#### DOI: 10.5846/stxb201809141981

岳东霞, 苗俊霞, 朱敏翔, 周妍妍, 邹明亮, 陈冠光, 郭建军. 疏勒河流域陆地水储量与植被指数的时空耦合关系. 生态学报, 2019, 39(14): - . Yue D X, Miao J X, Zhu M X, Zhou Y Y, Zou M L, Chen G G, Guo J J.Spatio-temporal coupling between Terrestrial Water Storage and Vegetation Index in Shule River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

# 疏勒河流域陆地水储量与植被指数的时空耦合关系

岳东霞<sup>1,\*</sup>, 苗俊霞<sup>1</sup>, 朱敏翔<sup>1</sup>, 周妍妍<sup>1</sup>, 邹明亮<sup>1</sup>, 陈冠光<sup>1</sup>, 郭建军<sup>2</sup>

1 兰州大学西部环境教育部重点实验室/资源环境学院,兰州 730000

2 中科院西北生态环境资源研究院,沙漠与沙漠化重点实验室,兰州 730000

摘要:干旱区水资源与植被生长状态的时空变化规律及其耦合关系的研究一直以来都是水文学和生态学等领域研究的重点和 热点。以我国干旱区内陆河流域— 疏勒河流域为研究区,利用 2002—2016 期间 GRACE 卫星反演的陆地水储量变化(TWSA) 和 MODIS 的增强型植被指数(EVI)两个指标开展了基于像元的流域水资源和植被状态的时空格局变化及其耦合关系研究。 结果表明:(1)在时间尺度上,疏勒河流域的 TWSA 和 EVI 表现出明显的周期性、季节性以及趋势性规律;(2)在空间尺度上,基 于像元的流域 TWSA 和 EVI 均呈明显的空间异质性;(3)在时空耦合关系方面,年均 TWSA 与 EVI 在流域整体尺度上呈中度负 相关;在子分区尺度上,中部平原区呈高度负相关,南部山区和北部山区相关性不显著;在像元尺度上,年均 TWSA 与 EVI 呈高 度负相关、中度负相关、低度负相关的像元分别占全流域总量的 19%、32% 和 31%;仅有 18%的像元呈低度正相关,说明疏勒河 流域的 TWSA 与 EVI 的时空耦合关系复杂且具有明显的空间异质性和尺度效应。研究结论将为疏勒河流域的水资源优化配置 和合理开发利用,以及实现干旱区的可持续发展提供科学依据。

关键词:GRACE 卫星;陆地水储量变化(TWSA);增强型植被指数(EVI);时空耦合关系;疏勒河流域

# Spatio-temporal coupling between Terrestrial Water Storage and Vegetation Index in Shule River Basin

YUE Dongxia<sup>1,\*</sup>, MIAO junxia<sup>1</sup>, ZHU minxiang<sup>1</sup>, ZHOU yanyan<sup>1</sup>, ZOU mingliang<sup>1</sup>, CHEN guanguang<sup>1</sup>, GUO Jianjun<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Western China's Environmental System, Ministry of Education, College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The spatio-temporal pattern changes between water resources and vegetation growth, and their coupling relationship have always been important issues in hydrology and ecology. This case study of Shule River Basin, which is a typical inland river basin in an arid area, investigated the spatio-temporal pattern changes in water resources and vegetation growth, and their coupling relationship. The terrestrial water storage anomaly (TWSA) inversed by the GRACE satellite was used along with the enhanced vegetation index (EVI) derived from the MODIS data for 2002 to 2016. The results indicate that (1) on a temporal scale, the TWSA and EVI of the basin show obvious periodicity, seasonality, and tendency; (2) on a spatial scale, the TWSA and EVI of the basin, based on grid cell size, show obvious spatial heterogeneity at the whole basin and sub-regional scales; (3) the coupling relationship analysis shows that there is a moderately negative correlation in the EVI across the whole basin and that there is a highly negative correlation in the

基金项目:国家自然科学基金(41671516;41701623);甘肃省软科学专项(1504ZKCA090-1);中科院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金;甘肃省国际科技合作专项1604WKCA002

收稿日期:2018-09-14; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dxyue@lzu.edu.cn

central plain area. However, there is no significant correlation in the southern mountainous area and the northern mountainous area. The proportions of grid cells that have a highly negative correlation, a moderately negative correlation, and a low negative correlation between the TWSA and EVI are 19%, 32%, and 31% of the total, respectively. Only 18% show a low positive correlation. Therefore, the coupling relationships between annual average TWSA and EVI are complex and show the clear spatial heterogeneity and scale effects in the basin. The research conclusions could help optimize the allocation and rational utilization of water resources and ecologically sustainable development in the Shule River Basin and the arid regions of China.

