

**引用格式:** Hu Pengfei, Li Jing, Zhang Yanli, *et al.* Temporal and Spatial Variation and Influencing Factors of Water Storage on the Loess Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1): 176-186. [胡鹏飞, 李净, 张彦丽, 等. 黄土高原水储量的时空变化及影响因素[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 176-186.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2019.1.0176

# 黄土高原水储量的时空变化及影响因素

胡鹏飞<sup>1</sup>, 李 净<sup>1</sup>, 张彦丽<sup>1</sup>, 朱国锋<sup>1,2</sup>, 何盘星<sup>3</sup>, 曹永攀<sup>2</sup>

- (1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;  
2. 中国科学院西北生态资源环境研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
3. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 近年来黄土高原下垫面情况变化巨大, 将多源数据应用于水储量变化研究可进一步揭示该区域水循环过程。利用 GRACE 数据研究了 2003~2015 年黄土高原地区陆地水储量变化(TWSC)的时空分布特征, 结合大气环流数据、TRMM(3B43)降水、GLDAS 蒸散发和 MODIS 地表温度数据分析了气候变化和人类活动对 TWSC 的影响。结果表明: ①2003~2015 年黄土高原 TWSC 整体表现为下降趋势, 下降速率约为 $-5.16 \pm 1.51$  mm/a, 季节变化表现为秋季>冬季>夏季>春季的下降趋势。②过去 13 a 黄土高原 TWSC 在空间上表现为自西向东减少, 整体处于亏损状态, 最小值可达 $-4.5$  cm。③降水对黄土高原西南部、南部的 TWSC 有影响较大, 地表温度对黄土高原东南部、东部的 TWSC 影响较大。④人类活动对山西和陕晋豫交界地带的 TWSC 影响较大。利用多源数据对比研究可以较准确地反映该区域水储量变化的时空分布情况, 对水循环机理的进一步研究有较大帮助。

**关 键 词:** 黄土高原; TWSC; 气候变化; 人类活动  
**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2019)01-0176-11

## 1 引 言

陆地水储量(Terrestrial Water Storage, TWS)的变化对一个地区的自然环境和社会经济发展影响巨大<sup>[1-3]</sup>, 是水循环和气候变化的重要指标<sup>[4-5]</sup>, 了解气候变化和人类活动如何影响陆地水储量对地区的水资源管理非常重要<sup>[6]</sup>。GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星因其在地球内部质量分布探测方面的高精度表现, 已被广泛应用于 TWS 变化的研究<sup>[7-8]</sup>, 这就弥补了遥感卫星只能观测浅层土壤水分、观测台站空间分布不均的不足, 为大、中尺度 TWS 变化的定量研究提供了可能<sup>[9-12]</sup>。

近年来, 各国学者利用 GRACE 卫星数据进行

区域水储量计算, 评估了各地区水资源状况<sup>[13]</sup>。如 Tapley 等<sup>[14]</sup>对南美洲 TWS 变化研究表明 GRACE 数据能更精确地监测大流域水文过程。Ramillien 等<sup>[3,15]</sup>研究指出 GRACE 数据反演 TWS 变化精度可达到 1.0~1.5 cm, 并估算了热带地区八大流域的水量变化。Crowley 等<sup>[16]</sup>研究了刚果盆地 TWS 变化, 并讨论了降水对特定季节 TWS 的补给状况。Strassberg 等<sup>[17]</sup>发现利用 GRACE 数据可以监测半干旱地区 TWS 变化。Rodell 等<sup>[7]</sup>在印度西北部水储量的研究中探讨了灌溉等人为因素对 TWS 变化的影响。Feng 等<sup>[18]</sup>研究发现华北地区地下水下降是由灌溉引起的。Long 等<sup>[19-20]</sup>通过研究 TWS 变化进一步评估了研究区干旱状况, Deng 等<sup>[21]</sup>直接

收稿日期: 2018-01-22; 修订日期: 2018-11-12  
基金项目: 国家自然科学基金项目(41661005、41261016、41561080), 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(41421061), 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCS-ZZ-2017), 农业部农业遥感监测与评价专项, 农业部农业遥感创新课题资助。  
作者简介: 胡鹏飞(1993—), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: pfhu0213@163.com。  
通讯作者: 李 净(1978—), 女, 甘肃会宁人, 博士, 副教授, 主要从事定量遥感研究。E-mail: li\_jinger@nwnu.edu.cn。

研究了气候变化和人类活动对中亚 TWS 变化的影响。目前,国内学者围绕 TWS 变化的时空分布进行了一系列研究,主要以塔里木河流域<sup>[22]</sup>、黑河流域<sup>[23-24]</sup>、洞庭湖流域<sup>[25]</sup>、黄河流域<sup>[26]</sup>及长江流域<sup>[12,27-28]</sup>为主,也包括天山<sup>[29-30]</sup>、祁连山<sup>[31]</sup>、新疆地区<sup>[6,32-33]</sup>、西南地区<sup>[34]</sup>、柴达木盆地<sup>[35]</sup>、华北平原<sup>[8,36]</sup>等地区和中国及周边地区的研究<sup>[37-40]</sup>。

黄土高原位于半干旱半湿润地区,400 mm 等降水量线和人口密度对比线都经过这里,故 TWS 的变化对该地区的社会和生态环境有重大影响。当前的研究很少关注气候变化和人类活动对黄土高原 TWS 变化的影响,利用 GRACE 数据探究 2003~2015 年黄土高原地区 TWS 变化的时空分布特征,以及降水、地表温度、蒸散发和人类活动对 TWS 变化的影响,以期为黄土高原地区水资源的科学管理提供参考。

2 研究区概况

黄土高原区(33°43′~41°16′N,100°54′~114°33′E)东起太行山,西抵乌鞘岭,北至长城,南达秦岭(图 1),面积约 62.4×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,涉及青海、宁夏、甘肃、内蒙、河南、陕西和山西 7 个省(自治区)、44 个地区(市、盟、州)、285 个县(旗、市、区)。位于中国第二级阶梯,西北高、东南低,海拔 300~3 000 m,由黄土塬、川、沟壑、山、梁、峁、坪等地貌组成,下垫面情况复杂。地处半干旱半湿润地区,年均气温 4~14℃,年均降水量约为 110~860 mm,年均蒸发量约为 720~1 420 mm,干燥指数 1.0~1.5,夏季温暖,盛行东南风,雨热同期。干旱、冰雹、局地暴雨等重大气象灾害及由此引发的山洪及泥石流等自然灾害时常发生。由于特殊的地质构造和地形地貌,水土流失严重,生态环境状况不容乐观。

