河西走廊水资源变化与生态环境时空关联分析

李晓婧，白艳萍，李 萌，马金辉
（兰州大学 资源环境学院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：[目的] 对河西走廊地区 2003—2015 年水资源和生态环境的时空变化规律以及时空关联关系进行分析，为该区水资源合理开发利用及实现生产、生活和生态可持续发展提供科学依据。[方法] 利用 GRACE 重力卫星数据、TRMM 降水数据与 MODIS 的植被指数数据，通过线性回归与相关性分析等方法，分别对河西走廊整体、3 个流域分区和像元尺度的水资源变化与生态环境时空变化规律及其相互作用机制进行分析。[结果] 年尺度上河西走廊及 3 个流域分区的水储量均呈现下降趋势，黑河流域与石羊河流域下降速度最大。研究区历年降水趋势稳定无明显变化，植被呈正增长趋势。月尺度上水储量变化与降水量和植被指数呈正相关，年尺度上水储量变化量与降水量不存在相关关系，与植被指数年均值存在高度负相关，并表现出明显的空间异质性和尺度效应。[结论] 研究区人工植被尤其是耕地的快速、持续上升，加大了水资源的消耗，造成水储量逐年下降。

关键词：河西走廊；GRACE 重力卫星；水储量变化；时空变化；植被
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0275-06 **中图分类号**：TV211，X171.1

文献参数：李晓婧，白艳萍，李萌，等. 河西走廊水资源变化与生态环境时空关联分析[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：275-280. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20190321.001；Li Xiaojing，Bai Yanping，Li Meng，et al. Analysis on spatiotemporal correlation between water resource change and ecological environment in Hexi Corridor[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：275-280.

Analysis on Spatiotemporal Correlation Between Water Resource Change and Ecological Environment in Hexi Corridor

Li Xiaojing，Bai Yanping，Li Meng，Ma Jinhui
(*College of Earth Environmental Sciences*，*Lanzhou University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730000，*China*)

Abstract：[Objective] The temporal and spatial variation of water resources and ecological environment in Hexi Corridor as well as their spatial and temporal correlation from 2003 to 2015 were analyzed in order to provide scientific basis for promoting reasonable development and utilization of water resources and realizing sustainable development of production，life，and ecology in the study area. [Methods] Based on the GRACE gravity satellite，TRMM precipitation，and MODIS vegetation index data，this study investigated the spatiotemporal variations of water resources and ecological environment as well as their interaction mechanisms in the pixel，watershed，and region levels，using the linear regression and correlation analysis. [Results] The annual water storage in the Hexi Corridor and its three watershed areas presented a downward trend with the highest decline rate in the Heihe and Shiyang basins. There had nonsignificant trend in the precipitation in the study area，and the vegetation presented an increasing trend. The monthly water storage was positively correlated with monthly precipitation and NDVI. The annual water storage was independent of annual precipitation，while it was highly negatively correlated with annual averaged NDVI，and this relationship presented apparent spatial heterogeneity and scale dependent. [Conclusion] The rapid and continuous increase in the artificial vegetation，especially in the cultivated land，accelerated the water resources consumption and caused the decrease in annual water reserves in study area.

Keywords：**Hexi Corridor；GRACE gravity satellite；water storage change；spatiotemporal distribution；vegetation**

收稿日期：2018-09-17 **修回日期**：2018-10-09
资助项目：国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“基于时序 InSAR 技术的中巴经济走廊地表变形动态监测与地质灾害危险性评价”(41661144046)
第一作者：李晓婧(1993—)，女(汉族)，河北省石家庄市人，硕士研究生，研究方向为 GIS 空间分析与建模。E-mail：lixj2016@lzu.edu.cn。
通讯作者：马金辉(1964—)，男(回族)，甘肃省天水市人，博士，副教授，主要从事 GIS 空间分析与地表变形方面的研究。E-mail：majh@lzu.edu.cn。

