适用性分析评估[15-16]，基于此，本文借助河南省连续运行参考站综合服务系统（henan continuously operating reference stations，HNCORS）2022-01-01—2022-12-31（年积日：001-365）数据进行解算，对GPT系列（GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型）模型对流层延迟模型进行系统性分析，其结果可为GPT系列模型在河南地区使用提供参考依据。

1 模型简介

GPT模型数学表达式可表示为：

$$P = Px\left(1 - 0.000\,022\,6(h - hx)\right)^{5.225} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}h} = -0.006\,5 \tag{2}$$

在式（1）和式（2）中，P_x为平均海平面大气压；h为大地高；h_x为平均海平面高；P为大气压；T为测站的温度。

GPT2模式是在GPT模型的基础上拓展基础数据发展而来的。为了进一步提高全球气象参数的空间分辨率，在GPT2模型的基础上构建了GP2w模型，GP2w模型可提高全球范围内任意位置的气象参数。GPT3模型是在GPT2模型基础上增加了大气加权平均温度和水汽压递减率的参数，其中气象参数数学表达式可表示为：

$$r(t) = A_0 + A_1\cos\left(\frac{\mathrm{doy}}{365.25}\times 2\pi\right) + B_1\sin\left(\frac{\mathrm{doy}}{365.25}\times 2\pi\right) + A_2\cos\left(\frac{\mathrm{doy}}{365.25}\times 4\pi\right) + B_2\sin\left(\frac{\mathrm{doy}}{365.25}\times 4\pi\right) \tag{3}$$

式中，$r(t)$为气象参数；A_0为年平均振幅；A_1、B_1为年周期参数；A_2、B_2为半年周期参数；doy表示年积日。

2 CORS数据反演PWV原理

基于HNCORS观测数据获取对流层天顶总延迟，结合气象观测资料和天顶静力延迟计算模型，得到天顶干延迟，数学表达式为：

$$\begin{cases} \mathrm{ZHD} = 0.002\,279\,3 \times \dfrac{P}{F(\varphi, h_0)} \\ F(\varphi, h_0) = 1 - 0.002\,6\times\cos(2\varphi) - 0.000\,28\times h_0 \end{cases} \tag{4}$$

式中，ZHD为天顶干延迟；P为气压；φ为纬度；h_0为海拔高度。天顶对流层延迟（zenith tropospheric delay，ZTD）减去ZHD得到天顶湿延迟（zenith wet delay，ZWD），数学表达式为：

$$\mathrm{ZWD} = \mathrm{ZTD} - \mathrm{ZHD} \tag{5}$$

再利用Bevis经验公式计算出加权平均温度T_m，进而得到水汽转换系数Π。ZWD与水汽转换系数的乘积即可得到PWV，数学表达式为：

$$\mathrm{PWV} = \Pi \cdot \mathrm{ZWD} \tag{6}$$

式中，Π为水汽转换系数，是无量纲转换因子。

3 数据来源与方案设计

3.1 数据来源

实验过程中选取HNCORS中2022-01-01—2022-12-31（年积日：001-365）观测数据。为了提高解算结果的精度和可靠性，引入了IGS观测数据同步解算，其中IGS观测数据通过IGS官网下载。河南高空气象站数据由国家气象科学数据中心提供，河南地区气象站包括郑州站（34.72°N、113.65°E）和南阳站（33.03°N、112.58°E），产品文件包括每日00时和12时的气象要素。

3.2 方案设计

本文采用控制变化量法设计了4组对照实验，实验参数配置如表1所示。

表1 参数配置信息

方案编号	基线处理模式	采样间隔/s	截止高度角/(°)	对流层总延迟计算模型	映射函数	大气加权平均温度模型	天线相位中心改正	电离层延迟	全球气温气压模型
方案1	RELAX	30	15	Saastamoinen模型	GMF模型	Bevis模型	IGS 14.ATX	去电离层组合	GPT模型
方案2	RELAX	30	15	Saastamoinen模型	GMF模型	Bevis模型	IGS 14.ATX	去电离层组合	GPT2模型
方案3	RELAX	30	15	Saastamoinen模型	GMF模型	Bevis模型	IGS 14.ATX	去电离层组合	GPT2w模型
方案4	RELAX	30	15	Saastamoinen模型	GMF模型	Bevis模型	IGS 14.ATX	去电离层组合	GPT3模型