**Key Words**: GRACE satellite; Terrestrial Water Storage Anomaly(TWSA); Enhanced Vegetation Index(EVI); spatiotemporal coupling; the Shule River Basin

干旱区内陆河流域,作为相对独立的水文单元和生态单元,其水资源与生态环境之间存在密切的相互影 响、相互作用的时空耦合关系。一方面,水是生命之源,是干旱区内陆河流域绿洲兴衰、植被演替的决定因 素<sup>[1]</sup>。水文过程和水资源的时空变化控制着流域基本的生态格局和生态过程,特别是控制着基本的植被分 布格局和演替过程<sup>[2-3]</sup>,也是维持区内生产、生活和生态可持续发展的主要的限制因素。另一方面,植被演替 不仅深刻地改变着地表生态系统的结构和功能,还对流域水文过程和水资源的时空变化造成显著影响<sup>[4-5]</sup>。 近年来,随着全球气候变化的加剧和人类活动的增强,我国西北干旱区内陆河流域的水资源变化、生态环境演 替及其相互作用关系显得更为深刻和复杂<sup>[1]</sup>,引起了学术界的广泛重视。

疏勒河流域为我国丝绸之路经济带关键地区——河西走廊的第二大内陆河流域,敦煌所在地,该区气候 极端干旱,水资源短缺、生态环境退化严重,水资源合理利用和生态环境保护是该流域未来发展必须面临两个 相互制约相互依存的巨大挑战。目前,国内外已有研究表明,最近 30 年来疏勒河流域上游降水量呈增加趋 势,中下游却呈减少趋势;受气温升高影响,上游祁连山冰川积雪融水补给量增加,地表径流呈现逐年上升趋 势<sup>[6-7]</sup>;但随着人口的增长和社会经济的发展,流域中游瓜敦盆地、玉踏盆地地下水位表现为大范围整体下降 的趋势,估测最近10年地下水位累计下降了0.6—4m,且下降速度逐年增大,导致泉水溢出持续减少,使得双 塔灌区可利用泉水灌溉的耕地面积减少了95%以上,不得不用井灌来替代<sup>[8-9]</sup>。此外,疏勒河流域地表水的 盐分和矿化度也呈持续增高趋势,水质下降,污染严重<sup>[10]</sup>,导致疏勒河流域水资源短缺更为严重。而近 30 年 来,疏勒河流域生态环境问题突出,表现为区内终端湖往上游退缩、湿地逐渐萎缩、生物多样性不断减少、土地 退化加剧等<sup>[11]</sup>。据利用 MODIS 的增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据产品分析, 2000— 2016年间疏勒河流域植被状态呈现整体改善,但局部恶化的时空格局[12]。因此,对于该流域水资源与生态 环境变化的耦合关系的研究已开始得到学者的关注,如陈荷生曾定性地分析了上世纪80年代该流域地表水、 地下水以及水资源分配格局的变化导致流域中下游部分地区天然林丧失、草场退化和土地荒漠化盐渍化加 剧[13];章予舒利用 20 世纪后 50 年地处疏勒河流域的安西县、玉门县的降雨、风速、大风天数等观测数据,对 气象因素对土地荒漠化的影响进行了初步研究,发现降水量与土地荒漠化的关系较为复杂且不直观[14];叶红 梅利用 2002 年流域中游昌马灌区的地下水观测数据和植被指数 EVI, 对灌区地下水埋深和植被指数的相关 性进行了定量分析,指出该灌区天然植被盖度与地下水埋深存在着复杂的相关性,且在不同地下水的埋深区 和不同植被类型区的相关性差异较大[15]。

尽管国内外研究对疏勒河流域的水资源和生态环境各自的变化已有较多探讨,但在该流域水资源与生态 环境变化的耦合关系研究方面成果不多,处于研究的起步阶段,且已有研究多利用传统水文水资源监测数据, 对流域内的部分地区开展了初步研究工作,尚缺乏利用高分辨率的遥感数据,开展全流域及其内部多尺度区 域的水资源与生态环境变化的时空耦合关系研究。传统的水文监测方法(水文站和观测井等)虽然可以直接 对点位水文信息进行高时间精度的地实时监测,但由于监测站点的建设、运行和维护成本较高,空间选址受地 形地貌、交通和土地利用等因素限制,在空间尺度上无法实现大面积的、密集的、均匀的布点,使得传统的水文

观测数据的空间精度、覆盖范围、数据的丰富度和延续性等方面都无法满足大区域空间尺度的水资源变化研究的需求,也因此制约着干旱区水资源与生态环境时空变化耦合关系的深入研究。

陆地水储量(Terrestrial Water Storage, TWS)是陆地生态系统地表水、地下水、土壤水、冰雪和生物体含水量的综合体,其变化量是刻画水文循环过程的重要指标<sup>[16]</sup>,但用传统方法测量宏观区域的陆地水储量变化则非常困难。重力(Gravity Recovery And Climate Experiment, GRACE)卫星自成功发射以后,为全球、区域和流域生态系统的陆地水储量时空变化研究提供了重要的基础数据,也为克服传统地面观测数据的不足,研究流域尺度水资源与生态环境变化的时空耦合关系提供了数据支撑。目前,我国对 GRACE 卫星数据反演陆地水储量变化的流域尺度研究已涉及到长江、黄河、海河、黑河以及雅鲁藏布江等流域<sup>[17-24]</sup>,其中部分研究通过与全球陆面数据同化系统数据进行对比分析,证明了 GRACE 数据能较精确地反映流域尺度水储量变化的时空格局。

