

# 三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应月度数据集 (2002–2016) 研发

朱 钰<sup>1,2</sup>, 刘时银<sup>1,2\*</sup>, 易 颖<sup>1,2</sup>, 谢福明<sup>1,2</sup>

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091;

2. 云南省国际河流与跨境生态重点实验室, 昆明 650091

**摘 要:** 三江并流区地形、气候复杂多变, 陆地水循环时空分异显著, 水储量是刻画这一分异的重要水文要素之一。本数据集空间分辨率为  $1^\circ$ , 时间分辨率为月。该数据集是基于 SRTM, 参考 GloRiC 数据提取了三江并流区边界; 利用 2002–2016 年的 GRACE RL06 GSM 月重力场模型反演获得了三江并流区的水储量, 并使用双重尺度因子对反演的水储量进行了修正。基于 STL 等统计学方法计算了水储量的时空变化, 最后使用线性拟合的方式量化了 ENSO 和水储量的关系。该数据集中包含: (1) 研究区域边界数据 (.shp); (2) 区域水储量时空变化数据 (.nc), 包含反演的水储量和用于对比的模型结果; (3) 水储量对 ENSO 的响应数据 (.nc)。NetCDF 数据分 15 层、使用不同维 (1、2 或 3) 存储。栅格数据空间分辨率为  $1^\circ$ , 时间分辨率为月。数据集由 2 组共 9 个文件组成, 数据量 1.69 MB (压缩为 1 个文件, 559 KB)。

**关键词:** 三江并流区域界线; 水储量; ENSO; 2002–2016

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.06>

## 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.12.V1>.

## 1 前言

作为重要的“世界自然遗产”, 三江并流区位于青藏高原东部与云贵高原的过渡地区, 地形起伏大, 气候背景复杂, 陆地水循环时空变化明显, 其水文、气候以及生态环境变化备受关注; 在全球变暖的背景下, 频发的自然灾害对区域的生产、生活以及旅游开发造成了严重威胁<sup>[1]</sup>。近年来, 该地区频发的自然灾害主要以大规模的旱涝为主。相关研究指出陆地水动态循环异常是旱涝形成的主要原因, 而区域水储量的变化是水循环的主要表征之一<sup>[2–4]</sup>。因此, 利用区域水储量的异常变化可以有效地识别和监测干旱 (洪涝) 事件, 并能分析其异常变化背后的气候背景。研发三江并流区的水储量时空变化特征数据集对评估区域旱涝灾害和明晰区域陆地水循环特征具有重要的现实意义。

一个区域的水储量可通过站点监测、模型模拟的方式获得。然而前者易受地形条件限制, 监测成本高昂, 且很难获得连续的监测成果; 后者的结果依赖于模拟模型的适宜性和

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-01-21; 出版日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41761144075); 中国科学院 (2019QZKK0208); 云南大学 (YJRC3201702)

\*通讯作者: 刘时银 AAT-4278-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, [shiyin.liu@ynu.edu.cn](mailto:shiyin.liu@ynu.edu.cn)

数据引用方式: [1] 朱钰, 刘时银, 易颖等. 三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应月度数据集 (2002–2016)

研发[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(1): 45–53. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.06>.

[2] 朱钰, 刘时银, 易颖等. 三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应月度数据集 (2002–2016) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.12.V1>.

站点实测数据的验证。相比之下，通过卫星遥感数据反演水储量展示出巨大的应用潜力<sup>[5]</sup>。近年来，一些学者应用 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)数据开展了水储量反演的相关工作，在干旱监测、地下水反演、大型水库蓄放水效应和冰雪变化对海平面贡献等方面均获取了比较理想的结果<sup>[6,7]</sup>。目前，GRACE-Fo（GRACE Follow On）的数据也开放使用，且后续的卫星计划中对数据的空间分辨率不断进行改善，应用 GRACE 监测全球水储量变化有良好的前景<sup>[7]</sup>。因此，使用 GRACE 反演三江并流区的水储量，结合相关水文模型结果构建水储量变化时空特征数据集，可行性和结果的精度及有效性研究成为目前三江并流区水储量研究的重点方向之一。

