

文章编号: 1008-2786-(2020)2-165-15

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000499

# “三江并流区”水储量的时空变化特征 及其对 ENSO 的响应

朱 钰<sup>1,2</sup>, 刘时银<sup>1,2\*</sup>, 易 颖<sup>1,2</sup>, 李婉秋<sup>3</sup>, 张思豆<sup>1,2</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省国际河流与跨境生态重点实验室, 云南 昆明 650091;

3. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 青藏高原东南部的“三江并流区”气候环境复杂且敏感, 陆地水循环过程空间分异明显, 在全球气候变化背景下, 区域旱涝灾害频发, 水循环过程发生变化, 刻画区域水储量时空变化特征有助于揭示灾害事件产生的原因。本文使用 GRACE RL06 数据、水文模型数据、实测数据等, 反演获得了 2002 年 4 月—2016 年 8 月“三江并流区”水储量变化时间序列及其多年变化空间分布, 分析了水储量异常与旱涝事件的联系, 进一步探讨了 ENSO 对水储量影响的强度及滞后程度, 并就水储量反演的不确定性做了讨论。获得如下结论: (1) 区域水储量处于下降状态, 除个别年份, 水储量的亏损超过 35 mm/a, 区域整体较干旱, 土壤水是水储量变化的主要组分, 区域干旱事件的发生大多与土壤水的持续下降有关; (2) 水储量变化空间分异明显, 西南下降、西北上升, 怒江流域为水储量严重亏损的区域, 水储量持续下降的区域常伴随着干旱事件的发生; (3) ENSO 对水储量变化的影响存在 2.72 个月的时滞, 每个月的影响强度为 0.95 mm, 水储量存在重大亏损的区域, ENSO 影响强度相对偏大; (4) 使用双重尺度因子能在一定程度上恢复滤波造成的误差, 但受数据空间分辨率的影响, 反演结果仍只能反映变化趋势, 难以刻画水储量变化的细部特征。

**关键词:** 水储量; 时空分异; ENSO; 青藏高原; 三江并流区

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

全球气候变化是人类社会发展面临的核心话题, 而陆地水循环与全球气候变化息息相关。“三江并流区”(Three Parallel Rivers Basin, TPRB) 位于青藏高原东南部, 且与云贵高原交界, 区域气候环境复杂, 陆地水循环时空变化明显。作为重要的“世界自然遗产”, 其生态、地质、水文环境等受到多方面的关注, 尤其是在全球气候变化背景下, 该地区的自然灾害素有“隔里不同天, 一山有四季, 十年有九

灾, 无灾不成年”的说法, 近年来其异常自然灾害更是受到政府等相关部门的高度重视。这类自然灾害主要以大面积的长年干旱及局部的洪涝为主要代表, 研究表明, 陆地水动态循环异常是导致灾害发生的重要原因。区域水储量时空变化是其主要的表现方面, 用区域水储量的异常变化可以很好地探测区域的干旱(洪涝)事件, 并能就异常变化分析其背后的气候驱动因素<sup>[1-3]</sup>。因此, 探究 TPRB 的水储量

**收稿日期** (Received date): 2019-09-30; **改回日期** (Accepted date): 2020-03-18

**基金项目** (Foundation item): 云南大学引进人才科研项目 (YJRC3201702); 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (41761144075); 云南大学第十届研究生科研创新项目 (2018Z099)。[Introducing Talent Research Projects In Yunnan University (YJRC3201702); Projects of International Cooperation and Exchange, NSFC (41761144075); The Tenth Graduate Research Innovation Project In Yunnan University (2018Z099)]

**作者简介** (Biography): 朱钰 (1992-), 男, 甘肃平凉人, 博士研究生, 主要研究方向: 水文过程模拟。[ZHU Yu (1992-), male, born in Pingliang, Gansu province. Ph. D. candidate, research on hydrological process simulation] E-mail: yuzhu@mail.ynu.edu.cn

\* **通讯作者** (Corresponding author): 刘时银 (1963-), 男, 研究员, 主要研究方向: 冰冻圈与水循环。[LIU Shiyin (1963-), male, professor, specialized in the cryosphere and water circulation]

时空变化特征具有重要的现实意义。

在水储量的时空特征反演方面,传统的站点监测能取得较好的效果,然而一旦流域过大,其监测的成本会大幅提高、监测数据的时间连续性也很难保证,且地形复杂的地区,安装站点十分困难。因而,学者们将目光转向水文模型模拟,但这种模拟结果仍依赖于实测站点数据的校验。相比之下,Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 卫星数据显示出巨大的应用潜力,其全球覆盖的特性及对大尺度地球表层质量变化信号的敏感性,使其成为监测流域水储量变化的有效手段,许多学者应用 GRACE 数据进行了不同流域(地区)的水储量反演及相关研究,如中国华北平原、长江流域、黄河流域、三峡库区的水储量变化的反演估算<sup>[4-7]</sup>;亚马逊河 2005 年干旱的监测<sup>[8]</sup>;加利福尼亚州地下水储量估算以及埃及努比亚地下蓄水层的补给消耗率的探究<sup>[9]</sup>等。

应用 GRACE 反演获得的水储量特征仅仅是反映区域干旱(洪涝)的一个标识量,而探究造成水储量变化的气候现象才能明确区域灾害事件的具体产生原因。研究表明,极端气候事件是水储量产生异常的重要原因之一,以厄尔尼诺南方涛动(El Niño Southern Oscillation, ENSO)为例,其通过影响季风环流改变区域降雨和气温,使得区域水储量的时空格局发生变化,进一步引发极端旱涝灾害<sup>[10]</sup>。关于 ENSO 与区域水储量的关系,多集中在二者之间的相关性研究,如文献[11]、[12]。全球尺度上的研究表明大部分地区水储量的年际变化与 ENSO 强相

关,最大互相关系数可达 0.70(置信度 95%)<sup>[13]</sup>。

为了明确 TPRB 水储量时空变化及其与极端气候事件的联系,本文将使用 GRACE 时变重力场数据、水文模型数据、实测数据等,利用优化的数据处理方法和时间序列分析方法,获得“三江并流”区域长时间、无间断的高精度水储量变化,分析其时空分异特征,进一步探讨 ENSO 对其影响的强度及滞后程度,以期为区域旱涝灾害的评估提供数值分析资料,为当地农牧业和生态需水预测及管理提供参考。

## 1 研究区概况

“三江并流区”(Three Parallel Rivers Basin, TPRB)位于青藏高原东南部(90°E ~ 101°E, 27°N ~ 36°N),包含怒江、澜沧江和金沙江的源头至其在云南省内的流域(图 1),总面积约 39.90 万 km<sup>2</sup>。区域地形和气候系统较为复杂,平均海拔在 3000 m 以上,地势起伏变化较大,大体上呈北高南低、西高东低,自西北向东南倾斜下降趋势(图 1a)。区域由南向北跨越亚热带、高原温带和高原亚寒带,并处于西南季风和东南季风的影响范围内,气候差异较大,其生态环境与气象气候既受到青藏高原隆升所带来的影响,同时,还受到纵向岭谷地貌—水系形成演化等多方面因素的影响,区域四周被相对湿润的环境所包围,而本身又较为干旱,因此,温度较高的干热河谷现象十分常见<sup>[14]</sup>。从图 1b 中可以看出区域主要以砂壤土(sandy loam)及壤土(loam)为主,壤土土质松细适中、春季升温较慢、蓄水能力较好、土壤结

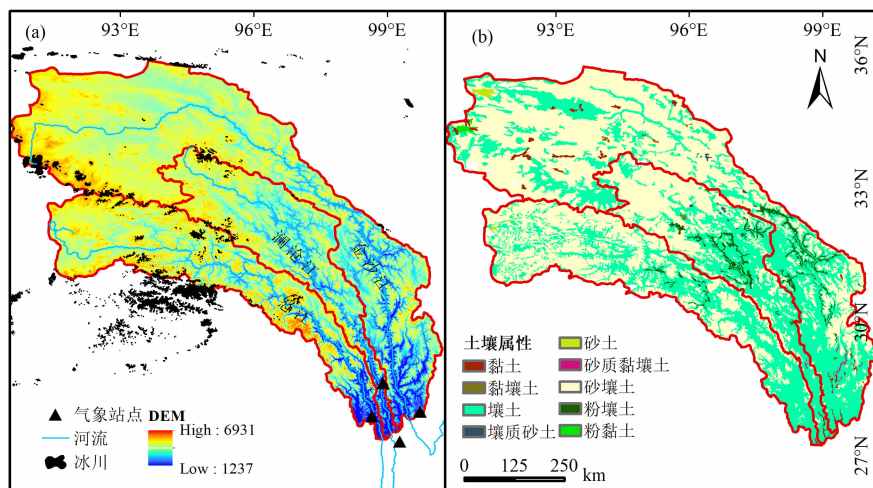


图 1 研究区概况图:(a)地形特征及河流、冰川分布;(b)土壤属性特征

Fig. 1 General conditions of study area: (a) topographic characteristics and distribution of rivers and glaciers; (b) soil properties