基于此,本文以疏勒河流域为研究区,以 2002 年以来 GRACE 卫星数据反演的该流域陆地水储量变化 (Terrestrial Water Storage Anomaly, TWSA)为水资源时空变化的综合指标,以 MODIS 的增强型植被指数 EVI 作为衡量流域生态环境状态的关键指标,对疏勒河流域水资源和生态环境的时、空变化规律及其耦合关系进行全面、定量分析,以期阐明水资源利用与生态环境变化的相互关系,为未来该流域乃至整个干旱区的水资源 优化配置和合理开发利用,实现区域"生产一生活一生态"的可持续发展提供重要的科学依据。

#### 1 研究区概况

14 期

疏勒河流域地处我国西北干旱区河西走廊(图1), 地理坐标为93°22′—98°59′E,38°01′—42°47′N之间, 海拔932—5792 m,区面积约12×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,其中以戈壁、 裸岩和沙地为主的未利用地约占流域总面积的75. 77%;低覆盖度为主的草地约占21.50%;耕地约占2. 94%;水域和林地分别约占0.60%和0.51%。流域属于 大陆性荒漠型气候,年温差在31.5—34.1℃之间,多年 平均降水量仅有47 mm,而潜在蒸发量大于3200 mm, 是甘肃省干旱程度最严重的地区之一。疏勒河流域南 部祁连山区是流域内所有地表径流的产流区,流域水系 自西向东,主要包括安南坝河、党河、榆林河、疏勒河干 流、石油河以及白杨河等。干流和主要支流的水源补给 主要是祁连山冰川融水和南北两山(祁连山、马鬃山)





山区降水。冰川年融水量 49.4×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,约占流域出山径流量的 30%,年降水资源为 125 亿 m<sup>3</sup>/a,其中南部山 区约占 63%,中部平原区和北部山区约占 37%。疏勒河流域上游山体陡峭,水流迅速。中下游平坦,绿洲与 沙漠共存<sup>[25]</sup>,是典型的内陆河流域。

#### 2 数据来源、处理与分析方法

#### 2.1 GRACE 卫星反演的 TWSA 数据

GRACE 卫星是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和德国宇航中 心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)联合研发的全球第二颗地球重力卫星,于 2002 年 3 月升 空。利用该地球重力卫星数据反演 TWSA 的基本原理是:如果把地球表层 10—15 km 范围看作一个薄层, John Wahr 等<sup>[26]</sup>认为地球重力场的变化绝大多数是发生在这个薄层中的,而在一个相对较短的时期内,这个 薄层中的重力场变化又是由这个薄层中水文过程和水量时空分布变化引起的。因此,可通过观测地球重力变 化来反映地球水储量的变化。目前,利用 GRACE 卫星数据能精确地反演区域月时间尺度的 TWSA,精度高于 9 mm 等效水高<sup>[27]</sup>,而且区域面积越大,反演精度越高,为全球、区域和流域等多尺度区域的水资源时空变化 研究提供了新思路和新方法<sup>[28]</sup>。

目前,GRACE 卫星数据主要由美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、美国德克萨斯大学 空间研究中心(Center for Space Research, CSR)以及德国波茨坦地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)3个单位负责处理和分发。GRACE 卫星反演的 TWSA 数据产品主要可分为四类:Level—0、Level—1A 与 Level—1B、Level—2、Level—3 等。本文选用 Level—3 数据,即 CSR GRACE RL05 Mascon Solutions,由 CSR 下载获得,地址为:http://www2.csr.utexas.edu/grace/。该数据是基于 GRACE Mascon 模型, 根据 Watkins 等<sup>[29]</sup>在全球划定的 4551 个质量均匀分布的 3°等面积球帽(Mascon),利用 CSR RL05 Level 1b 数据,通过加权最小二乘法计算得到的。数据值直接表示为月等效水柱高度,单位为 cm,空间分辨率为 0.5°× 0.5°,时间分辨率为 1 月。时间序列为 2002 年 4 月—2016 年 12 月,共 177 个月。由于卫星自身原因和测量误差等因素的影响,本文实际获得该时段的 161 个月份数据,缺失 16 个月份数据。对于缺失的数据,本文采用缺失月份多年平均值替代。

利用 GRACE 卫星反演得到的 TWSA 实际是每个像元陆地水储量的多年距平值。比如 *i* 像元 *j* 月 TWSA 为 *X<sub>i,j</sub>* cm,即 *X<sub>i,j</sub>* 为 *i* 像元 *j* 月陆地水储量与 *i* 像元陆地水储量多年平均值的差值,若 *X<sub>i,j</sub>* 的值为正,则说明该像元该月的陆地水储量高于历年均值,为积累期,若 *X<sub>i,j</sub>* 的值为负,则说明该像元该月的陆地水储量低于历年均值,为亏损期。

