引文格式：李玉忠. 利用GNSS连续站数据反演云南地区陆地水储量[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 81-84. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.015

利用GNSS连续站数据反演云南地区陆地水储量

李玉忠[1,2]
（1. 青海省测绘科学技术研究院，青海 西宁 810001；2. 测绘科学技术研究应用研究室，青海 西宁 810001）

摘 要：在气候变化背景下，极端水文事件日益频发，因此对陆地水储量（TWS）变化的定量计算显得尤为重要。通过系统收集和分析2010—2021年连续全球导航卫星系统（GNSS）观测数据，研究了云南地区TWS的时空分布情况。利用格林函数模型，定量计算TWS随时间的变化量，综合分析云南地区水资源盈亏情况。结果表明，GNSS推断的等效水高与重力恢复和气候实验结果的整体趋势较一致，但其振幅更大。GNSS反演的云南地区6个主要流域TWS年振幅总量为72.6±6.0 Gt，能有效揭示云南地区TWS的时空特征，为科学管理水资源提供科学依据。

关键词：TWS；GNSS；格林函数；云南地区
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0081-04

Terrestrial Water Storage Inversion in Yunnan Province, China Using GNSS Continuous Station Data

LI Yuzhong[1,2]
(1. Qinghai Academy of Surveying and Mapping Science and Technology, Xining 810001, China;
2. Applied Research Laboratory for Research in Surveying and Mapping Science and Technology, Xining 810001, China)

Abstract: Under the background of climate change, extreme hydrological events are becoming more and more frequent, which makes the quantitative calculation of terrestrial water storage (TWS) change particularly important. We systematically collected and analyzed the continuous global navigation satellite system (GNSS) observation data from 2010 to 2021, and studied the spatio-temporal distribution of TWS in Yunnan Province. Then, we used Green function model to quantitatively calculate the change of TWS with time, and comprehensively analyzed the profit and loss of water resources in Yunnan Province. The results show that the equivalent water height inferred from GNSS is in good agreement with the results of gravity recovery and climate experiment (GRACE), but has larger amplitude than GRACE. Based on GNSS inversion, the total annual amplitude of TWS in six major river basins in Yunnan Province is 72.6±6.0 Gt, which can effectively reveal the spatio-temporal characteristics of TWS in Yunnan Province, and provide scientific basis for scientific management of water resources.

Key words: TWS, GNSS, Green function, Yunnan Province

水是生命之源、生产之要、生态之基，水在大气、海洋和陆地驻留，并按固有的循环系统流转。其中，陆地水储量（TWS）与人类生存和万物繁衍的关系最为密切，其变化将对经济社会发展产生深刻影响。陆地水包括冰川、雪、树冠水、地表水（湖泊、河流和水库）、土壤水和地下水等[1-3]。监测全球和区域总水储量并表征其时空格局，有助于探索水文气象相互作用机制和管理水资源[4-5]。近年来重力恢复和气候实验（GRACE）重力卫星通过精确测量卫星间距变化率得到地球时变重力场数据，扣除大气和非潮汐影响，可计算TWS变化；再与水文模型相结合可研究深层地下水的含量、地表径流、蒸发以及冰层质量变化等[6]。然而，低时空分辨率（每月采样、空间分辨率约为350 km）、误差影响（高频误差、泄露误差）、对高频精细尺度的TWS变化不敏感以及数据缺失等局限极大地限制了GRACE的应用。随着全球导航卫星系统（GNSS）的完善和成熟，将其应用于观测地表垂向季节性形变得到了越来越多的关注[7-9]。GNSS的时间分辨率较高，连续监测时间长，可做小尺度变化研究，能精确测量地表细微形变，解算定位精度可达毫米级，可为大陆地壳高精度形变实时检测提供可靠技术，已成功应用于不同时空尺度的水体质量变化跟踪[1,2,10-12]。GNSS的时间序列通常具有明显的季节性信号，部分学者[13-14]认为季节性成分主要与陆地水变化有关。目前国内外研究人员主要采用中国大陆构造环境监测网络（CMONOC）数据分析云南地区的TWS，

项目来源：中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目（2023年度）。
作者简介：李玉忠（1977—），本科，研究方向为大地测量与工程测量，E-mail：1019291152@qq.com。