在水循环过程中，气象要素发挥着重要作用。有研究表明：极端气候事件，如厄尔尼诺南方涛动（El Nino Southern Oscillation, ENSO）可通过影响大气环流而改变降水格局、诱发气温异常，最终导致区域甚至全球陆地的水储量异常，产生极端旱涝灾害<sup>[8]</sup>；全球大部分地区水储量的年际变化均与 ENSO 有较强的相关性<sup>[9]</sup>，有些区域水储量部分时段的异常几乎可以完全归因为 ENSO<sup>[10]</sup>。因此，水储量研究中，需要考量 ENSO 对其的影响，尤其是在诸如三江并流区这种特殊地理环境的地区。

2 数据集元数据简介

《三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应数据集（2002–2016）》<sup>[11]</sup>的主要元数据，如，数据集名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率等信息见表 1。

表 1 《三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应数据集（2002–2016）》元数据简表

条目	描述		
数据集名称	三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应数据集（2002–2016）		
数据集短名	TWS_ENSO_TPRB		
作者信息	朱钰 ABD-2058-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, yuzhu@mail.ynu.edu.cn 刘时银 AAT-4278-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, shiyin.liu@ynu.edu.cn 易颖 ABD-3176-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, yingyi@mail.ynu.edu.cn 谢福明 ABD-3175-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, xfm@mail.ynu.edu.cn		
地理区域	27°N–36°N, 90°E–101°E	数据年代	2002 年 8 月至 2016 年 9 月
时间分辨率	月	空间分辨率	1°
数据格式	.shp、.nc	数据量	1.69 MB
数据集组成	（1）流域边界 TPRB.shp；（2）水储量相关数据 TPRB_TWS_ENSO_2002-2016.nc		
基金项目	国家自然科学基金(41761144075)；中国科学院(2019QZKK0208)；云南大学(YJRC3201702)		
数据计算环境	Python 3.7		
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>		
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所		
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[12]</sup>		

3 数据研发方法

3.1 流域边界提取

流域边界的提取主要依赖空间分辨率为 30 m 的 SRTM，主要使用开源工具 pysheds<sup>1</sup> 及 Google Earth 平台开展边界的提取修订。具体步骤如下：

（1）使用 pysheds 对 SRTM 进行填洼、流向、汇流的计算；（2）结合研究需求（避免中下游区水库等的影响）以及先验研究，确定出水口，提取初步的边界；（3）参考 GloRiC 数据<sup>[13]</sup><sup>2</sup> 对初步的边界进行验校；（4）结合 Google Earth 平台中高分辨率影像数据，在视角海拔高度 1–2 km 情况下检查修订，获取研究区边界数据。

3.2 水储量反演

在数据集研发过程中应用美国德克萨斯大学空间研究中心（Center for Space Research, University of Texas at Austin, UTSR）发布的 GRACE LEVEL-2（RL06）GSM<sup>3</sup> 月重力场模型，时间序列为 2012 年 8 月至 2016 年 8 月。水储量的反演主要有三方面内容：（1）数据预处理；（2）重力信号转换；（3）信号衰减恢复。

（1）数据预处理

数据预处理首先对数据进行滤波等处理。需要处理的误差主要包含 GRACE 数据的 C20 项误差、南北条带误差以及高阶球谐系数误差。本项研究采用更具季节变化特征的 SLR C20 项替换 GRACE C20 项，其他的两项误差主要使用滤波的方式去除<sup>[14]</sup>。具体的处理流程如图 1 所示。