#### 2.2 MODIS 的 EVI 数据

NASA 提供的 MODIS 的植被指数产品按种类分可分为两类——归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI)。增强型植被指数(EVI)针对归一化植被指数(NDVI)在大气噪声、土壤背景和饱和度等问题做出了优化和改进,更适用于植被覆盖度较低的干旱区。因此,本文采用了 MOD13A3 EVI 产品数据开展研究。该数据时间分辨率为1月,空间分辨率为1000 m。为了防止云雾等的影响,本文将逐月的所有16 天合成产品数据进行加权平均或最大值合成处理。数据获取后,需要对数据进行镶嵌、投影变换、几何校正、重采样、裁剪等一系列的预处理,最终得到2002 年 4 月—2016 年 12 月期间疏勒河流域 WGS84 坐标系、空间分辨率为0.5°×0.5°、时间分辨率为1月的 EVI 数据集。

以上两种数据的来源、时间、空间分辨率和数据格式均不同,为便于分析,本文采用了统一的空间参考系统,利用数据转化和重采样等数据处理方法,最终使两种数据达到相同的坐标系、时间分辨率和空间分辨率,为开展相关分析做好了数据准备。

2.3 时间序列季节性分解

植被生长和水文过程在时间变化上除了有显著的周期性外,还会受到自然或人为扰动等一系列复杂因素 的影响,而出现趋势性或随机性等非周期性的变化,导致植被和水文现象的周期性变化和非周期性变化信号 的相互纠缠,给时间序列数据的准确分析造成影响。因此,需要应用时间序列的季节性分解方法对时间序列 数据进行分解和特征提取。

时间序列季节性分解法是将一组具有强烈季节性或周期性的时间序列数据进行分解,得到趋势、周期、季节和随机4个因子,4个因子的组合方式可以是相乘,也可以是相加,如下列式子所示:

$$Y = T + C + S + R \overrightarrow{u} Y = T \times C \times S \times R \tag{1}$$

式中, Y 表示时间序列植被指数或水文数据; T 表示季节性分解后的长期趋势因子; C 表示季节性分解后得到的周期因子; S 表示剔除周期因子后的时间序列因子; R 表示误差因子。

#### 3 结果与分析

3.1 流域水储量变化和植被指数的时间变化规律 根据疏勒河流域地形地貌特征、行政区划现状以及地质构造特征,流域大致可分为三大区域,即南部山区 (流域上游祁连山区)、中部平原区(流域中下游绿洲与荒漠地区)和北部山区(马鬃山地区)。本文以像元为 最小计算单位,计算并分析了逐月尺度、多年月平均尺度、多年季节尺度、年际尺度上疏勒河流域及其3个子 分区的 TWSA 和 EVI 的时间变化规律。

#### 3.1.1 逐月尺度上变化规律

在研究期177个月的逐月尺度上,为了能有效剔除时间上的复杂性对流域TWSA和EVI变化规律分析的影响,本文利用时间序列季节性分解法(公式1)和趋势分析法对疏勒河流域整体及3个子分区逐月尺度的TWSA和EVI进行季节性分解和趋势分析,分别得到逐月尺度的TWSA和EVI及其周期因子、趋势因子、去除周期因子后的数据序列。

如图 2 所示,2002—2016 年期间流域整体及 3 个子分区逐月尺度的 TWSA 均呈下降趋势(见黑色趋势 线),流域整体下降速率较快,约为0.0073 cm/月,而 3 个子分区下降幅度差异较大,其中北部山区降低速度最 快,约为0.0107 cm/月;中部平原区降低速度较快,约为0.0091 cm/月;南部山区降低速度最慢,约为0.0024 cm/月;从时间分段上看,流域整体及 3 个子分区在 2002—2011 年变化均较平稳,2011—2016 年变化波动幅 度较大,多年月极低值和极高值均出现在 2015—2016 年。从周期性上看,2002—2016 年期间流域整体及 3 个 子分区逐月尺度的 TWSA(蓝色实线)和去除周期因子后的 TWSA(橙色实线)变化趋势基本一致,存在显著的 周期波动规律(见绿色虚线),周期因子波动的振幅均保持在-2—2 之间;波动的周期均为 12 个月,说明该流 域 TWSA 存在显著的年周期性,且波峰和波谷出现的时间比较统一,说明其在年内波动变化的最高值和最低 值出现月份一致。







由图 3 可知,2002—2016 年期间,流域整体及 3 个子分区的逐月 EVI 都出现了不同的程度的上升趋势(见黑色趋势线),其中,南部山区 EVI 上升速度最快,斜率为 0.70;流域整体及中部平原区次之,斜率分别为

