

陈威, 钟敏, 冯伟等. 2020. 2005—2017 年两次强 ENSO 事件对中国区域陆地水储量变化影响的卫星重力观测. 地球物理学报, 63(1):141-154, doi:10.6038/cjg2020M0259.

Chen W, Zhong M, Feng W, et al. 2020. Effects of two strong ENSO events on terrestrial water storage anomalies in China from GRACE during 2005—2017. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(1):141-154, doi:10.6038/cjg2020M0259.

## 2005—2017 年两次强 ENSO 事件对中国区域 陆地水储量变化影响的卫星重力观测

陈威<sup>1,2</sup>, 钟敏<sup>1,2</sup>, 冯伟<sup>1\*</sup>, 钟玉龙<sup>1,2</sup>, 许厚泽<sup>1</sup>

1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 近年来极端气候事件的频发对全球和区域性水循环产生了重大影响,特别是 2005—2017 年间两次强 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)事件使得全球陆地水储量出现了较大的年际波动. GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星随着数据质量的提高、后处理方法的完善和超过十年的连续观测,捕捉陆地水储量异常的能力明显提高,这为研究 2005—2017 年间两次强 ENSO 事件对中国区域陆地水储量变化的影响提供了观测基础. 本文综合利用 GRACE 卫星重力数据、GLDAS 水文模型和实测降水资料分析了中国区域陆地水储量年际变化和与 ENSO 的关系. 研究发现:长江流域中、下游地区和东南诸河流域与 ENSO 存在较高的相关性,与 ENSO 的相关系数最大值分别为 0.55、0.78、0.70,较 ENSO 分别滞后约 7 个月、5 个月和 5 个月. 其中长江流域下游地区与 ENSO 的相关性最强,2010/11 La Niña 和 2015/16 El Niño 两次强 ENSO 事件使得陆地水储量分别发生了约 -24.1 亿吨和 27.9 亿吨的波动. 在 2010/11 La Niña 期间,长江流域下游地区和东南诸河流域陆地水储量异常约在 2011 年 4—5 月达到谷值,而长江流域中游地区晚 1~2 月达到谷值. 在 2015/16 El Niño 期间,长江流域中、下游地区和东南诸河流域陆地水储量从 2015 年 9 月到 2016 年 7 月持续出现正异常信号. 其中,2015 年秋冬季(2015 年 9 月至 2016 年 1 月)陆地水储量异常明显是受此次 El Niño 同期影响的结果;2016 年春季(4—5 月)陆地水异常是受到此次厄尔尼诺峰值的滞后影响所致;2016 年 7 月的陆地水储量异常则与西北太平洋存在的异常反气旋环流有关.

**关键词** GRACE; 陆地水储量异常; ENSO 事件; 相关性

doi:10.6038/cjg2020M0259

中图分类号 P223

收稿日期 2018-05-29, 2019-08-22 收修定稿

### Effects of two strong ENSO events on terrestrial water storage anomalies in China from GRACE during 2005—2017

CHEN Wei<sup>1,2</sup>, ZHONG Min<sup>1,2</sup>, FENG Wei<sup>1\*</sup>, ZHONG YuLong<sup>1,2</sup>, XU HouZe<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In recent years, the frequent occurrence of extreme climate events has had a great impact on the global and regional water cycle, of which two strong El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events from 2005 to 2017 have caused significant inter-annual fluctuations of terrestrial water storage (TWS). With the improvement of data quality, the advancement of post-processing

基金项目 国家自然科学基金(41774094, 41474063, 41431070), 中国科学院战略性先导科技专项(XDB23030100)资助.

第一作者简介 陈威,男,1992 年生,博士生,主要从事卫星大地测量与全球变化研究. E-mail: chenwei@whigg.ac.cn

\* 通讯作者 冯伟,男,1984 年生,副研究员,主要从事卫星大地测量与全球变化研究. E-mail: fengwei@whigg.ac.cn

methods and the persistence of observations more than one decade, the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) twin satellites can be used to monitor long-term terrestrial water storage anomalies (TWSA) accurately, which makes it possible to study the correlation between TWSA and ENSO events. Here we estimate TWSA from GRACE, soil moisture storage anomalies (SMSA) from Global Land Data Assimilation System (GLDAS) models, and precipitation anomalies in main river basins of China and quantify their correlations with ENSO events. This study shows that, among main river basins of China, the typical ENSO-related regions are located in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin (YRB) and the Southeastern River Basin (SRB), with maximum correlation coefficients between TWSA and ENSO of 0.55, 0.78 and 0.70, respectively. The TWSA in these three typical ENSO-related regions lag behind ENSO by  $\sim 7$  months,  $\sim 5$  months,  $\sim 5$  months, respectively. Among them, ENSO has the greatest impact on the lower reach of YRB. During the two strong ENSO events (i. e., 2010/11 La Niña and 2015/16 El Niño), the magnitude of TWS fluctuations reaches  $-24.1$  Gt and  $27.9$  Gt, respectively. During the 2010/11 La Niña period, TWSA over the lower reach of YRB and the SRB reach the minimum around April to May 2011; while the minimum of TWSA over the middle reach of YRB happened 1–2 months later. During the 2015/16 El Niño period, TWS increased continuously in the middle and lower reaches of YRB and the SRB, due to continuous El Niño from autumn–winter of 2015 to early 2016. Another two anomalies in TWS in April–May of 2016 and July 2016 are related to the lagging effect of 2015/16 El Niño, which are caused by the lagging effect of the persistent abnormal anticyclonic circulation in the western North Pacific. It is demonstrated that GRACE has an unprecedented superiority in detecting the correlations between TWSA and ENSO.

**Keywords** GRACE; Terrestrial Water Storage Anomaly (TWSA); ENSO events; Correlation

## 0 引言

中国作为世界上人口最多的国家,虽然水资源总量丰富,但是仍存在着人均水资源量占有量少、分布不均匀、易受极端气候影响等问题。因此,研究中国区域陆地水资源变化特别是极端气候事件对中国区域陆地水储量的影响具有较高的社会效益和科研价值。陆地水储量(Terrestrial Water Storage, TWS)是指陆地表面及以下的水量总和,是水循环系统中的重要组成成分。从水量垂直分布上看,陆地水储量是由土壤含水量(Soil Moisture Storage, SMS)、地表水储量、冰川冻土积雪和地下水储量组成(Li et al., 2012);从水量平衡方程上看,陆地水储量的变化是由降水、蒸发、径流和地下水等活动的综合反映(Schmidt et al., 2006)。在 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星发射之前,研究陆地水储量变化主要依赖于传统的水文观测站和陆地水文模型。但是传统的水文观测易受到观测条件制约、站点空间分布不均匀和数据质量不佳等因素的影响,这极大限制了人们对陆地水文过程(如地下水的

损耗、极地冰川的消融等)的认识与研究(Ramillien et al., 2005);陆地水文模型的输出也局限于特定的水文要素,例如 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)模型输出的只是近地表的土壤含水量变化,无法反映从地表到地下整个水储量变化(Rodell and Famiglietti, 2002)。

GRACE 重力卫星于 2002 年 3 月发射,主要通过高精度测量两颗卫星之间的距离变化(微米级精度)来定量反演全球和区域性陆地水储量的时空变化(Tapley et al., 2004; Wahr et al., 1998; 孙文科, 2002; 宁津生, 2002; 许厚泽, 2001)。在之前的研究中,大部分学者更关心的是 GRACE 的数据处理、陆地水储量的季节变化和趋势变化。Wahr 等(1998)、Swenson 和 Wahr(2002)通过理论模拟给出了 GRACE 数据获取全球和区域性陆地水储量的原理和方法;Tapley 等(2004)和 Chen 等(2010a)利用 GRACE 研究了亚马逊河流域陆地水储量的季节性变化特征;Zhong 等(2009)和 Feng 等(2013)结合水文资料发现中国华北平原陆地水储量的下降主要来自于地下水的开采。随着数据质量的提高、后处理方法的完善和连续超过十年的观测, GRACE 可以