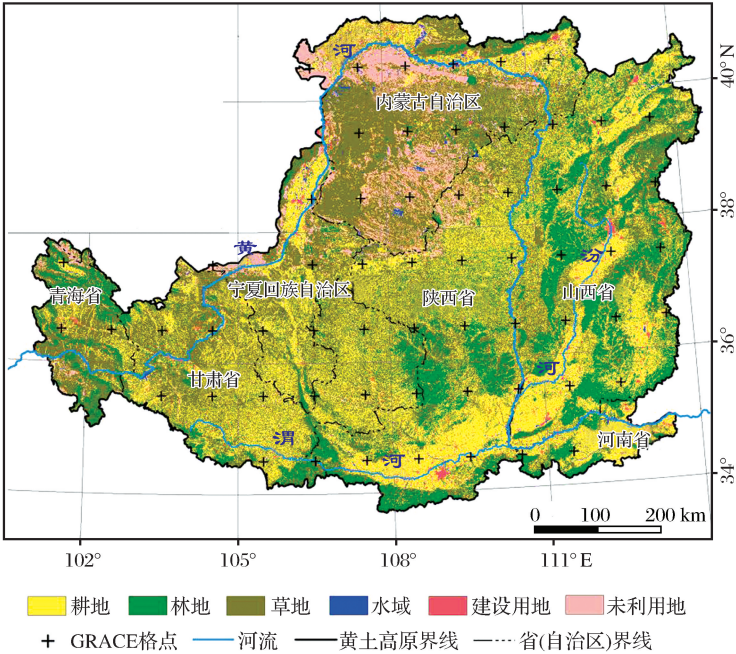


图 1 研究区 GRACE 格点、土地类型分布

Fig.1 The spatial distribution of GRACE grids and LUCC in study area

3 数据和方法

3.1 数据

GRACE 卫星数据从 NASA 网站 (<https://grace.jpl.nasa.gov/>) 获得,本文采用 2003~2015 年间 Level-2 的空间研究中心(Center for Space Research, CSR)发布的 RL05 月数据,空间分辨率为 1°×1°,同时不考虑 GRACE 数据处理中存在的泄露误差和测量误差<sup>[41]</sup>,2003、2011~2015 年缺失数据

采用相邻月份的平均值代替;大气环流资料来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn>);MODIS 白天地表温度(MOD11A2,8 d)产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>),空间分辨率 1 km,均采用最大值法合成为月尺度数据;TRMM(3B43)月降水数据(<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>),空间分辨率 25 km。蒸散量数据下载自全球土地资料同化系统(GLDAS)官方网站(<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>

services/grads-gds/gldas),空间分辨率为  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。2010 年 LUCC 栅格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/DataList.aspx>),空间分辨率为 1 km。

3.2 水储量计算

根据 GRACE 卫星提供的重力球谐系数,求出地表质量变化,进而转换为陆地水储量变化量。GRACE 重力球谐系数从 CSR 网站获取,采用卫星激光测距仪(SLR)获取的地球扁率值( $C_{20}$ )系数替代 GRACE 卫星反演的  $C_{20}$  项<sup>[5,42-43]</sup>,再使用去相关滤波处理方法去除 GRACE 数据高阶系数相关性引起的纵向条纹误差,最后应用平滑半径为 300 km 的高斯滤波进行区域平滑处理。基于球谐系数反演得到的等效水高实质上就是陆地水储量变化(TWSC)<sup>[44]</sup>。利用重力场模型球谐系数计算等效水柱高度变化量的模型<sup>[45]</sup>为:

$$\Delta\sigma(\theta,\eta)=\frac{a\rho_a\text{ve}}{3\rho_{\text{water}}}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^n\frac{2n+1}{1+k_n}P_{nm}(\sin(\theta))(\Delta C_{nm}\cos(m\eta)+\Delta S_{nm}\sin(m\eta))$$

其中: $\Delta\sigma$  为等效水高表示的陆地水储量变化, $\theta$  是纬度, $\eta$  是经度, $a$  是地球半径, $\rho_{\text{ave}}$  是地球的平均密度, $\rho_{\text{water}}$  为水的密度, $k_n$  是负载 Love 系数, $\Delta C_{nm}$  和

$\Delta S_{nm}$  是球谐系数变化量, $P_{nm}(\sin(\theta))$  是  $n$  阶和  $m$  阶完全归一化 Legendre 函数,最大次数  $n$  和阶数  $m$  可扩展到 60。GRACE 数据处理过程中会有信号衰减<sup>[46]</sup>,利用 JPL 网站 ([http://podaacftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/land\\_mass/RL05/](http://podaacftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/land_mass/RL05/)) 提供尺度因子来恢复损失的信号。

4 结果与讨论

4.1 结果分析

4.1.1 陆地水储量年际变化

2003 年 1 月至 2015 年 12 月黄土高原 TWSC 整体表现为下降趋势,大约以  $-5.16\pm 1.51\text{ mm/a}$  的速率递减(图 2)。最大盈余出现在 2004 年 9 月,高达 61.52 mm;最大亏损出现在 2015 年的 5 月,达到  $-81.1\text{ mm}$ 。

2003~2015 年,每年降水量的峰值多出现在 7 月或 8 月,每年陆地水储量变化的峰值多出现在 9 月或 10 月(图 2),说明黄土高原地区 TWSC 对降水响应有 1~3 个月的延迟,根据严家宝等<sup>[37]</sup>的研究,黄河流域与海河、淮河流域的水储量变化具有一定的关联性,结合陈坤等<sup>[38,47]</sup> 研究结果,可以得出水储量变化表现滞后的原因可能与水汽来源、土壤水

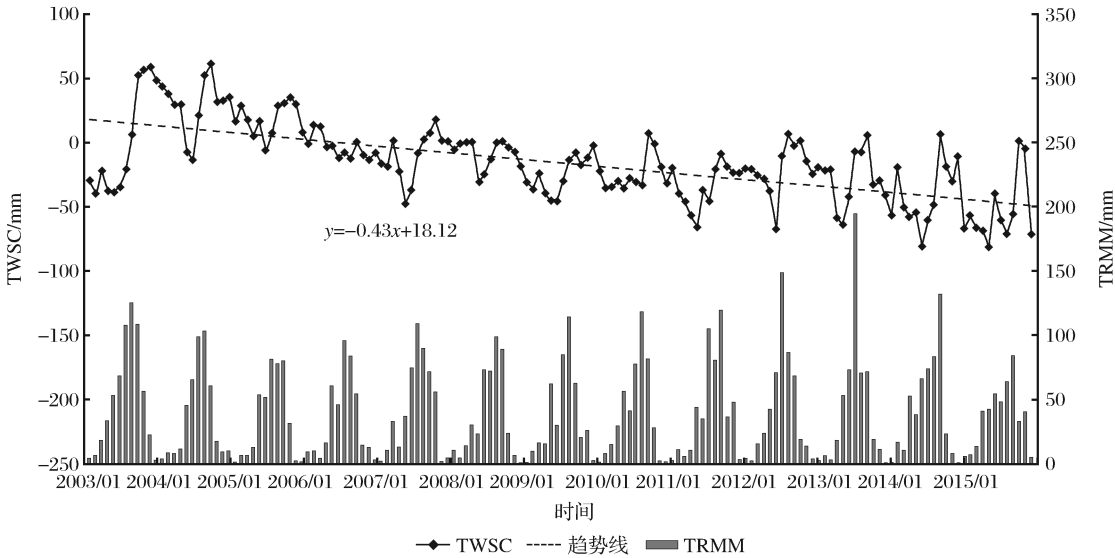


图 2 2003~2015 年黄土高原 TWSC 年际趋势  
Fig.2 The interannual trend of TWSC in the Loess Plateau from 2003 to 2015