而利用密集GNSS台站定量计算云南内部不同子流域TWS的研究较少。基于此，本文收集了2010—2021年43个连续GNSS观测站的数据，以此分析云南地区TWS的时空格局演变情况，并与GRACE结果进行对比分析，探究干旱与GNSS-TWS的相关性。

1 数据来源和研究方法

云南省位于我国西南边界、青藏高原东南部；属典型的亚热带气候，受南亚和东亚季风影响明显，降雨丰富；具有明显的季节性变化，地壳形变非常显著[15]。云南省拥有丰富的水系以及多条大型且复杂的断裂带，是我国大陆现今构造运动最剧烈的区域之一[16]。云南省境内径流面积在100 km^{2}以上的河流有908条，主要包括长江、珠江、红河、澜沧江、怒江和伊洛瓦底江六大水系。本文从中国地震局GNSS数据产品服务平台（http://www.cgps.ac.cn）收集了云南省43个CMONOC站点数据，时间跨度为2010年1月—2021年12月。获得GNSS时间序列后，需进一步剔除构造（长期趋势项）和非构造形变（非潮汐大气和海洋荷载），本文采用德国地学中心ESMGFZ产品改正非潮汐大气和海洋荷载（http://rz-vm115.gfz-potsdam.de:8080/repository）。此外，还需对数据结果进行剔除粗差、阶跃以及插值缺失数据等操作。

1）粗差剔除。首先对原始时间序列进行最小二乘拟合得到线性趋势，再从原始数据中减去趋势向得到相应的残差，然后对残差进行排序得到四分位距。四分位距为3/4处上分位值与1/4处下分位值的差值。以中位数为参考，超出3倍四分位距的点为异常值，进而探测和剔除粗差。

2）阶跃剔除。受外部环境和更换天线等因素影响，时间序列会产生阶跃，影响整体数据质量。本文通过CATS软件来设置阶跃发生的时间，计算得到阶跃的位移量，再进行扣除。

3）缺失数据插值。传统缺失数据插值方法通常采用单点时间序列，未考虑站点间的空间相关性，而基于Matlab开发的动态时空插值方法采用KKF滤波[17]，在处理基于网络坐标时间序列的连续和随机数据间隙方面具有优异性能。研究区站点经过预处理后垂直方向的时间序列见图1。

本文利用GNSS地表位移反演TWS的估计准则为[14-16,18]：

$$\left((\boldsymbol{A}x-b)/\sigma\right)^2+\beta^2\left(L(x)\right)^2\rightarrow\min \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为格林函数系数矩阵；x为格网点对应的等效水高；b为测站点GNSS的垂直位移观测值；σ为向量标准差，即GNSS时间序列标准差；β为平滑因子；L为拉普拉斯算子。

采用岭估计方法求解等效水高，即

$$x=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}+\sigma^2\beta^2L^{\mathrm{T}}L\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}b \tag{2}$$