构良好,而砂壤土中沙石较多、干时成块、持水能力较壤土弱(土壤数据来源:Harmonized World Soil Database;网址: <http://web.archive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/>)。土质的空间分异会造成区域土壤持水力的差异,进而影响区域水储量的变化,加之该地区复杂多变的地形、气候条件,以及广泛分布的冰川,水储量的时空变异特征会更加凸显。

独特的环境与地形使得该地区拥有丰富的水力资源、矿产资源、生物资源与旅游资源,这些资源与人类生存、发展以及资源开发息息相关。研究表明近年来该地区的气候因子呈现出年平均气温升高、年降水量在增多之后又开始减少、年蒸发量增大的趋势,气候有干旱化的趋势。气候干旱化致使该地区水资源短缺、草场退化、土地沙漠化及水土流失等生态环境问题频发,进一步产生了一系列恶性循环<sup>[15]</sup>。因此,揭示作为表征区域水资源指标的水储量时空变化规律及其对气候气象事件的响应程度至关重要。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究数据

#### 2.1.1 GRACE RL06

GRACE 卫星是获取高精度地球重力场时变特征的主要途径和手段,其采集的数据在地球动力学、水文学等领域备受关注<sup>[16]</sup>。本文使用美国德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, University of Texas at Austin, UTCSR)生产的 GRACE LEVEL-2(RL06)GSM 月重力场模型,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间分辨率为 1 月,时间序列为 2002 年 4 月—2016 年 8 月,重力球谐系数均截断至 60 阶。RL06 在表现形式上仍然与 RL05 一致,均为扣除了非潮汐大气和海洋影响、各种潮汐影响以及日月等行星引起的重力扰动等影响的正则化球谐系数,但 RL06 数据采用了一些新背景场,对处理方法进行了改进,数据信号误差,尤其南北条带的误差有明显减小<sup>[17]</sup>。

GRACE 月重力场模型本身存在一定的误差,因此需要进行精化的处理。研究表明 SLR 的 C20 精度高于 GRACE 数据 C20 项,且更具季节变化特征,因此,用 SLR 的 C20 项替换 GRACE C20 项<sup>[18-19]</sup>。

此外,南北条带误差及高阶球谐系数误差也需要进行改正,本文采用改进的 P3M9 去相关滤波法剔除南北条带误差,300 km 扇形滤波降低高阶球谐系数误差<sup>[6,20]</sup>。为了求取时变重力场,在完成上述处理之后,通过求月均重力场球谐系数估计研究时段内地球稳态部分质量,扣除这一稳态部分即可获取时变重力场数据。

#### 2.1.2 水文模型数据

##### (1) Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 数据

由美国宇航局哥达德飞行中心(Goddard Space Flight Center, NASA)与美国国家环境预报中心(National Centers of Environmental Prediction, NCEP)共同建立的全球水文模型 GLDAS 被广泛应用于气象、水文相关研究中<sup>[21-23]</sup>。GLDAS 主要基于多元观测数据、大气同化产品以及在分析资料模拟计算出全球的降水、土壤温度、径流、辐射通量等多种气象水文资料供各类研究人员及相关机构使用,包含了三个陆面过程模式(NOAH、CLM、Mosaic)及一个水文模型(VIC)<sup>[24]</sup>。本文在研究中使用 2002—2016 年的数据,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间分辨率为 1 月,主要用于计算尺度因子及地下水储量反演。

##### (2) Climate Prediction Center (CPC) 数据

由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 CPC 模型,以全球观测的降水、气温数据为基础,使用陆面模式建立,主要反映表层土壤水含量和积雪变化。其产品主要包含积雪数据(厚度、分布、反照率)、土壤温度、4 层土壤水含量等。本文在研究中主要使用 2002—2016 年的土壤水数据(时间分辨率为 1 月,空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ )分析 GRACE 反演的水储量与 GLDAS 及 CPC 所得水储量的相关性<sup>[25]</sup>。

##### (3) Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) 数据

GPCC 降雨量数据集,由 NOAA 地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory, ESRL)提供。该数据集是基于全球 64 400 个观测台站(包含水文监测站、气象观测站)的质量控制数据以及区域气象资料集制作而成的陆面降水资料,精度高,且数据结果中提供系统误差等信息<sup>[26]</sup>。本文使用该

数据集中 2002—2016 年  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的月值数据分析 GRACE 反演的水储量与降水及 ENSO 的联系。

### 2.1.3 ENSO 指数 (Multivariate ENSO Index, MEI)

表征 ENSO 的指数 MEI 由 NOAA 提供 (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>)。MEI 比其他的 ENSO 指数 (如 SST, SOI) 包含更多有效信息,能较好的反映大气耦合系统的性质,且更不易受到数据更新的偶然误差影响<sup>[27-28]</sup>。同时,MEI 能更好的反映 ENSO 对全球降水影响<sup>[29,30]</sup>,因此,研究中使用 2002—2016 年的 MEI 指数反映 ENSO 对于降水异常的影响。

### 2.1.4 实测站点降水与蒸散发数据

为了验证水储量反演结果的有效性,从当地气象部门搜集了 4 个站点的实测降水及蒸散发数据与反演结果进行对比。对实测数据进行剔除空值、月平均等预处理后,获得 2002—2016 年 4 个站点的时间序列,其中,维西站 (编号:56548) 靠近澜沧江流域,贡山站 (编号:56533) 位于怒江流域,香格里拉站 (编号:56543) 位于金沙江流域,德钦站 (编号:56444) 位于澜沧江流域。

## 2.2 方法

### 2.2.1 时序分解

STL (Seasonal - Trend Decomposition Procedure Based on Loess) 作为一种常用的时序分解方法,广泛应用于气象、水文相关的研究,其将时间序列  $Y$  分为趋势分量  $T$ 、周期分量 (季节分量)  $S$  及余项  $R$ ,以精细化表征时序数据在不同层面的变化特点<sup>[31-33]</sup>。STL 分为内循环及外循环,内循环主要通过去趋势、子周期平滑、子周期低通量过滤、去周期、趋势平滑等步骤拟合趋势项及计算周期分量,外循环主要调节拟合过程中权重的鲁棒性以去除异常值<sup>[33]</sup>。对于时间序列  $Y$ ,其  $i$  时刻的 STL 分解可表示为式 (1):

$$Y_i = T_i + S_i + R_i (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

研究过程中主要使用 STL 进行水储量、MEI 等时序数据的分解,以分析其各分量的特征,发掘有效信息。

### 2.2.2 区域水储量反演

地球重力场变化的主要原因之一是陆地水质量的动态变化<sup>[16]</sup>,以等效水高 (Equivalent Water Thickness, EWT) 的形式表示,区域某一点的等效水高  $\Delta h$  可通过式 (1) 计算<sup>[34]</sup>:

$$\Delta h(\theta, \lambda) = \frac{R\rho_e}{3\rho_w} \sum_{n=0}^N \frac{2n+1}{1+k_n} W_n \cdot$$

$$\sum_{m=0}^n W_m (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

式中,  $R$  为平均地球半径,取  $6.3781363 \times 10^6$  km;  $(\theta, \lambda)$  分别代表计算点的地心余纬、经度;  $\rho_e$  表示地球平均密度,取  $5.517 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_w$  表示水的平均密度,取  $1 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>;  $k_n$  为负荷勒夫数;  $\bar{P}_{nm}(\cos \theta)$  表示规格化  $n$  阶  $m$  次勒让德函数;  $\Delta C_{nm}$  与  $\Delta S_{nm}$  表示地球重力场球谐系数相对其均值的变化量;  $N$  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>[16,35-36]</sup>;  $W_n$ 、 $W_m$  为高斯滤波平滑函数,令  $r_{1/2}$  为滤波半径,高斯核函数  $W$  可通过式 (3) 递推获得:

$$\begin{cases} W_0 = \frac{1}{2\pi}, W_1 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1 + e^{-2\alpha}}{1 - e^{-2\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right), \dots, \\ W_{n+1} = -\frac{2n+1}{\alpha} W_n + W_{n-1} \quad n > 2 \\ \alpha = \frac{\ln 2}{1 - \cos(r_{1/2}/R)} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2.3 信号振幅衰减恢复