水资源是我国西北内陆地区社会经济发展和生态平衡的关键制约因素[1]。在气候变化及人类活动影响不断加剧的背景下,从区域到全球尺度监测陆地总水储量及各要素的变化对人类生存和可持续发展具有重要意义[5]。重力反演与气候试验卫星GRACE(gravity recovery and climate experiment)广泛地被应用与中长空间尺度流域的水储量变化研究[2]。地球各系统间的质量重新分布和迁移引起地球重力场的变化,在年或季较短时间尺度上,主要由地球表层大气、海洋、陆地水质量交换引起。通过精确观测地球重力场随时间的变化,可以反演地球水质量变化的情况[3]。目前,利用重力卫星重建地球重力场取得了丰富的成果[4-9],是传统陆地水文观测技术的有效补充[5]。河西走廊位于甘肃省西北部,行政上属于甘肃省张掖、酒泉、武威、金昌、嘉峪关 5 市。研究区气候干旱,属于大陆性气候区,年降水量仅为 40~400 mm,年蒸发量却高达 1 500~3 000 mm。该地区地势南高北低,南部祁连山地的冰川储量丰富[10],是河西地区降水较多的地区,也是河西走廊石羊河、黑河和疏勒河 3 大内陆河的发源地。河西走廊干旱缺水,生态环境极为脆弱,是制约河西走廊地区社会经济可持续发展的主要瓶颈[11]。加之人类活动对水资源的过度开发利用,造成了天然绿洲退缩、地下水位下降、内陆河断流、沙漠化扩大等严重的生态问题[12]。本文对河西走廊水资源和生态环境的时空变化规律、以及时空关联关系进行分析,旨在为干旱区水资源合理开发及实现生产、生活和生态可持续发展提供科学依据。

1 研究资料及研究方法

1.1 数据来源

国际上应用解算过的 GRACE 卫星数据来反演全球以及区域的陆地水储量的变化,通行的做法[13]有:一种是应用已解算的月重力场模型数据直接求解;另一种是利用卫星轨道数据推求区域陆地水储量变化,即 Mascon 方法。本文 GRACE 数据采用空间研究中心(CSR)提供的 2003—2015 年的 RL05 GRACE MASCON 解决方案(http://www.csr.utexas.edu/grace),空间分辨率为 0.5°,时间分辨率为 1 个月,栅格值表示等效水高。由于 GRACE 部分月度数据缺失,采用缺失月份多年平均值表示该月的等效水高。降水采用 NASA 网站提供的 2003—2015 年 TRMM 3B43 数据(https://pmm.nasa.gov),NDVI(归一化差分植被指数)数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的 MOD13 产品。2000,2005,2010,2015 年的土地利用/覆盖类型数据由中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)提供。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势分析 采用一元线性回归趋势分析法模拟每个栅格的变化趋势,计算公式为:

$$k=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\mathrm{raster}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{raster}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2}$$

式中:i——时间段序号;n——监测时间段累计次数;raster_i——第 i 时间段栅格图层。

1.2.2 相关性分析 计算两个时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 相关系数通常用以下公式:

$$r_{xy}=\frac{C_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}=\frac{\sum_{t=1}(x_t-\bar{x})(y_t-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}(x_t-\bar{x})^2\sum_{t=1}(y_t-\bar{y})^2}}$$

式中:σ_x,σ_y——x 和 y 的均方差;$\bar{x}$,$\bar{y}$——均值;C_{xy}——x 和 y 的协方差;r_{xy}——x 和 y 序列的互相关系数;n——时间序列的长度。

2 研究结果

2.1 水储量时空变化

利用一元线性回归分析法,计算研究区每个像元 2003—2015 年水储量变化趋势,结果如图 1 所示。由图 1 可知,研究区祁连山地区水储量呈增长趋势,等效水柱每年最大增长 3.1 mm,沿着径流方向水储量增长趋势愈弱,直至为减少趋势,等效水柱每年最大减少 1.9 mm。