0.53 和 0.48;增长最慢的是北部山区,斜率仅为 0.31。从时间分段上看,流域整体以及南部山区在 2002—2009 年 EVI 变化比较平稳,2010—2016 年 EVI 有一个明显的上升趋势;中部平原区 EVI 在 2002—2016 年期间均呈上升趋势,且波动较无规律;北部山区 EVI 在 2002—2009 年波动变化较大,2010 年以后开始趋于稳定。从周期性上看,2002—2016 年期间,流域整体及 3 个子分区的逐月 EVI(蓝色实线)和去除周期因子影响后的 EVI(橙色实线)变化趋势虽然差异较大,但都存在显著的周期波动规律(见绿色虚线),周期相对一致,波动的幅度差异较大,其中流域整体波动的幅度保持在-200—250 之间,南部山区保持在-300—450 之间,中部平原区保持在-100—100 之间,北部山区保持在-150—50 之间。





#### 3.1.2 多年月平均尺度变化规律

在多年月平均尺度上,如图 4 所示,流域整体及子 分区 TWSA 和 EVI 均呈单峰分布,且均为 7、8 月份最 大,向两端逐渐减小。流域整体 TWSA 在 1—3 月经历 了一个先降后升的过程,但仍处于水资源亏损状态,4 月开始转为正值,水资源进入积累状态,7 月达到全年 最高值,8 月后又开始逐渐下降,到 9 月下降至亏损状 态,12 月降至全年最低值。流域 3 个子分区多年月平 均 TWSA 变化情况与流域整体趋势较为一致,但存在差 异:(1)南部山区与其它两个子分区比较,呈现一定的 滞后效应,TWSA 晚两个月进入积累期,晚一个月进入 亏损期。由于每年的 3—5 月,南部山区冰川和积雪开 始消融,融水通过地表径流和地下径流的方式补给中部





平原区和北部山区,因此,除了流域南部山区 TWSA 仍处于亏损状态外,中部平原区和北部山区都开始进入积

6

累状态;6—8月,降水量开始增多,流域各子分区的TWSA均进入积累状态;9月到次年的2月,降水量极少, 南部山区的冰川和积雪融化量也降低,各子分区的TWSA开始进入亏损期,但由于南部山区降水量较其它子 分区丰富,因此会滞后一个月进入亏损期。(2)北部山区在一年12个月中TWSA波动比其它子分区大很多。 相关研究表明<sup>[30]</sup>,北部马鬃山地区岩土体以第四系上更新统洪积松散堆积物和侵入基岩为主,岩土体的渗透 系数和给水度较高。所以该区含水层储水和释水能力较强,在降水量较高的月份,通过渗透作用,有效地将水 资源储存在含水层,达到很好的补给效果;而在降水量较低的月份,大量地下水在重力作用下从岩土体空隙中 排出,补给到流域中部平原区,造成水储量亏损严重。

流域整体及3个子分区的 EVI 均由1月份升至7或8月而后逐渐降低至12月份,但南部山区 EVI 年内 变幅最大,1--3月比流域整体和其它两个子分区都低,4--11月有一个急促的上升和下降过程,并在7--8月 期间达到远比其它子分区高的峰值,11--12月又变得很低;与南部山区不同的是中部平原区和北部山区 EVI 在年内变幅较小。这是因为流域南部山区草地比重大,植被生长会随气候的季节性变化而发生萌芽、展叶、开 花、结果、落叶和休眠等规律性的现象,造成 EVI 在不同月份出现幅度较大的变化;而中部平原区和北部山区 大部分地区为荒漠戈壁,植被覆盖度极低,EVI 随月份和季节变化较不明显,因此 EVI 在不同月份间变化幅度 较低。

3.1.3 多年季节平均尺度变化规律

在多年季节平均尺度上,如图 5 所示,流域整体及 子分区 TWSA 变化趋势基本一致,呈夏季最高的单峰趋 势,但各季节差异显著,其中,春季流域整体基本持平, 但南部山区 TWSA 仍处于亏损状态,中部平原区和北部 山区处于积累状态,夏季各地区的 TWSA 均进入累积状 态,其中增幅顺序为北部山区>南部山区>中部平原区; 秋季和冬季各区域 TWSA 又进入了亏损期,其中北部山 区亏损最严重,中部平原区次之,南部山区水量亏损较 不明显。

与TWSA 年相似,流域整体及子分区的 EVI 变化 趋势基本一致,也呈夏季最高的单峰趋势,但不同子分 区 EVI 在四季中的变化差异则较大。其中南部山区 EVI 在春、夏、秋季都明显高于另外两个子分区,唯独在





冬季低于另外两个子分区。根据典型地物光谱曲线<sup>[31]</sup>和 EVI 计算原理可知,冰川积雪的覆盖会大大降低 EVI 的计算结果。因此,虽然南部山区植被覆盖度要比中部平原区和北部山区高得多,但受到冬季大面积积 雪覆盖的影响,南部山区冬季的 EVI 低于中部平原区和北部山区;中部平原区 EVI 在春、秋和冬季都处于全 流域最低,唯独在夏季反超北部山区。其原因是中部平原区的耕地面积比重远高于北部山区,流域 4 个主要 的灌区均分布在中部平原区。耕地是一种比较特殊的人工植被类型,与天然草地相比,耕地的时间序列 EVI 具有更明显的季节性<sup>[32]</sup>,特别是夏季,耕地的 EVI 曲线会形成又高又陡的波峰。