在对 GRACE 月重力场数据进行的后处理操作中会产生误差<sup>[37]</sup>,如球谐展开、空间滤波 (去相关滤波、扇形滤波等) 会使得数据信号“泄漏” (leakage)<sup>[38]</sup>。考虑到中等尺度研究区域上,有学者使用尺度因子法有效地恢复了“泄漏”误差<sup>[39]</sup>,因此,本文亦采用尺度因子法处理这一误差。

计算过程中,对于 GRACE 数据的缺失月份,根据 Wu<sup>[21]</sup> 等人的方法,采用公式 (4) 进行填补:

$$TWS^* = TWS_1 \times \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + TWS_2 \times \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \quad (t_2 > t > t_1) \quad (4)$$

式中,  $TWS^*$  (terrestrial water storage) 表示  $t$  时刻的缺失值;  $TWS_1$ 、 $TWS_2$  分别表示  $t_1$ 、 $t_2$  时刻的反演值。

为了比较哪种水文模型更适合计算这一区域的尺度因子,对 GRACE 与 CPC、GLDAS 进行对比分析。图 2 展示了三种水储量的变化曲线,可以看出三者的季节变化特征基本一致,然而 CPC 水文模型反演获得的水储量振幅明显大于 GLDAS 与 GRACE 的结果。通过计算,GRACE 与 GLDAS 结果的相关系数为 0.92,与 CPC 结果的相关系数为 0.85,因此,采用 GLDAS 水文模型计算尺度因子。

尺度因子的一般计算步骤为:对水文模型进行球谐展开(展开阶数与 GRACE 相同,为 60 阶),之后对球谐系数开展与 GRACE 相同的滤波后处理,接着计算滤波前后的 EWT,最后通过前后时间序列残差平方和最小拟合尺度因子。

从图 2 可以看出,水储量的变化包含季节特征及趋势特征,因此,本文对 GLDAS 获得的水储量滤波前后的时序数据进行 STL 分解,结果如图 3,可以看出滤波前后,季节项的峰值有微小的变动,趋势项的变化较为明显,尤其在 2011—2015 这一时段。余项,反映反演水储量的波动特征,其变化无法用简单的尺度因子刻画,且从时序上看滤波前后差异不大,因此这里不做分析。可以肯定,滤波对季节项、趋势项的影响是不尽相同的,因此本文分别计算趋势项及季节项的尺度因子(这里定义为双重尺度因子)以恢复信号的损失。

分别使用较为常用的单一尺度因子(计算结果

为 1.04,接近于 Long<sup>[40]</sup>的结果)及上文定义的双重尺度因子(计算结果为趋势项:1.13,季节项:1.03)进行滤波后的信号恢复,结果如图 4 所示,可以看出,使用单一尺度因子及双重尺度因子恢复的结果除个别峰值有微小差别外,基本一致,计算得到原始结果与单一尺度因子恢复结果的  $R^2$  为 0.9889,与双重尺度因子恢复结果的  $R^2$  为 0.9893。这说明尽管双重尺度因子恢复结果略好于单一尺度因子,但使用单一尺度因子已然能取得较好的恢复效果。造成这一结果的原因可能是由于区域信号分布较为均匀,滤波没有对结果产生较大影响。最终,本文选用双重尺度因子恢复 GRACE 反演水储量信号振幅的衰减量。

## 2.2.4 水量平衡过程

区域水储量在垂直方向包括地表径流(河、湖、水库等)(SR)、地下水(GW)、土壤水(SM)、冰雪融水(SW)以及生物含水量<sup>[41]</sup>。生物含水量的变化相对较小,在研究中可以忽略不计。因此,研究区的总

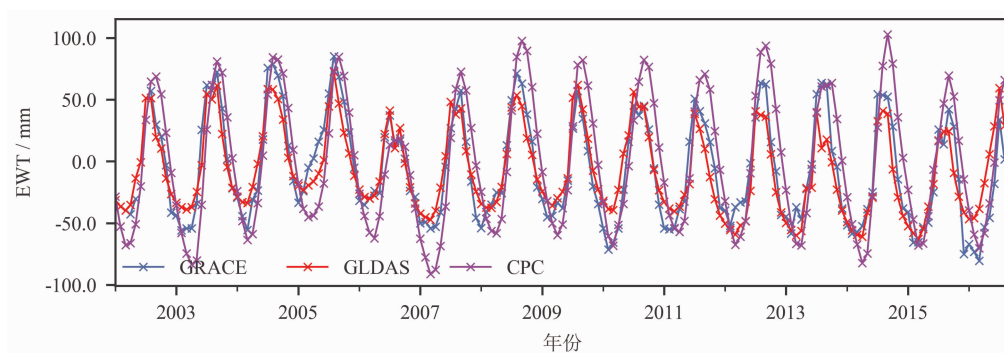


图 2 GRACE 与水文模型反演的水储量对比

Fig. 2 Comparison of terrestrial water storage inverted by GRACE and hydrological model

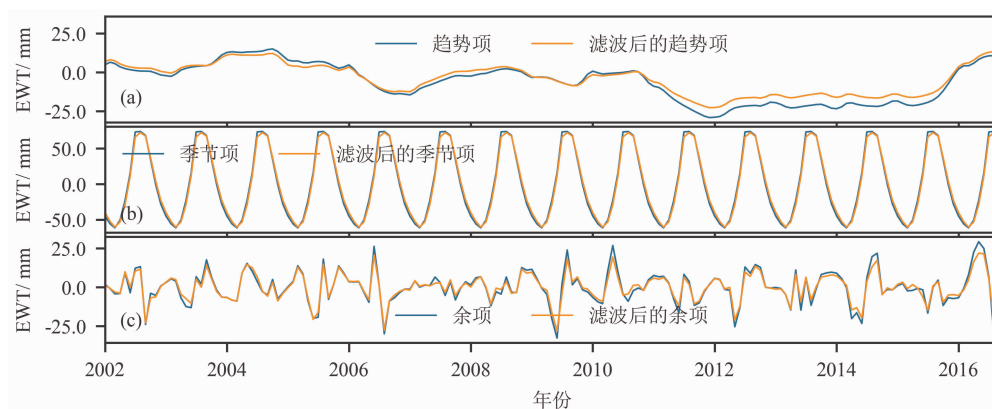


图 3 GLDAS 水储量滤波前后各分量的特征:(a)趋势项;(b)季节项;(c)余项

Fig. 3 Characteristics of each component before and after the filter of terrestrial water storage from GLDAS:

(a) trend items; (b) seasonal items; (c) residual items



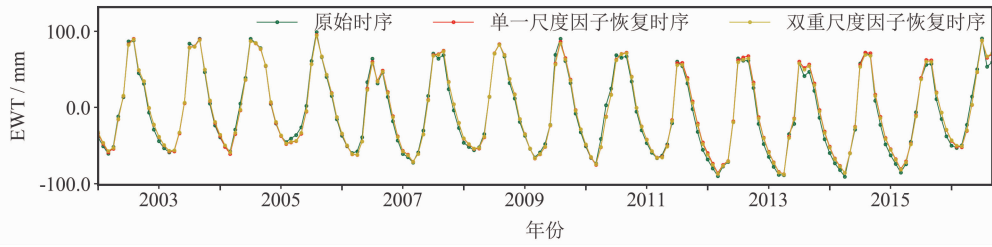


图4 GLDAS 原始水储量及使用不同尺度因子恢复获得的结果对比

Fig. 4 Comparison of original terrestrial water storage from GLDAS and the results obtained by using different scale factors