截留、湖泊地下水调蓄及人类活动有关。

4.1.2 陆地水储量年内变化

过去 13 a 的 TWSC 存在明显的季节差异(图 3(a)),春季 TWSC 的值最低,秋季 TWSC 的值最高,夏季和冬季的 TWSC 相对比较稳定,整体表

现为秋季>冬季>夏季>春季的下降趋势。2003~2015 年每月 TWSC 值表现为 4~6 月份最低,9~11 月份最高(图 3(b)),黄土高原 TWSC 在 9 月份达到最高值,为 7.57 mm,5 月份达到最低值,为  $-37.98\text{ mm}$ ,平均值约为  $-15.41\text{ mm}$ ,整体处于亏

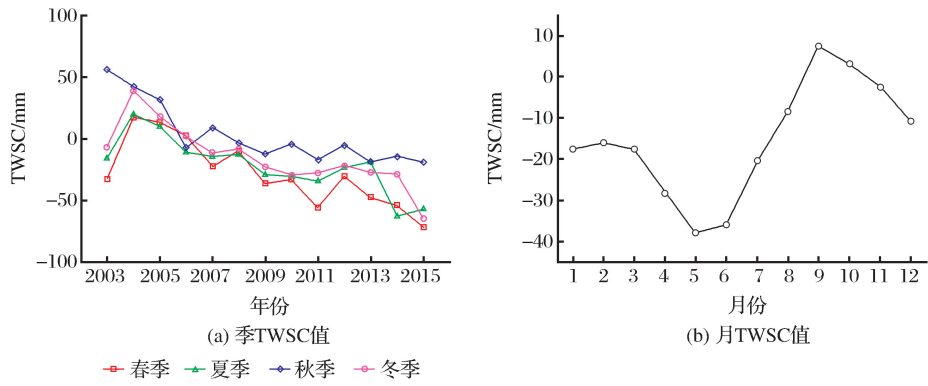


图 3 黄土高原 TWSC 的年内趋势

Fig.3 The trend of TWSC in Loess Plateau during the Year

损状态。

为便于理解和分析,根据区域水量平衡方程,黄土高原地区的陆地水储量等于降水量减去径流量和蒸发量的总和,但考虑到研究区并非完全封闭的区域,径流有输出和输入,且已有研究表明过去 10 a 该地区的径流损失量逐渐减少<sup>[26]</sup>,故在不考虑人为因素影响的情况下,降水量减去蒸散量(以下简称 P-E)可以近似反映研究区 TWSC 的补给和亏损状况。夏秋季节降水一般大于蒸发,冬春季节蒸发大于降水(图 4(a)),研究区处于季风和非季风交错地

带,雨热同期,TWSC 在夏季和秋季表现为补给,冬季和春季表现为亏损。根据 2003~2015 年每月 P-E 的平均表现,6 月中旬到 9 月底降水量大于蒸发量,10 月初到次年 5 月底降水量小于蒸发量(图 4(b)),而根据 2003~2015 年每月 TWSC 的平均表现,8 月中旬至 10 月中旬水储量变化表现为盈余状态,10 月中旬至次年 8 月中旬水储量变化表现为亏损状态(图 3(b)),这是因为黄土高原地区 TWSC 对降水的响应有 1~3 个月的延迟,因此,可以得知该地区陆地水储量的季节变化受到降水量和

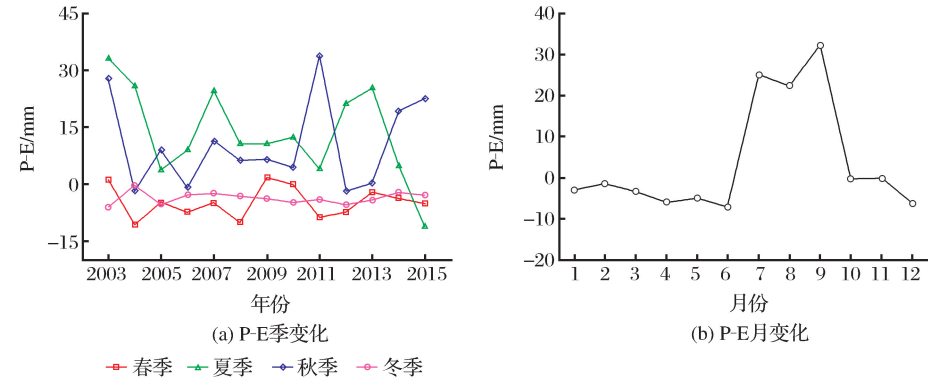


图 4 黄土高原 P-E(降水量减去蒸发量)年内变化

Fig.4 The variation of P-E (precipitation minus evaporation) in Loess Plateau during the Year

蒸散量的重要影响。

4.1.3 陆地水储量空间变化

2003~2015 年,黄土高原地区 TWSC 大致表现为自西北向东南逐年越来越少,只有 2004 年和 2005 年发生过明显的补给,其余年份均呈现出不同程度的亏损状态(图 5)。2003 年黄土高原北部 TWSC 处于 2 cm 内的盈余状态,南部基本处于 -2 cm 内的亏损状态;2004 年、2005 年整个黄土高原地区 TWSC 表现为自西北向东南越来越多的盈

余状态,在 2004 年山西、河南一带出现了最高值,达到 8.9 cm 左右;2006~2008 年整个黄土高原地区 TWSC 基本处于 -2 cm 左右的亏损状态,山西南部一带在 2006 年还处于盈余状态,到 2008 年已经变成明显的亏损状态;2009~2011 年黄土高原地区 TWSC 自西北向东南逐渐减少,整个地区已经没有盈余的现象,最低值达到了 -8 cm 左右;2012 年黄土高原地区 TWSC 发生了明显的补给现象,在青海地区和陕西南端出现了盈余的迹象,亏损的情况主



要发生的山西一带;2013~2015 年黄土高原地区 TWSC 仍表现为自西北向东南减少的亏损状态,但亏损的差异更大,宁夏、内蒙和陕西交界一带表现为 -2 cm 以内的亏损,2015 年时山西和河南交界地

带表现为亏损状态,约为 -14.7 cm。总体来看,2007~2015 年山西河南一带 TWSC 表现出明显的逐年下降趋势,这种空间变化趋势与曹艳萍和谢小伟等<sup>[48-49]</sup>的研究结果基本一致。

