

DOI: 10.5846/stxb202111243322

王大为, 赵成章, 方锋, 林婧婧, 李丽丽, 杨永明. 石羊河流域水分利用效率及其对饱和水汽压差的响应. 生态学报, 2023, 43(8): 3090-3102.

Wang D W, Zhao C Z, Fang F, Lin J J, Li L L, Yang Y M. Spatial-temporal dynamics of water use efficiency and responding to vapor pressure deficit in Shiyang River Basin, northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3090-3102.

# 石羊河流域水分利用效率及其对饱和水汽压差的响应

王大为<sup>1,2,3</sup>, 赵成章<sup>1,\*</sup>, 方 锋<sup>3</sup>, 林婧婧<sup>3</sup>, 李丽丽<sup>2,4</sup>, 杨永明<sup>2</sup>

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070

2 滇西应用技术大学地球科学与工程学院, 大理 671006

3 兰州区域气候中心, 兰州 730020

4 玉龙雪山冰冻圈与可持续发展云南省野外科学观测研究站, 丽江 674100

**摘要:**水分利用效率(WUE)是叶片通过光合作用调节水分生理过程的指标,是联系生态系统碳循环与水循环关系的关键,反映了植被生态系统对陆地环境快速调整和资源的变化适应策略。基于卫星遥感和地面观测数据,利用光能利用率模型和蒸散发经验估算模型,模拟石羊河流域2000—2019年植被总初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)数据,估算2000—2019年不同植被类型的WUE空间分布特征,研究GPP/ET/WUE与饱和水汽压差(VPD)的相关性,探讨干旱区不同类型植被对水分利用及胁迫的适应策略。结果表明:(1)2000—2019年石羊河流域植被WUE、GPP和ET的平均值分别为 $0.80\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}$ 、 $256.52\text{ gC/m}^2$ 和 $302.52\text{ mm}$ ,其三者的空间分布特征表现为“南高北低”,即由流域源头至下游逐渐减少的空间分布。(2)近20年内,流域内WUE、GPP和ET的变化率的平均值分别为 $0.017\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}\text{ a}^{-1}$ 、 $6.99\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $3.80\text{ mm/a}$ ,流域总体呈现波动上升的趋势,但城区和民勤耕地-荒漠交接区呈不同程度的减少趋势。(3)流域内不同类型植被的WUE平均值关系为:森林>农作物>草地>灌丛>荒漠植被>湿地植被,WUE增加速度的平均值关系为:农作物>森林>草地>灌丛>荒漠植被>湿地植被,与GPP基本一致,其中ET在灌丛、荒漠植被、湿地植被地区呈现降低趋势。(4)研究区内GPP/ET/WUE与VPD相关性的空间分布特征与石羊河径流方向具有高度一致性,WUE与VPD相关性分布特征受土地利用以及径流方向影响显著。WUE与VPD呈正相关的区域主要分布在河西走廊绿洲东部和荒漠区东部,呈负相关区域主要分布在祁连山高海拔地区、河西走廊绿洲中部和荒漠区西部。因此,正确揭示内陆河植被GPP/ET/WUE的空间分异以及变化趋势及其对驱动因素VPD的响应,是了解流域尺度中干旱区植被对全球干旱加剧的适应性策略前提,进而为生态保护提供决策服务。

**关键词:**水分利用效率;植被总初级生产力;蒸散发;植被类型;饱和水汽压差;相关性;石羊河

## Spatial-temporal dynamics of water use efficiency and responding to vapor pressure deficit in Shiyang River Basin, northwestern China

WANG Dawei<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Chengzhang<sup>1,\*</sup>, FANG Feng<sup>3</sup>, LIN Jingjing<sup>3</sup>, LI Lili<sup>2,4</sup>, YANG Yongming<sup>2</sup>

1 Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 College of Earth Science and Engineering, West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China

3 Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

4 Yulong Snow Mountain National Field Observation and Research Station for Cryosphere and Sustainable Development, Lijiang 674100, China

**Abstract:** Water use efficiency (WUE) is the regulation index of leaf photosynthesis on the water physiological process, as the key to link the relationship between the ecosystem carbon cycle and the water cycle, and directly reflects the rapid

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(41705062,32071606);甘肃省气象局研究型业务重点项目(ZD2021-02);云南省教育厅项目“云南省高校山地实景点云数据处理及应用重点实验室”