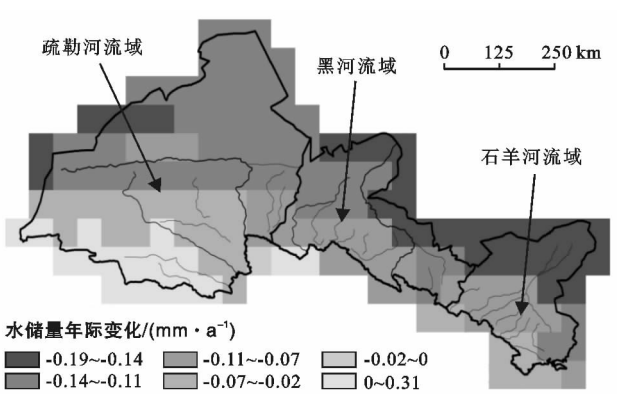


图 1 河西走廊 GRACE 等效水高变化趋势空间分布

通过区域统计得到河西走廊及河西走廊内 3 大流域 GRACE 等效水高月度变化折线图(图 2)。结果显示研究区水储量变化在月尺度上表现出明显的

周期性,波动范围基本保持在－20～20 mm 之间,周期为 12 个月,表示研究区整体及 3 大流域水储量变化存在显著的年周期;疏勒河流域与黑河流域水储量变化在年内波动变化的最高值和最低值出现月份一致。经过 12 次滑动平均及线性回归,可观察到研究区及 3 大流域水储量变化均呈下降趋势。通过观察可以发现疏勒河流域 2003—2009 年水储量变化趋势平稳,2009 年后水储量在波动中下降,2011—2015 年水储量年内变化波动范围与极大值逐年增大;黑河流域 2003—2010 年水储量稳定下降,2010—2015 年水储量在波动中下降且年内变化波动范围较大,年内变化的极大值呈增长趋势;石羊河流域水储量呈逐年下降趋势,年内变化波动范围较稳定。研究区 3 大流域中石羊河流域水储量降低速度最快,约为 0.146 3 mm/月,黑河流域水储量降低速度较快,约为 0.134 7 mm/月,疏勒河流域水储量下降速度较慢,约为 0.085 mm/月,研究区整体水储量呈较快的下降趋势,约为 0.109 2 mm/月。

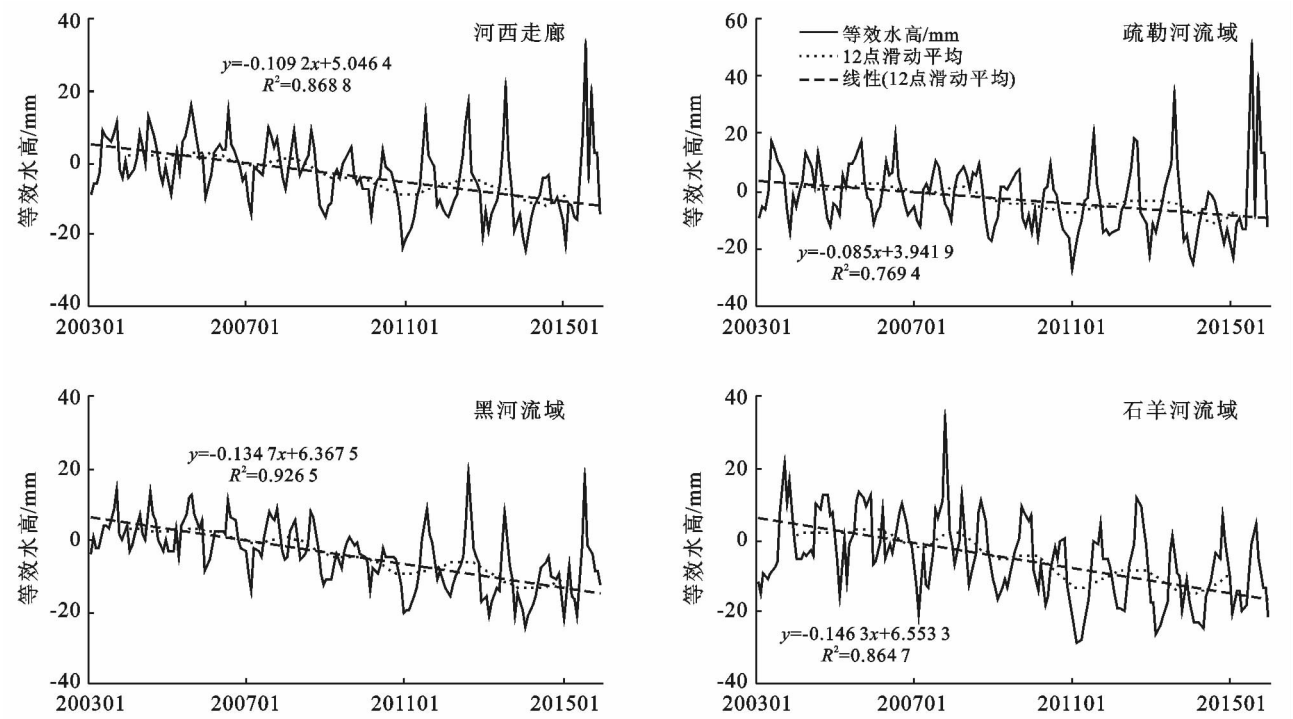


图 2　研究区水储量变化

利用 2002—2015 年河西走廊整体及其 3 大流域月尺度水储量变化值多年平均值,分析研究区年内水储量变化情况(图 3)。疏勒河流域水储量在 4 月份进入累积状态,7 月份达到最高值,然后开始逐渐下降,12 月降至最低值。黑河流域水储量在 1 至 7 月缓慢上升,7 月份进入累积状态,同时达到全年最高值,然后缓慢下降,在 10 月下降至亏损状态。石羊河流域水储量 1 至 9 月在波动中上升,7 月进入累积状态,9 月达到全年最高,11 月下降至亏损状态。疏勒河流域水储量年内波动幅度最大,石羊河流域水储量年内变化相对于疏勒河流域及黑河流域呈现一定的滞后效应,晚 2 个月达到全年最高值。