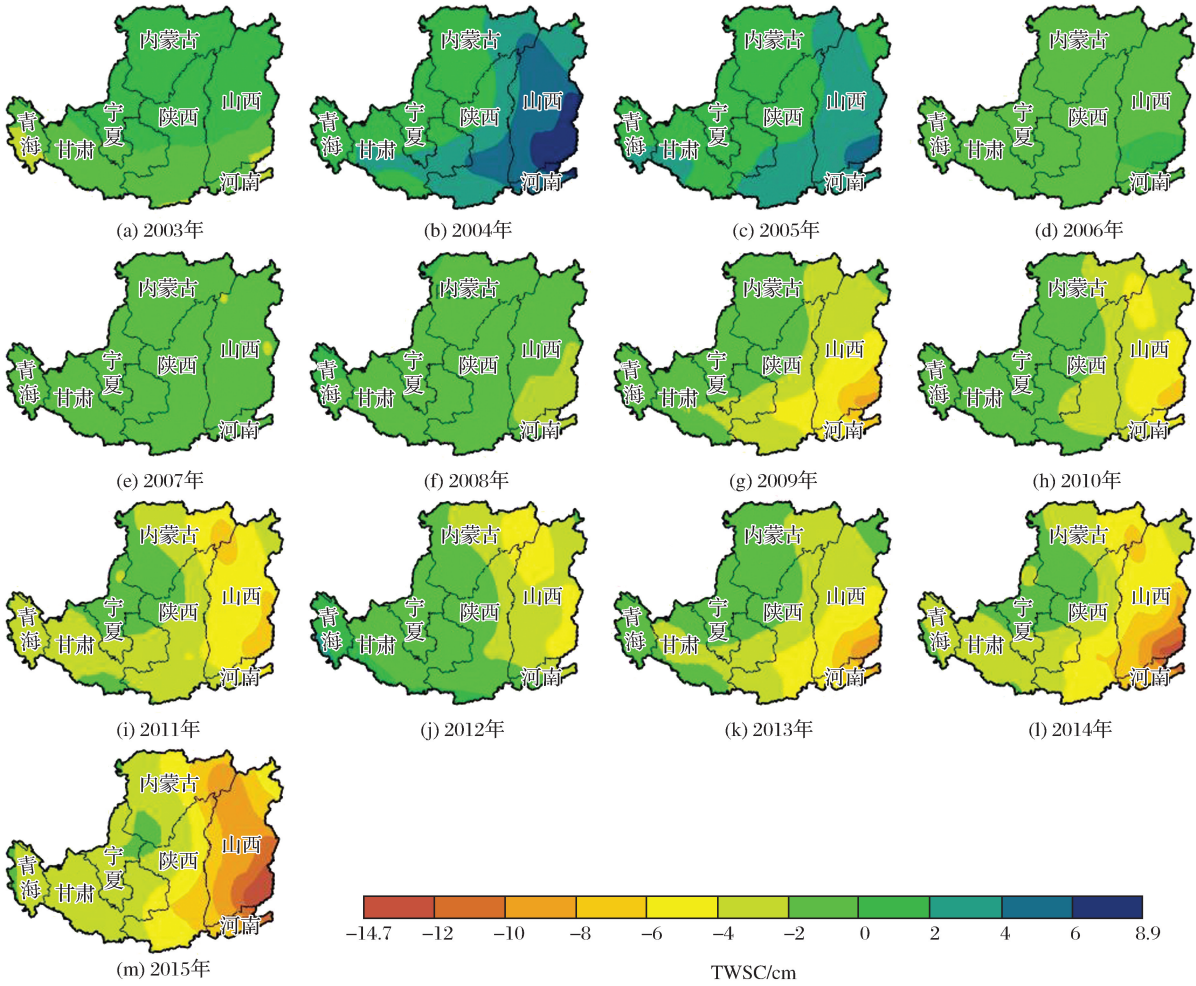


图 5 2003~2015 年黄土高原 TWSC 年际空间分布

Fig.5 The interannual spatial distribution of TWSC in the Loess Plateau from 2003 to 2015

过去 13 a 黄土高原 TWSC 整体表现为自西向东减少(图 6(a)),处于亏损状态,最小值可达 -4.5 cm。春季,青海、河南、山西南部 and 陕西南部的 TWSC 处于明显的亏损状态(图 6(b)),最低值可达 -7.5 cm,这是由于气温回升、植物开始生长造成的。夏季自东向西 TWSC 逐渐增加(图 6(c)),变化幅度达到最大,最大值出现在青海、青海和甘肃交界地带,处于 3 cm 以内的盈余状态,原因可能是冰川积雪融水和降雨共同补给;山西、河南一带亏损最为明显,最小值可达 -10.7 cm,可能与蒸发、农作物灌溉面积和工业活动有关。秋季黄土高原南部 TWSC 处于明显的盈余状态(图 6(d)),最高值达到 4.4 cm,原因是 7~9 月份青藏高原的冰川积雪融

水、山区降水和秦岭北麓的降水较多,在土壤水截留、湖泊地下水调蓄等影响下,水储量的滞后性也有体现;北部仍处于亏损状态,原因可能与降水量、下垫面类型以及人类活动有关。冬季 TWSC 处于亏损状态(图 6(e)),大致表现为从南到北亏损程度逐渐减轻,显示出纬向性差异,原因是气温的影响。

4.2 讨 论

4.2.1 TWSC 与环流指数的相关关系

黄土高原地区 TWSC 与所有的环流指数都呈正相关关系(表 1),其中与南海副高面积指数、太平洋副高面积指数、西太平洋副高强度指数、太平洋副高强度指数、西太平洋副高脊线、南海副高脊线、太平洋副高脊线、南海副高北界和太平洋副高北界通

过了  $P<0.05$  的检验,即这些环流指数的趋势越强, TWSC 越大;北半球副高面积指数、北半球副高强度指数、北半球副高北界等半球级的环流指数和亚洲区极涡面积、强度指数与 TWSC 没有通过显著性检验,但相关系数均为正值,说明北半球副高面积、

强度、北界和亚洲极涡面积、强度的增强可能会导致 TWSC 的增加。综上所述,黄土高原的 TWSC 主要受到太平洋、南海级别的气候系统的影响,更高的半球级别气候系统和更低的亚洲级别的气候系统对该地区 TWSC 影响并不显著。