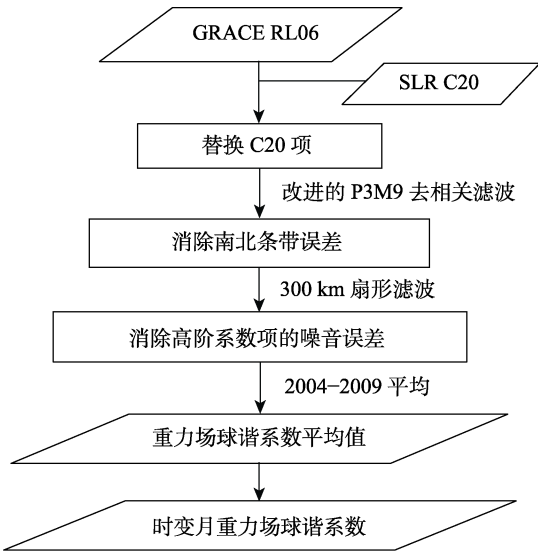


图 1 数据预处理流程图

<sup>1</sup> pysheds. <http://mattbartos.com/pysheds/>.

<sup>2</sup> WWF. HydroSHEDS database. <https://www.hydrosheds.org/page/development>.

<sup>3</sup> CSR GRACE/GRACE-FO RL06 Mascon Solutions (version 02). [http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06\\_mascons.html](http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html).

## (2) 重力信号转换

陆地水质量的变化会引起地球重力场变化<sup>[15]</sup>, 基于这一理论, 地球某一点 $(\theta, \lambda)$ 的重力信号可通过式(1)转换为陆地水储量的变化信号 $\Delta h$ <sup>[16]</sup>。在这个模型中, 陆地水储量的变化使用等效水高 (Equivalent Water Thickness, EWT) 表示,

$$\Delta h(\theta, \lambda) = \frac{R\rho_e}{3\rho_w} \sum_{n=0}^N \frac{2n+1}{1+k_n} W_n \sum_{m=0}^n W_m (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (1)$$

式中,  $R$ 、 $\rho_e$  和  $\rho_w$  均为常数, 分别表示地球的半径、地球的平均密度、水的平均密度。

$\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$  表示规格化  $n$  阶  $m$  次勒让德函数。 $k_n$  为负荷勒夫数。 $\Delta C_{nm}$ 、 $\Delta S_{nm}$  表示地球重力场球谐系数相对于其均值的变化量。 $N$  为球谐系数的阶数, 研究表明高阶项误差较大, 通常需截断高阶项, 一般取  $N=60$  进行计算<sup>[17-19]</sup>。 $W_n$ 、 $W_m$  为高斯滤波平滑函数, 可通过式(2)递推获得。

$$W_0 = \frac{1}{2\pi}, W_1 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1+e^{-2\alpha}}{1-e^{-2\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right), \dots, W_{n+1} = -\frac{2n+1}{\alpha} W_n + W_{n-1} \quad (n > 2) \quad (2)$$

式中,  $\alpha = \frac{\ln 2}{1 - \cos(r_{1/2}/R)}$ ,  $r_{1/2}$  表示滤波半径, 需要根据实际情况设定。

## (3) 信号衰减恢复

尽管对 GRACE 数据进行预处理能有效减小数据本身的误差, 但也不可避免的造成了重力信号振幅衰减。数据研发过程中采用双重尺度因子法对振幅信号进行恢复<sup>[5]</sup>, 恢复的具体步骤如下:

a) 对水文模型进行球谐展开 (展开阶数与 GRACE 相同, 这里为 60 阶), 数据生产中主要使用 GLDAS 水文模型;

b) 对展开后的球谐系数进行后处理 (后处理过程及过程中涉及的相关参数与 GRACE 数据预处理相同);

c) 分别利用处理前、后的规格化球谐系数计算对应研究区的等效水高, 获得处理前、后的等效水高时间序列  $PP_T$ 、 $AP_T$ ;

d) 对  $PP_T$ 、 $AP_T$  进行 STL 分解<sup>[20-22]</sup>, 获得两个时间序列的趋势项  $PP_{T1}$ 、 $AP_{T1}$  和季节项  $PP_{T2}$ 、 $AP_{T2}$ ;