2.2　水储量变化与降水的关系

通过区域统计得到 2003—2015 年河西走廊及 3 个流域分区的历年年降水量,结果显示研究区及 3 个流域分区的年降水总体趋势平稳,线性趋势斜率接近于 0,黑河流域年降水年际变化波动范围较大。利用 2003—2015 年河西走廊整体及其 3 大流域月尺度降水数据,分别计算各月累年均值,结果如图 4 所示。研究区及其 3 大流域在冬季降水量最少,春季降水开始增多,夏季降水量最大,秋季降水量开始减少。

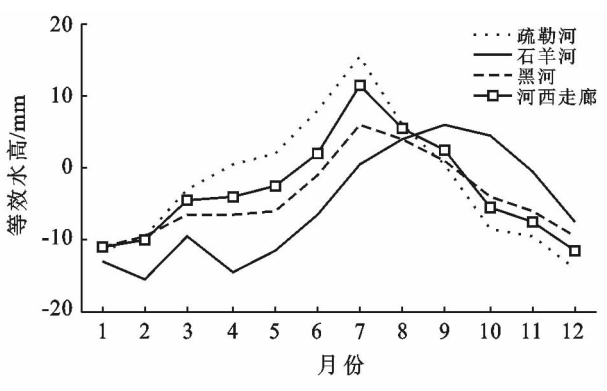


图 3　研究区各月等效水高累积多年平均值

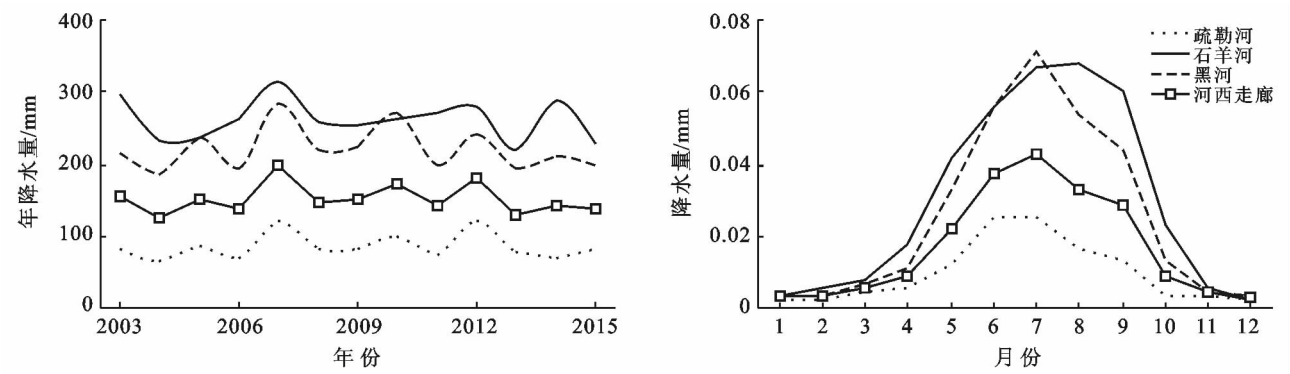


图 4 研究区年降水变化趋势和各月降水累积多年平均值

通过基于像元通过对多年 GRACE 等效水高与降水进行相关性分析(图 5),河西走廊南部的祁连山地年水储量与年降水为正相关,研究区祁连山地以北年水储量与年降水为负相关,是由于河西走廊 3 大流域水源补给主要来源为祁连山冰雪融水,研究区流域中下游干旱少雨,潜在蒸散发量大于降水量;另一方面,由甘肃省水资源公报可知 2003—2015 年研究区中游及下游的农田有效灌溉面积呈增加趋势,水资源的补给和消耗除了受降水量影响外,还深受地表径流和地下水的补给、径流和排泄以及人类生产、生活和生态用水等因素影响。因此,研究区除祁连山地区以外,水储量的变化受降水影响较小。