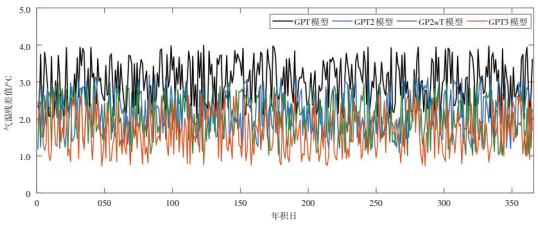
由表1可知，为了对比分析GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型在HNCORS水汽反演中的适应性，4组对照实验基线解算过程中仅全球气温气压模型不同，其余参数均保持一致，其中，基线处理模式设置为RELAX模式，将HNCORS原始数据使用TEQC软件将数据采样间隔统一为30 s，对流层延

迟使用模型改正，天线相位中心使用IGS14.ATX产品文件进行改正，电离层延迟使用去电离层组合进行消除，为了使解决结果可靠、稳定性高，在解算过程中使用模型削弱了潮汐、相位缠绕和相对论效应对结果的影响。

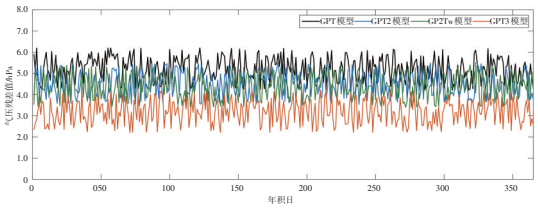
4　适用性评估

4.1　气温、气压、水汽压适用性分析

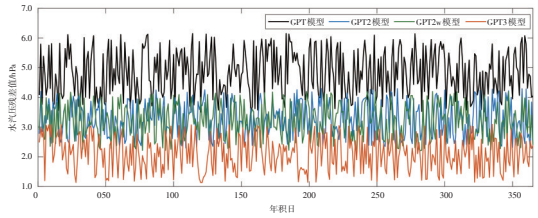
为了对比分析 GPT 模型、GPT2 模型、GPT2w 模型和 GPT3 模型在 HNCORS 水汽反演中的适应性，将 3.1 节 8 个 HNCORS 站（AYAY 站、SMLB 站、NYXC 站、ZZGY 站、PDRZ 站、KFTX 站、SQYC 站、XYOS 站）的坐标和在 2022-01-01—2022-12-31 的时序信息作为输入参数，分别得到基于 GPT 模型、GPT2 模型、GPT2w 模型和 GPT3 模型下的气温、气压和水汽压值，将得到结果分别与实测气象数据进行对比分析，残差时间序列如图 1 所示，同时将平均偏差 BIAS 值和平均均方根误差 RMS 值作为精度因子进行统计分析，其中 BIAS 和 RMS 值数学表达式如式（7）、（8）所示，精度因子统计结果如表 2 所示，可视化结果如图 2 所示。



a 气温



b 气压



c 水汽压

图 1　残差时间序列

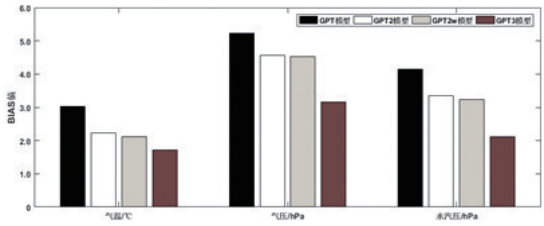
$$\mathrm{BIAS}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Y_m^{Mi}-Y_m^{Ri}\right) \tag{7}$$