有效地捕捉到与极端气候事件相关的陆地水储量异常(Terrestrial Water Storage Anomaly, TWSA)。其中 Zhang 等(2015)利用 GRACE 数据分析出长江流域下游地区易受到 ENSO 事件的影响,且推断该流域 TWSA 与 ENSO 存在联系的物理机制是由于降水的驱动;Luo 等(2016)结合水文模型探测到珠江流域上游地区陆地水储量处于亏损状态,且认为该流域陆地水储量在 2010 年发生的异常与 2010/11 La Niña 有关;Ni 等(2018)综合 GRACE 数据和降水资料认为热带地区陆地水储量的年际变化较大,且与 ENSO 存在较高的相关性。

ENSO 作为一种极为常见的极端气候事件,它是由于太平洋东部和中部地区的海温异常使得全球气候发生变化(Fasullo et al., 2013; Trenberth and Caron, 2000)。而中国位于太平洋西海岸的东亚地区,气候受到东亚季风的影响,且 ENSO 事件与东亚季风水汽输送和干旱洪涝等气候变化有着密切的关系(Chang et al., 2000)。Xu 等(2005)研究表明厄尔尼诺发生时中国夏季风偏弱,季风降雨带位于我国长江以南地区;卢爱刚等(2006)分析了 10 次 ENSO 事件对中国区域降水的影响,认为 ENSO 响应最为明显的区域主要发生在华北地区和长江中下游地区;邹力等(1997)研究了 10 次 ENSO 事件对中国夏季降水变化的影响,其中洪涝和干旱灾害较多出现在长江中、下游地区和华南地区。

以上研究表明了 ENSO 事件会影响中国某些区域的降水和陆地水储量变化,但是关于利用 GRACE 来探测整个中国区域陆地水储量变化与 ENSO 之间关系的研究较少。在 GRACE 卫星观测期间,2010/11 年发生了一次超强的拉尼娜事件,2015/16 年间又发生了一次持续时间较长、影响范围较广的超强厄尔尼诺事件,这为我们研究强 ENSO 事件对中国区域陆地水储量变化的影响提供了新的契机。本文结合 GRACE 重力卫星数据、GLDAS 水文模型和实测降水资料,详细研究了 2005—2017 年中国区域陆地水储量的时空变化以及与 ENSO 的相关性和时滞性,并给出了简明的物理解释。

## 1 数据和方法

### 1.1 GRACE 重力卫星数据

本文使用的 GRACE 重力卫星数据包括 CSR

RL05 level-2 月重力场球谐系数、CSR-Mascons 数据和 JPL-Mascons 数据,研究时间段为 2005 年 1 月至 2016 年 8 月,期间缺失的月数据通过三次样条插值获取。其中 CSR-Mascons 数据和 JPL-Mascons 数据均已替换 C20 项、1 阶项,扣除了冰川均衡调整(Glacier Isostatic Adjustment, GIA)的影响,并在时间和空间上采用先验信息进行约束减少了南北“条带”误差和测量误差(Watkins et al., 2015; Save et al., 2016)。而 CSR 公布的 RL05 level-2 月重力场数据为 60 阶球谐系数,已扣除了高频信号如非潮汐大气、固体潮汐等,但是依然会受到由于 GRACE 卫星轨道设计产生的南北“条带”误差的影响。level-2 月重力场球谐系数处理步骤如下:(1)从球谐系数中扣除相应时间段上的平均值;(2)将球谐系数 C20 项更换为由卫星激光测距观测得到的 C20 项,同时加上地心改正项(Cheng et al., 2013);(3)扣除 GIA 对长期变化的影响(Geruo et al., 2012);(4)分别选用 DDK, Swenson, Duan, P4M6 四种方法来抑制南北“条带”误差的影响(Swenson and Wahr, 2006; Duan et al., 2009; Chen et al., 2010b; Kusche, 2007);(5)采用高斯 500 km 滤波的方法来降低高阶球谐系数噪声的影响,并采用 Chen 等提出的 Forward modeling 方法进行泄漏误差改正(Chen et al., 2013, 2015);(6)将改正后的球谐系数转化为等效水柱高的格网数据,并进行面积加权平均转为相应的时间序列;(7)利用最小二乘的方法求得趋势项、周年项和半周年项,并在时间序列中将其扣除后使用 5 个月的滑动平均得到年际尺度的 TWSA。最后,取四种去条带方法和不同数据源得到结果的算术平均值作为最终的 TWSA 估计。

### 1.2 GLDAS 水文模型

GLDAS 水文模型是由美国宇航局哥达飞行中心(Goddard Space Flight Center, NASA)和美国国家环境预报中心(National Center of Environmental Prediction, NOAA)共同建立的全球陆面同化数据系统(Kumar et al., 2006)。该数据系统融合了地面和卫星观测资料,具有很高的时间分辨率(从 3 小时到 1 月)和空间分辨率(从  $0.25^\circ$  到  $1^\circ$ ),输出参数主要有土壤湿度、地表气压、气温、风速、蒸散发和降水速率等。为降低数据模型误差对结果的影响,本文采用的是 GLDAS 公布的四套地表同化数据(Noah、Mosaic、CLM 和 VIC),其空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,选取的时间段为 2005 年 1 月至 2016 年 8 月。GLDAS

数据经过相同的球谐展开和高斯平滑,并去除趋势项和季节项(主要包括周年项和半年项),将每个格网点的时间序列进行 5 个月的滑动平均.最后,我们取四套数据的算术平均值来估计土壤含水量异常(Soil Moisture Storage Anomalies, SMSA).

### 1.3 实测降水资料

降水是直接影响陆地水储量变化的一个重要因素.因此本文除了分析陆地水储量异常(TWSA)外,还计算了降水异常(precipitation anomaly)与 ENSO 的关系.降水数据来自于中国气象信息中心(China Meteorological Administration, CMA)提供的实测月降水网格数据,选取时间段为 2005 年 1 月至 2016 年 8 月,空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ .降水数据的处理采取与 GLDAS 相同的步骤,去除趋势项和季节项并进行 5 个月的滑动平均.在进行数据处理时为保证空间分辨率一致,我们利用邻近插值方法将降水数据插值为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ .

### 1.4 ENSO 数据

ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 数据来源于美国气象预测中心(National Weather Service Climate Prediction Center, NOAA)公布的 Niño3.4 指数(Huang et al., 2015a). Niño3.4 指数是定义在 Niño3.4 区域内( $5^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}$ ,  $170^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$ )的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)月距平值,而 ENSO 事件则定义为 Niño3.4 指数经过 5 个

月的滑动平均并持续 6 个月高于  $+0.4^{\circ}\text{C}$  (定义为 El Niño 事件)或者低于  $-0.4^{\circ}\text{C}$  (定义为 La Niña 事件).其中 Niño3.4 指数进行 5 个月的滑动平均是为了抑制热带海洋地区季节内振荡的影响.

### 1.5 相关性与时滞性

本文通过计算互相关的方法(Eltahir and Bras, 1996; Lee et al., 2006),主要分析了中国区域陆地水储量异常变化与 Niño3.4 指数在时域上的相关性.假设两组独立的时间序列分别为  $x_1$  和  $x_2$ ,  $\tau$  为时滞因子,则相关系数  $\rho(\tau) = \frac{\sigma_{12}(\tau)}{\sqrt{\sigma_{11}\sigma_{22}}}$ ,  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_{22}$  分

别为  $x_1$  和  $x_2$  的方差,  $\sigma_{12}$  为  $x_1$  与  $x_2$  的协方差,其中相关系数  $|\rho(\tau)| \leq 1$ .当  $|\rho(\tau)|$  取得最大值时,  $\tau$  相应为最大时滞月,其中  $|\tau| \leq 12$ .

## 2 结果与分析

虽然中国区域水资源总量较为丰富,但是不同地区的陆地水储量差异性较大,受极端气候事件的影响也不尽相同.因此根据中国水利部关于水资源的分区原则,我们将中国水域共划分为十大流域,如图 1 所示:①长江流域,②黄河流域,③松花江流域,④珠江流域,⑤淮河流域,⑥海河—滦河流域,⑦辽河流域,⑧西北诸河流域,⑨西南诸河流域,⑩东南诸河流域.