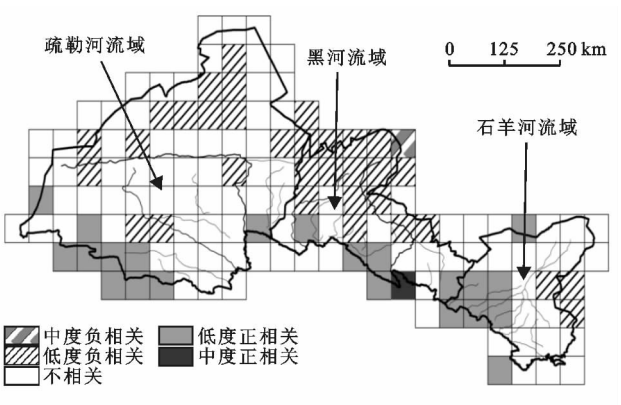


图 5 河西走廊年水储量变化与年降水相关系数分布

利用区域统计得到的研究区 2003—2015 年水储量变化值与降水量,进行月尺度与年尺度相关性分析(表 1)。月尺度下,研究区整体的水储量变化与降水正相关性最好,相关系数为 0.62,且置信水平为 0.01,其次为疏勒河流域、黑河流域,石羊河流域的水储量变化与降水在月尺度下相关系数最低。年尺度下,研究区整体及 3 大流域分区的水储量变化与降水均不存在相关性。

2.3 水储量变化与生态环境时空耦合

河西走廊地区在"移民政策"实施以后,农业生产大大增加了研究区内水资源的消耗,进一步加剧了研究区内荒漠化的状况[14]。由中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)提供 2000,2005,2010 和 2015 年的土地利用/覆盖类型栅格数据,通过区域统计得到河西走廊三大流域 2000,2005,2010 以及 2015 年土地利用/覆盖类型面积比重(表 2)。疏勒河流域土地利用/覆盖类型主要为未利用地(约 79%)和草地(约 18%),林地和草地无明显变化,耕地和建筑用地增加明显,冰川与未利用地面积比重下降,水域面积比重轻微上升。黑河流域土地利用/覆盖类型主要为未利用地(约 57%)、草地(约 24%)与耕地(约 10%),耕地与建筑用地面积比重明显上升,水域面积比重先下降后上升,冰川面积比重在 2015 年出现上升。石羊河流域土地利用/覆盖类型主要为未利用地(约 44%)、草地(约 29%)与耕地(约 18%),耕地与建筑用地面积比重明显上升,水域面积比重轻微上升,草地面积比重出现下降。疏勒河流域冰川呈负增长趋势,但结合前文可知疏勒河流域南部的祁连山地水储量呈正增长趋势,原因可能为冻土退化,随着冻土层的隔水作用减小,活动层加大和加厚,使地下水库库容增大,更多的地表水入渗变成地下水,造成地下水水库的储水量增加[15]。

表 1 水储量变化与降水的年度和月度相关性

项目	疏勒河流域	石羊河流域	黑河流域	河西走廊
月度	0.56**	0.37**	0.51**	0.62**
年度	−0.12	0.08	−0.02	−0.11

注:** 表示显著性水平为 0.01;* 表示显著性水平为0.05。下同。

植被是干旱区衡量生态环境质量高低及演变规律最有效的指示器[16]。通过区域统计得到 2003—2015 年河西走廊及三个流域分区的历年年均 NDVI,2009 年前 NDVI 年均值趋势较平稳,增长速度较慢,2009 年以后增长速度较快(图 6)。通过 NDVI 各月

累年均值可知,石羊河变化幅度最高,其次为黑河流域,疏勒河流域 NDVI 波动变化较小,年内一直保持在一个比较低的水平,3 个流域分区 NDVI 最大值出现在 7 月份,11 月份回落到较低水平。研究区整体及 3 个流域分区植被生长的物候特征比较相似,植被在春季(3 月至 5 月)进入生长期,夏季(6 月至 8 月)达到旺盛期,秋季(9 月至 11 月)开始衰退,冬季(12 月至次年 2 月)进入休眠期。

表 2　河西走廊各流域 2000—2015 年土地利用/覆盖类型面积比重

项 目	疏勒河流域(%)				黑河流域(%)				石羊河流域(%)			
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
耕地	0.82	1.00	1.05	1.09↑	9.40	9.99	10.00	10.54↑	17.14	17.82	17.94	18.03↑
林地	0.44	0.43	0.43	0.44	5.93	5.91	5.91	5.91	8.24	8.22	8.22	8.21
草地	18.71	18.71	18.76	18.75	24.44	24.35	24.45	24.27	29.01	28.91	28.94	28.83
水域	0.29	0.29	0.30	0.31	1.50	1.48	1.49	1.60	0.36	0.36	0.37	0.39
建筑用地	0.16	0.16	0.16	0.21↑	0.80	0.87	0.88	1.11↑	0.91	0.91	0.92	1.19↑
未利用地	79.02	78.85	78.75	78.66	57.79	57.26	57.13	56.42	44.35	43.78	43.60	43.35
冰川	0.57	0.56	0.55	0.54	0.14	0.14	0.14	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00

