引文格式：汤伟尧. 利用深度学习和GNSS研究水负荷位移时空变化[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 5-8. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.002

利用深度学习和GNSS研究水负荷位移时空变化

汤伟尧[1]
（1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司，陕西 西安 710043）

摘　要：基于长江中上游地区14个全球导航卫星系统（GNSS）测站的观测数据和重力恢复与气候实验（GRACE）Mascon数据，提出了一种基于卷积长短期记忆人工神经网络（LSTM）的水负荷位移估计方法。研究表明，在数据预处理时改正大气和非潮汐海洋负载，可明显减弱GNSS测站的非线性运动。与格林函数法相比，该方法的估计结果与GNSS真实观测值的差值标准差平均降低了20.2%。夏、秋季水负荷位移多为负值，而冬、春季则多为正值，且呈现出显著的周年和半周年周期性以及近1/3年周期变化。湖北省西南部水负荷位移振幅较大，而西部地区尤其是西北部地区振幅较小；中部地区水负荷位移普遍偏大，东部地区振幅逐渐减小。研究结果可为长江中上游地区水负荷位移的监测和分析提供新的视角。

关键词：水负荷位移；GNSS；GRACE；卷积LSTM；格林函数
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0005-04

Research on Spatio-temporal Change of Water Loading Displacement Using Deep Learning and GNSS

TANG Weiyao[1]
(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Based on observational data from 14 global navigation satellite system (GNSS) stations in the middle and upper reaches of the Yangtze River and gravity recovery and climate experiment (GRACE) Mascon data, we put forward a water loading displacement estimation method based on a convolutional long short-term memory (LSTM) neural network. The results show that the nonlinear motion of GNSS station is obviously weakened by correcting atmospheric and non-tidal ocean loading during data preprocessing. Compared to the Green's function method, this method shows better consistency in the discrepancy between estimated water loading displacement and actual GNSS observations, with an average standard deviation reduction of 20.2%. The water loading displacement tends to be negative in summer and autumn, and positive in winter and spring. Additionally, significant annual and semi-annual periodic changes in water loading displacement are observed, along with a near one-third of a year signal. Spatially, the southwest of Hubei Province exhibits larger water loading displacement amplitudes, while the western region, especially the northwest, shows smaller amplitudes. Central regions generally have larger displacements, and the amplitude gradually decreases in the eastern areas. This study offers a new perspective for monitoring and analyzing water loading displacement in the middle and upper reaches of the Yangtze River.

Key words: water loading displacement, GNSS, GRACE, convolutional LSTM, Green's function

水资源是维持地球生态系统和人类社会稳定的关键要素[1-3]。全球气候变化和人类活动影响使得水资源动态变化成为全球关注的焦点[4]。水负荷位移不仅影响地球的重力场，还对区域地表稳定性和生态系统健康产生深远影响[5-6]，因此准确监测水负荷位移及其时空变化对于理解全球水循环、评估气候变化影响以及有效管理水资源至关重要。随着卫星遥感技术的发展，重力恢复与气候实验（GRACE）和全球导航卫星系统（GNSS）为该类研究提供了全新的视角和方法[7-8]。GRACE卫星能通过精确测量地球重力场的微小变化来推断水储量的变化，为研究全球水负荷位移提供了宝贵数据[9-10]。国内外众多学者[11-16]结合GNSS与GRACE数据分析了不同区域水负荷变化情况。本文基于长江中上游区域14个GNSS测站4年数据以及对应的GRACE Mascon数据产品，提出了基于卷积长短期记忆人工神经网络（LSTM）的水负荷位移估计方法，并与传统的格林函数方法进行了对比；分析了研究区域水负荷位移的时空变化特点。

项目来源：基于北斗地基增强的铁路运维动态基准关键技术（SKLK18-01）。
作者简介：汤伟尧（1991—），硕士，工程师，从事大地测量、工程测量等工作，E-mail：taocdlxx@126.com。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文采用地震局提供的14个陆态网GNSS站（ftp://ftp.cgps.ac.cn）的垂向坐标时间序列数据，时间跨度为2019—2022年，测站分布见图1。为匹配GRACE水储量月解数据，将单天解坐标时间序列进行月平均，得到月解数据；并进行固体潮、海潮和极潮改正[17]。为消除大气负载和非潮汐海洋负载对结果的影响，本文利用美国国家环境预测中心和美国国家海洋合作计划提供的环境负载数据对GNSS数据进行改正，其中大气负载位移数据的时间分辨率为6 h，空间分辨率为2.5°×2.5°，非潮汐海洋负载位移数据的时间分辨率为12 h，空间分辨率为1°×（0.3~1°）。为消除测站线性运动的影响，采用ICE-6G_C模型对冰川均衡调整（GIA）进行改正。GRACE水储量数据采用美国得克萨斯大学空间研究中心提供的Mascon月解数据（http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html），已替换C20项和地心改正项，并扣除了GIA的影响。以2004年1月—2009年12月的均值为基准进行距平处理，具有分辨率高、信噪比高、泄露误差小等特点。该数据的空间分辨率为0.25°×0.25°。