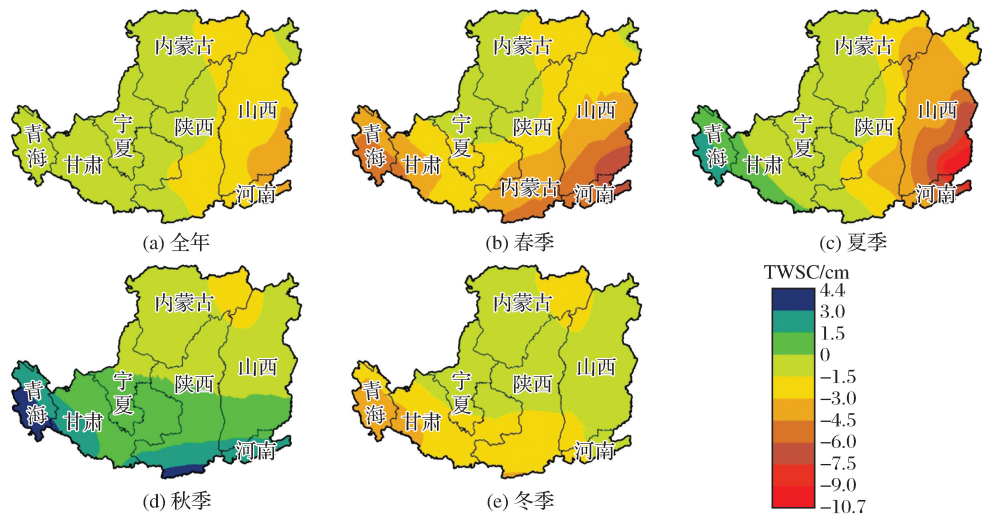


图 6 黄土高原 TWSC 的年内空间分布

Fig.6 The spatial distribution of TWSC in the Loess Plateau during the Year

黄土高原地区的降水、地表温度和蒸散发与南海副高面积指数没有通过显著性检验,但与其他的环流指数均通过了  $P<0.01$  的检验。蒸散发、降水和地表温度与北半球副高面积、强度、北界指数呈 0.75 以上的正相关,即北半球级的副高指数越强,降水量、蒸发量越多,地表温度越高;降水、蒸散发和地表温度与太平洋副高面积、强度、北界、脊线指数以及西太平洋副高强度、脊线指数,南海副高脊线、北界指数也呈显著的正相关关系,即这些环流指数趋势增强将导致蒸发、降水增加、地表温度升高;亚洲区极涡面积、强度指数与蒸散发、地表温度呈 0.85 以上的负相关,与降水呈 0.7 以上负相关,即亚洲极涡面积增加、极涡强度越强,降水、蒸散发和地表温度的值会随之减小。大的气候背景对黄土高原地区降水、蒸发和地温等气候变量有至关重要的影响,与该地区 TWSC 有直接的相关性,说明即使在人类活动较频繁的黄土高原地区,气候变化仍影响着该地区水储量变化。

4.2.2 降水和地表温度对 TWSC 的影响

2003~2015 年黄土高原的年均地表温度呈下降趋势,下降速率为  $0.144\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ (图 7(a))。地表温度下降最明显的地区出现在宁夏、甘肃和陕西的交界地带,下降幅度在  $0.01\sim0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,下降最大

值接近  $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,地表温度上升的地区分布在内蒙古、关中平原、河南和山西的部分区域,上升幅度多在  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  之内,最大值可达  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 7(c))。

表 1 黄土高原地区 TWSC 与环流背景的相关关系  
Table 1 Relationship of TWSC and circulation background in the Loess Plateau area

环流指数	水储量变化	蒸散发	降水	地表温度
北半球副高面积指数	0.12	0.83 **	0.79 **	0.78 **
南海副高面积指数	0.18 *	-0.01	0.03	0.14
太平洋副高面积指数	0.21 *	0.66 **	0.65 **	0.63 **
北半球副高强度指数	0.06	0.84 **	0.81 **	0.75 **
西太平洋副高强度指数	0.20 *	0.50 **	0.51 **	0.50 **
太平洋副高强度指数	0.18 *	0.58 **	0.60 **	0.56 **
西太平洋副高脊线	0.18 *	0.75 **	0.77 **	0.61 **
南海副高脊线	0.24 **	0.57 **	0.67 **	0.50 **
太平洋副高脊线	0.18 *	0.76 **	0.77 **	0.63 **
北半球副高北界	0.08	0.87 **	0.85 **	0.76 **
南海副高北界	0.21 *	0.65 **	0.72 **	0.58 **
太平洋副高北界	0.19 *	0.78 **	0.78 **	0.66 **
亚洲区极涡面积指数	0.13	-0.87 **	-0.72 **	-0.91 **
亚洲区极涡强度指数	0.14	-0.93 **	-0.79 **	-0.89 **

注: \*\*  $r<0.01$ ; \*  $r<0.05$

2003~2015 年黄土高原地区的区域平均年降水量基本保持在  $30\sim45\text{ mm}$  之间,呈  $0.031\text{ mm/a}$

的缓慢增加趋势(图 7(b))。降水量在空间上的变化趋势表现为:降水增加最明显的地区出现在陕西、河南和山西的交界地带,增幅可达 0.152 mm,宁夏、内蒙古、陕西中北部、山西北部及陇东一带保持

在 0.03 mm 以内的增量,下降最严重的地区出现在山西与河南的交界地带,最高降幅可达 0.063 mm,此外青海、甘肃南部、陕西南部、内蒙和山西交界地区保持在 0.02 mm 以内的下降量(图 7(d))。

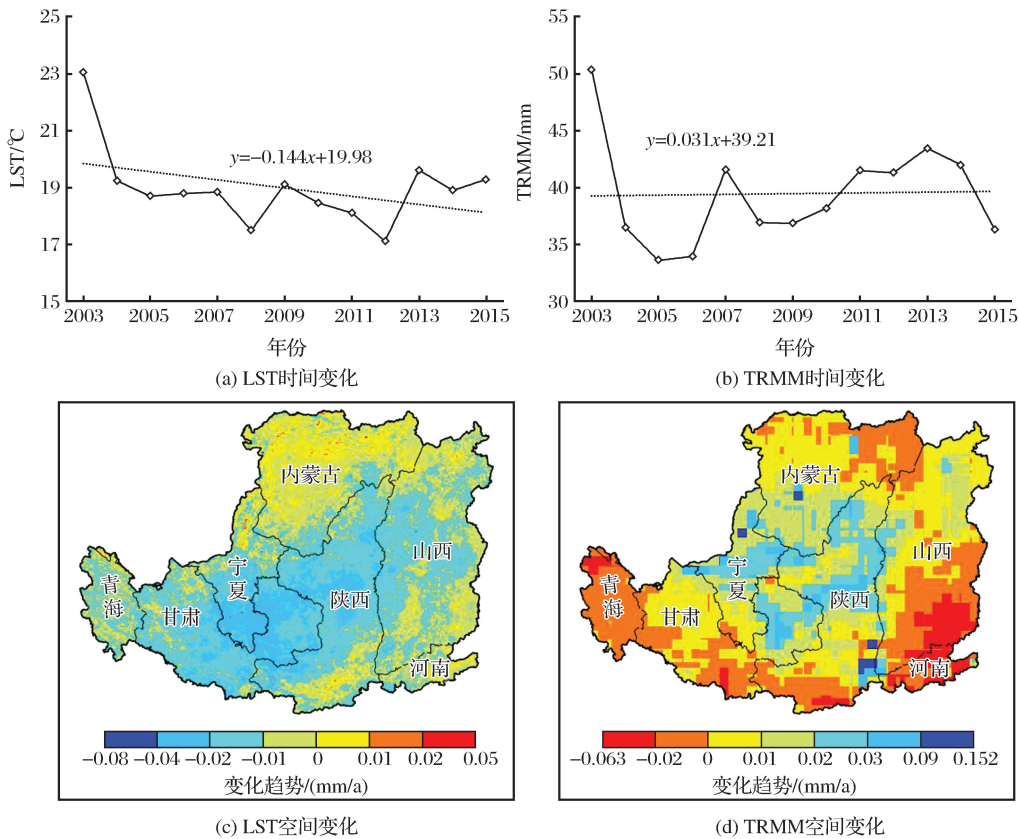


图 7 黄土高原地表温度和降水的时空变化

Fig.7 The temporal and spatial variation of surface temperature and precipitation in the Loess Plateau