注:标“↑”符号表示面积比重增加明显。

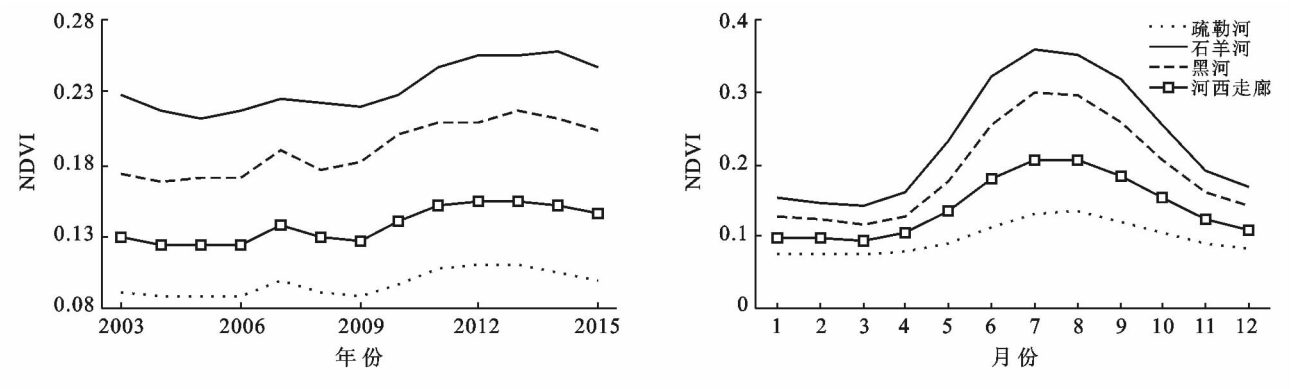


图 6　研究区年均 NDVI 变化趋势和各月 NDVI 累积多年平均值

统计得到的研究区 2003—2015 年水储量变化值与 NDVI,进行月尺度与年尺度相关性分析(表 3)。月尺度下,研究区整体的水储量变化与降水相关性较好,相关系数为 0.49,置信水平为 0.01,其次为黑河流域,疏勒河流域与石羊河流域的水储量变化与NDVI在月尺度下相关系数最低。年尺度下,研究区整体及石羊河流域与黑河流域的水储量变化与NDVI均存在显著的高度负相关,置信水平为 0.01,疏勒河流域水储量变化与 NDVI 存在较显著的低度负相关。

表 3　水储量变化与 NDVI 的年度和月度相关性

项目	疏勒河	石羊河	黑河	河西走廊
月度	0.39**	0.39**	0.41**	0.49**
年度	−0.62*	−0.85**	−0.93**	−0.81**

通过对空间尺度进一步细化,深入研究水储量与植被之间的耦合关系。对研究区像元尺度的水储量年际变化量与 NDVI 年均值做相关分析(图 7),发现主要灌区水储量年际变化量与植被指数年均值呈现高度负相关,主要原因为研究时间段内研究区耕地面积的持续增加,大量地消耗了该区域的地下水资源的同时增加了地面水分蒸发量,导致水资源流失,最终表现为水储量年际变化量与植被指数呈明显负相关的特征。疏勒河流域南部山区呈正相关,原因为该区高寒草甸生长的主要限制因素为温度[17],全球气候变暖有利于高寒草甸植被增长[18],进而蓄水功能得到增加。

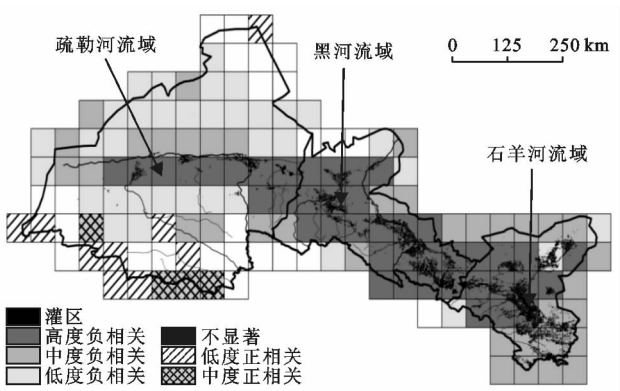


图 7　水储量年际变化与 NDVI 相关性空间分布

3 讨论与结论

河西走廊及 3 个流域分区的水储量变化周期为 12 个月，年尺度上水储量均呈现下降趋势，其中石羊河流域与黑河流域水储量下降较快，疏勒河流域下降较慢。由于生态建设工程的实施[19]，研究区水储量下降速度趋于放缓。从多年月平均尺度看，夏季水储量为积累期，冬季为亏损期，由于河西走廊 3 个流域分区的自然条件与社会经济发展状况等方面有所差异[20]，水储量年内变化规律存在差异。