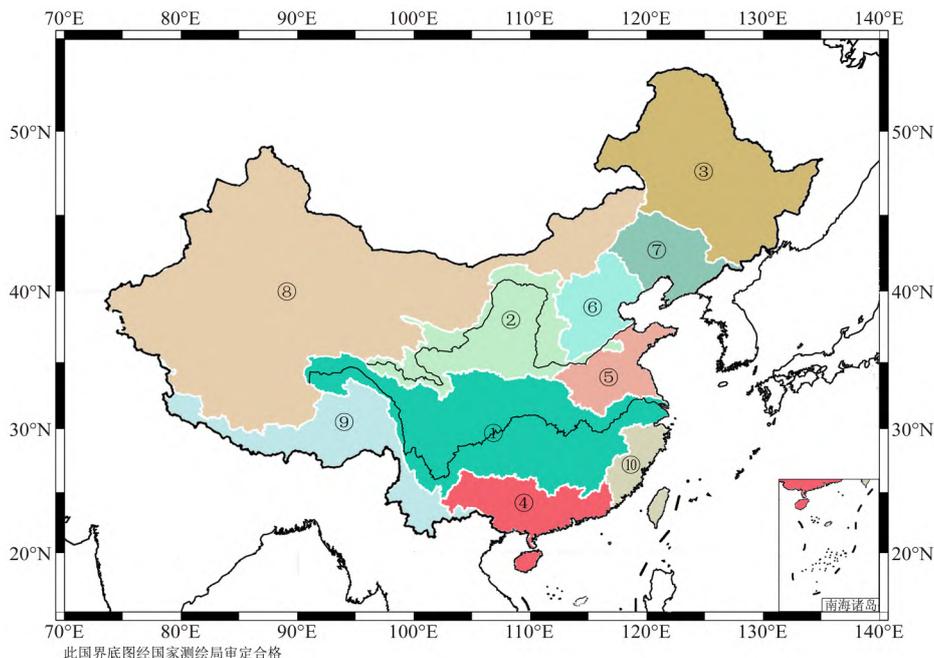


图 1 中国十大流域划分示意图

Fig. 1 Ten major river basins in China

表 1 中国十大流域 TWSA, SMSA, 降水异常与 ENSO 的最大相关系数和滞后月  
(这些流域均通过 95% 的置信水平)

Table 1 The maximum correlations and the corresponding time delay months between TWSA, SMSA, precipitation anomaly and ENSO from ten major river basins in China (These basins have passed the 95% confidence level)

流域名称	TWSA/ENSO	滞后月	SMSA/ENSO	滞后月	降水异常/ENSO	滞后月
①长江流域	0.51	6	0.57	6	0.53	4
②黄河流域	-0.38	3	-0.31	0	-0.32	-4
③松花江流域	0.37	2	0.20	2	0.19	-4
④珠江流域	0.35	2	0.51	3	0.21	-1
⑤淮河流域	-0.45	-1	0.35	8	0.30	6
⑥海河—滦河流域	-0.45	2	-0.25	0	0.22	6
⑦辽河流域	-0.39	-2	-0.45	1	-0.42	-4
⑧西北诸河流域	-0.35	-10	-0.33	0	-0.38	-5
⑨西南诸河流域	0.37	-12	0.37	-12	-0.35	-4
⑩东南诸河流域	0.70	5	0.56	4	0.58	2

## 2.1 TWSA 与 ENSO 的相关性分析

由表 1 可知,中国十大流域的 TWSA、SMSA 和降水异常均通过 95% 的置信水平. 陆地水储量异常(包括 TWSA 和 SMSA)和降水异常与 ENSO 呈现出正相关的区域为长江流域、松花江流域、珠江流域和东南诸河流域;而黄河流域、辽河流域和西北诸河流域与 ENSO 呈现负相关. Cohen(1992)指出当两组独立的时间序列受到复杂多变的因素影响时,如果在显著性的前提下这两者之间的相关系数  $\geq |0.5|$ ,那么可认为这两组独立的时间序列存在较强的相关性. 在水循环中, TWSA、SMSA 和降水异常均易受到多变气候、复杂环境的影响. 因此我们在分析中国区域 TWSA、SMSA 和降水异常与 ENSO 的相关性时,将  $|0.5|$  作为它们与 ENSO 是否具有较强相关性的阈值,时滞范围选择在  $-12 \sim 12$  个月. 根据较强相关性的阈值,表 1 中只有长江流域和东南诸河流域的陆地水储量异常(包括 TWSA 和 SMSA)、降水异常均与 ENSO 表现出较强的相关性. 珠江流域 SMSA 与 ENSO 虽然表现出了较好的相关性,但是该区域内的 TWSA、降水异常与 ENSO 均未表现出较强的相关性. 这可能是因为珠江流域还受到 PDO(Pacific Decade Oscillation)等气候因素的综合影响, PDO 会使得 ENSO 期间菲律宾海的异常反气旋发生调整从而导致珠江流域的降水异常和 TWSA 与 ENSO 未呈现出较好的相关性(Luo et al., 2016; Chen et al., 2014; 朱益民和杨修群, 2003). 文章 2.2 节将给出整个中国区域 TWSA、降水异常与 ENSO 的空间相关性和时滞性,并做进一步

的分析与解释.

其中长江流域 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关系数最大值分别为 0.65、0.51 和 0.54,较 ENSO 分别滞后大约 6 个月、6 个月和 4 个月. 东南诸河流域 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关系数最大值分别为 0.70、0.54、0.57,较 ENSO 分别滞后  $\sim 5$  个月、 $\sim 4$  个月、 $\sim 2$  个月. 但是整个长江流域总面积达到 180 万平方公里,横跨中国东部、中部和西部地区,具有区域范围广、地理环境差异大、气候多变等特点(王新才等, 2012; 胡小工等, 2006). 因此 ENSO 事件对于长江流域陆地水异常在空间上的影响具有较大的差异性,为此我们将长江流域按照宜昌、湖口划分为上、中、下游并进行分析. 如图 2a 所示,长江流域上游地区与 ENSO 的相关性较差. Yao 等(2016)指出长江流域上游地区受到 PDO 的影响较大,而由于 PDO 的调制作用可能会使得 ENSO 事件对长江流域上游地区的影响发生改变. 长江流域中、下游地区与 ENSO 具有较强的相关性(图 2b 和 2c),中游地区 TWSA、SMSA 和降水异常与 ENSO 的相关系数最大值分别为 0.55、0.46 和 0.67,较 ENSO 分别滞后大约 7 个月、6 个月和 5 个月;下游地区 TWSA、SMSA 和降水异常与 ENSO 的相关系数最大值分别为 0.78、0.75 和 0.61,较 ENSO 分别滞后大约 5 个月、5 个月和 4 个月.

为进一步分析长江流域中、下游地区和东南诸河流域所受 ENSO 影响的情况,我们分别计算了这三个地区陆地水储量异常(包括 TWSA 和 SMSA)