以处理前后时间序列 (趋势项、季节项) 残差平方和最小原则, 即  $\sum (PP_{Ti} - S_i \cdot AP_{Ti})^2$  ( $i=1, 2$ ) 最小, 求取区域尺度因子  $S_1$ 、 $S_2$ ;

使用两个尺度因子分布恢复季节项和趋势项, 并使用 STL 反算获得恢复后的水储量时间序列。

## 3.3 ENSO 对水储量影响量化

采用线性拟合法度量水储量对 ENSO 的响应机制<sup>[23-24]</sup>。如果使用  $TWSC_{residuals}$  表示水储量的有效信号 (通过 STL 分解获得),  $imag(Hilbert(MEI))$  表示结果 Hilbert 变换的 ENSO 指数 MEI 的虚部, 那么 ENSO 对水储量的影响可通过式(3)衡量, 其拟合系数  $a$ 、 $b$  以及  $c$  可用来计算影响量级 (振幅 AMP) 和影响时滞 (相位 Phase) (见式(4))。

$$TWSC_{residuals} = a + b \times MEI + c \times imag(Hilbert(MEI)) \quad (3)$$

$$\begin{cases} AMP = \sqrt{b^2 + c^2} \\ Phase = \tan^{-1}\left(\frac{c}{b}\right) \end{cases} \tag{4}$$

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集由下列内容组成：（1）研究区域边界数据（.shp）；（2）区域水储量时空变化数据（.nc），包含反演的水储量和用于对比的模型结果；（3）水储量对 ENSO 的响应数据（.nc）。NetCDF 数据分 15 层，使用不同维（1、2 或 3）存储。栅格数据的空间分辨率为 1°，时间分辨率为月。数据集的详细信息见表 2。

表 2 《三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应数据集（2002–2016）》组成文件描述

数据名称	数据属性					数据量
	变量	时段	频率	分辨率	描述	
TPRB.shp	—	—	—	—	区域边界，通过 SRTM 提取，并在 Google Earth 中加以修正	1.49 MB
TPRB_TWS_ENSO_2002-2016.nc*	EWT	2002.8.1–2002.9.1	月	1°	GRACE 反演的区域格网水储量等效水高	208.0 KB
	TWS_grace_t TWS_noah_t TWS_cpc_t	2002.8.1–2002.9.1	月	—	GRACE、GLDAS-NOAH、CPC 反演的水储量时间序列，主要用于对比分析及双重尺度因子计算	
	TWS_gra_trend TWS_gra_season TWS_gra_residual	2002.8.1–2002.9.1	月	—	GRACE 反演的水储量的趋势、季节、残差特征序列	
	TWS_rate_spa	—	—	1°	GRACE 反演的水储量的空间变化速率	
	SM GW SW CW SR	2002.8.1–2002.9.1	月	—	水储量各组分时间变化特征。土壤水（SM）、冠层截留（CW）、积雪融水（SW）来自于 GLDAS-NOAH <sup>[25]</sup> ；GW 来自于 WGHM <sup>[26]</sup> ，SR 来自于 GRUN <sup>[27]</sup> 。主要用于水储量各组分特征分析	
	enso_amp	—	—	1°	ENSO 对水储量的影响量	
	enso_phase	—	—	1°	ENSO 对水储量影响的滞后时长	

\* nc 数据分多层、不同维度存储，每一层都有其对应的属性信息，包含单位、描述、引用等。数据属性中包含坐标系、投影、分辨率、处理程序等信息。

4.2 数据结果

图 2(a)、2(b)反映了水储量在空间上的变化特征。水储量的变化空间分异明显，西南方向表现出下降趋势，西北方向表现为上升趋势，怒江流域下降最为明显，然而三江源头地区水储量却呈现增加状态。图 2(c)反映了水储量在时间轴上的变化。从 2002–2016 年，三江并流区的总的水储量呈现明显的下降趋势，且季节变化特征十分明显。从残差项的波动可以看出区域水储量有明显异常信号如 2003 年、2004 年的春季，2006 年、2015 年的冬季等，这指示着这些年份区域出现了旱（涝）灾情。图 3 反映了 ENSO 对区域水储量的影