河西走廊及 3 个流域分区 2003—2015 年历年降水量趋势平稳，疏勒河流域与黑河流域的降水与水储量变化的月度累年均值趋势一致，由于灌溉用水需求量大，石羊河流域水储量变化月度累年均值最大值出现的月份比降水月度累年均值的最大值晚一个月。月尺度上降水量与水储量变化呈现较好的正相关性，年尺度上降水量与水储量变化不存在相关性。河川径流是干旱区内陆河流域的主要水资源[21]，由于研究区 3 个流域分区的中下游水资源的补给与消耗过程比较复杂，例如上游来水对中下游水储量的影响，因此基于像元的水储量变化与降水量的相关性不显著。

2003—2015 年在流域降水量保持相对稳定的背景下，研究区及流域分区的水储量均不断下降，而植被指数则在持续上升，在流域尺度和整体上均呈现高度负相关。河西走廊 3 个流域分区中石羊河流域 NDVI 累年均值最大，并且水储量月度累年均值出现的最大值的月份比 NDVI 月度累年均值最大值出现的月份滞后 2 个月，说明植被影响了水储量的累积。自然条件与人类活动共同作用于水循环系统，使水资源在人工绿洲和天然绿洲、流域上中下游之间重新进行分配。河西走廊人工绿洲规模的扩大主要是人类改造自然绿洲或未利用土地获得的[21]，并且人工绿洲的演变主要跟人类的经济活动有关。从像元尺度上看，灌区内水储量年际变化量与植被指数年均值呈高度负相关，南部祁连山地区水储量年际变化量与植被指数呈正相关。随着研究区耕地面积的不断扩大，农业生产对水资源的消耗量也大幅增加，导致该区水储量逐年减少，因此研究区主要灌区水储量年际变化与植被指数年均值表现为显著的负相关关系。

综上，2003—2015 年研究区水储量变化历年呈下降趋势，并在流域尺度及像元尺度表现出明显的空间异质性和尺度效应。研究时间段内研究区降水保持相对稳定，没有明显的变化趋势，证明降水不是水储量发生下降的主要原因。从土地利用/覆被类型变化和 2003—2015 年历年 NDVI 均值变化来看，河西走廊人工植被呈增加趋势。研究区水储量的下降受人类活动影响较大，主要表现在耕地面积和建筑面积比率的增长，从而增加了农业生产及人类生活耗水量，并直观地表现为水储量年际变化与植被指数年均值显著负相关，石羊河流域表现最为明显。由于 GRACE 数据空间分辨率较低，文章仅从宏观角度对研究区水储量变化进行了分析，后期可结合径流、土壤含水率与地下水实测数据开展进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 陈亚宁，杨青，罗毅，等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理，2012，35(1)：1-9.

[2] Charles J Vörösmarty, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289(5477): 284-288.

[3] 曹艳萍，南卓铜. GRACE 重力卫星数据的水文应用综述[J]. 遥感技术与应用，2011，26(5)：543-553.

[4] 罗志才，周浩，李琼，等. 基于 GRACEKBRR 数据的动力积分法反演时变重力场模型[J]. 地球物理学报，2016，59(6)：1994-2005.

[5] 姚朝龙. 联合 GRACE 和水文气象数据研究自然与人为因素对区域水储量变化的影响[D]. 湖北 武汉：武汉大学，2017.

[6] 周旭华，吴斌，彭碧波，等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报，2006，49(6)：1644-1650.

[7] 段建宾，钟敏，闫昊明，等. 利用重力卫星观测资料解算中国大陆水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学，2007，27(3)：68-71.

[8] 邢乐林，刘晓玲，张守建，等. 利用 GRACE 时变重力场监测中国及周边地区的水储量变化[J]. 海洋测绘，2007，27(2)：34-36.

[9] 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.

[10] 李世明，程国栋，李元红，等. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护[M]. 河南 郑州：黄河水利出版社，2002.

[11] 梅锦山. 河西走廊生态保护战略研究[J]. 水资源保护，2014(5)：21-25.

[12] 李志刚. 河西走廊人居环境保护与发展模式研究[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[13] 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，2009，54(9)：1290-1294.

[14] 常跟应，张文侠. 基于生态文明的疏勒河流域大规模移民反思[J]. 兰州大学学报：自然科学版，2014，50(3)：405-409.