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Y_m^{Mi}-Y_m^{Mi}\right)^2} \tag{8}$$

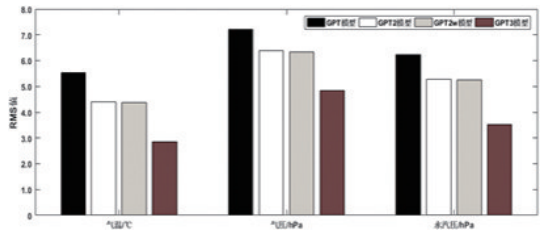
式（7）、（8）中，Y_m^{Mi} 为GPT系列模型获取的计算结果；Y_m^{Ri} 为实测气象结果；N 为样本数量。BIAS结果可以反映GPT系列模型计算结果与实测结果的平均偏离程度，而RMS值可以验证GPT系列模型计算结果的可靠性和稳定性。

表 2　精度因子统计结果

方案编号	模型	气温/℃		气压/hPa		水汽压/hPa	
		BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS
方案 1	GPT 模型	3.02	5.53	5.24	7.21	4.15	6.23
方案 2	GPT2 模型	2.23	4.40	4.56	6.40	3.36	5.27
方案 3	GPT2w 模型	2.11	4.37	4.52	6.33	3.24	5.25
方案 4	GPT3 模型	1.72	2.84	3.17	4.83	2.12	3.52



a BIAS值



b RMS值

图 2　精度因子统计可视化结果

由图 2、表 2 可知，基于 GPT3 模型获取的气温、气压和水汽压精度最高，GPT2 模型和 GPT2w 模型获取结果精度相当，GPT 模型获取结果精度最差，分析其原因可能是由于 GPT 模型建模使用数据相对较少，GPT3 模型新增了参数因子进一步提升了模型的精度和可靠性。与 GPT 模型相比，GPT2 模型获取的气温、气压和水汽压结果 BIAS 值精度分别提升了 26.16%、12.98%、19.04%；RMS 值精度分别提升了 20.43%、11.23%、15.41%；GPT2w 模型获取的气温、气压和水汽压结果 BIAS 值精度分别提升了 30.13%、13.74%、21.93%；RMS 值精度分别提升了 20.98%、12.21%、15.73%；GPT3 模型获取的气温、气压和水汽压结果 BIAS 值精度分别提升了 43.05%、39.50%、48.92%；RMS 值精度分别提升了 48.28%、33.01%、43.50%。总体而言，GPT3 模型获取的气温、气压和水汽压结果最优，稳定性最好。

4.2　反演 PWV 精度评估

为了进一步评估 GPT 系列模型在 HNCORS 水汽反演中的适用性，将 4 种 GPT 系列模型分别解算获取河南地区 PWV 结果，以高空气象站数据为参考值，验

证GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型反演PWV精度，均方根误差RMS值作为精度因子进行统计，结果如表3所示。

表3 GPT系列模型反演PWV结果/mm

站名	模型类别			
	GPT	GPT2	GPT2w	GPT3
AYAY	3.24	2.41	2.33	1.96
SMLB	3.45	2.34	2.30	2.16
NYXC	4.13	3.85	3.77	2.82
ZZGY	3.81	3.14	2.97	2.28
PDRZ	5.10	4.63	4.59	3.13
KFTX	3.70	2.88	2.74	2.25
SQYC	4.24	3.26	2.97	2.09
XYOS	3.98	2.84	2.65	2.11
平均值	3.96	3.17	3.04	2.35

由表3、图2可知，基于不同模型获取PWV结果存在差异性，其中基于GPT3模型获取的PWV结果精度最高，GPT2模型和GPT2w模型获取PWV结果精度相当，GPT模型获取PWV结果精度最差，这一结果与4.1节获取的气温、气压和水汽压结果相吻合。与GPT模型相比，GPT2模型、GPT2w模型、GPT3模型获取PWV结果精度可分别提升19.95%、23.23%、40.66%。总体而言，GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型基于HNCORS获取的PWV结果平均RMS值分别为3.96、3.17、3.04、2.35 mm，GPT3模型获取PWV结果总体精度优于3 mm。