**收稿日期:**2021-11-24; **网络出版日期:**2022-08-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaocz601@163.com

adjustment of the ecosystem to the site environment and the adaptation strategy of resource changes. The Gross primary production (GPP) temporal and spatial characteristics derived from the data of MODIS-NDVI by the Light Energy Utilization Model, and the Evapotranspiration (ET) temporal and spatial characteristics derived from the meteorological data by the Thornthwaite Evapotranspiration Model during 2000—2019 in Shiyang River Basin (SRB). In this research, we estimated the spatial pattern and temporal variations of the GPP, ET and WUE in different vegetation types from 2000 to 2019, investigated the co-relationship between GPP/ET/WUE and Vapor pressure deficit (VPD), and discussed the response of adaptation strategies for water utilization and stress in the arid area among the different vegetation. The results show that: (1) from 2000 to 2019, the average annual value of total WUE, GPP, and ET in SRB were  $0.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,  $256.52 \text{ gC/m}^2$ , and  $302.52 \text{ mm}$ , respectively; The spatial patterns of average annual WUE, GPP and ET in the SRB's vegetated areas varied widely, and the values decreased from upstream on the south side of the Qilian Mountains and middle to downstream on the north side of the desert. (2) During the 20 years, the average slope of WUE, GPP, and ET showed an obvious upward trend in almost whole basin, with the rate of  $0.017 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,  $6.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  and  $3.80 \text{ mm/a}$ . The change rates of WUE, GPP and ET within the basin exhibited an upward trend, except for Liangzhou and the areas surrounding Minqin cropland according to the urbanization and industrial adjustment. (3) The WUE, GPP and ET annual average values, and slope of trends among the different land use types also varied significantly. Among various vegetation types, the highest values of WUE, GPP and ET appeared in forests, and the lowest values presented in wetlands; the highest change rate of different vegetation was forest, and the lowest one was the wetland. (4) Correlation analysis and statistical results indicated that the correlation distribution characteristics of GPP/ET/WUE and VPD in the study area were highly consistent with the runoff direction of the SRB. As the WUE was determined by GPP and ET, the correlation distribution between WUE and VPD had obviously spatial heterogeneity with the land-use and SRB runoff direction. The positive correlation was distributed in the eastern part of the Hexi Corridor oasis and the eastern desert area, and the negative correlation was distributed in the high-altitude areas of the Qilian Mountains, the middle of the Hexi Corridor oasis and the western part of the desert area. Overall, correctly revealing the spatial differentiation and changing trend of GPP/ET/WUE of inland river vegetation and its response to the driving factor VPD was the premise of understanding the adaptive strategy of vegetation in arid areas at the watershed scale to the intensification of global drought, to provide decision-making services for ecological protection.

**Key Words:** water use efficiency; gross primary production; evapotranspiration; vegetation type; vapor pressure deficit; correlation; Shiyang River Basin

水是地球-生物-化学-生态系统形成的前提条件之一,水资源空间差异是形成生态系统植被区域特征、影响总初级生产力分异的关键<sup>[1-3]</sup>。水分利用效率(WUE)是指植物光合作用中消耗单位质量水分所固定的光合产物的总量,主要用于评估植被生态系统利用水分转化生物量的强度和能力的<sup>[4]</sup>。WUE反映了植被生态系统短时间内对立地环境调整和资源变化的适应策略<sup>[5]</sup>,是连结生态系统水碳循环耦合关系的关键<sup>[6]</sup>。在生态系统尺度下,WUE通常是用生态系统总初级生产力(GPP)与对应时期蒸散量(ET)的比值来定义,WUE数值的高低直接由植被生产力和蒸散作用决定<sup>[4,7-8]</sup>,是植物协调生产力与耗水量之间矛盾的重要途径。因此,了解不同类型植被生态系统WUE的时空变异特征,是研究气候变化影响下植物对水分利用分配的前提,也是研究全球二氧化碳浓度增加背景下不同植被生态系统水分耗散与有机碳固定的基础。

饱和水汽压差(VPD)指的是给定空气温度下的饱和水汽压与实际水汽压之间的差值,是空气可以容纳的水汽含量与空气温度的曲线函数表征<sup>[9]</sup>。随着全球地表温度升高饱和水汽压不断增加,进而导致VPD随着温度的升高而增大<sup>[10]</sup>。过高的VPD会因导致植被气孔导度降低、木质部水分流失,增大蒸腾速率,进而促使植物水分胁迫加剧;同时,VPD的增加会使土壤蒸发量增大,进而导致陆地生态系统蒸发量(ET)增加,当