水储量变化量  $TWSC$  可以表示为:

$$TWSC = \Delta GW + \Delta SM + \Delta SR + \Delta SW \quad (5)$$

式中,  $\Delta GW$  表示地下水储量变化;  $\Delta SM$  表示土壤水含量变化量;  $\Delta SR$  为地表径流变化量;  $\Delta SW$  表示冰雪融水变化。  $\Delta TWSC$  通过 GRACE 月重力场模型数据反演获得,  $\Delta SM$ 、 $\Delta SW$  通过 GLDAS 水文模型获得。地表径流采用 GRUN 模型数据<sup>[42]</sup>, 通过该数据计算得到 2002—2014 年 TPRB 的径流变化量约为 0.60 mm/a, 根据云南省水资源公报 (<http://www.web.yn.gov.cn/list?code=xxgl2>) 2011—2015 年公布的流域年度径流深结果, 可获得金沙江、澜沧江、怒江地表径流变化趋势分别约为 16.16 mm/a、-3.25 mm/a、-21.97 mm/a, 进一步通过流域面积加权获得整个区域的等效水高变化量约为 0.48 mm/a, 这说明 GRUN 数据能较好的刻画流域的径流变化。地下水采取已广泛应用的 WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model) 模型数据<sup>[43]</sup>。

从水循环的角度看, 水储量的变化量  $\frac{d_{TWS}}{d_t}$  还可利用降水  $P$ 、蒸散发  $ET$ 、地表径流变化表达 (式 (6))<sup>[44-45]</sup>。忽略一些细微的水文循环过程,  $\Delta TWSC$  可近似等于  $\frac{d_{TWS}}{d_t}$ 。

$$\frac{d_{TWS}}{d_t} = \Delta P - \Delta ET - \Delta SR \quad (6)$$

#### 2.2.5 ENSO 与 $TWSC$ 关系的量化

为了量化  $TWSC$  对于 ENSO 的响应机制, 采用线性拟合法进行度量<sup>[46-47]</sup>。具体步骤如下:

首先, 对  $TWSC$  进行 STL 分解获取其有效信号; 接着使用式 (7) 拟合有效信号与 ENSO 指数  $MEI$  的关系, 并计算拟合系数; 最后通过式 (8) 计算振幅  $AMP$  及滞后相位 (Lag Phase), 其中  $AMP$  表示 ENSO 对  $TWSC$  影响量级的大小,  $Phase$  表示影响时滞。

$$TWSC_{residuals} = a + b * MEI + c * \text{imag}(\text{Hilbert}(MEI)) \quad (7)$$

$$\begin{cases} AMP = \text{sqr}(b^2 + c^2) \\ Phase = \tan^{-1}\left(\frac{c}{b}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $TWSC_{residuals}$  表示水储量的有效信号;  $\text{imag}(\text{Hilbert}(MEI))$  表示经过 Hilbert 变换后的  $MEI$  指数虚部;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合系数。

### 3 结果

#### 3.1 TPRB 水储量时空变化

从图 5 可以看出, 2002—2016 年, 该流域总的水储量呈现下降趋势, 下降率约为 -0.24 mm/a, 但是 2002—2005 年的水储量却有上升。采用 2.2.1 的方法对水储量时间序列进行分解, 从分解后的信号中可以发现, 水储量的季节变化特征十分明显, 冬季、春季为枯水期, 夏季、秋季为丰水期, 其振幅保持在  $\pm 50$  mm, 没有明显的年际变化。趋势项的变化特征与水储量的总体变化基本一致, 这说明区域水储量的变化主要取决于趋势项。残差项反映了区域水储量波动的特征, 是区域中干旱或洪涝灾害最有力的证据。可以看出, 水储量的波动没有明显规律, 但有明显的异常信号, 如 2003 年、2004 年的春季, 2006 年、2015 年的冬季等。表 1 直观的展现了每一年的水储量的收支情况, 可以发现除个别年份外, 水储量的亏损均在 35 mm 以上, 区域整体上偏干旱, 然而, 水储量的盈余量基本保持在 30 mm 以上, 这较为符合干热河谷景观的特征。从水储量收支平衡看, 从 2003—2015 年间, 有 7 年均表现出水储量的亏损, 较为严重的是 2004、2006 及 2011 年。根据中国气象局发布的中国气象灾害年鉴中的统计数据, 这些年份云南北部、西藏东南干旱灾情严重, 农牧业

表 1 TPRB 水储量的波动特征

Tab. 1 Fluctuation characteristics of terrestrial water storage in TPRB

年份	盈余量 /mm	亏损量 /mm	水量平衡 /mm	最大盈 余月份	最大亏 损月份
2003	68.42	51.56	16.85	9	4
2004	35.19	63.12	-27.93	7	3
2005	80.19	41.88	38.31	5	1
2006	60.95	95.38	-34.43	12	8
2007	42.25	54.10	-11.85	2	12
2008	54.50	17.59	36.92	11	1
2009	38.39	43.25	-4.86	8	6
2010	47.87	54.60	-6.73	6	2
2011	41.21	65.44	-24.24	6	9
2012	48.43	30.65	17.77	3	7
2013	55.30	38.59	16.72	7	10
2014	53.16	49.90	3.26	7	6
2015	12.49	31.08	-18.60	1	6

注：亏损和盈余是统计每个月情况的总和，亏损量是亏损月份的总和，盈余量是盈余月份的总和。

受到极大的影响，因此，可以肯定这些年份水储量的亏损与干旱有一定的联系。从水储量盈余和亏损出现最大值的月份看，2006、2007、2008、2012 及 2015 年水储量最大亏损均出现在夏秋两季，最大盈余出现在冬春两季，这与总水储量的季节变化特征是完全相反的，可以推测在这些年份，研究区的确出现过一定程度的干旱。2011 年与 2013 年 6、7 月份出现最大盈余，紧接着 9、10 月份出现最大亏损，说明这一时段研究区存在先涝后旱的现象，这与《中国气象灾害年鉴》（2012，2014）中国西南地区的灾害统计一致。从子流域的角度看，澜沧江水储量有上升

趋势，而金沙江、怒江水储量处于亏损状态，尤其是怒江流域，其水储量信号振幅变化量较大，水储量在旱季波动明显。

结合图 6a、b 中可以发现区域土壤水（SM）是区域水储量的主要组分，地表径流（SR）与地下水（GW）次之，从图 6c 看地表径流、地下水的趋势变化几乎为 0，土壤水变化是区域 TWSC 的主要贡献量。2002—2005 年其变化趋势与 TWSC 基本一致，2006—2015 年，土壤水先后经历两次下降回升，总体上趋势项均小于 0，反观这一时期的地下水、地表径流、冰雪融水（SW）趋势项基本在 0 以上，这说明区域水储量的亏损与土壤水有直接关系。土壤水是区域植物生存、生长的必要条件，当土壤持水量不能满足植物生长所需时，就容易形成干旱。可以推测区域的干旱事件的发生，尤其是云南 2009—2014 的持续干旱<sup>[15]</sup>，土壤水的持续下降是主要诱因。TPRB 的冰雪覆盖区主要位于上游源头区，因此冰雪融水的变化量量级较小，对 TWSC 贡献较小。尽管如此，其在冬春有明显的峰值，且变化量总体上大于 0，尤其在 2011 年以后，这说明流域冰雪融水在不断增加，这一点与 TPRB 源头区冰川出现负物质平衡相呼应<sup>[48-50]</sup>。地下水作为宝贵的储备水资源，备受关注，从图上看，近 10 年 TPRB 的地下水整体上变化不大，这说明尽管近 10 年 TPRB 偏旱，但地下水受到的影响却较小。2009 年以前土壤水的整体变化趋势与 TWSC 基本一致，而之后其趋势项与 TWSC 完全相反，尤其在 2011 年以后，土壤水处于持续下降的状态。从上文可知，这些年份是 TPRB 的干旱年份，这一时期地表气温较常年增加，蒸发量也随之增强，这可能是产生这一变化特征的主要原

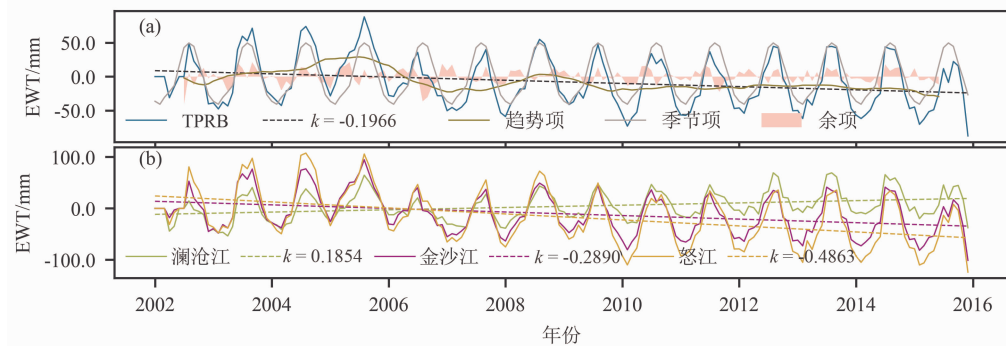


图 5 水储量总体特征及流域特征：(a) 水储量时间序列及其各组分变化特征；(b) 各子流域水储量的变化特征

Fig. 5 General characteristics and watershed characteristics of terrestrial water storage;