5 结 语

本文借助2022-01-01—2022-12-31 HNCORS观测数据，通过对照实验，对GPT模型、GPT2模型、GPT2w模型和GPT3模型在河南地区适用性进行系统分析。结果证实了GPT3模型通过增加参数因子有效提升了模型的可靠性和精度，因此，在河南地区进行GNSS水汽反演推荐使用GPT3模型，可有效提高PWV反演精度。

参考文献

[1] 邓标,王伟娜,王延霞. BDS/GPS对流层延迟估计及对精密单点定位的影响[J]. 空间科学学报,2024,44(1):142-150

[2] 卢有勋. 区域实时对流层网格模型构建及在精密单点定位中的应用[J]. 地球物理学进展,2024,39(1):77-86

[3] 赵奕源,吴文坛,赵春梅,等. 不同活跃状态下香港区域电离层建模分析[J]. 测绘科学,2023,48(8):72-80

[4] 郭秋英,薛学龙,余淼,等. 基于多模PPP-AR技术的大气水汽探测性能分析[J]. 导航定位与授时,2023,10(6):93-102

[5] 李涵,李剑锋,黄丁发. 高海拔地区GNSS对流层延迟时空特性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(10):1 026-1 031

[6] 戴祺,章浙涛,文援兰,等. 不同气候条件下几种对流层模型性能分析[J]. 导航定位学报,2023,11(4):38-48

[7] 郑友淼. GPT/GPT2/GPT3模型在广东省适应性对比分析[J]. 地理空间信息,2022,20(4):123-125

[8] 许双安. 顾及大高差的改进GPT3天顶对流层延迟模型[J]. 测绘科学,2022,47(12):48-56

[9] 邹崇尧,梁斌,厉芳婷,等. 基于CORS对流层延迟改正模型在山区地灾监测的分析应用[J]. 地理空间信息,2023,21(12):100-102

[10] 李黎,许思怡,高颖,等. 基于GPT3和傅里叶函数构建长三角地区ZHD模型[J]. 测绘地理信息,2024,49(1):104-108

[11] 孟昊霆,张克非,杨震,等. GPT2/GPT2w+Saastamoinen模型ZTD估计的亚洲地区精度分析[J]. 测绘科学,2020,45(8):70-76

[12] 张永林,李磊. GPT2w对流层延迟模型在中国区域的精度分析[J]. 导航定位学报,2020,8(5):97-101

[13] 高壮,何秀凤,常亮. GPT3模型在中国地区的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(4):538-545

[14] 胡应剑,吴丕团,黄良珂. 新疆地区GPT2w模型计算加权平均温度适用性分析[J]. 地理空间信息,2020,18(3):109-111

[16] 尹恒毅,郭春喜,姚顽强,等. 不同对流层天顶延迟模型在陕西地区的精度及适用性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(4):391-394

（上接第58页）

[11] 高伟,李欣悦,张远,等. 长江流域生态系统服务价值时空演变与预测[J]. 生态学报,2023,43(15):6 203-6 211

[12] 陈宗铸,雷金睿,吴庭天,等. 国家公园生态系统生产总值核算:以海南热带雨林国家公园为例[J]. 应用生态学报,2021,32(11):3 883-3 892

[13] 张颖,张子璇,刘海鸥. 塞罕坝国家森林公园GEP核算及分析[J]. 环境保护,2023,51(增刊):27-32

[14] 桂华,杨梦婷,苏星. 项目级生态产品价值核算方法学研究[J]. 节能与环保,2023(1):29-31

[15] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报,2013,33(21):6 747-6 761

[16] 王金南,马国霞,志凯,等. 生态产品第四产业发展评价指标体系的设计及应用[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(10):1-8