#### 3.1.4 年际尺度变化规律

在年际尺度上,本文以 2002—2016 年各年度流域整体及子分区 TWSA 和 EVI 的年内月均值代表当年的 TWSA 和 EVI 年均值。如图 6 所示,2002—2016 年以来,疏勒河流域整体及 3 个子分区的 TWSA 整体呈下降 趋势,主要为 2002—2014 年逐年下降,至 2014 年降至 15 年的最低点而后又有所回升的趋势,其中 2006 年前 各区域均处于逐渐减小的累积状态,2007—2016 年除南部山区以外,其他地区均处于逐渐增加的亏损状态。 15 年来,中部平原区和北部山区波幅较大,而南部山区波幅较小。经查阅相关资料发现,2014 年是地处疏勒 河流域的酒泉市有气象记录以来最干旱的年份,2013 年 9 月—2014 年 4 月,该市 7 个县(市、区)连续近 200 天无有效降水。15年来,流域整体及3个子分区的 EVI 均呈现波动式上升趋势,其中2002—2009年波动较 大但总体趋势相对平稳,而2010年以后各地区 EVI 经历了一个明显的上升过程,且南部山区上升幅度最大。





## 3.2 流域 TWSA 和 EVI 的空间分布规律

利用一元线性回归分析法,本文基于流域像元 2002—2016 年逐月 TWSA 和 EVI 值得到每个像元的 TWSA 和 EVI 变化趋势及其变化速率,并按变化速率进行分级,获得空间分布图。

如图 7 所示,2002—2016 年流域内部基于像元的 TWSA 整体呈降低趋势,说明近 15 年来流域水储量整体趋于减少,但下降速率的空间异质性显著。其中,南部山区大部分像元 TWSA 呈轻微下降,主要分布在阿克塞县和肃北县南部区域,约占全流域像元总数的 36.48%;中部平原区大部分像元 TWSA 呈中度下降,约占全流域像元总数的 25.68%,但玉门市花海、昌马两大灌区、瓜州安西极旱荒漠自然保护区、敦煌市西湖保护区所在像元呈现显著下降趋势,而北部山区几乎所有像元均呈显著下降趋势,占全流域像元总数的 37.84%。相反,流域 EVI 整体呈现不同程度的上升趋势,说明流域整体植被状态好转,但区内空间异质性也十分显著。其中,EVI 呈显著上升和中度上升的像元主要分布在流域的中部平原区和南部山区,其所在像元分别占全流域像元总数的 22.97%、35.14%,显著上升像元覆盖了中游的四大灌区——花海灌区、昌马灌区、双塔灌区以及党河灌区,祁连山区的肃北县部分地区,以及敦煌西湖国家级自然保护区、敦煌阳关国家自然保护区和瓜州安西极旱荒漠国家级自然保护区;流域北部山区像元 EVI 呈轻微上升趋势,占全流域像元总数的 41.89%。

3.3 流域陆地水储量变化与植被指数的时空耦合关系

# 3.3.1 流域整体及子分区尺度的时空耦合关系

经相关性分析,由表1可知,2002—2016年流域整体的TWSA与EVI年均值的相关系数为-0.561,P值为0.03,呈中度负相关,说明疏勒河流域整体而言,研究期间随着流域植被状况的整体好转,流域的水资源消耗量在不断增加。而3个子分区则各不相同,其中部平原区TWSA与EVI年均值的相关系数为-0.753,P值为0.001,呈高度负相关关系,而南部山区和北部山区的TWSA与EVI年均值的相关系数分别为-0.127和-0.284,P值为分别为0.651和0.306,相关性均不显著。结合前文年际变化和空间格局分析结果可以看出,近15年来随着疏勒河流域外来人口增加和经济发展,中部平原区耕地和人工植被面积在不断增加,植被EVI整体

8





□分区边界

水系

100 km

□ 行政区划边界 ■ 中度上升

🔲 轻微上升

🔲 显著上升

呈增长趋势,因此消耗了该区域的大量地表和地下水资源<sup>[33-34]</sup>,导致该地区 TWSA 的显著或中度下降。在南部山区,近年来受气温升高的影响,疏勒河流域上游山区永久性冰川雪地不断消融,导致南部山区高海拔区域的陆地水储量持续下降<sup>[35]</sup>;但南部山区高寒草甸生长的主要限制因素为温度<sup>[36]</sup>,而气温升高使得该区植被生长的温度胁迫得到了缓解,有利于植被的生长,导致草地面积在近 15 年有显著的上升趋势。在北部山区,植被分布稀疏且近 15 年各类植被面积变化不大,EVI 维持在一个相对稳定的水平,而 TWSA 的显著下降可能与当地工矿业、畜牧业以及人口增长对水资源,尤其是地下水消耗量增加有直接的关系。从而导致南部山区和北部山区的 TWSA 与 EVI 年均值的负相关性不显著。