岭估计求解的关键是确定β和L。本文采用L-曲线法确定β，根据L曲线图可知，拐点处β^2=0.01。

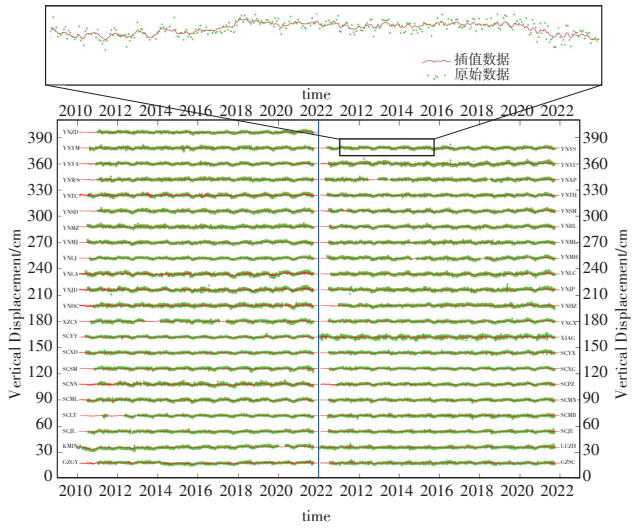


图1 研究区GNSS测站时间序列

2 研究结果与分析

GNSS原始观测时间序列与处理后的结果均存在明显的周期运动，这是由季节性降雨、干旱等水文事件导致的周期性荷载变形。基于水荷载与地表形变之间的耦合关系，可通过格林函数模型推断出TWS。通过GNSS和GRACE技术推断的等效水高（EWH）时间序列见图2，二者具有很好的一致性，所有测站结果的相关性均值为0.83，P值显著性检验为0.033 < 0.050，即至少有95%的把握，证明了反演方法的正确性。值得注意的是，GNSS推断的EWH振幅比GRACE大，所有测站均存在这种现象。其原因可能是，GRACE属于大尺度（>300 km）观测，研究局部地区时存在信号泄漏问题[19]。

云南省干湿季节分明，湿季（雨季）为5—10月，集中了85%的降水量；干季（旱季）为11月—次年4月，降水量只占全年的15%。基于GNSS反演的云南地区TWS的时间和空间分布见图3，可以看出，两个时间的结果存在明显差异，1月比6月更湿润，这与云南省的季风降雨特征相吻合；且滇西南较滇东北更湿润，以红河断裂带为界，西侧存在陆地水缺失。本文还计算了2010—2021年云南省6个主要流域基于GNSS反演的TWS年振幅（表1）。结果表明，澜沧江和怒江流域TWS变化最大，年振幅分别为250.4±23.3、

232.2±20.1 mm；珠江流域变化最小，年振幅为169.1±16.8 mm；6个流域TWS年振幅变化总量为72.6±6.0 Gt。

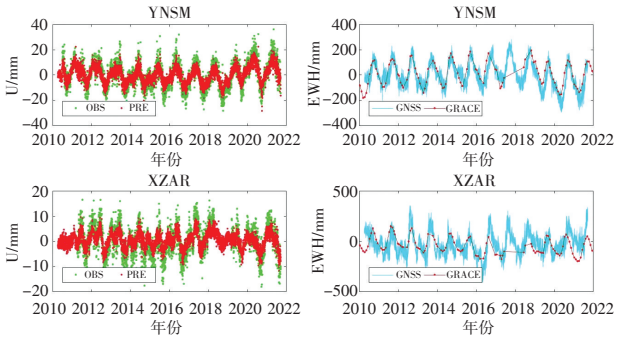
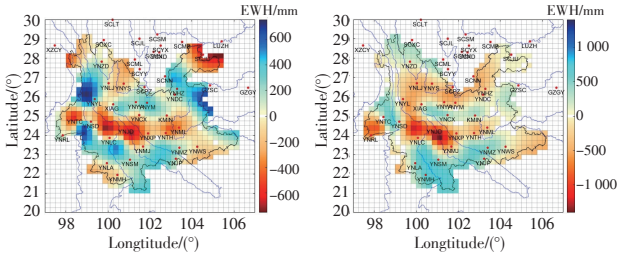


图2　GNSS观测值与GRACE、GNSS推断的EWH比较



a 2015年1月中旬　　b 2015年6月中旬

图3　基于GNSS数据反演的云南省EWH

审图号：GS(2019)3333

表1　基于GNSS反演的云南省6个主要流域TWS年振幅

流域	面积/km²	TWS年振幅	
		质量/Gt	EWH/mm
长江	99 029.32	20.954±1.35	211.6±13.6
珠江	52 450.11	8.871±0.88	169.1±16.8
红河	65 711.32	12.919±1.11	196.6±16.9
澜沧江	78 458.32	19.642±1.83	250.4±23.3
怒江	29 996.64	6.965±0.60	232.2±20.1
伊洛瓦底江	17 087.40	3.225±0.27	188.7±16.1