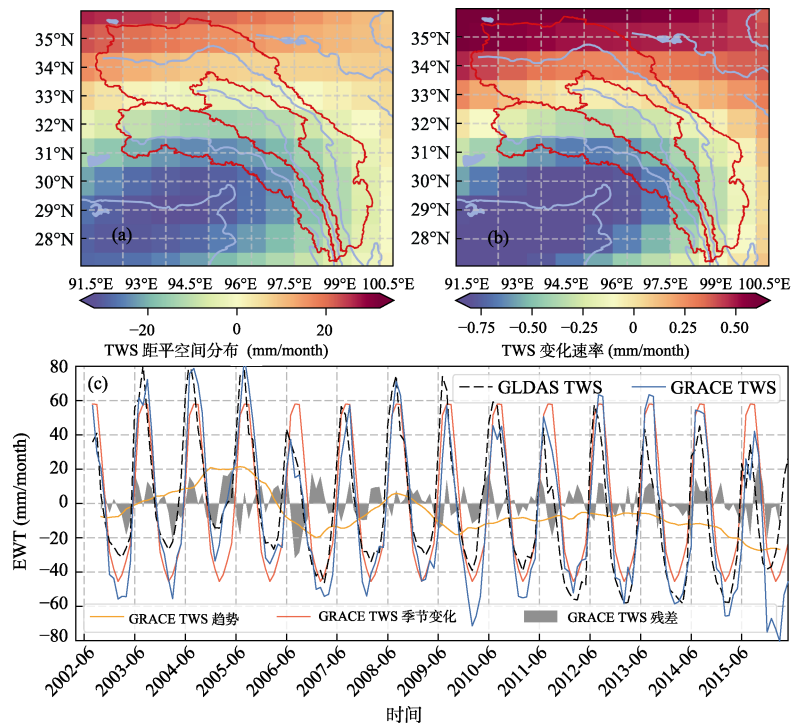


图 2 GRACE 水储量 (TWS 表示水储量) 图。(a) 水储量距平空间分布特征图；(b) 水储量空间变化速率图；(c) 水储量时间序列及各组分变化特征图

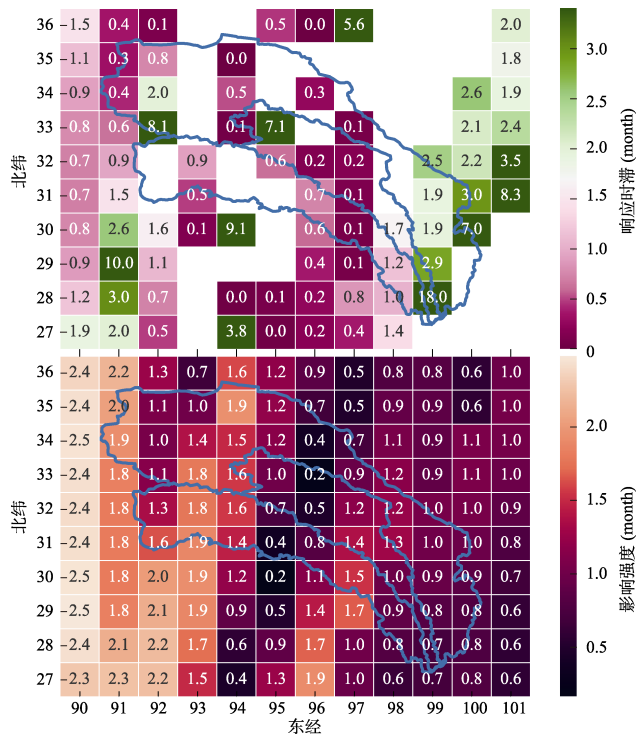


图 3 ENSO 对水储量的影响量级及二者响应的滞后时间空间分布图

响。总体上, ENSO 对于区域 TWSC 的影响强度为每月 0.95 mm, TWSC 对于 ENSO 的响应时滞达到 2.72 个月, 对比图 2(a)和图 3, 可以发现 ENSO 对水储量的影响量级大的区域, 水储量的亏损也较为严重, 尤其在怒江流域。