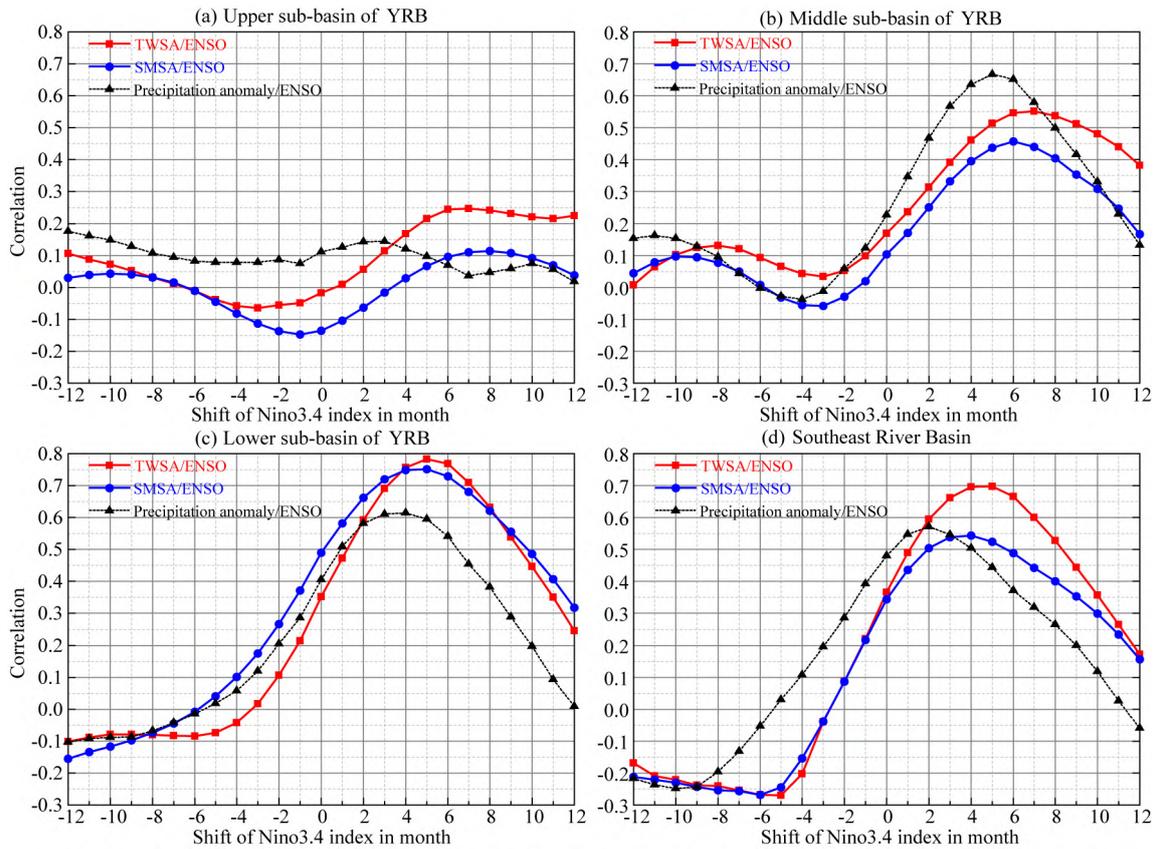


图2 (a)长江流域上游地区 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关性, (b)长江流域中游地区 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关性, (c)长江流域下游地区 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关性, (d)东南诸河流域 TWSA、SMSA、降水异常与 ENSO 的相关性

横坐标的时滞范围选择在-12至12个月之间,其中负值表示 TWSA 或降水异常滞前,正值表示 TWSA 或降水异常滞后。

Fig. 2 Correlation coefficients between terrestrial water storage anomalies (TWSA), soil moisture storage anomalies (SMSA), precipitation anomalies and the Niño3.4 index in (a) the Upper sub-basin of Yangtze River Basin (YRB), (b) the Middle sub-basin of YRB, (c) the Lower sub-basin of YRB, and (d) the Southeast River Basin, respectively

The corresponding time delay months is shifted from -12 months to 12 months, where negative values indicate TWSA or precipitation anomaly lags before, and positive values indicate that TWSA or precipitation lags behind.

和降水异常的时间序列。如图 3a、3b、3c 所示;这三个地区陆地水储量异常和降水异常明显与 ENSO (Niño3.4 指数)存在较强的相关性,且较 ENSO 大约滞后 2 个月;这三个区域的陆地水异常和降水异常分别受 2010/11 La Niña 和 2015/16 El Niño 事件的影响出现了谷值和峰值。2010/11 La Niña 期间,长江流域中、下游地区和东南诸河流域表现出了明显的负异常,与正常年份相比减少了~22.3 Gt, ~24.1 Gt, ~11.6 Gt;2015/16 El Niño 期间,这三个流域表现出明显的正异常,较正常年份增加了~19.8 Gt, ~27.9 Gt, ~16.2 Gt。ENSO 虽然不会对中国气候产生直接的作用,但是会通过西太平洋副高、东南季风和西南季风的影响使得中国区域降水发生异常 (Fasullo et al., 2013; Yao et al., 2016;

郭栋等,2016;翟盘茂等,2016)。这表明长江流域中、下游地区和东南诸河流域的陆地水储量异常主要是由于降水异常所引发。

此外,对于长江流域中、下游地区和东南诸河流域而言:长江流域下游地区 TWSA 与 ENSO 的相关系数最大,受到两次强 ENSO 事件的影响陆地水储量发生的异常波动也最大。其次是东南诸河流域,该流域地处经济发达的长三角地带,东邻东海和台湾海峡,常年水资源总量较为丰沛,但是依然存在水资源分布不均、沿海部分地区水资源短缺、易受东南季风影响等问题 (苏爱平,2012;叶寿仁和吴志平,2011)。之前的研究鲜有关注东南诸河流域陆地水储量变化及其与 ENSO 的相关性。因此本文利用 GRACE 来研究东南诸河流域受 ENSO 事件等气候

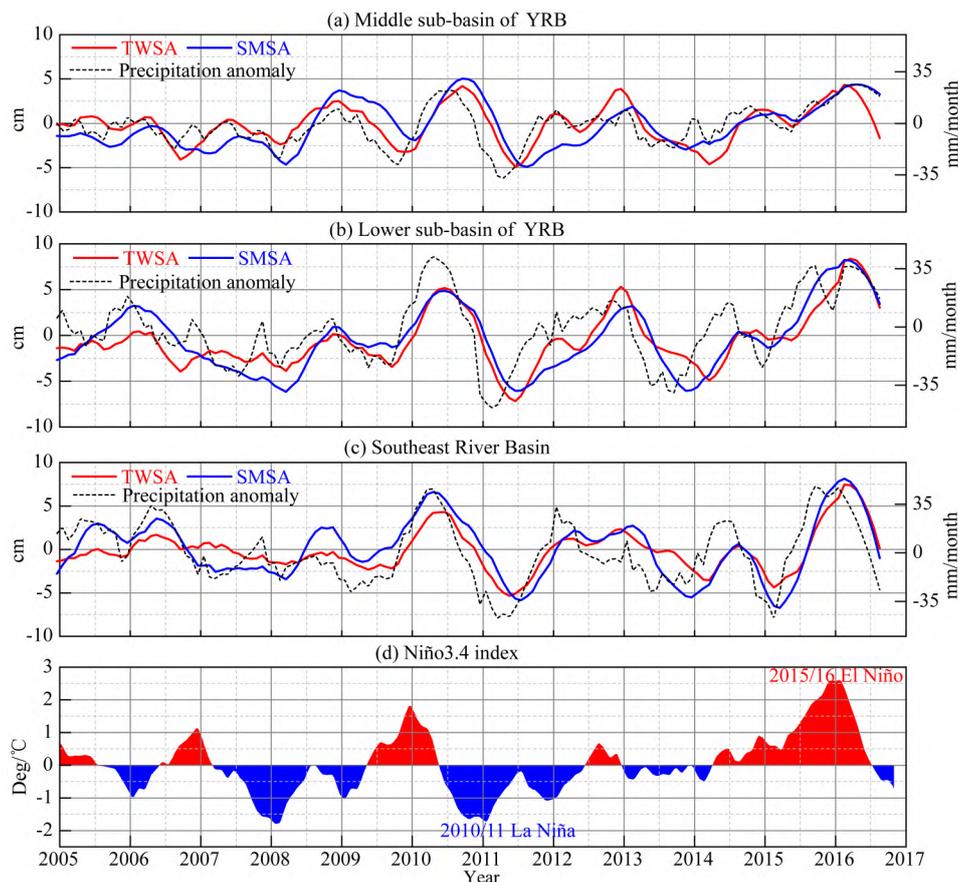


图 3 2005—2016 年 (a) 长江流域中游地区、(b) 长江流域下游地区和 (c) 东南诸河流域的 TWSA、SMSA 和降水异常时间序列; (d) Niño 3.4 指数

Fig. 3 Time series of TWSA, SMSA and precipitation anomalies in (a) the Middle sub-basin of YRB, (b) the Lower sub-basin of YRB, and (c) the Southeast River Basin. (d) Time series of Niño 3.4 index during 2005—2016

因素的影响,对于分析该流域因极端气候条件所引发的洪涝和干旱具有重要的意义。

## 2.2 ENSO 期间 TWSA 的空间分析

ENSO 事件主要发生在赤道太平洋地区,它会通过改变大气环流来影响全球水循环系统并使得中国相关区域的降水和陆地水储量发生异常 (Fasullo et al., 2013; 陈威等, 2017). 为进一步分析整个中国区域陆地水异常 (包括 TWSA、SMSA)、降水异常与 ENSO 之间的关系,我们给出了它们与 ENSO 的最大相关系数和时滞关系的空间分布。如图 4 所示: 它们与 ENSO 的相关系数在中国大部分区域通过 95% 的置信水平 (白色空格表示未通过 95% 置信水平)。其中 TWSA/ENSO 和 SMSA/ENSO 的空间分布总体上较为吻合,但是在青藏高原地区和西北诸河流域地区有一定的差异性,这可能与 GRACE 监测到的陆地水储量变化还包括地表水、雪水当量和地下水有关。陆地水异常/ENSO 和降水异常/ENSO 的结果表明: 长江流域中下游地区、东南诸河流域以及西北诸河流域的北方地区受 ENSO 的影响较大且呈正