利用克里金插值的 2003~2015 年 156 个月 TWSC 栅格数据与 TRMM 降水、MODIS 地表温度数据做空间相关,结果显示黄土高原 TWSC 与降水的相关系数自西南向东北减小,相关系数最高达 0.48,最小接近-0.3(图 8(a)),黄土高原 TWSC 与地表温度的相关系数自西向东减小,最小值是-0.47,最大值在 0.4 左右(图 8(b))。黄土高原 TWSC 与降水在大部分地区呈现正相关,相关性高值出现在接近青藏高原和秦岭的青海、甘肃和陕西南部;负值区则出现在山西、山西和陕西、内蒙、河南的交界地带,负值区域水储量变化受人类活动影响强烈,地形上也受到吕梁山、太行山的影响,单纯的降水并不能主导该区域水储量的变化。黄土高原 TWSC 与地表温度在大部分地区呈现负相关,相关性低值出现在山西、河南、陕西、内蒙古东部和陇东地区;正值区则出现在青海、甘肃中部、宁夏、内蒙西部和陕西西南部,原因可能与海拔、地形、降水量、季

节性冰川积雪融水的影响程度有关,说明地表温度不是该区域水储量变化的主导因素。

2003~2015 年黄土高原地区降水增多,地表温度减少,TWSC 反而减少,说明降水和地温一定程度上影响着该地区的水储量季节变化,其多年持续下降受到气候变化之外的其他因素的深刻影响,可能与灌溉、采矿和地下水开采等人类活动有关。

4.2.3 人类活动对 TWSC 的影响

黄土高原水储量变化存在明显的空间差异,降水、径流补给较多的东南部 TWSC 值小于降水、径流更少的西部、北部。降水与 TWSC 在山西大部 and 陕西、内蒙少部分地区呈负相关(图 8(a)),说明东部、东南部水储量的亏损并不是降水引起的;地表温度与 TWSC 在东部、东南部呈正相关(图 8(b)),说明该区域地表温度越高水储量变化越小;夏秋季节降水大于蒸发(图 4),说明该区域水储量的持续亏损受到除自然因素之外的人类活动影响。



人类活动对水储量变化的影响不仅包括引水灌溉、工业生产、城镇和乡村人口需水对区域内径流和地下水的影响,还包括土地利用、土地覆被等下垫面状况的变化。许炯新等<sup>[50]</sup>的研究表明持续增加的黄土高原人口、灌溉面积和水土保持面积对黄河流域水循环影响强度至少达 68% 以上。贺燕子等<sup>[51]</sup>的研究表明陕西省从南到北,人类活动对径流变化的影响逐渐加强,气候因素占的份量变小,陕北是煤化工业和水土保持工作主要耗水地区,人类活动对

径流变化的平均贡献率达 77.47%,即便是在关中地区,工农业及生活用水等人类活动的平均贡献率也达 50.34%。黄土高原东南部水储量在春夏季节亏损最严重(图 6(b)、6(c)),且该区域近年来亏损趋势加快(图 5),山西、河南和陕西交界地带人类活动最为频繁(图 1),煤炭等工业生产节奏快,生活生产需水量大,也是过去几年退耕还林等水土保持工作的重点地区,故人类活动对山西和陕晋豫交界地带水储量变化的强烈影响是该地区降水和 TWSC 呈

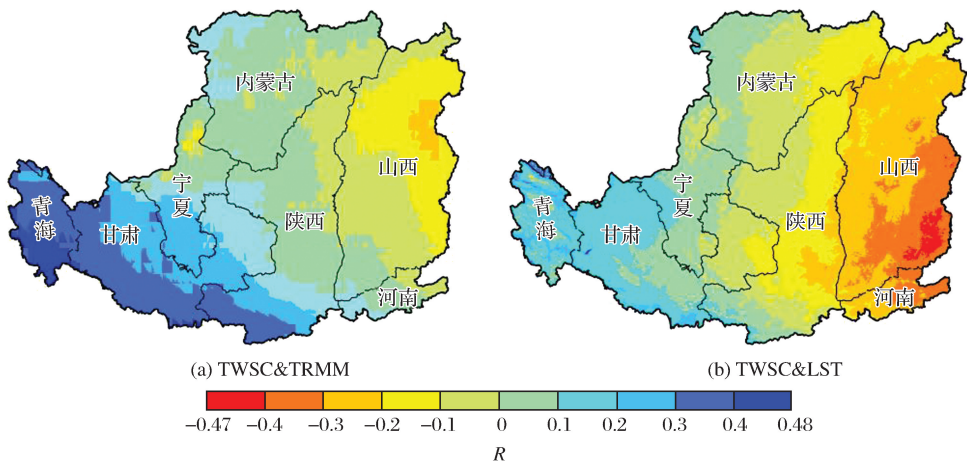


图 8 黄土高原 TWSC 与降水和地表温度的空间相关关系

Fig.8 Spatial correlation of TWSC with precipitation and surface temperature in the Loess Plateau

负相关的主要因素。

5 结 语

本文利用 2003~2015 年 GRACE 数据研究了黄土高原地区的 TWSC 的分布特征,并与 MODIS 地表温度、TRMM(3B43)降水、GLDAS 蒸散发数据进行比较,发现气候变化和人类活动共同对黄土高原 TWSC 产生影响,得出以下结论:

(1) 2003~2015 年黄土高原 TWSC 呈现  $-5.16\pm1.51$  mm/a 的下降趋势,最大值 61.52 mm 出现在 2004 年 9 月,最小值  $-81.1$  mm 出现在 2015 年的 5 月,季节变化表现为秋季>冬季>夏季>春季的下降趋势。

(2) 过去 13 a 黄土高原 TWSC 在空间表现为自西向东减少,整体处于亏损状态,最小值达  $-4.5$  cm,发生在春季和夏季的山西及陕晋豫交界地带。2003~2015 年 TWSC 逐年表现为自西北向东南越来越少,在 2004 年和 2005 年处于明显的盈余状态,其余年份均处于不同程度的亏损状态,2015 年水储量亏损最严重。

(3) 降水对黄土高原西南部、南部的 TWSC 有重要影响,地表温度对黄土高原东南部、东部的 TWSC 有重要影响。黄土高原 TWSC 主要受到太平洋、南海级别的气候系统的影响,与降水的相关系数表现为自西南向东北减小,最高值达 0.48,但西南部的降水表现为 0.02 mm 以内的下降趋势,说明青海省、甘肃省南部及陕西省南部一带的黄土高原水储量变化受到降水的重要影响;黄土高原 TWSC 与地表温度的相关系数自西向东减小,最小值是  $-0.47$ ,但东南部的地表温度基本表现出  $0.01$  °C 的微弱上升趋势,说明山西省南部、河南省一带黄土高原水储量变化一定程度上受到地表温度的影响。

(4) 人类活动对山西和陕晋豫交界地带 TWSC 影响较大。黄土高原东部、东南部的的水储量变化对人类活动的响应更为强烈。

参考文献 (References):

[1] Cao Y, Nan Z, Cheng G. 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.