基于GNSS和GRACE反演的TWS结果，本文计算了2010—2021年云南6个主要流域的TWS质量异常（图4）。参考2010—2020年云南省水资源公报（http://wcb.yn.gov.cn/）的公开数据可知，2009—2012年云南省连续4年发生重大干旱，降水量普遍低于多年平均水平；2011年全省平均降水量仅为985.2 mm，比常年偏少23%，比2010年偏少16.9%；尽管2012年、2013年降水量仍低于年平均水平，但比2011年分别增加了10.6%和20.8%；随后云南省年降水量缓慢增加（2014年略有减少3.9%），2017年、2018年降水量超过了常年平均水平。上述降水变化导致的陆地水波动，在GNSS反演的TWS时间序列中均得到体现。在过去的12年中，云南省地表水资源总量达到了2 206亿m³（220.6 Gt）的峰值。

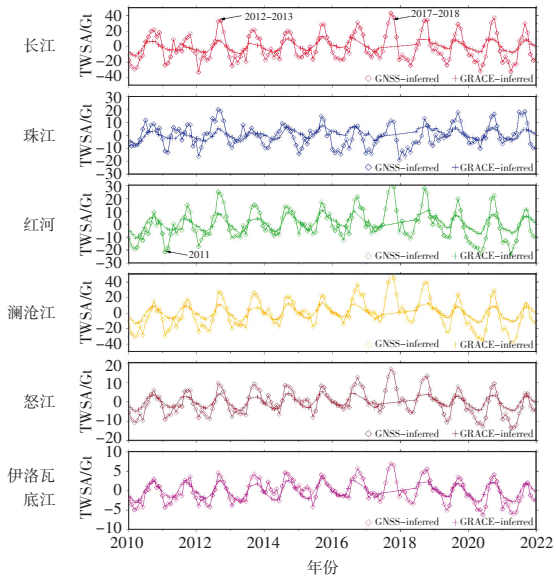


图4　云南6个主要流域的TWSA时间序列

审图号：GS(2019)3333

本文进一步分析了2019年云南省TWS的变化情况（图5），可以看出，2019年云南省降水量偏少，出现了严重的干旱事件，特别是1—5月干旱少雨天气影

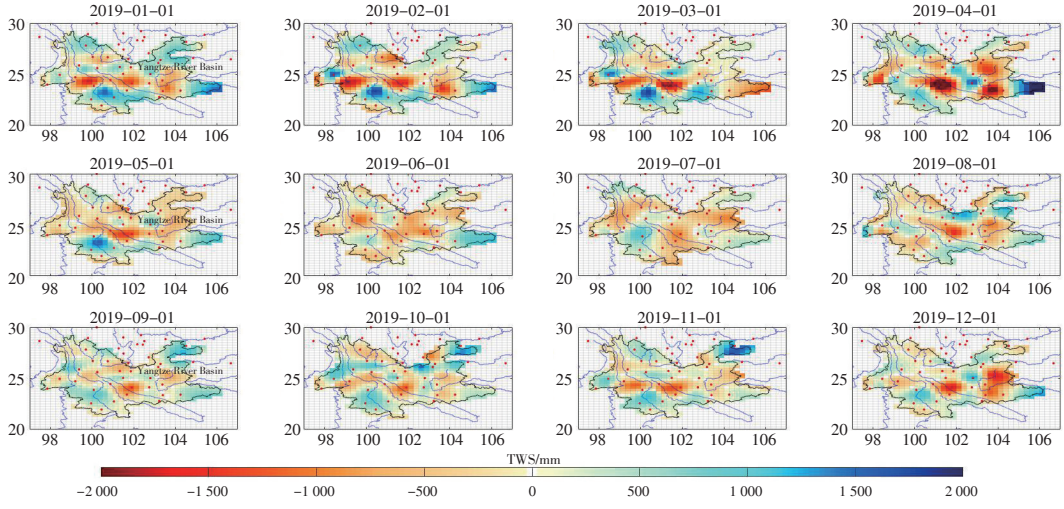


图5　GNSS格林函数反演的云南省2019年逐月TWS变化

审图号：GS(2019)3333

响更大，滇中出现了陆地水极值，4月最为严重。根据干旱发生的时间滞后性，云南省5月出现了严重干旱，加之滇西地区维持晴热少雨天气，更促使了极端干旱的发生。研究结果表明，GNSS反演的TWS能有效揭示云南省干旱的时空特征，为精准抗旱策略的制定提供了科学依据。