相关性 Relevance	流域整体 The whole basin	南部山区 The south mountain region	中部平原区 The central plain region	北部山区 The north mountain region
相关系数 Correlation coefficient	-0.561 *	-0.127	-0.284	-0.753 **
P值P value	0.03	0.651	0.306	0.001

表 1 流域整体及各子分区 TWSA 与 EVI 年均值的相关性 Table 1 Interannual variation of terrestrial water storage and annual average of vegetation indices

\* \*表示相关性在 0.01 层上显著(双尾); \*表示相关性在 0.05 层上显著(双尾); TWSA:陆地水储量变化 Terrestrial Water Storage Anomaly; EVI: 增强型植被指数 Enhanced Vegetation Index

## 3.3.2 基于像元尺度的时空耦合关系

□分区边界

水系

□ 行政区划边界 ■ 中度下降

■ 轻微下降

□ 显著下降

进一步基于流域像元进行 TWSA 与 EVI 年均值相关性分析,并按相关系数分级实现了像元尺度的相关 性空间化表达。如图 8 所示,全流域约 19%的像元 TWSA 与 EVI 年均值呈高度负相关,主要集中在流域中部 平原区的 4 大灌区以及敦煌西湖国家保护区核心区范围内。说明随着流域中部平原区农业产业机构改变及 经济的发展,农业生产对水资源的消耗量也随之大幅上涨,直接导致该区陆地水储量下降严重,并直观地表现 为中部平原区 TWSA 与 EVI 呈显著的负相关。这与实际情况相符,据 2015 年甘肃省水利厅统计年鉴可知,疏 勒河流域农业灌溉用水占流域总用水量的 81%,可见中部平原区农业用水对全流域水资源消耗量的变化具 有重要贡献。约有 32%的像元呈中度负相关,主要集中在瓜州西北部的安西极旱荒漠国家级自然保护区、敦 煌西南部的敦煌西湖国家级自然保护区、敦煌阳关国家级自然保护区;约有 31%的像元呈低度负相关,主要 分布在北部马鬃山地区以及南部山前戈壁;仅有 18%的像元呈低度正相关,主要分布在南部祁连山山区流域 上游。

#### 4 结论

疏勒河流域位于西北干旱区,水资源异常稀缺,生态环境十分脆弱,既是疏勒河流域最主要的两大基本特征,也是该流域发展面临的最为严峻的两大问题。EVI 作为生态环境状况的重要指示因子,其与水资源变化之间存在相互影响、相互作用的时空耦合关系。

本文利用 2002—2016 年 GRACE 卫星反演的 TWSA 数据和 MODIS EVI 数据,在对疏勒河流域水资 源和植被状况时、空分布规律分析的基础上,基于像元 尺度分别在流域尺度、子分区尺度上对疏勒河流域 TWSA 与 EVI 时空耦合关系进行深入分析。结果显示, 在时间尺度上,疏勒河流域 TWSA 和 EVI 表现出明显 的周期性、季节性以及趋势性规律;在空间尺度上,流域 TWSA 和 EVI 在流域尺度、子分区尺度均表现出明显的 空间异质性;在时空耦合关系方面,流域 TWSA 与 EVI 年均值在流域整体尺度上呈中度负相关;在子分区尺度



图 8 TWSA 年际变化与 EVI 年均值相关系数空间分布图 Fig. 8 Spatial distribution of correlation between annual variation of water reserves and annual mean value of vegetation index

上,中部平原区两者呈高度负相关,南部山区和北部山区相关性不显著;基于像元,全流域 TWSA 与 EVI 年均 值呈高度负相关、中度负相关、低度负相关的像元分别占总量的 19%、32%和 31%;仅有 18%的像元呈低度正 相关,说明该流域特殊的自然与人文因素驱动,导致流域 TWSA 与 EVI 的时空耦合关系非常复杂,且呈明显 的尺度效应。较大区域相关性的分析,往往掩盖了其内部相关性的时空分异,因此,通过不同空间尺度的耦合 关系分析可以较全面地展示区域 TWSA 与 EVI 的时空耦合关系。本文研究方法和结果可为干旱区水资源优 化配置和合理开发利用,实现干旱区生产、生活和生态可持续发展提供技术支持和科学依据。

尽管本文对疏勒河流域 TWSA 和 EVI 的时空变化规律及其时空耦合关系进行了深入研究,最终取得了一定的研究成果,但仍有不足:(1)缺少地下水位、土壤含水率等实测数据对 GRACE 反演的 TWSA 进行验证 和校正;(2)由于 GRACE 卫星空间分辨率较低,无法对疏勒河流域水储量变化进行植物斑块尺度的时空动态 变化分析;(3)由于 GRACE 卫星时间跨度较短,仅为 2002 年至今,很难做到在更长时间序列上的分析,有待数据的进一步积累和深入分析。