相关, TWSA/ENSO 的滞后月与 SMSA/ENSO 的滞后月较为接近,但是它们较降水异常/ENSO 推迟 ~2 个月; 青藏高原西南部 (主要是西北诸河流域南部和西南诸河流域西部地区) 以及华北部分地区 (主要是淮河流域北部、海河—滦河流域中东部和辽河流域南部地区) 与 ENSO 呈负相关,但是青藏高原西南部陆地水异常/ENSO 的滞后月较降水异常/ENSO 的滞后月却迟到了 ~6 个月,这可能与该地区地处高海拔地带和陆地水主要以冰川冻土的形式存在有关 (Yi and Sun, 2014; 王宗太和刘潮海, 2001)。

在图 4a 中, GRACE 的结果还显示西南诸河流域北部至横断山脉地区、黄河流域中游地区以及松花江流域中部地区等与 ENSO 呈一定的正相关,黄河流域下游地区、海河流域东部地区、辽河—滦河流域南部地区以及淮河流域北部等与 ENSO 呈一定的负相关,但是降水资料的结果却未能在这些区域表现出较好的一致性。这一方面可能是因为这些区域的蒸散发量和径流量在 ENSO 期间调节了降水的异常; 另一方面也可能是由于这些区域的降水受

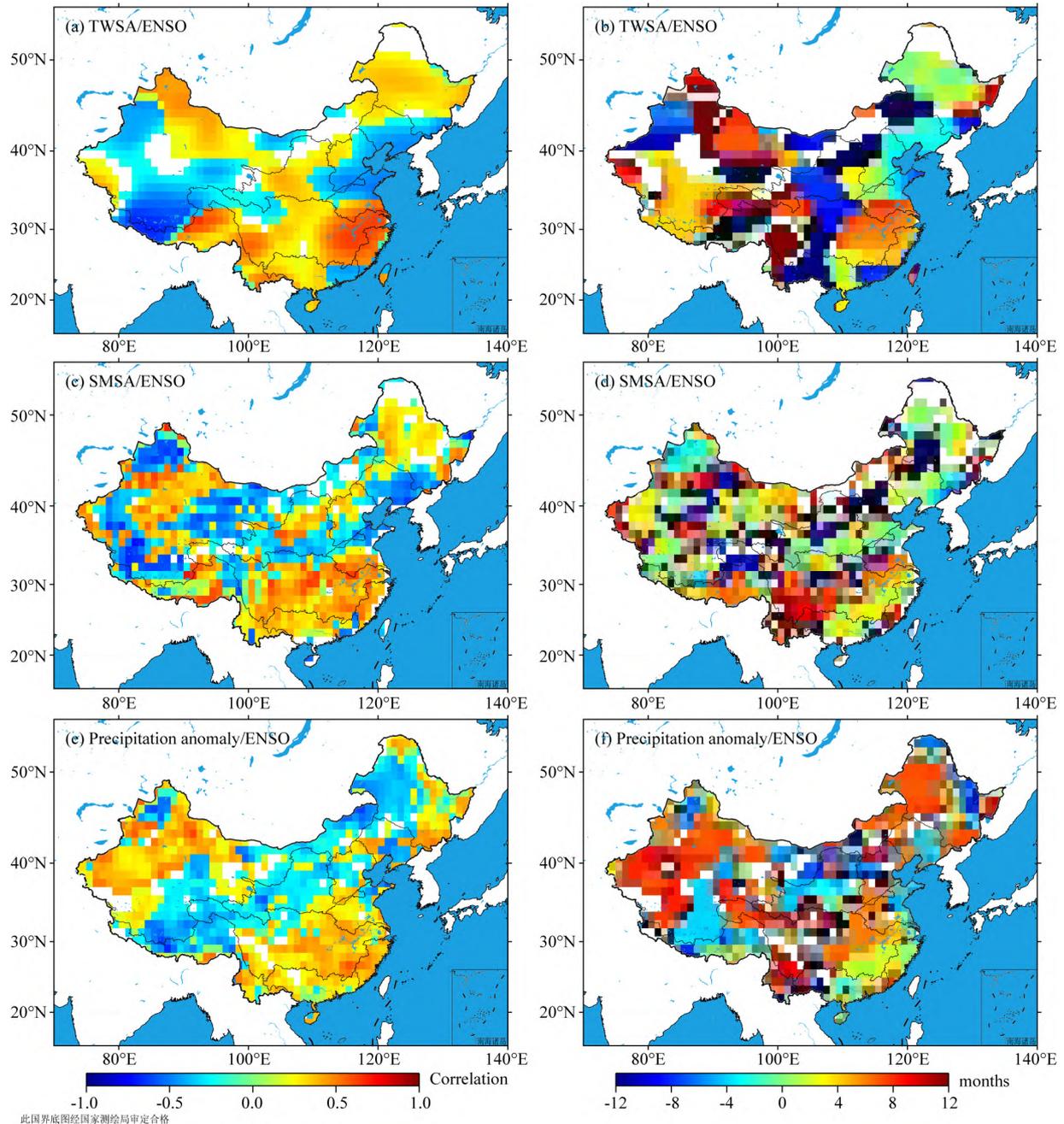


图 4 中国区域 TWSA、SMSA、降水异常分别与 ENSO 的最大相关系数及相应的时滞月

Fig. 4 (a) The maximum correlation coefficients and the corresponding time delay months between TWSA and ENSO in China, (b) the corresponding time lagged months between TWSA and ENSO, (c) the maximum correlation coefficients between SMSA and ENSO in China, (d) the corresponding time lagged months between SMSA and ENSO, (e) the maximum correlation coefficients between precipitation anomaly and ENSO in China, (f) the corresponding time lagged months between precipitation anomaly and ENSO

到其他气候因素 (IOD、NAO 等) 的影响调制了 ENSO 对于降水的影响。此外,不同流域地理环境和地理位置的差异性影响也可能使得 TWSA/ENSO 与降水异常/ENSO 在空间上的相关性具有差异。另外,GRACE 结果本身的误差也可能使相关性的估计具有一定的偏差。

2005—2017 年,全球共遭遇了 2010/11 La Niña 和 2015/16 El Niño 两次超强 ENSO 事件。因此我们还分析了这两次 ENSO 事件期间中国区域陆地水储量和降水的空间异常。综合图 5、图 6 可知,拉尼娜期间长江流域中、下游地区和东南诸河流域的陆地水储量和降水均出现较大的负异常,华北部分