### 4.3 数据验证

在反映区域土壤水方面, GLDAS 模型具有良好的模拟效果。一般而言, 区域水储量的主要组分是土壤水。因此, 使用 GRACE 反演的区域水储量的结果与 GLDAS 水文模型反演的水储量进行了对比, 以验证反演结果的有效性。从图 4 可以看出二者在时间轴上具有较好的一致性,  $R^2$  达到 0.86 ( $P<0.000,1$ ), 且去除季节项后仍有较高一致性 ( $R^2=0.52$ ,  $P<0.000,1$ )。此外, 研究中还利用站点观测数据从水量平衡角度计算了站点的水储量, 并与 GRACE 反演的水储量进行了对比, 结果表明尽管反演的水储量难以捕捉细小的时变特征, 但二者相关系数达到 0.68, 且反演结果的量级、变化趋势均与实测一致<sup>[5]</sup>。

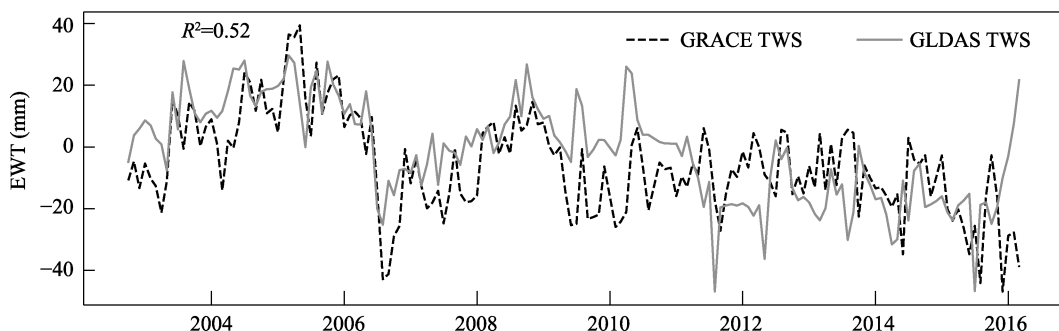


图4 去除季节项后 GRACE 与 GLDAS 反演的水储量时间变化图

## 5 讨论和总结

本研究以 GRACE RL06 月时变重力场数据为基础, 反演了三江并流区的水储量。采用统计学方法分解了水储量的时空特征, 并对其变化进行了分析, 量化了 ENSO 对区域水储量变化的影响。研究中产出的数据集有助于辅助开展本地区陆地水循环相关的监测研究工作。

基于 GRACE 生产的区域水储量数据集空间分辨率较粗 ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), 这主要是由于重力卫星的特性决定的, 因此, 尽管本数据集中的结果能较好地反映水储量的变化特征, 但如果要分析某一较小空间单元的水储量变化特征, 反演结果的不确定性就会明显增加, 此时, 数据的结果需要使用站点数据或者高分辨率卫星观测的气象资料加以补充评估。

本数据集能够简单揭示三江并流区的水循环过程, 并能从极端气候事件角度分析水储量变化原因。然而, 在高海拔地区 (主要是源头区), 由于数据集中模型模拟的冰雪融水的不确定性, 水储量各组分对于水储量变化的贡献量会受到影响, 因此, 在这些区域分析水量变化特征时需要重点考虑冰雪融水的季节特征以及高原湖泊的水量变化。