(a) time series of terrestrial water storage and its components variation characteristics; (b) change characteristics on TWS in sub-basins

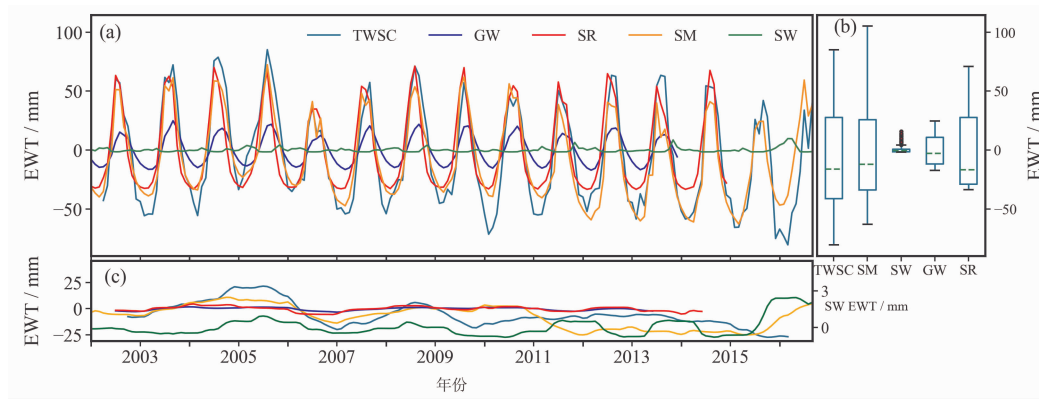


图6 TWSC 及其各分量(地下水(GW)、土壤水(SM)、地表径流(SR)、冰雪融水(SW))的时间序列:

(a) 总体特征; (b) 波动状态; (c) 变化趋势

Fig. 6 Time series of TWSC and its components including GW, SM, SR and SW:

(a) general characteristics; (b) fluctuation state; (c) trends

因。

为了反映 TPRB 的 TWSC 在空间上的变化量,对反演结果逐格网处理,获得每个格网点 2002 年 4 月—2016 年 9 月的时间序列,求取每个格网的长时间趋势项,获得水储量的月平均变化速率空间分布,如图 7 所示。可以看出,水储量的空间变化速率为  $-9.12 \sim 7.44 \text{ mm/a}$ ,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,尤其在流域源头区域。这主要是由于流域源头属于高寒地区,冰川、冰湖分布较多,常年低温,蒸发量较小,且近年来,全球气温升高造成冰川物质负平衡,区域降水增加,冰湖得到补充,土壤蓄水量也相应增大(图 8)。TPRB 的干热河谷地带的 TWSC 亏损可能是由于该地区气候炎热少雨、年际蒸发量较大造成的。因此,区域的降水、冰雪融水的增加、干热河谷炎热少雨可能是造成这种空间分异特征的主要原因。从分流域角度看,金沙江流域整体表现为上升趋势,仅在流域的下游存在微弱的下降趋势。澜沧江源头区表现为微弱的上升,下游有微弱的下降趋势,总体保持平衡状态。怒江流域的 TWSC 下降趋势较为严重,存在较大程度的亏损。

### 3.2 水储量对极端气候事件的响应

从 3.1 的分析中,可知 TPRB 的 TWSC 时空分异明显,在许多年份出现异常,流域干旱灾害频发,尤其在云南省境内,更是出现了连续多年大旱的现象。可以明确一点,水储量异常仅仅是干旱的主要诱因,其根本原因是极端气候事件引起的大气环流的时空变化。许多研究表明水储量的异常均与极端

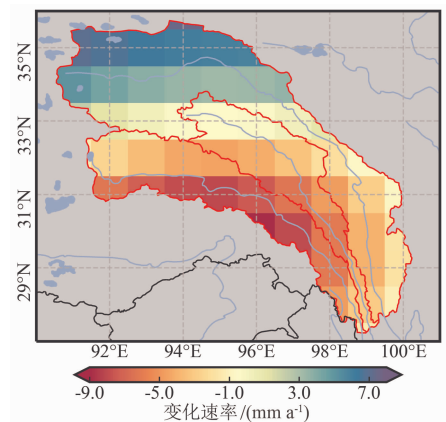


图7 TWSC 变化速率空间分布图

Fig. 7 Spatial pattern of TWSC variation

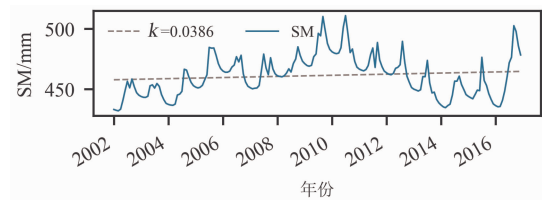


图8 水储量上升区域的土壤水(SM)变化情况

Fig. 8 Change of soil water in the area with rising terrestrial water storage

气候事件有一定联系<sup>[51]</sup>,而这类极端气候事件以 ENSO 为典型代表。ENSO 是发生在热带太平洋一种间隔不规则、准周期的气候模式,对南亚季风(印度季风)、东亚副热带季风区和热带海洋性大陆季风区的降水会产生不同程度的影响<sup>[52-53]</sup>。TPRB 位于青藏高原与云贵高原的交界处,同时受到印度



季风和东亚季风的影响。研究表明,东亚季风与印度季风的强弱与 ENSO 有较大的关系,而在季风影响下,降水分布的区域、强度会发生一定变化<sup>[54-55]</sup>。降水作为区域水储量的主要补给源,一旦其变化量出现较大波动,TWSC 也会随之变化,干旱洪涝现象就会出现<sup>[10]</sup>。

为了明确 TPRB 的 TWSC 与 ENSO 的关系,使用表征 ENSO 的 MEI 指数(提取暖事件(warm)以及冷事件(cold))以及区域降水数据进行探究分析。从图 9 可以看出,就 ENSO 与降水而言,降水较少的冬半年,多伴随着厄尔尼诺(El Niño)的出现,而降水峰值的出现,多伴随着拉尼娜(La Niña)的出现,且降水对于 MEI 峰值出现的响应存在一定的时滞性(时滞约 1~2 个月)。尽管有些年份(2007、2008、2010、2011)降水偏多的夏半年出现了 La Niña 现象,冬半年亦存在 La Niña 现象,然而降水却没有明显增加。从降水与水储量的变化特征看,二者的季节特征、变化趋势基本一致,具有较强的相关性,符合一般规律,同时,TWSC 对于降水的响应也有明显的时滞性(时滞约 1~2 个月)。综上,可以明确 ENSO 对于水储量的影响具有滞后性。此外,El Niño 对 TWSC 在冬半年的亏损有一定的影响,从图 9 中也可以明显看出除 2005 年外,受 El Niño 影响的年份,TWSC 的最大亏损量均超过 50 mm,且夏半年的盈余量也明显低于前后一年。La Niña 对 TWSC 的影响主要表现在其盈余峰值方面,在枯水期对 TWS 的变化影响不大。可以看出,就峰值而言,2007—2009 年 TWSC 先上升后下降,2010—2013 年持续上升,而这一变化与 La Niña 的峰值变化完全一致。

为进一步明晰 ENSO 对于水储量影响的量级大小及时滞月数,采用 2.2.3 描述的方法求解 TWSC 有效信号与 MEI 拟合的振幅(AMP,这里表示每月滞后强度)及相位。总体上,ENSO 对区域 TWSC 每月的影响强度为 0.95 mm,这一结果与 TWSC 的有效信号的振幅相比,较符合实际情况,但与 Phillips 等<sup>[46]</sup>获得的 ENSO 对全球水储量的影响结果相比,本文结果偏小,这可能与本文采用的季节项、趋势项分离方法与其不同有关。此外,ENSO 对 TWSC 影响的时滞为 2.72 个月,这一结果与图 9 反映的现象相符。图 10 展示了区域每一格点水储量受 ENSO 影响的量级(图 10a)及影响的时滞月份(图 10b)。结合图 8 可以发现,在水储量亏损较为严重的区域,ENSO 影响的量级也偏大。然而在 TPRB 的中部,ENSO 对 TWS 的影响却达到最小,这一现象需要进一步探讨,因为青藏高原的热效应、太平洋年际震荡等因素也会对区域水储量产生不同程度的影响<sup>[10]</sup>。区域的时滞月份从 0.5 个月到 3 个月不等,大部分区域为 2 个月左右,在 TPRB 的中部,时滞为 0.5 个月甚至更短。