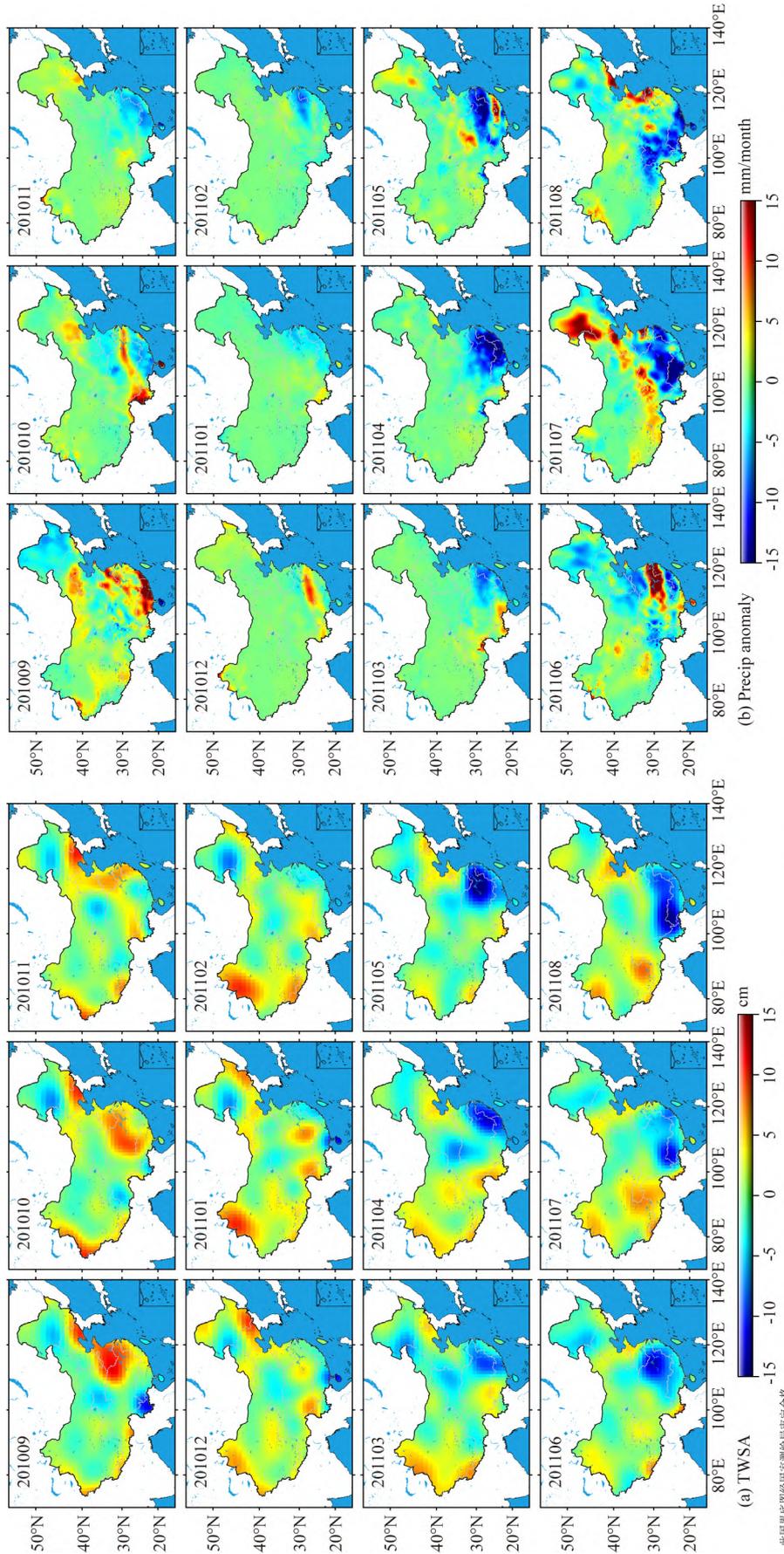


图5 2010/11 La Niña期间, 中国区域2010年9月至2011年8月(a) GRACE观测的逐月TWSA空间分布和(b) CMA降水数据得到的降水异常空间分布. 趋势项和季节项已扣除  
 Fig.5 Spatial patterns of monthly (a) GRACE-derived TWSA and (b) precipitation anomalies from CMA in China from September 2010 to August 2011 (2010/11 La Niña). Linear trends and seasonal signals were removed

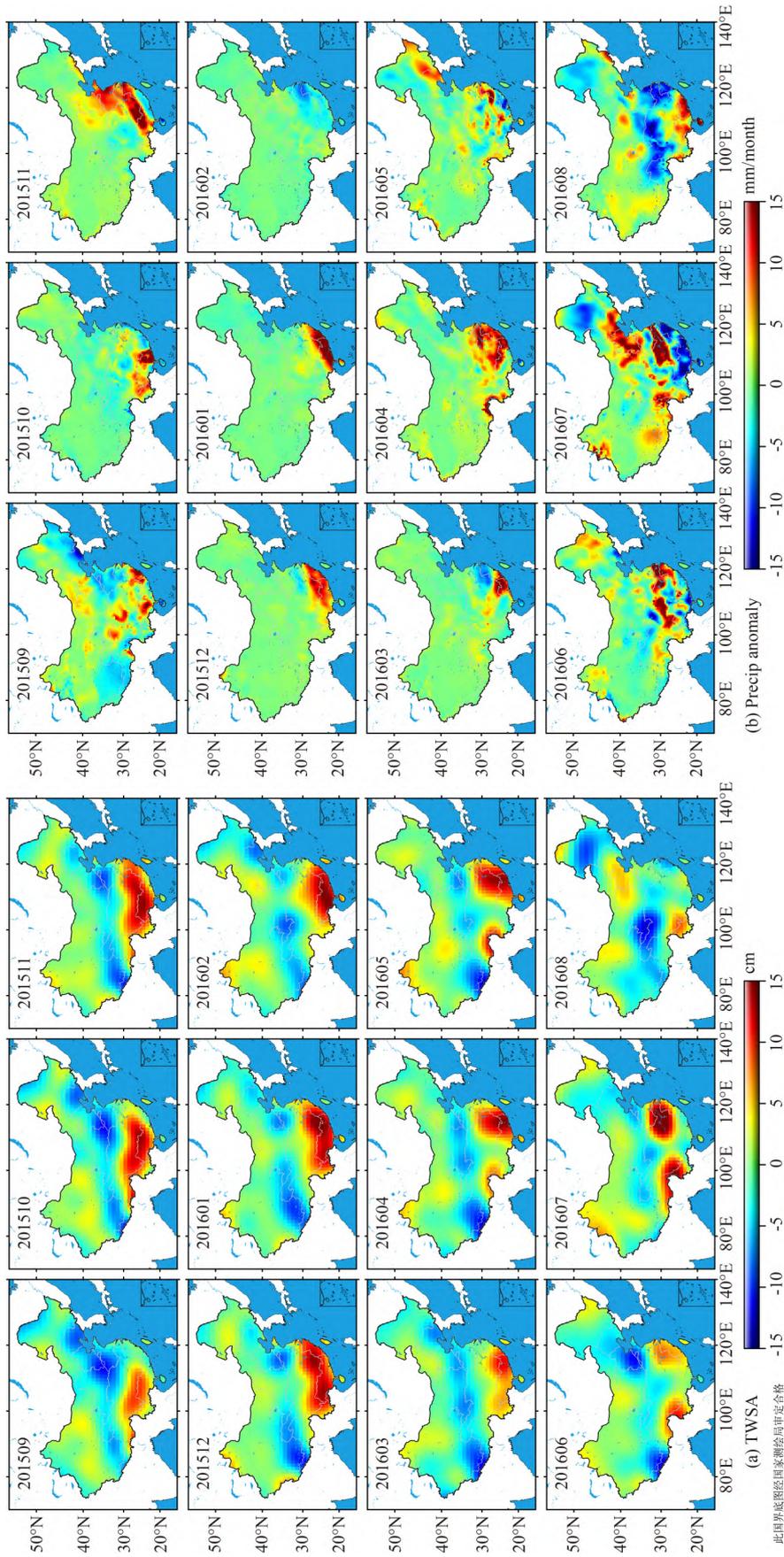


图6 2015/16 El Niño期间, 中国区域2015年9月至2016年8月(a) GRACE观测的逐月TWSA空间分布, (b) GLDAS数据得到的SMSA空间分布和CMA降水数据得到的降水异常空间分布. 趋势项和季节项已扣除  
 Fig. 6 Spatial patterns of monthly (a) GRACE-derived TWSA, (b) GLDAS-based SMSA, and precipitation anomalies from CMA in China from September 2015 to August 2016 (2015/16 El Niño period). Linear trends and seasonal signals were removed

地区(主要是淮河流域北部、海河—滦河流域中东部和辽河流域南部地区)出现一定的正异常,厄尔尼诺期间却与之相反。这一结果与 ENSO 事件对中国的气候影响一致:即在厄尔尼诺年份里东亚季风减弱,中国夏季主要季风雨带偏南,长江中下游地区和东南诸河流域出现降水增多,华北一些地区出现少雨干旱现象;但是拉尼娜年份期间由于副热带高压位置偏北,有利于形成华北汛期多雨的大气环流形势,这会导致华北部分地区汛期降水增加易造成洪涝灾害,长江中下游地区和东南诸河流域降水减少易发生干旱事件等(李建平等,2013;许武成等,2005)。2010/11 La Niña 期间(图 5):长江流域中、下游地区和东南诸河流域 TWSA 大约在 2011 年 4—6 月达到谷值,较 2010/11 La Niña 谷值滞后 5~7 个月;降水异常在 2011 年 4—5 月左右达到谷值,较 2010/11 La Niña 谷值滞后 5~6 个月。与 ENSO 相关的这些区域陆地水储量较降水滞后 1~2 个月出现异常,且长江流域下游地区和东南诸河流域陆地水储量变化较长江流域中游地区提前 1~2 个月达到谷值,这与文章 2.1 节的结论一致。值得注意的是长江流域中、下游地区和东南诸河流域 TWSA 在 2011 年 6 月开始出现了较大的负值,这是因为此次拉尼娜事件并未于 2011 年 5 月停滞,反而持续此次 ENSO 事件且在 2011 年 10 月左右迎来第二次谷值(见图 3d)。该拉尼娜事件不仅持续时间长而且出现了两次明显的谷值,这也是 2010/11 La Niña 被定义为 21 世纪以来超强 ENSO 事件的原因之一(<http://www.bom.gov.au/climate/enso>)。