#### 参考文献(References):

- [1] 程国栋,赵传燕.干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究.地球科学进展,2008,23(10):1005-1012.
- [2] 陈亚宁,李卫红,徐海量,刘加珍,张宏峰,陈亚鹏.塔里木河下游地下水位对植被的影响.地理学报,2003,58(4):542-549.
- [3] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶. 生态水文过程研究进展. 生态学报, 2003, 23(3): 580-587.
- [4] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例.地理学报,1999,54(3): 241-246.
- [5] 傅伯杰,陈利顶,马克明,王仰麟.景观生态学原理及应用.北京:科学出版社,2001.
- [6] 慕富强. 最近 25 年来疏勒河流域气候变化与水文水资源的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [7] 郑一帆. 疏勒河水资源变化趋势分析. 甘肃科技, 2017, 33(17): 52-54.
- [8] 王根绪,程国栋,沈永平.近50年来河西走廊区域生态环境变化特征与综合防治对策.自然资源学报,2002,17(1):78-86.
- [9] 王有权.河西走廊疏勒河流域地下水资源开发利用的环境效应.地下水,2012,34(2):48-50.
- [10] 周长进,张义丰,董锁成,李岱. 疏勒河流域天然水质研究及水环境保护. 自然资源学报, 2004, 19(5): 604-609.
- [11] 杨根生,曲耀光,董光荣,陈广庭,李栋梁,张景光,伍光和,胡双熙. 疏勒河下游生态保护研究. 中国沙漠, 2005, 25(4): 472-482.
- [12] 邹明亮,周妍妍,曾建军,韩雅敏,岳东霞.基于 HANTS 算法的疏勒河流域荒漠化时空动态监测.西北师范大学学报:自然科学版,

#### http://www.ecologica.cn

2018, 54(2): 88-94.

- [13] 陈荷生. 疏勒河流域水资源开发对环境的影响. 自然资源, 1988, (2): 60-65.
- [14] 章予舒,王立新,张红旗,李香云.甘肃疏勒河流域环境因子变异对荒漠化态势的影响.资源科学,2003,25(6):60-65.
- [15] 叶红梅,陈少辉,盛丰,谌宏伟.疏勒河流域中下游土地覆盖动态变化及其与地下水的相关性.水利学报,2013,44(1):83-90.
- [16] 王文, 王鹏, 崔巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析. 水科学进展, 2015, 26(6): 759-768.
- [17] 李晓英, 叶根苗, 蔡晨凯, 苏志伟. 基于 GRACE 和 MODIS 数据的长江流域陆地水储量变化分析及预测. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 130-135.
- [18] 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 黄珹, 廖新浩. 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, 2006, 36(3); 225-232.
- [19] 曹艳萍, 南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 719-727.
- [20] 翟宁, 王泽民, 伍岳, 叶聪云. 利用 GRACE 反演长江流域水储量变化. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(4): 436-439.
- [21] 尼胜楠, 陈剑利, 李进, 陈超, 梁青. 利用 GRACE 卫星时变重力场监测长江、黄河流域水储量变化. 大地测量与地球动力学, 2014, 34 (4): 49-55.
- [22] 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. 测绘学报, 2012, 41(5): 676-681.
- [23] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量时变趋势分析. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 88-94.
- [24] 许朋琨,张万昌. GRACE 反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化.水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 23-29.
- [25] 郑晓, 王乃昂, 李卓仑, 张学敏, 王蕾. 1990-2005 年疏勒河流域土地利用/覆盖变化分析. 中国沙漠, 2010, 30(4): 857-861.
- [26] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, Velicogna I. Time-variable gravity from GRACE: First results. Geophysical Research Letters, 2004, 31 (11): L11501.
- [27] Andersen O B, Hinderer J. Global inter-annual gravity changes from GRACE: Early results. Geophysical Research Letters, 2005, 32(1): L01402.
- [28] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1998, 103(B12): 30205-30229.
- [29] Watkins M M, Wiese D N, Yuan D N, Boening C, Landerer F W. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2015, 120(4); 2648-2671.
- [30] 郭永海,王海龙,肖丰,苏锐,季瑞利,刘淑芬,董建楠,宗自华,李亚伟,周佳.马鬃山地区侵入岩体渗透性能分析.铀矿地质,2011, 27(6):363-369.
- [31] 梅安新,彭望琭,秦其明,刘慧平.遥感导论.北京:高等教育出版社,2001.
- [32] 左丽君,张增祥,董婷婷,汪潇. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析.农业工程学报,2008,24(3): 167-172.
- [33] Zhang X H, Wang N A, Xie Z Y, Ma X L, Huete A. Water loss due to increasing planted vegetation over the Badain Jaran Desert, China. Remote Sensing, 2018, 10(1): 134.
- [34] 蒋瑾, 丛自立. 从水分平衡角度探讨固沙植物的合理密度问题. 生态学杂志, 1986, 5(1): 7-12.
- [35] 于国斌,李忠勤,王璞玉.近50 a 祁连山西段大雪山和党河南山的冰川变化.干旱区地理, 2014, 37(2): 299-309.
- [36] 周兆叶, 宜树华, 叶柏生, 任世龙, 许民, 李乃杰. 疏勒河上游冻土区高寒草地 NDVI 分布特征及制约因素分析. 草业科学, 2012, 29 (5): 671-675.