## 4 讨论

### 4.1 水储量反演过程的不确定性

尽管目前 GRACE 卫星数据的分辨率较低,但从上文中的反演结果及其他学者反演的效果来看,就整个流域而言,利用经过处理的 GRACE 时变重力场球谐系数反演的区域 TWSC,能分辨厘米级的等效水高变化,以经过 1000 km 高斯滤波后的 GRACE 月重力场模型为例,其反演的 TWSC 精度在

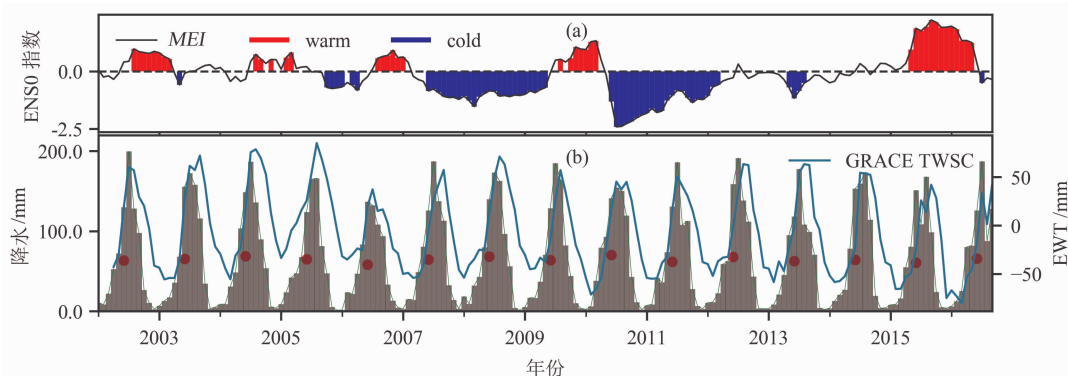


图 9 ENSO 与 TWSC 的变化特征:(a) ENSO 时间序列;(b) TWSC 和降水时间序列

Fig. 9 Variations of ENSO and TWSC: (a) time series of ENSO; (b) time series of TWSC and precipitation

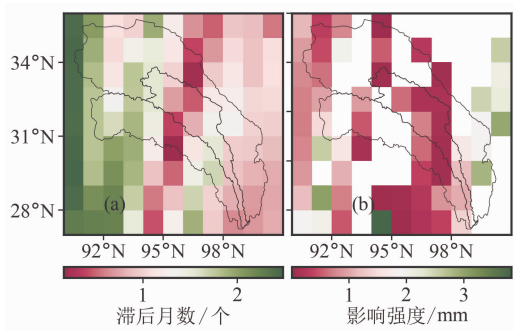


图 10 ENSO 对 TWSC 的影响强度及二者响应的滞后时间空间分布图: (a) 响应时间; (b) 影响强度

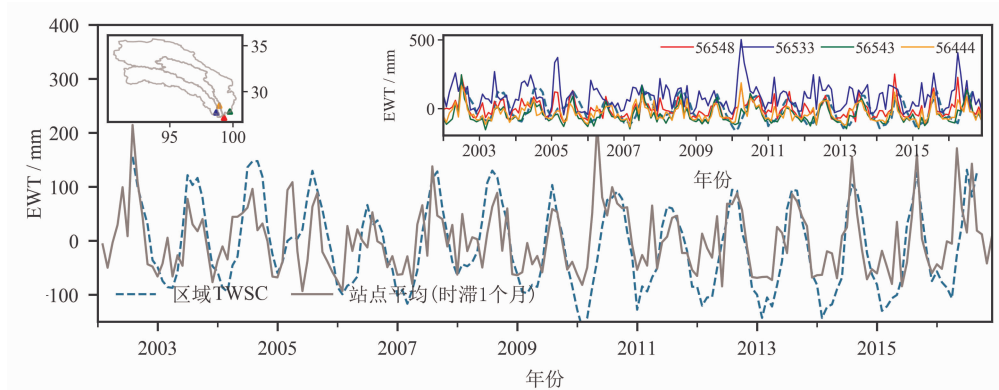
Fig. 10 Influence magnitude of ENSO on TWSC and the time-lag spatial pattern of their responses: (a) spatial pattern of response time; (b) spatial heterogeneity of influence magnitude

1 ~ 2 cm<sup>[56]</sup>。从图 2 可以看出, GRACE 获得的 TWSC 不仅与水文模型结果在 TPRB 具有较好的符合度, 且更具细节特征, 尤其是在枯水期, 波动较为明显。然而, 就反演结果的精确度而言, GRACE 时变重力场数据本身及反演过程会对结果产生较大影响, 致使结果仅能保证在变化趋势性上的准确性, 无法精确到细小的时间维度或空间中某一较小统计单元。这些影响主要反映在以下两个方面:

(1) 数据处理过程中, 为了提高高阶项的信噪比, 通常会使用滤波处理, 但是滤波过程会削弱信号振幅, 尽管使用了尺度因子对结果进行了恢复, 但是这种恢复也仅仅是修正误差, 无法达到理想效果<sup>[4, 39-40]</sup>。此外, 区域尺度因子的计算过程中引入了水文模型, 水文模型自身就存在不确定性, 这种不确定容易引发结果的误差。本文在模拟尺度因子过

程中仅仅是选择相对可靠的模型, 而未对模型的误差做出评估并加以改正, 因此, 这种误差就会难以避免的传播到反演结果中。尽管学者们不断寻求理想的方法以最大程度的减小误差, 减少反演结果对于水文模型的依赖, 但是目前仍没有理想的方法以完全消除这种误差, 研究过程中, 大多都是尽可能的将这种误差控制在较小影响分析结果的层面。

(2) GRACE 时变重力场模型数据的空间分辨率较低, 仅能监测较大尺度范围内水储量变化, 尽管本文研究区的 TWSC 量级已达到 GRACE 能感应到的程度(图 5), 然而, 这种感应程度还不足以精确表征实际情况, 尤其是对于时间维度上的细节信息以及空间维度的较小统计单元的刻画。以下对此具体分析。由于 TPRB 环境条件复杂, 实际观测站点不多, 且许多站点由于各方面原因难以获取数据, 仅搜集到位于云南境内的 4 个站点 2002—2016 年的实际降水及蒸散发数据。根据已有的研究理论及公式(6)<sup>[44]</sup>, 可以验证 GRACE 反演的 TWS 的准确性。由于缺少实测径流数据, 使用 4.1 中通过水文水资源年鉴推求的结果计算。由于实测站点分布较为集中, GRACE 反演的 TWSC 仅有 4 个格点覆盖, 因此, 使用 4 个格点的均值作为实测站点控制区域的 GRACE 反演结果。从图 11 可以明显看出四个站点的水储量波动较大, 尤其是位于怒江流域的站点(56533), 其水储量等效水高的盈余量基本在 200 mm 以上(超过 400 mm 的值可能是观测误差), 远高于 GRACE 反演的等效水高, 这可能是由于径流数据的误差造成的。其他站点的水文学水储量振幅与 GRACE 反演的 TWSC 基本一致, 但其在枯水



注: 图中数字“56 \*\*\*”表示气象站点编号。“56 \*\*\*” represents meteorological station No.