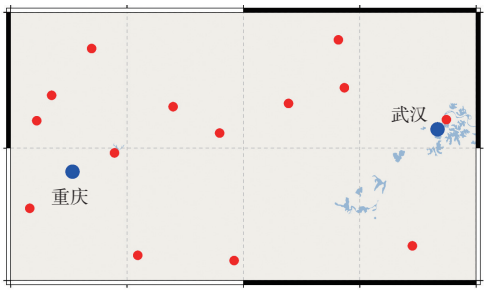


图1 测站分布

1.2 研究方法

首先，对GNSS数据进行大气负载、非潮汐海洋负载和冰后地壳回弹效应的改正，并将GNSS和Mascon数据进行标准化处理，构建一个五维矩阵[N, T, H, W, C]，其中N为GNSS站点数量，本文涵盖14个GNSS测站，其中70%用于训练集，因此N值为10；T为时间步长，本文设定为48个月；H和W分别为围绕每个GNSS点选取的格网点水平和垂直空间布局，均为14；C为特征数量，本文中为经度、纬度、格网点与GNSS点间的经纬度差异以及水储量数据。然后，设计卷积LSTM模型，卷积层采用3×3×3的卷积核，且激活函数均设定为ReLU。模型通过最大池化层、展平层和全连接层处理数据，最终输出每个测站每月的水文负荷位移时间序列。为验证反演结果的准确性，本文使用交叉验证方法对模型进行评估，共进行14次循环训练和验证。最后，基于未标准化的Mascon数据，采用负荷格林函数方法计算水负荷位移，并将得到的结果与GNSS实测值进行比较，以进一步验证模型效果。

2 研究结果与分析

2.1 数据预处理

对GNSS数据进行大气负载、非潮汐海洋负载改正，结果见表1，可以看出，改正后GNSS测站的非线性运动明显降低，其中周年项运动变化更明显。改正后周年项振幅平均降低0.67 mm，约占周年信号的15.53%；半周年项振幅平均降低约2.88%。由此可知，研究区大气负载和非潮汐海洋负载的非线性运动主要是周年项运动，半年项运动的贡献较小。Forbes效应、大气中水汽量的年度变化[18]等季节性因素以及大气扭矩变化对地球摆动的激发[19]、大气和海洋内部不稳定性[20]、太阳大气中强对流运动引起的波动合和能量转换[21]，这些因素共同作用导致周年项振幅显著大于半年项。另外，本文对GIA信号进行了分析并改正，但研究区GIA的影响非常小，改正前后时间序列的变化并不明显。

表1 大气负载和非潮汐海洋负载改正前后测站非线性运动的变化

测站	周年项振幅			半年项振幅		
	改正前/mm	改正后/mm	贡献率/%	改正前/mm	改正后/mm	贡献率/%
CQCS	4.24	3.59	15.41	0.51	0.50	2.90
GZFG	5.14	4.44	13.55	0.32	0.31	2.80
HBES	3.28	2.80	14.75	0.31	0.30	3.20
HBXF	5.76	4.87	15.37	0.20	0.19	2.60
HNLY	3.08	2.58	16.24	0.18	0.18	2.50
SCBZ	4.55	3.74	17.85	0.22	0.21	3.30

2.2 基于卷积LSTM的水负荷位移估计

利用本文方法建立研究区水负荷位移模型，首先分析机器学习过程中的模型性能，采用训练成熟的模型对验证集数据进行处理，将预测的水负荷位移结果与GNSS真实观测值以及格林函数方法的结果进行比较，其中3个测站的结果见图2，3种方法结果的变化趋势一致，均展现出水负荷位移的周期运动特性，GNSS观测的水负荷位移振幅变化最大，卷积LSTM方

法次之，格林函数方法最小。虽然对GNSS坐标时间序列进行了大气负载、非潮汐海洋负载和GIA改正，但其结果中可能包含温度影响等其他地球物理因素，导致测站产生非线性运动；而另外两种方法对于小尺度的信号并不敏感，因此在单点水负荷位移监测方面，GNSS技术仍是一种高精度的监测手段。从一致性的角度来看，本文方法得到的结果与GNSS观测结果更加接近。