(下转第 287 页)

态协调度能力差,而林甸县与杜蒙县,尽管两县生态足迹水平也很高,但是由于生态资源较为宽裕,所以压力状况略好于其他地区。生态承载压力分布均衡在一定程度上也说明在制定相关优化措施时,要注重因地制宜,切合实际。

(3) 大庆市生态承载力影响因素多样,既包括了社会响应因子,也包含了经济方面的影响因素。由此可见,大庆市土地承载力恶化的原因是多方面的,而在日后改善土地承载状况的对策中,应对控制人口数量,加快产业结构优化调整,引导居民合理消费,提高土地资源集约利用水平,增加单位面积土地利用效益等措施重点加以考虑。

(4) 下一步的研究中,将通过增加研究期时间序列长度及减少研究期数间隔,更可靠地反映区域动态发展趋势,弥补模型的静态缺陷;进一步缩小研究的地域单元,使小区域生态问题得到更明显的体现;着眼于其他资源城市,与大庆市计算结果进行对比分析,深入探究该类城市生态承载力普遍规律。

[参 考 文 献]

[1] 李建春,袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报,2017,32(6):988-1001.

[2] 徐君,李贵芳,王育红. 国内外资源型城市脆弱性研究综述与展望[J]. 资源科学,2015,37(6):1266-1278.

[3] 闫晓霞,张金锁,邹绍辉. 污染约束下可耗竭资源最优消费模型研究[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(2):291-299.

[4] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: Reducing human impaction on the earth[M]. Gabriola island: New Society Publishers,1996.

[5] 孙艳芝,沈镭. 关于我国四大足迹理论研究变化的文献计量分析[J]. 自然资源学报,2016,31(9):1463-1473.

[6] Simposon W, Petpoesehevsky. An ecological footprint analysis for Australia[J]. Australia Journal of Environment Management, 2011,18(7):1-18.

[7] Jason Venetoulis. Ecological Footprint of Nations2005 Update[R]. Oakland California USA: Redefming Progress, 2005.

[8] WWF. Living Planet Report 2006[R]. G1 and Switzerland: WWF-World Wide Fund for Nature, 2006.

[9] Folke C . The problem of fit between ecosystems and institutions[J]. Ecology & Society, 2007, 12(1):181-194.

[10] 蔺海明,领鹏. 甘肃省河西绿洲农业区生态足迹动态研究[J]. 应用生态学报,2004,15(05):827-832.

[11] Verma, Yadav, Tiwari. Effect of indigenous *Mesorhizobium* spp. and plant growth promoting rhizobacteria on yields and nutrients uptake of chickpea(*Cicer arietinum*) under sustainable agriculture[J]. Ecological Engineering, 2013,51:282-286.

[12] 周涛,王云鹏,龚健周,等. 生态足迹的模型修正与方法改进[J]. 生态学报,2015,35(14):4592-4603.

[13] 陈珏,雷国平. 大庆市土地利用与生态环境协调度评价[J]. 水土保持研究,2011,18(3):116-120.

[14] 徐宝库. 黑龙江垦区人力资源管理现状改善措施[J]. 中外企业家,2015(6):136.

[15] 张桂宾,王安周. 中国中部六省生态足迹实证分析[J]. 生态环境,2007,16(2):598-601.

[16] 刘建兴,王青,顾晓薇,等. 投入产出法在我国生态足迹研究中的应用[J]. 东北大学学报:自然科学版,2007,28(4):592-595.

[17] 刘某承,李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5):401-406.

[18] 刘某承,李文华,谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志,2010,29(3):592-597.

[19] 鲁凤. 生态足迹变化的动力机制及生态足迹模型改进研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.

(上接第 280 页)

[15] 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.

[16] 肖乾广,肖岚,李亚君. EOS/MODIS,FY-1D/MVISR,NOAA/AVHRR 的归一化植被指数的同化研究[C]// 全国遥感信息综合研究与深化应用交流研讨会. 2009.

[17] 周兆叶,宜树华,叶柏生,等. 疏勒河上游冻土区高寒草地 NDVI 分布特征及制约因素分析[J]. 草业科学,2012,29(5):671-675.

[18] 邹明亮. 基于 GRACE 的疏勒河流域水资源—生态环境时空耦合关系研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2018.

[19] 张建永,李扬,赵文智,等. 河西走廊生态格局演变跟踪分析[J]. 水资源保护,2015,31(3):5-10.

[20] 韦惠兰,罗万云. 沙化封禁区农田生态系统服务价值变化及其影响因素:以河西走廊 8 县市为例[J]. 水土保持通报,2017,37(6):189-196.

[21] 牛赟,陈斌,李秉新,等. 黑河中游荒漠植物生长与降水、土壤水和地下水的关系[J]. 水土保持通报,2016,36(3):98-104.