图 11 由实测数据获得的水储量结果与 GRACE 水储量结果对比

Fig. 11 Comparison of terrestrial water storage obtained from measured data and GRACE

期的波动远多于 TWSC 的波动。总体上,两种水储量的季节变化特征基本一致(去掉时滞影响后),总的变化趋势也趋同。为了更加明显的显示二者的关系,对四个站点的水储量剔除一些站点的异常值后进行平均,并做1个月的时滞处理,可以发现,结果与上述分析一致。计算可得二者的相关系数为0.68,对于旱年份的波动进行平滑处理后,二者的相关系数可达到0.87。显然,上述分析完全佐证了最初的结论,即 GRACE 反演的 TWSC 结果难以捕捉细小的时变特征、对较小统计单元的变化特征仅能表征其大体趋势。

#### 4.2 ENSO 对于 TWSC 影响的不确定性

从4.2中的分析可以得出,ENSO 对于区域 TWSC 有一定的影响,但是一些特殊时段、特殊地点水储量异常的影响程度难以具体评估,甚至很难确定这些异常是否是受到 ENSO 影响。尽管文中对于 ENSO 和 TWSC 做了定量分析,但这一过程中仅考虑了数值上的关系,而忽略了内在的机理。水储量的异常主要是降水异常导致的,但降水异常受到大气环流异常的影响,而 ENSO 是导致大气环流的因素,却不是唯一因素,因此,理论上,定量分析过程中应该对这一方面加以考虑。

TPRB 地形条件复杂,气候条件多变,青藏高原的隆升使其温度、降水异于同一纬度地区,其热效应可能会干扰 TWS 对 ENSO 的响应。研究表明青藏高原的热力异常对于临近区域的降水会产生不同程度的影响<sup>[57]</sup>,而这一热力异常与 ENSO 又有一定关系,持续稳定的 ENSO 通过印缅槽影响青藏高原地面加热,会引发春末夏初地面热力异常<sup>[58]</sup>。因此,图9中2007年6月—2009年6月与2011年—2012年持续的 La Niña 事件导致 TWSC 与 ENSO 的关系不明确,这有可能是 ENSO 影响了青藏高原热效应,而这一效应又进一步反馈到 TWSC 上造成的。

总之,不同的区域由于其地理位置不同、气候条件差异,TWSC 对于 ENSO 的响应机理应是不尽相同,只有综合考虑各方面因素,完善物理过程机制,才能减小二者响应关系的不确定性。

## 5 结论

(1)2002—2016年,TPRB 的水储量整体呈现微弱下降趋势(下降率约2.4 mm/a),但在2002—

2005年有上升趋势。水储量季节特征明显,其振幅为 $\pm 50$  mm。去除趋势项和季节项的有效信号,直观的反映了水储量的波动情况及收支情况。根据统计,除个别年份外,水储量的亏损在35 mm/a以上,2004、2006及2011年水储量亏损严重,区域整体较干旱,但凡发生于旱灾害的年份,水储量都存在异常波动。

(2)就 TWSC 各组分的变化情况看,SM 变化是 TWSC 的主要贡献量。2006—2015年 SM 处于亏损状态,SM 持续下降是这一时期的干旱事件发生的主要原因。SW 对于 TWSC 的贡献较小,但在枯水期有明显峰值,这与 TPRB 源头区冰川物质平衡有一定联系。地表径流、地下水在 TWS 中占比较大,但二者的变化量基本为0,对 TWSC 的影响较小。

(3)从空间分布看,水储量的整体变化速率在 $-9.12 \sim 7.44$  mm/a 之间,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。怒江流域是水储量亏损最严重的区域,金沙江流域有水量盈余,澜沧江基本保持水量平衡。水储量的下降受到降水、蒸发及冰川负物质平衡的共同作用,而上升区域可能受冰湖扩张的影响较大。

(4)ENSO 通过影响 TPRB 的降水时空分布而影响区域的 TWSC,研究时段内 TWSC 对于降水的响应存在1~2个月的时滞。通过 ENSO 与 TWSC 的定性定量分析发现,ENSO 暖事件 El Niño 对水储量在冬半年的亏损产生影响,冷事件 La Niña 对水储量的影响主要表现在其盈余峰值方面。总体上,ENSO 对于区域 TWSC 的影响强度为每月0.95 mm,TWSC 对于 ENSO 的响应时滞为2.72个月,在水储量亏损较为严重的区域,ENSO 影响的量级也相对较大。

## 参考文献(References)

- [1] CHEN Xuhui, JIANG Jinbao, HUI Li. Drought and flood monitoring of the Liao river basin in Northeast China using extended GRACE data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1168.
- [2] SCHUMACHER M, FOROOTAN E, DIJK A V, 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: 212–228.
- [3] 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**: B05404.
- [4] 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. [FENG Wei, WANG Changqin, MU Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints[J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 2017, **60**(5): 1630–1642]
- [5] WANG Linsong, MIKHAIL K K, MAIK T, et al. The challenge of spatial resolutions for GRACE-Based estimates volume changes of larger Man-Made lake: the case of China's three gorges reservoir in the Yangtze river[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(1): 99.
- [6] 李圳,章传银,柯宝贵,等. 顾及 GRACE 季节影响的华北平原水储量变化反演[J]. *测绘学报*, 2018, **47**(7): 940–949. [LI Zhen, ZHANG Chuanyin, KE Baogui, et al. North China plain water storage variation analysis based on GRACE and seasonal influence considering[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(7): 940–949]
- [7] 尼胜楠,陈剑利,李进,等. 利用 GRACE 卫星时变重力场监测长江、黄河流域水储量变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, **34**(4): 49–55. [NI Shengnan, CHEN LiJian, LI Jin, et al. Terrestrial water storage change in the Yangtze and Yellow River basins from GRACE time-variable gravity measurements[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, **34**(4): 49–55]
- [8] SCANLON B R, LONGUEVERGNE L, LONG D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA[J]. *Water Resources Research*, 2012, **48**(4): W4520.
- [9] MOHAMED A, KAREM A. Quantifying modern recharge and depletion rates of the Nubian Aquifer in Egypt[J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, **39**(4): 729–751.
- [10] ZHANG Zizhan, CHAO B F, CHEN Jianli, 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**(126): 35–45.
- [11] 金钟伟,金涛勇. 联合 GRACE 和气象水文数据研究 2010–2016 年亚马孙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): 199–203. [JIN Zhongwei, JIN Taoyong. Correlation between ENSO and total water storage change anomaly with extreme weather events over Amazon basin from 2010 to 2016 estimated from GRACE and hydroclimatic data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, **39**(2): 199–203]
- [12] ANYAH R O, FOROOTAN E, AWANGE J L, et al. Understanding linkages between global climate indices and terrestrial water storage changes over Africa using GRACE products[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1405–1416.
- [13] NI Shengnan, CHEN Jianli, WILSON C R, et al. Global terrestrial water storage changes and connections to ENSO events[J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, **39**(1): 1–22.
- [14] 骆银辉,崔子良. 云南三江并流区地质环境问题研究[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2012: 12–23. [LUO Yinhui, CUI Ziliang. *Research on geologic environment in three parallel rivers of Yunnan protected areas* [M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Publishing House, 2012: 12–23]
- [15] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. *水资源保护*, 2018, **34**(3): 22–29. [RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(3): 22–29.]
- [16] 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.
- [17] 高春春,陆洋,史红岭等. 基于 GRACE RL06 数据监测和分析南极冰盖 27 个流域质量变化[J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(3): 864–882. [GAO Chunchun, LU Yang, SHI Hongling. Detection and analysis of ice sheet mass changes over 27 Antarctic drainage systems from GRACE RL06 data[J]. *Chinese Journal of Geophysics(in Chinese)*, 2019, **62**(3): 864–882]
- [18] CHENG Minkang, TAPLEY B D. Variations in the earth's oblateness during the past 28 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, **109**: B04402.
- [19] CHEN J L, WILSON C R. Low degree gravity changes from GRACE, Earth rotation, geophysical models, and satellite laser ranging[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(B6): 1–9.
- [20] SHIN-CHAN H, SHUM C K, CHRISTOPHER J, et al. Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, **163**(1): 18–25.
- [21] WU Qifan, SI Bingcheng, HE Hailong, et al. Determining Regional-Scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(2): 154.
- [22] PENG Yang, JUN Xia, ZHAN Chesheng, et al. Reconstruction of terrestrial water storage anomalies in Northwest China during 1948–2002 using GRACE and GLDAS products[J]. *Hydrology Research*, 2018, **49**(5): 1594–1607.
- [23] LI Xia, GAO Yanhong, WANG Wanzhao, et al. Climate change and applicability of GLDAS in the headwater of the Yellow River basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**: 531–540.
- [24] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, **85**: 381–394.
- [25] YUN Fan. Climate prediction center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: D10102.
- [26] SCHNEIDER U, BECKER A, FINGER P, et al. GPCC's new