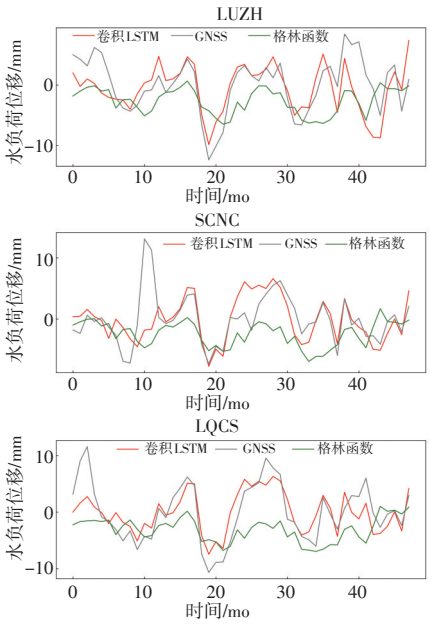


图2　部分测站不同方法估计的水负荷位移

为量化不同方法结果之间的差异，以GNSS观测的水负荷位移为参考，计算另外两种方法与其的差值。通过统计差值的最大值、最小值和标准差发现，相较于格林函数方法，本文方法与GNSS实测结果差值的最值均较小，标准差平均减少了20.2%，说明本文方法得到的结果更接近实测值。

2.3　水负荷位移的时空特点分析

为分析研究区水负荷位移的变化特点，对研究区水负荷位移进行区域平均，得到区域水负荷位移时间序列，结果见图3，可以看出，水负荷位移具有明显的周期性，位移振幅呈先变大后变小的趋势，其中2020年6月—2022年6月振幅较大；夏、秋季水负荷位移基本处于负值，而冬、春季则基本处于正值，这主要是由于夏、秋季降水较多，地表水增大，从而导致地表沉降，冬、春季降水较少，地面则出现回弹。

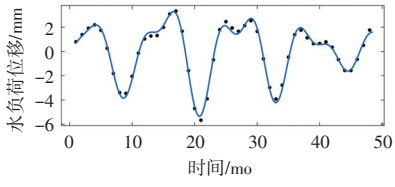
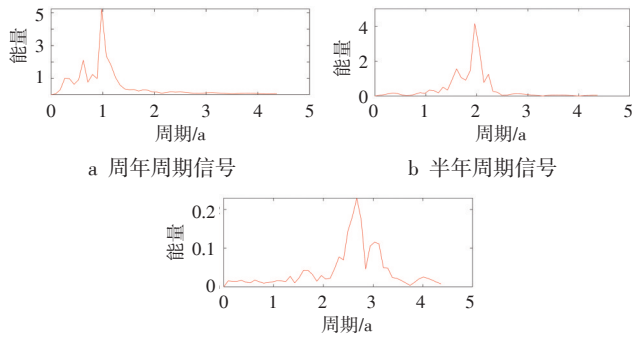


图3　水负荷位移随时间的变化特点

为进一步分析水负荷位移的周期变化特点，本文采用快速傅里叶变换方法分析时间序列，结果见图4，可以看出，研究区水负荷位移存在明显的周年、半周年和近1/3年的周期信号，且周年信号强度最大、1/3年信号强度最小。



a 周年周期信号　　b 半年周期信号

c 1/3年周期信号

图4　周期信号探测结果

对所有格网点的时间序列进行拟合，求得振幅值；并对振幅的空间分布进行分析，结果见图5，可以看出，湖北省西南地区的水负荷位移振幅较大，而研究区西部区域振幅较小，最小值出现在西北部；中部区域水负荷位移普遍偏大，东部区域呈振幅减小的趋势。由于研究区位于长江中上游区域，水文情况复杂多变，水负荷位移振幅的空间分布特点受其影响较大，具体的影响机制有待进一步研究。

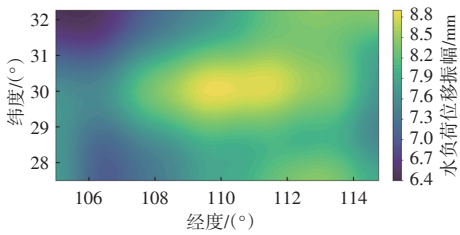


图5　水负荷位移振幅空间分布

3　结　论

基于长江中上游14个GNSS站点和GRACE Mascon数据，本文利用卷积LSTM创新性地估计并分析了水负荷位移，主要结论包括：①经过大气负载和非潮汐海洋负载改正，GNSS测站的非线性运动得到显著降低，周年项的振幅平均下降了15.53%，而半周年项则平均减少了2.88%；②相较于格林函数方法，本文方法估计结果与GNSS实测结果的差值在最值和标准差上均表现出更好的一致性，平均标准差降低了20.2%；③在季节性水负荷位移方面，夏、秋季主要