VPD 达到阈值时,严重的干旱会引发植被光合和生长速率减少以及碳饥饿,导致生态系统水分胁迫的事件增加<sup>[11]</sup>。因此,VPD 通过干旱引起的植物死亡,被确定为独立于与气候变化相关的其他驱动因素,是影响陆地生态系统以及生物功能群落重要的驱动因素<sup>[12]</sup>。鉴于此,本文通过分析典型内陆河流域生态指标(GPP/ET/WUE)与 VPD 时空特征相关性,以期了解流域尺度中干旱区植被 GPP/ET/WUE 对全球干旱加剧(VPD 增加)变化适应性策略以及驱动方向。

随着遥感技术的发展以及生态模型的开发与应用,尤其是大尺度、高精度数据的发布与使用,国内外学者对区域和全球尺度生态系统的 WUE 及其影响因素进行了大量研究<sup>[1-3,5-7]</sup>,特别是水分胁迫条件下 WUE 的分异特征进行了广泛的调查<sup>[1,6-8,13]</sup>。陆地生态系统中植物的 WUE 对水分的利用及水分胁迫的适应性会因物种、群落结构、温度、水分、辐射、大气 CO<sub>2</sub>浓度、土壤水热以及养分条件等的差异而存在时空差异性<sup>[13-16]</sup>。自工业革命以来,大气中 CO<sub>2</sub>浓度呈波动增加趋势<sup>[12]</sup>,增大了植被光合速率(即增大了单位时间内植被固定的碳总量 GPP)以及 VPD,导致 ET 增大,这使得 WUE 的时空变化表现出不确定性。在叶片水平上,学者认为由于不同植被气孔导度变化的差异,在气孔关闭前 VPD 与 WUE 呈正相关,关闭后则为负相关<sup>[13]</sup>。在生态系统水平上大部分学者认为 VPD 与 WUE 二者之间为负相关<sup>[4,14-18]</sup>;但仍有部分学者认为在干旱区大气 CO<sub>2</sub>浓度升高导致植被叶片气孔导度降低,植物可用更少的水换取等量的碳,从而大幅度降低了生态系统的水分需求,VPD 与 WUE 之间呈正相关<sup>[19]</sup>。因此,了解不同植被类型 WUE 时空变化特征及其水分胁迫效应,是对比干旱区植物之间生理适应过程的关键,是分析干旱区流域尺度中植物碳累积过程对水分的利用及对水分胁迫适应策略的前提条件。

石羊河流域属于典型的生态敏感区,生态环境与社会经济发展的矛盾尖锐<sup>[20]</sup>。近年来,研究发现石羊河流域气候向暖湿化方向发展<sup>[21]</sup>,植被生长状况日益变好<sup>[22-23]</sup>,植被固碳能力的增强必然会加大对光合作用以及蒸腾作用中水分消耗<sup>[24]</sup>。一方面,水分消耗的增大表明了大气对水分的“需求”增大,促进了生态系统的蒸散过程,从而增加了固定单位有机物质水分耗散量,表现为生态系统 WUE 降低<sup>[24]</sup>;另一方面,随着全球暖干化过程中大气 CO<sub>2</sub>浓度升高,植物水分利用效率提高同时增快了植物光合作用的速率,并且植被碳累积中植物水分利用效率的促进作用胜于光合作用速率<sup>[19]</sup>。然而,针对气候暖湿化背景下的干旱区不同植被生态系统 WUE 空间分布特征以及对水分利用和水分胁迫性并未详细阐述<sup>[25]</sup>。鉴于此,本文基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)归一化植被指数(NDVI)数据和气象数据,研究了石羊河流域 2000—2019 年的植被 WUE 时空动态变化趋势,明确在流域暖湿化过程中不同植被类型 WUE 对 VPD 的响应机制以及水分利用策略。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

石羊河流域位于中国西北部(36°57'—39°27'N, 101°22'—104°14'E),海拔 1263—5130 m(图 1),是甘肃河西走廊的第三大内陆水系。流域地处黄土、青藏、蒙新三大高原的交汇过渡带,地貌类型多样,相对高差显著;深居大陆腹地,受东亚季风、南亚季风和西风带共同作用,流域内常年干旱少雨、太阳辐射强、日照充足、昼夜温差大、蒸发强烈,冬季寒冷、夏季炎热、多风且多干热风,风沙危害严重,气候系统复杂;南接祁连山北麓,北与腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠接壤,流域内荒漠面积占 68%,森林、草原、农作物等植被总覆盖面积仅