- land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, **115**(1/2): 15–40.
- [27] SONI A, SYED T H. Diagnosing Land Water Storage Variations in Major Indian River Basins using GRACE observations [J]. *Global & Planetary Change*, 2015, **133**: 263–271.
- [28] WOLTER K, MICHAEL S T. El Niño/southern oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, **31**(7): 1074–1087.
- [29] POMPA-GARCÍA M, NEMIGA X A. ENSO index teleconnection with seasonal precipitation in a temperate ecosystem of northern Mexico [J]. *Atmosfera*, 2015, **28**(1): 43–50.
- [30] RÄSÄNEN T A, LINDGREN V, GUILLAUME J A, et al. On the spatial and temporal variability of ENSO precipitation and drought teleconnection in mainland Southeast Asia [J]. *Climate of the Past Discussions*, 2015, **11**(6): 5307–5343.
- [31] 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): 335–348.
- [32] SANCHEZ-VAZQUEZ M J, NIELEN M, GEORGE J G, 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.
- [33] CLEVELAND R B, CLEVELAND W S. A seasonal-trend decomposition procedure based on loess [J]. *Journal of Official Statistics*, 1990, **6**: 3–33.
- [34] 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.
- [35] FENG Wei, ZHONG Min, JEAN-MICHEL L, 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.
- [36] SWENSON S, WAHR J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(8): 1–4.
- [37] KLEES R, ZAPREEVA E A, WINSEMIUS H C, et al. The bias in GRACE estimates of continental water storage variations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, **11**(4): 1227–1241.
- [38] 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. [FENG Wei, WANG Changqing, MU Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(5): 1630–1642]
- [39] 李婉秋,王伟,章传银,等. 利用 GRACE 卫星重力数据监测关中地区地下水储量变化 [J]. *地球物理学报*, 2018, **61**(6): 2237–2245. [LI Wanqiu, WANG Wei, ZHANG Chuanyin, et al. Monitoring groundwater storage variations in the Guanzhong area using GRACE satellite gravity data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, **61**(6): 2237–2245]
- [40] LONG Di, YANG Yuting, WADA Y, et al. Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China's Yangtze River Basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **168**: 177–193.
- [41] CAO Yanping, NAN Zhuotong, CHENG Guodong. GRACE gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(1): 1021–1047.
- [42] 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.
- [43] 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*, 2014, **50**(7): 5698–5720.
- [44] CHAO Nengfang, WANG Zhengtao. Characterized flood potential in the Yangtze river basin from GRACE gravity observation, hydrological model, and In-Situ hydrological station [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, **22**(9): 05017016.
- [45] 杨大文,杨汉波,雷慧闽. 流域水文学 [M]. 北京:清华大学出版社, 2014: 21–46. [YANG Dawen, YANG Hanbo, LEI Huimin. *Watershed hydrology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 21–46]
- [46] 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): L1605.
- [47] 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**(3/4): 341–345.
- [48] KÄÄB A, TREICHLER D, NUTH C, et al. Brief communication: contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya [J]. *The Cryosphere*, 2015, **9**(2): 557–564.
- [49] ZHOU Yushan, LI Zhiwei, JIA Li, et al. Glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **210**: 96–112.
- [50] BERTHIER E, CABOT V, VINCENT C, et al. Decadal Region-Wide and Glacier-Wide mass balances derived from Multi-Temporal



- ASTER satellite digital elevation models. validation over the Mont-Blanc area[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2016, **4**:63.
- [51] OUYANG R, LIU W, FU G, et al. Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, **11**(4): 4235 – 4265.
- [52] 刘颖,倪允琪. ENSO 对亚洲夏季风环流和中国夏季降水影响的诊断研究[J]. *气象学报*, 1998, **56**(6): 681 – 691. [LIU Ying, NI Yunqi. Diagnostic research of the effects of ENSO on the Asian summer monsoon circulation and the summer precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **56**(6): 681 – 691]
- [53] JUAN Feng, WEN Chen. Interference of the East Asian winter monsoon in the impact of ENSO on the East Asian summer monsoon in decaying phases[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, **31**(2): 344 – 354.
- [54] MANHIQUE A J, REASON C C, RYDBERG L, et al. ENSO and Indian ocean sea surface temperatures and their relationships with tropical temperate troughs over Mozambique and the southwest Indian ocean[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, **31**(1): 1 – 13.
- [55] BRACCO A, KUCHARSKI F, MOLteni F, et al. A recipe for simulating the interannual variability of the Asian summer monsoon and its relation with ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 2007, **28**(5): 441 – 460.
- [56] HU Xiaogong, CHEN Jianli. ZHOU Yonghong. Seasonal variation of water storage in the Yangtze river basin measured by GRACE [J]. *Science in China Series D*, 2006, **36**:225 – 232.
- [57] 翟盘茂. 气候变化与灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 89 – 124. [ZHAI Panmao. *Climate change and disasters*[M]. Beijing: China Meteorological, 2009: 89 – 124]
- [58] 李栋梁, 何金海, 汤绪, 等. 青藏高原地面加热场强度与 ENSO 循环的关系[J]. *高原气象*, 2007, **26**: 39 – 46 [LI dongliang, HE Jinhai, TANG Xu, et al. The relationship between the intensity of surface heating fields over the Qinghai-Xizang plateau and ENSO cycle[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, **26**: 39 – 46]

## Spatiotemporal Changes of Terrestrial Water Storage in Three Parallel River Basins and Its Response to ENSO

ZHU Yu<sup>1,2</sup>, LIU Shiyin<sup>1,2\*</sup>, YI Ying<sup>1,2</sup>, LI Wanqiu<sup>3</sup>, ZHANG Sidou<sup>1,2</sup>

(1. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650091, Yunnan China;

2. Institute of International Rivers and Eco-Security Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan China;

3. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong China)

**Abstract:** The complex and sensitive climate conditions and natural environment in Three Parallel Rivers Basin (TPRB), located in the southeastern Tibetan Plateau, China, leads to spatial differentiation of terrestrial water cycle. Under the background of climate change, the increasing frequency and intensity of natural disasters, for example, floods and droughts, results in changing of water balance. Therefore, it is necessary to analyze the possible causes of these events through characterizing the change of terrestrial water storage (TWSC). For this purpose, the GRACE RL06 gravity field data, hydrological model data, and measured data were employed to obtain uninterrupted and high-precision TWSC in the TPRB from April 2002 to August 2016. Spatial and temporal differentiation characteristics of TWSC, using different methods, were acquired to qualitatively and quantitatively analyze the response to extreme climate events. Furthermore, the impact of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on TWSC was explored, and the uncertainties of TWSC driven by GRACE were discussed. Some findings were shown as follows: (1) There was a downward trend on TWSC in TPRB during study period. Except for individual years, the loss of TWSC was more than 35 mm/a. The main component of TWSC was the change of soil moisture, so it could be inferred occurrence of regional drought events was mostly related to the continuous decline of soil moisture. (2) The spatial differentiation of TWSC was obvious, with a downward trend in the southwest and an

upward trend in the northwest. Of the whole study area, Nujiang basin is the area with the largest loss of TWSC. The area where water reserves had declined severely was the area where extreme drought occurs. (3) The influence of ENSO on TWSC exhibited a 2.72 month time lag and an amplitude change of 0.95 mm per month. The influence intensity of ENSO in regions where water reserve showed a significant loss was relatively large. (4) Although the error caused by filtering could be restored to a certain extent by using double-scale factor method, the inversion results, affected by spatial resolution of the data, could only reflect the tendency of TWSC and be of difficulty to describe the detailed characteristics of TWSC.

**Key words:** terrestrial water storage (TWSC); spatiotemporal differential; ENSO; Tibetan Plateau; Three Parallel Rivers Basin (TPRB)

---

## 美国锡安国家公园西庙山——丹霞方山

(潘志新,海南大学旅游学院)

锡安国家公园(Zion National Park)位于美国犹他州西南部,面积约 590 km<sup>2</sup>,是美国西部红层的典型代表,发育了众多丹霞崖壁、方山和峡谷等景观。公园内形成丹霞地貌的红层主要形成于侏罗纪,以陆相红色细砂—粉砂岩为主。其中,形成于早—中侏罗世的 Navajo 组砂岩是锡安国家公园丹霞崖壁发育的地层,为典型风沙沉积,具大型板状交错层理。

锡安国家公园的丹霞地貌主要分布在公园东南部的锡安峡谷(Zion Canyon)两侧,经流水切割侵蚀,巨厚的 Navajo 组砂岩完全出露,形成连续的直立陡崖。在 Navajo 砂岩崖壁顶部,除局部被侵蚀残余的 Temple Cap 组覆盖,基本为平坦的高原面。Temple Cap 组因沉积厚度较小(60 m 以内),形成的山崖体量很小,它叠加在高大的 Navajo 砂岩崖壁上,远望犹如建于山顶的寺庙,如位于锡安峡谷西侧的西庙山(the West Temple)。