为负值，而冬、春季则多为正值，水负荷位移展现出显著的周年、半周年以及近1/3年周期性变化，其中周年信号最显著、1/3年周期信号最弱；④在空间分布上，湖北省西南部的水负荷位移振幅较大，研究区西部地区振幅较小，尤其是西北部地区，中部地区的水负荷位移普遍较大，而东部地区则呈振幅递减的趋势。

参考文献

[1] 何国庆. 基于GRACE RL06数据探测华北平原水储量变化[J]. 地理空间信息,2022,20(6):55-59

[2] Ferreira V G, Montecino H, Ndehedehe C E, et al. Determining Seasonal Displacements of Earth's Crust in South America Using Observations from Space-borne Geodetic Sensors and Surface-loading Models[J]. Earth, Planets and Space,2019,71:1-16

[3] 谢小伟. 黄河中上游地区水储量变化及陆地水负荷形变研究[J]. 测绘学报,2022,51(12):2 560

[4] 李雅丽,魏峰远,陈荣国,等. 基于WebGIS的河南省水文信息管理系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2018,16(4):43-46

[5] 黄俊,谷延超,黄飞龙,等. 利用广义三角帽法评估GRACE/GRACE-FO反演流域陆地水储量变化的不确定性[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(9):957-962

[6] Knowles L A, Bennett R A, Harig C. Vertical Displacements of the Amazon Basin from GRACE and GPS[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2020,125(2):18 105

[7] 李建成,李贤炮,钟波. 利用GNSS地表形变反演区域陆地水储量变化的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(11):1 724-1 735

[8] Liu Y, Fok H S, Tenzer R, et al. Akaike's Bayesian Information Criterion for the Joint Inversion of Terrestrial Water Storage Using GPS Vertical Displacements, GRACE and GLDAS in Southwest China[J]. Entropy, 2019, 21(7):664

[9] 郑增记,苏利娜,范丽红,等. 陕西省GPS基准站垂直形变的陆地水负荷效应[J]. 测绘工程,2018,27(9):6-10

[10] Razeghi M, Han S C, Mcclusky S, et al. A Joint Analysis of GPS Displacement and GRACE Geopotential Data for Simultaneous Estimation of Geocenter Motion and Gravitational Field[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2019,124(11):12 241-12 263

[11] 王林松,陈超,邹蓉,等. 利用GPS与GRACE监测陆地水负荷导致的季节性水平形变:以喜马拉雅山地区为例[J]. 地球物理学报,2014,57(6):1 792-1 804

[12] 李婉秋,王伟,章传银,等. 区域地壳结构差异对GRACE-FO反演中国近10个月陆地水负荷垂直形变的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(7):707-713

[13] 盛传贞,甘卫军,梁诗明,等. 滇西地区GPS时间序列中陆地水载荷形变干扰的GRACE分辨与剔除[J]. 地球物理学报,2014,57(1):42-52

[14] Fok H S, Liu Y. An Improved GPS-inferred Seasonal Terrestrial Water Storage Using Terrain-corrected Vertical Crustal Displacements Constrained by GRACE[J]. Remote Sensing,2019,11(12):1 433

[15] Zhu H, Chen K, Hu S, et al. Characterizing Hydrological Droughts Within Three Watersheds in Yunnan, China from GNSS-inferred Terrestrial Water Storage Changes Constrained by GRACE Data[J]. Geophysical Journal International,2023,235(2):1 581-1 599

[16] Xiang Y, Yue J, Cong K, et al. Characterizing the Seasonal Hydrological Loading over the Asian Continent Using GPS, GRACE, and Hydrological Model[J]. Pure and Applied Geophysics,2019,176:5 051-5 068

[17] 陈国恒,涂纯二,刘远海,等. 基于GPS/BDS/GLONASS/Galileo的区域CORS稳定性分析[J]. 地理空间信息,2022,20(5):111-115

[18] Nakagawa K. Secular Variation in the Transmission Coefficient of the Atmosphere Observed at Tosa-shimizu During the Years 1945-1979[J]. Geophysical Research Letters, 1981,54(2):57-69

[19] Wilson C, Haubrich R. Atmospheric Contributions to the Excitation of the Earth's Wobble 1901-1970[J]. Geophysical Journal International,1976,46(3):745-775

[20] Sadhvi K, Suresh I, Takeshi I, et al. Year-to-year Meridional Shifts of the Great Whirl Driven by Oceanic Internal Instabilities[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2020

[21] Srivastava A, Dwivedi B. Observations from Hinode/EIS of Intensity Oscillations Above a Bright Point: Signature of the Leakage of Acoustic Oscillations in the Inner Corona[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,2010,405(4):2 317-2 325