本数据集不仅包含水储量相关的数据, 还包含三江并流区的流域边界, 这些资料的整合汇编能一定程度上增加本地区研究的识别度。

**作者分工：**刘时银、朱钰对数据集的开发做了总体设计；易颖采集和处理了 GRACE 数据；朱钰设计了模型和算法；谢福明做了数据验证；朱钰撰写了数据论文。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] 骆银辉, 周道银, 朱荣华等. 世界自然遗产——“三江”并流区地质生态环境特征及其成因初探[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 94–7.
- [2] Chen, X., Jiang, J., Li, H. Drought and flood monitoring of the Liao River basin in Northeast China using extended GRACE data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1168.
- [3] Schumacher, M., Forootan, E., Van, D. A. I. J. M., *et al.* Improving drought simulations within the Murray-Darling basin by combined calibration/assimilation of GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204(1): 212–228.
- [4] Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., *et al.* 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(B5): B05404.
- [5] 朱钰, 刘时银, 易颖等. “三江并流区”水储量的时空变化特征及其对 ENSO 的响应[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 1–10.
- [6] 冯伟, 王长青, 穆大鹏等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1630–1642.
- [7] Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., *et al.* Contributions of GRACE to understanding climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 358–369.
- [8] Zhang, Z., Chao, B. F., Chen, J., *et al.* Terrestrial water storage anomalies of Yangtze River Basin droughts observed by GRACE and connections with ENSO [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 126(1): 35–45.
- [9] Ni, S., Chen, J., Wilson, C. R., *et al.* Global terrestrial water storage changes and connections to ENSO events [J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(1): 1–22.
- [10] 金钟炜, 金涛勇. 联合 GRACE 和气象水文数据研究 2010–2016 年亚马逊平原水储量异常变化与极端气候和 ENSO 的关系[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(2): 93–97.
- [11] 朱钰, 刘时银, 易颖等. 三江并流区水储量变化及其对 ENSO 响应月度数据集(2002–2016)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.08.12.V1>.
- [12] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy>. 2014.05 (2017 年更新).
- [13] Dallaire, C. O., Lehner, B., Sayre, R., *et al.* A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 14(2): 024003.
- [14] Han, S. C., Shum, C. K., Jekeli, C., *et al.* Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(1): 18–25.
- [15] Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., *et al.* The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): L09607.
- [16] Wahr, J., Molenaar, M., Bryan, F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998,



103(B12): 30205–30229.

- [17] Longuevergne, L., Scanlon, B. R., Wilson, C. R. GRACE hydrological estimates for small basins: evaluating processing approaches on the high plains aquifer, USA [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(11): 6291–6297.
- [18] Feng, W., Zhong, M., Lemoine, J. M., *et al.* Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110–2118.
- [19] Swenson, S., Wahr, J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08402.
- [20] Rojo, J., Rivero, R., Romero-morte, J., *et al.* Modeling pollen time series using seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS smoothing [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(2): 335–48.
- [21] Sanchez-vazquez, M. J., Nielen, M., Gunn, G. J., *et al.* Using seasonal-trend decomposition based on loess (STL) to explore temporal patterns of pneumonic lesions in finishing pigs slaughtered in England, 2005–2011 [J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2012, 104(1/2): 65–73.
- [22] Cleveland, R. B., Cleveland, W. S. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess [J]. *Journal of Official Statistics*, 1990, 6(1): 3–33.
- [23] Phillips, T., Nerem, R. S., Fox-kemper, B., *et al.* The influence of ENSO on global terrestrial water storage using GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16): L16705.
- [24] Salisbury, J. I., Wimbush, M. Using modern time series analysis techniques to predict ENSO events from the SOI time series [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2002, 9(4): 341–345.
- [25] Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., *et al.* The global land data assimilation system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381–394.
- [26] Döll, P., Schmied, H. M., Schuh, C., *et al.* Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2015, 50(7): 5698–5720.
- [27] Ghiggi, G., Humphrey, V., Seneviratne, S. I., *et al.* GRUN: An observations-based global gridded runoff dataset from 1902 to 2014 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1655–1674.