- [2] Long D, Shen Y, Sun A, *et al.* Drought and Flood Monitoring for a Large Karst Plateau in Southwest China Using Extended GRACE Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 145-160.
- [3] Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, *et al.* Time Variations of Land Water Storage from an Inversion of 2 Years of GRACE Geoids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1): 283-301.
- [4] Hirschi M, Seneviratne S I, Schär C. Seasonal Variations in Terrestrial Water Storage for Major Midlatitude River Basins[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(1): 39-60.
- [5] 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: Solid Earth*, 2009, 114: B505404. Doi: 10. 1029/2008JB006056.
- [6] Chen Yaning, Xu Changchun, Yang Yuhui, *et al.* Hydrology and Water Resources Variation and Its Response to Regional Climate Change in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331-1341. [陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1331-1341.]
- [7] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based Estimates of Groundwater Depletion in India[J]. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-1002.
- [8] Su Xiaoli, Ping Jinsong, Ye Qixin. Terrestrial Water Variations in the North China Plain Revealed by the GRACE Mission[J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 42(6): 917-922. [苏晓莉, 平劲松, 叶其欣. GRACE 卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 917-922.]
- [9] Zhong Min, Duan Jianbin, Xu Houze, *et al.* Trend of China Land Water Storage Redistribution At Medi-and Large-Spatial Scales in Recent Five Years by Satellite Gravity Observations[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009(9): 1290-1294. [钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 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[J]. *科学通报*, 2009(9): 1290-1294.]
- [10] Cazenave A, Nerem R S. Redistributing Earth's Mass[J]. *Science*, 2002, 297(5582): 783-784.
- [11] Cox C M, Chao B F. Detection of A Large-Scale Mass Redistribution in the Terrestrial System Since 1998[J]. *Science*, 2002, 297(5582): 831-833.
- [12] Xu Min, Ye Baisheng, Zhao Qiudong. Temporal and Spatial Pattern of Water Storage Changes Over the Yangtz River Basin During 2002~2010 based on GRACE Satellite Data[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(1): 68-77. [许民, 叶柏生, 赵求东. 2002~2010 年长江流域 GRACE 水储量时空变化特征[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(1): 68-77.]
- [13] Yang Shengtian, Yu Xinyi, Ding Jianli, *et al.* A Review of Water Issues Research in Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 79-93. [杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 79-93.]
- [14] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, *et al.* GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505.
- [15] Ramillien G, Cazenave A, Brunau O. Global Time Variations of Hydrological Signals from GRACE Satellite Gravimetry[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 158(3): 813-826.
- [16] Crowley J W, Mitrovica J X, Bailey R C, *et al.* Land Water Storage Within the Congo Basin Inferred from GRACE Satellite Gravity Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): L19402. Doi: 10.1029/2006GL027070.
- [17] Strassberg G, Scanlon B R, Rodell M. Comparison of Seasonal Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with Groundwater-Level Measurements from the High Plains Aquifer (USA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(14): L14402.
- [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] Long D, Scanlon B R, Longuevergne L, *et al.* GRACE Satellite Monitoring of Large Depletion in Water Storage in Response to the 2011 Drought in Texas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(13): 3395-3401.
- [20] Yi H, Wen L. Satellite Gravity Measurement Monitoring Terrestrial Water Storage Change and Drought in the Continental United States[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19909. Doi: 10.1038/Srep/9909.
- [21] Deng H, Chen Y. Influences of Recent Climate Change and Human Activities on Water Storage Variations in Central Asia[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 46-57.
- [22] Duan Jianjun, Wang Yanguo, Wang Xiaofeng, *et al.* Impact of Climate Change and Human Activities on the Water Resources and Ecological Environments in the Tarim River Basin in 1957~2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 781-791. [段建军, 王彦国, 王晓凤, 等. 1957-2006 年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 781-791.]
- [23] Cao Yanping, Nan Zhuotong. Monitoring Water Storage Variations in the Heihe River Basin by the GRACE Gravity Satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 719-727. [曹艳萍, 南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(6): 719-727.]
- [24] Luo Zhicai, Li Qiong, Zhong Bo. Water Storage Variations in Heihe River Basin Recovered from GRACE Temporal Gravity[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 676-681. [罗志才, 李琼, 钟波. 利用 GRACE 时变重力场反演黑河流域水储量变化[J]. *测绘学报*, 2012, 41(5): 676-681.]
- [25] Liao Mengsi, Zhang Xinping, Huang Huang, *et al.* Monitoring Water Storage Changes in Dongting Lake Basin from GRACE Gravity Satellite[J]. *Progress in Geophysics (In Chinese)*, 2016, (1): 61-68. [廖梦思, 章新平, 黄煌, 等. 利用 GRACE 卫