2015/16 El Niño 从 2014 年 10 月开始,大约在 2015 年 11 月达到峰值,并于 2016 年 5 月结束,持续时间共近 20 个月。2015/16 El Niño 期间(如图 6):长江流域中、下游地区和东南诸河流域的陆地水和降水从 2015 年 9 月到 2016 年 7 月持续出现正异常。2015 年秋冬季(2015 年 9 月至 2016 年 2 月)出现的正异常是由于此次厄尔尼诺事件自 2014 年 10 月开始持续超过一年的影响所致,我们称之为厄尔尼诺的同期影响。2016 年春季(2016 年 3—5 月)长江流域中、下游地区和东南诸河流域的陆地水和降水再次出现了正异常,其中降水在 2016 年 4 月出现峰值,而陆地水大约滞后 1 个月在 2016 年 5 月出现峰值,这是由于此次厄尔尼诺峰值滞后 4~6 个月的影响。这三个区域的陆地水于 2016 年 7 月又一次出现了较大的正异常,降水则在 2016 年 6 月出现较大的正异常。2016 年 6—7 月以来我国南方地区连续

遭遇了大面积的强降雨侵袭,且强降雨的发生加重了南方地区自 2015 年秋冬季以来本已严重的汛情(<http://news.cctv.com/special/2016xq/index.shtml>)。但是 2015/16 El Niño 于 2016 年 5 月就已结束,那么我们利用 GRACE 监测到的 2016 年 7 月的陆地水异常是否依然是由于此次厄尔尼诺的滞后影响?

显然,长江流域中、下游地区和东南诸河流域 2016 年 7 月的陆地水异常是由于 2016 年 6—7 月的强降雨所致。而 2016 年 6—7 月发生强降雨的原因是由于 2015/16 El Niño 结束的夏季,西北太平洋依然存在着明显的反气旋环流异常(李清泉和闵庆焯,2016;郭栋等,2016;翟盘茂等,2016)。这不仅加强了热带西太平洋向中国区域的水汽输送,还使得西太平洋副热带高压加强并向西延伸造成了中国南方强降水,最终导致了长江流域中、下游地区和东南诸河流域陆地水出现正异常(李清泉和闵庆焯,2016;Zhang,2001;Zhang et al.,1999)。因此我们利用 GRACE 监测到的 2016 年 7 月陆地水异常仍是由 2015/16 El Niño 的滞后影响所导致的。

### 3 结论

本文综合利用 GRACE 重力卫星数据、GLDAS 水文模型和实测降水资料,详细分析了 2005—2017 年中国区域陆地水异常、降水异常与 ENSO 的关系和两次超强 ENSO 事件对相关区域的影响,并得到以下结论:

(1)在中国十大流域中,与 ENSO 存在较高相关性的区域主要是长江流域中、下游地区和东南诸河流域。其中长江流域中游地区 TWSA 与 ENSO 的相关系数最大值为 0.55,较 ENSO 滞后~7 个月;长江流域下游地区 TWSA 与 ENSO 的相关系数最大值为 0.78,较 ENSO 滞后~5 个月;东南诸河流域 TWSA 与 ENSO 的相关系数最大值为 0.70,较 ENSO 滞后~5 个月。2010/11 La Niña 事件使得长江流域中、下游地区和东南诸河流域陆地水分别与正常年份相比减少了~22.3 Gt,~24.1 Gt 和~11.6 Gt;2015/16 El Niño 事件使得这三个区域陆地水分别与正常年份相比增加了~19.8 Gt,~27.9 Gt 和~16.2 Gt。长江流域下游地区 TWSA 与 ENSO 的相关系数最大,且由于两次强 ENSO 事件的影响所引发的异常波动也最大。而中国其他区域的陆地水储量异常变化与 ENSO 未能展现出较

好的相关性,可能是因为这些区域离太平洋较远或受其他气候振荡(IOD、NAO)影响较大,也可能是GRACE结果的误差导致对相关性的估计具有一定的偏差。

(2)两次强 ENSO 期间中国区域陆地水储量的异常空间分布与 ENSO 事件对中国的气候影响一致。2010/11 La Niña 期间,长江流域中、下游地区和东南诸河流域 TWSA 在 2011 年 4—6 月达到谷值,较 2010/11 La Niña 谷值滞后 5~7 个月。受到 ENSO 的影响,陆地水储量往往较降水晚 1~2 月出现异常,长江流域下游地区和东南诸河流域陆地水储量较长江流域中游地区提前 1~2 个月出现异常。2015/16 El Niño 期间,长江流域中、下游地区和东南诸河流域陆地水储量从 2015 年 9 月到 2016 年 7 月持续出现正异常信号。其中 2015 年秋冬季陆地水和降水出现的异常是由于 2015/16 El Niño 的同期影响所致;2016 年春季陆地水出现的异常是受到此次厄尔尼诺的峰值滞后影响;2016 年 7 月 GRACE 捕捉到的陆地水异常与厄尔尼诺结束后西北太平洋存在着反气旋环流异常有关,为 2015/16 El Niño 的滞后影响所致。

致谢 感谢 CSR 和 JPL 提供的 GRACE 数据,GSFC 和 NCEP 提供的 GLDAS 水文模型,中国气象信息中心提供的实测降水资料以及 NOAA 提供的 ENSO 数据。感谢国家气候中心李清泉研究员、中国科学院测量与地球物理研究所闫昊明研究员、山东大学(威海)穆大鹏博士和审稿专家给出的宝贵意见。

## References

- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and Tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J. Climate*, 13(24): 4326-4340, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<4326:IAIVOT>2.0.CO;2.
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. 2010a. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resour. Res.*, 46(12), doi: 10.1029/2010WR009383.
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2010b. Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115(D22), doi: 10.1029/2010JD014689.
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. 2013. Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. *Nature Geosci.*, 6(7): 549-552, doi: 10.1038/ngeo1829.
- Chen J L, Wilson C R, Li J, et al. 2015. Reducing leakage error in GRACE-observed long-term ice mass change: a case study in west Antarctica. *J. Geodesy*, 89(9): 925-940, doi: 10.1007/s00190-015-0824-2.
- Chen J P, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014. Interdecadal changes in the relationship between Southern China winter-spring precipitation and ENSO. *Climate Dyn.*, 43(5-6): 1327-1338, doi: 10.1007/s00382-013-1947-x.
- Chen W, Zhong M, Zhong Y L, et al. 2017. Global mean sea level variations and the land water cycle at the inter-annual scale during the 2014-2016 El Niño episode. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 62(19): 2116-2124, doi: 10.1360/N972016-01377.
- Cheng M K, Tapley B D, Ries J C. 2013. Deceleration in the Earth's oblateness. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118(2): 740-747, doi: 10.1002/jgrb.50058.
- Cohen J. 1992. Statistical power analysis. *Current Directions in Psychological Science*, 1(3): 98-101.
- Duan X J, Guo J Y, Shum C K, et al. 2009. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions. *J. Geodesy*, 83(11): 1095-1106, doi: 10.1007/s00190-009-0327-0.
- Eltahir E A B, Bras R L. 1996. Precipitation recycling. *Rev. Geophys.*, 34(3): 367-378, doi: 10.1029/96RG01927.
- Fasullo J T, Boening C, Landerer F W, et al. 2013. Australia's unique influence on global sea level in 2010-2011. *Geophys. Res. Lett.*, 40(16): 4368-4373, doi: 10.1002/grl.50834.
- Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. 2013. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resour. Res.*, 49(4): 2110-2118, doi: 10.1002/wrcr.20192.
- Geruo A, Wahr J, Zhong S J. 2013. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophys. J. Int.*, 192(2): 557-572, doi: 10.1093/gji/ggs030.
- Guo D, Wang L W, Li Z K, et al. 2016. Comparison between anomalies of summer rainfall in China in decaying years during super El Niño events of 2015/2016 and 1997/1998. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(6): 835-844.
- Hu X G, Chen J L, Zhou Y H, et al. 2006. Seasonal water storage change of the Yangtze River basin detected by GRACE. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 49(5): 483-491.
- Huang B Y, Banzon V F, Freeman E, et al. 2015. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4). Part I: upgrades and intercomparisons. *J. Climate*, 28(3): 911-930, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00006.1.
- Kumar S V, Peters-Lidard C D, Tian Y, et al. 2006. Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling. *Environ. Modell. Softw.*, 21(10): 1402-1415, doi: 10.1016/j.envsoft.2005.07.004.
- Kusche J. 2007. Approximate decorrelation and non-isotropic

- smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. *J. Geodesy*, 81(11): 733-749, doi: 10.1007/s00190-007-0143-3.
- Lee L J E, Lawrence D S L, Price M. 2006. Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. *J. Hydrol.*, 330(3-4): 604-620, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.025.
- Li B L, Rodell M, Zaitchik B F, et al. 2012. Assimilation of GRACE terrestrial water storage into a land surface model: Evaluation and potential value for drought monitoring in western and central Europe. *J. Hydrol.*, 446-447: 103-115, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.035.
- Li J P, Ren R C, Qi Y Q, et al. 2013. Progress in air-land-sea interactions in Asia and their role in global and Asian Climate Change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(2): 518-538.
- Li Q Q, Min Q Y. 2016. A dialogue with Renhe Zhang: The heavy rainfall over southern China in the first half year of 2016 and its relation to the 2015/2016 super Eño. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 61(24): 2659-2662.
- Luo Z C, Yao C L, Li Q, et al. 2016. Terrestrial water storage changes over the Pearl River Basin from GRACE and connections with Pacific climate variability. *Geodesy Geodyn.*, 7(3): 171-179, doi: 10.1016/j.geog.2016.04.008.
- Ni S N, Chen J L, Wilson C R, et al. 2018. Global terrestrial water storage changes and connections to ENSO events. *Surv. Geophys.*, 39(1): 1-22, doi: 10.1007/s10712-017-9421-7.
- Ning J S. 2002. The satellite gravity surveying technology and research of earth's gravity field. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 22(1): 1-5.
- Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, et al. 2005. Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235(1-2): 283-301, doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.005.
- Rodell M, Famiglietti J S. 2002. The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US. *J. Hydrol.*, 263(1-4): 245-256, doi: 10.1016/S0022-1694(02)00060-4.
- Save H, Bettadpur S, Tapley B D. 2016. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121(10): 7547-7569, doi: 10.1002/2016JB013007.
- Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, et al. 2006. GRACE observations of changes in continental water storage. *Global Planet. Change*, 50(1-2): 112-126, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.11.018.
- Sun W K. 2002. Satellite in low orbit (CHAMP, GRACE, GOCE) and high precision earth gravity field: the latest progress of satellite gravity geodesy and its great influence on geoscience. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 22(1): 92-100.
- Swenson S, Wahr J. 2002. Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 107(B9): ETG 3-1-ETG 3-13, doi: 10.1029/2001JB000576.
- Swenson S, Wahr J. 2006. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8), doi: 10.1029/2005GL025285.
- Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683): 503-505, doi: 10.1126/science.1099192.
- Trenberth K E, Caron J M. 2000. The southern oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. *J. Climate*, 13(24): 4358-4365.
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 103(B12): 30205-30229, doi: 10.1029/98JB02844.
- Wang Z T, Liu C H. 2001. Geographical characteristics of the distribution of glaciers in China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 23(3): 231-237.
- Watkins M M, Wiese D N, Yuan D N, et al. 2015. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120(4): 2648-2671, doi: 10.1002/2014JB011547.
- Xu H Z. 2001. Satellite gravity missions-new hotspot in geodesy. *Science of Surveying and Mapping* (in Chinese), 26(3): 1-3.
- Xu W C, Ma J S, Wang W. 2005. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 25(2): 212-220.
- Yao C L, Luo Z C, Wang H H, et al. 2016. GRACE-derived terrestrial water storage changes in the inter-basin region and its possible influencing factors: a case study of the Sichuan Basin, China. *Remote Sensing*, 8(6): 444, doi: 10.3390/rs8060444.
- Ye S R, Wu Z P. 2011. Summary of Southeast Rivers region integrated water resources plan. *China Water Resources* (in Chinese), (23): 121-123, 104.
- Yi S, Sun W K. 2014. Evaluation of glacier changes in high-mountain Asia based on 10 year GRACE RL05 models. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119(3): 2504-2517, doi: 10.1002/2013JB010860.
- Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 74(3): 309-321.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 16(2): 229-241, doi: 10.1007/BF02973084.
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(5): 1005-1017.
- Zhang Z Z, Chao B F, Chen J L, et al. 2015. Terrestrial water storage anomalies of Yangtze River Basin droughts observed by GRACE and connections with ENSO. *Global Planet. Change*, 126: 35-45, doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.002.

- Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. 2009. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations. *Chinese Science Bulletin*, 54(5): 816-821, doi: 10.1007/s11434-008-0556-2.
- Zhu Y M, Yang X Q. 2003. Relationships between pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(6): 641-654.
- 附中文参考文献**
- 陈威, 钟敏, 钟玉龙等. 2017. 2014—2016 年 El Niño 期间全球平均海平面的年际变化及全球水循环的贡献. *科学通报*, 62(19): 2116-2124, doi: 10.1360/N972016-01377.
- 郭栋, 王琳玮, 李震坤等. 2016. 2015/2016 和 1997/1998 超强 El Niño 衰减年我国夏季降水异常的比较. *大气科学学报*, 39(6): 835-844.
- 胡小工, 陈剑利, 周永宏等. 2006. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化. *中国科学 D 辑 地球科学*, 36(3): 225-232.
- 卢爱刚, 葛剑平, 庞德谦等. 2006. 40a 来中国旱灾对 ENSO 事件的区域差异响应研究. *冰川冻土*, V28(4): 535-542, doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.04.012.
- 李建平, 任荣彩, 齐义泉等. 2013. 亚洲区域海-陆-气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展. *大气科学*, 37(2): 518-538.
- 李清泉, 闵庆焯. 2016. 对话张人禾: 2016 年上半年中国南方强降雨与超强厄尔尼诺. *科学通报*, 61(24): 2659-2662.
- 宁津生. 2002. 卫星重力探测技术与地球重力场研究. *大地测量与地球动力学*, 22(1): 1-5.
- 苏爱平. 2012. 东南诸河区水资源形势及管理对策浅议. *水利科技*, (2): 6-8.
- 孙文科. 2002. 低轨道人造卫星(CHAMP、GRACE、GOCE)与高精度地球重力场——卫星重力大地测量的最新发展及其对地球科学的重大影响. *大地测量与地球动力学*, 22(1): 92-100.
- 王新才. 2012. 规划水资源论证实践与思考. *人民长江*, 43(19): 1-5.
- 王宗太, 刘潮海. 2001. 中国冰川分布的地理特征. *冰川冻土*, 23(3): 231-237.
- 许厚泽. 2001. 卫星重力研究: 21 世纪大地测量研究的新热点. *测绘科学*, 26(3): 1-3.
- 许武成, 马劲松, 王文. 2005. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述. *气象科学*, 25(2): 212-220.
- 叶寿仁, 吴志平. 2011. 东南诸河区水资源综合规划概要. *中国水利*, (23): 121-123, 104.
- 翟盘茂, 余荣, 郭艳君等. 2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响. *气象学报*, 74(3): 309-321.
- 钟敏, 段建宾, 许厚泽等. 2009. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势. *科学通报*, 54(9): 1290-1294, doi: 10.1007/s11434-008-0556-2.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. *气象学报*, 61(6): 641-654.
- 邹力, 倪允琪. 1997. ENSO 对亚洲夏季风异常和我国夏季降水的影响. *热带气象学报*, 13(4): 306-314.

(本文编辑 何燕)