3 结 论

陆地水是水资源中重要的组成部分，探究陆地水在区域或局部的时空变化，对于揭示陆地水循环、掌握地表季节性形变的非线性变化以及建立维持高精度的地球参考框架具有重要意义。GNSS能捕捉到固体地球对区域水文荷载信号变化的弹性响应，从而为近实时监测陆地蓄水变化提供了可能。本文以云南地区为研究区，采用格林函数反演方法，对2010—2021年云南省TWS的时空变化进行了分析。结果表明，云南省TWS的年变化总量为72.6±6.0 Gt，不同流域差异明显，澜沧江流域TWS变化最大，年振幅为250.4±23.3 mm，珠江流域变化最小，年振幅为169.1±16.8 mm。GNSS反演的TWS时间序列周期波动可直接反映降水量变化，且与干旱的发生存在直接关联，从而论证了GNSS在监测陆地水和干旱事件中的可行性。本文研究结果为揭示陆地水循环的复杂机制和理解干旱特征提供了重要依据。

参考文献

[1] 成帅,袁林果,姜中山,等. 应用GPS数据和Slepian基函数反演川云渝地区陆地水储量变化[J]. 地球物理学报,2021,64(4):1167-1180

[2] Argus D F,Fu Y,Landerer F W. Seasonal Variation in Total Water Storage in California Inferred from GNSS Observations of Vertical Motion[J]. Geophysical Research Letters,2014(41):1971-1980

[3] Fu Y N,Argus D F,Landerer F W. GPS as an Independent Measurement to Estimate Terrestrial Water Storage Variations in Washington and Oregon[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2015,120(1):52-56

[4] Jiang Z,Hsu Y J,Yuan L,et al. Monitoring Time-varying Terrestrial Water Storage Changes Using Daily GNSS Measurements in Yunnan, Southwest China[J]. Remote Sensing of Environment,2021,12(21):24-39

[5] 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):14-33

[6] Jiang Z,Hsu Y J,Yuan L,et al. Characterizing Spatiotemporal Patterns of Terrestrial Water Storage Variations Using GNSS Vertical Data in Sichuan,China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,2021,126:e2021JB022398

[7] 杨元德,鄂栋臣,晁定波,等. GRACE估算陆地水储量季节和年际变化[J]. 地球物理学报,2009,52(12):2987-2992

[8] 朱广彬,李建成,文汉江,等. 利用GRACE时变重力位模型研究全球陆地水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(5):39-44

[9] 丁一航,黄丁发,师悦龄,等. 利用GPS和GRACE分析四川地表垂向位移变化[J]. 地球物理学报,2018,61(12):4777-4788

[10] 韩永清,宋晓蛟,赵峰. 基于GNSS数据反演云南及周边地区PWV及其精度分析[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(9):89-91

[11] 何思源,谷延超,范东明,等. 利用GPS垂直位移反演云南省陆地水储量变化[J]. 测绘学报,2018,47(3):332-340

[12] 钟波,李贤炮,李建成,等. 利用GPS垂直位移反演区域陆地水储量变化的TSVD-Tikhonov正则化方法[J]. 地球物理学报,2023,66(3):997-1014

[13] 杨兴海,袁林果,姜中山,等. 应用GPS垂向位移定量分析2011—2020年云南省极端干旱时空特征[J]. 地球物理学报,2022,65(8):2828-2843

[14] 汤苗,钟萍,姜中山,等. 利用GNSS垂直位移研究长江流域陆地水储量变化的时空分布特征[J]. 地球物理学报,2022,65(10):3780-3796

[15] 朱伟刚,马东,郑宇,等. 利用GNSS垂向位移研究云南地区水文干旱特征[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(3):295-302

[16] 陈超,邹蓉,曹家铭,等. 陆地水GNSS反演的格林函数和Slepian基函数比较分析[J]. 测绘学报,2023,52(12):2066-2077

[17] Liu N,Dai W,Santerre R,et al. A MATLAB-based Kriged Kalman Filter Software for Interpolating Missing Data in GNSS Coordinate Time Series[J]. GPS Solutions,2018,22(3):1-8

[18] 陈林,邓越. 四川省大型湖泊和水库水体长时序时空变化分析[J]. 地理空间信息,2024,22(7):72-75

[19] 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