- 星监测近 10 年洞庭湖流域水储量变化[J].地球物理学进展, 2016,(1):61-68.]
- [26] Li Aihua, Cui Shengyu, Wang Hongrui, *et al.* Water Storage Changes in the Middle Reaches of the Yellow River Basin based on GRACE Time Variable Gravitation Model[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 461-473. [李爱华, 崔胜玉, 王红瑞, 等. 基于 GRACE 卫星时变重力场模型的黄河中游地区水储量变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 461-473.]
- [27] Li Xiaoying, Ye Genmiao, Cai Chenkai, *et al.* Analysis and Prediction of the Anomaly of Terrestrial Water Storage in the Yangtze River Basin based on MODIS and GRACE[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5): 130-135. [李晓英, 叶根苗, 蔡晨凯, 等. 基于 GRACE 和 MODIS 数据的长江流域陆地水储量变化分析及预测[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 130-135.]
- [28] Ni Shengnan, Chen Jianli, Li Jin, *et al.* Terrestrial Water Storage Change in the Yangtze and Yellow River Basin from GRACE Time-Variable Gravity Measurements[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4): 49-55. [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.]
- [29] Li Wudong, Guo Jinyun, Chang Xiaotao, *et al.* Terrestrial Water Storage Change in the Tianshan Mountains of Xinjiang Measured by GRACE during 2003~2013[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7): 1021-1026. [李武东, 郭金运, 常晓涛, 等. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003~2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42(7): 1021-1026.]
- [30] Wang Zhicheng, Zhang Hui, Li Wanjiang, *et al.* Study on Water Storage Variations in the Akesu River Basin based on GRACE Dataset[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(6): 1-8. [王志成, 张辉, 李万江, 等. 基于 GRACE 数据的天山阿克苏河流域水储量变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6): 1-8.]
- [31] Xu Min, Zhang Shiqiang, Wang Jian, *et al.* Temporal and Spatial Patterns of Water Storage Change of Qilian Mountains in Recent 8 Years based on GRACE[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(3): 458-467. [许民, 张世强, 王建, 等. 利用 GRACE 重力卫星监测祁连山水储量时空变化[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 458-467.]
- [32] Sun Qian, Ding Jianli, Mamat · Sawut, *et al.* Temporal-Spatial Changes of Water Storage in Xinjiang, China during 2003~2012[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1650-1656. [孙倩, 丁建丽, 买买提·沙吾提, 等. 2003~2012 年新疆陆地水储量时空变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1650-1656.]
- [33] Hao Jiansheng, Zhang Feiyun, Zhao Xin, *et al.* Spatiotemporal Change of Water Storage and Its Influencing Factors in the Ili-Balkhash Basin based on GRACE Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 883-892. [郝建盛, 张飞云, 赵鑫, 等. 基于 GRACE 监测数据的伊犁—巴尔喀什湖盆地水储量变化特征及影响因素[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 883-892.]
- [34] Li Qiong, Luo Zhicai, Zhong Bo, *et al.* Terrestrial Water Storage Changes of the 2010 Southwest China Drought Detected by GRACE Temporal Gravity Filed[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 1843-1849. [李琼, 罗志才, 钟波, 等. 利用 GRACE 时变重力场探测 2010 年中国西南干旱陆地水储量变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-1849.]
- [35] Wang Yang, Wei Jiahua, Xie Hongwei. The Variation of Terrestrial Water Storage in the Qaidam Basin based on GRACE Data[J]. South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 75-82. [王洋, 魏加华, 解宏伟. 基于 GRACE 的柴达木盆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 75-82.]
- [36] Shu Qiuyan, Pan Yun, Gong Huili, *et al.* Spatiotemporal Analysis of GRACE-based Groundwater Storage Variation in North China Plain[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2): 132-137. [束秋妍, 潘云, 宫辉力, 等. 基于 GRACE 的华北平原地下水储量时空变化分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 132-137.]
- [37] Yan Jiabao, Jia Shaofeng, Lyu Aifeng, *et al.* Spatial-Temporal Variation Characteristics of China Terrestrial Water Storage in the Last Ten Years[J]. South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology (In Chinese), 2016, 14(4): 21-28. [严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 21-28.]
- [38] Chen Kun, Jiang Weiguo, He Fuhong, *et al.* Temporal and Spatial Variations Research of GRACE Water Storage Changes in China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 275-286. [陈坤, 蒋卫国, 何福红, 等. 基于 GRACE 数据的中国水储量变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 275-286.]
- [39] Ye Shuhua, Su Xiaoli, Ping Jinsong, *et al.* Land Water Storage Variations in China and Adjacent Areas Revealed by the GRACE Gravity Mission[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1580-1586. [叶叔华, 苏晓莉, 平劲松, 等. 基于 GRACE 卫星测量得到的中国及其周边地区陆地水量变化[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(5): 1580-1586.]
- [40] Zhao Q, Wu W, Wu Y. Variations in China's Terrestrial Water Storage over the Past Decade Using GRACE Data[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 6(3): 187-193.
- [41] Yang P, Xia J, Zhan C, *et al.* Monitoring the Spatio-Temporal Changes of Terrestrial Water Storage Using GRACE Data in the Tarim River Basin between 2002 and 2015[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 218-228.
- [42] Cheng M K, Tapley B D. Temporal Variations in J2 from Analysis of SLR Data[C]// Proc. 12<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, 2000.
- [43] Cheng M, Tapley B D. Variations in the Earth's Oblateness During the Past 28 Years[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109: B09402.
- [44] Swenson S, Wahr J. Post-Processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L08402.

- [45] 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.
- [46] Landerer F W, Swenson S C. Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): 04531.
- [47] Shu Meizhen, Yang Chuanguo, Li Yulong, *et al.* Temporal and Spatial Variation of Water Storage in Huang-Huai-Hai Area During 2003 ~ 2014 based on GRACE Satellite Data[J]. *South-To-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16 (1): 83-88. [束美珍, 杨传国, 李玉龙, 等. 黄淮海地区 2003~2014 年 GRACE 水储量时空变化[J]. *南北水调与水利科技*, 2018, 16 (1): 83-88.]
- [48] Cao Yanping, Zhao Fang. Terrestrial Water Storage Changes of He'nan Province from GRACE Satellite[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 295-301. [曹艳萍, 赵芳. 利用 GRACE 卫星研究河南省水储量时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 295-301.]
- [49] Xie Xiaowei, Xu Caijun, Gong Zheng, *et al.* Groundwater Storage Changes in Shan-Gan-Jin Plateau derived from GRACE[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(1): 133-137. [谢小伟, 许才军, 龚正, 等. 利用 GRACE 反演陕甘晋高原地下水储量变化[J]. *测绘通报*, 2018(1): 133-137.]
- [50] Xu Jiongxin. Impact of Human Activities on the Stream Flow of Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 648-655. [许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 648-655.]
- [51] He Yanzi, Yue Dapeng, Da Xing, *et al.* A Preliminary Study on Impact of Climatic Change and Human Activity on Water Resources: Taking Shaanxi Province as an Example[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016(12): 87-93. [贺燕子, 岳大鹏, 达兴, 等. 气候变化和人类活动对水资源影响的初探——以陕西省为例[J]. *江西农业学报*, 2016(12): 87-93.]

## Temporal and Spatial Variation and Influencing Factors of Water Storage on the Loess Plateau

Hu Pengfei<sup>1</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Zhang Yanli<sup>1</sup>, Zhu Guofeng<sup>1,2</sup>,  
He Panxing<sup>3</sup>, Cao Yongpan<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In recent years, the conditions of the underlying surface of the Loess Plateau have changed greatly. We researched the changes of water storage by using multi-source data to further reveal the region's water cycle process. GRACE data were used to study the temporal and spatial characteristics of Terrestrial Water Storage Changes (TWSC) in the Loess Plateau for 2003~2015 years, combined with the atmospheric circulation data, TRMM (3B43) precipitation, GLDAS evaporation and MODIS surface temperature data to analyze the impact of climate change and human activities on TWSC. The results shown that: ① in the 2003~2015 years, the TWSC of Loess Plateau showed a decreasing trend with the rate of  $-5.16 \pm 1.51$  mm/a, and the seasonal variation shown autumn > winter > summer > spring. ② in the past 13 years, the TWSC of Loess Plateau were decreasing from west to east, and the whole were in the state of loss, the minimum value was up to  $-4.5$  cm. ③ Precipitation has a greater influence on the TWSC in the southwest and south of Loess Plateau, but the surface temperature plays dominated role in the southeast and east. ④ Human activities have a greater impact on TWSC in Shanxi province and the border zone of Shaanxi, Shanxi and Henan. The comparative study of multi-source data can more accurately reflect the spatial and temporal distribution of water storage changes in the region, and it also have great significant for further research of water cycle process.

**Key words:** the Loess Plateau; TWSC; Climate change; Human activities