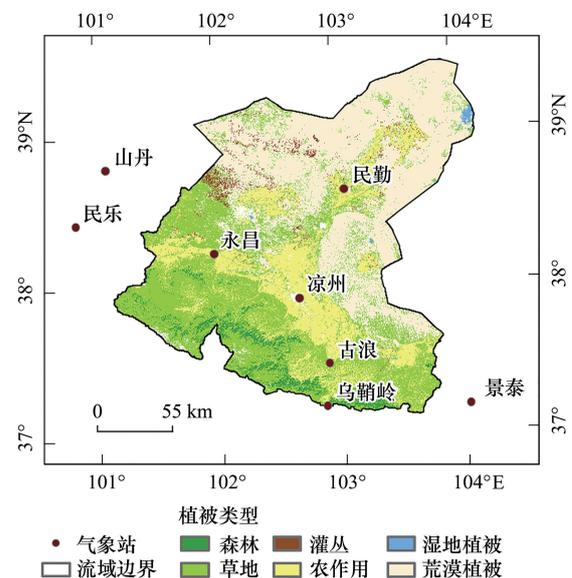


图 1 石羊河流域植被类型和气象站点

Fig.1 Vegetation Types and Meteorological Stations in Shiyang River Basin (SRB)

为 32%,是典型的气候敏感区和生态环境脆弱带<sup>[22,26]</sup>。流域内不同生态系统的植被因受气候、地形、水资源等自然资源影响,在碳积累和循环过程中有明显差异<sup>[20]</sup>,特别是植被对水分利用以及干物质转化过程存在显著的分异特征<sup>[27]</sup>。

## 1.2 数据来源与预处理

### 1.2.1 遥感数据

本研究利用美国国家航空航天局(NASA)(<https://earthdata.nasa.gov/>)提供的中分辨率成像光谱仪(MODIS)的月尺度归一化差值植被指数(NDVI)V6版本数据产品(MOD13A3 V006),空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 个月,时间跨度为 2000—2019 年。通过 MODIS 重投影工具(MRT)对下载的 NDVI 数据进行拼接并转换为等经纬度投影,在 ArcGIS 软件中将月 NDVI 合并为年数据,并裁剪出石羊河流域范围。

### 1.2.2 气象数据

2000—2019 年石羊河流域及其周边 8 个气象站点的气温、降水量、水汽压、风速、云量、相对湿度、日照时数的年数据资料以及数字高程模型(DEM,分辨率 1km)来源于甘肃省气象局。利用 ANUSPLINE 气象数据插值软件插值得到与 NDVI 数据像元大小一致、投影相同的气象栅格数据。以往研究表明 ANUSPLINE 软件模拟气候数据精度较高,可信度较强,已广泛应用于中国气候空间模拟<sup>[28]</sup>。

### 1.2.3 植被类型数据

石羊河流域植被类型数据及分类方案来源于采用精细分类的 2020 年全球 30 米土地覆盖产品(GLC\_FCS30—2020)<sup>[29]</sup>。在 ArcGIS 中采用邻近值法将该产品空间重采样为与 NDVI 相匹配的 1km 分辨率等经纬度投影数据,并对相近的植被类型进行了合并(表 1)。根据植被分类方案显示,石羊河流域分为森林、灌丛、农作物、草地、湿地植被和荒漠植被 6 种类型。

表 1 石羊河流域植被类型合并方案  
Table 1 Consolidation scheme of vegetation types in SRB

合并前 Before consolidation	合并后 After consolidation	合并前 Before consolidation	合并后 After consolidation
开阔落叶阔叶林 Open deciduous broadleaved forest	森林	旱地 Rainfed cropland	农作物
封闭落叶阔叶林 Closed deciduous broadleaved forest		灌溉农业 Irrigated cropland	
开阔常绿针叶林 Open evergreen needle-leaved forest	灌丛	草地 Grassland	草地
封闭常绿针叶林 C losed evergreen needle-leaved forest		稀疏植被 Sparse vegetation	
灌木林 Shrubland		湿地 Wetland	湿地植被
落叶灌木林 Deciduous shrubland		裸地 Bare areas 固结的裸地 Consolidated bare areas 未固结的裸地 Unconsolidated bare areas	荒漠植被

## 1.3 植被水分利用效率(WUE)的计算

本研究采用生态系统研究中普遍选用的水分利用效率计算方法<sup>[13]</sup>,即生态系统总初级生产力与总蒸散量的比值:

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

式中,WUE 为单位时间内植被生态系统水分利用效率( $\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ )。GPP 为单位时间内植被生态系统总初级生产力( $\text{gC/m}^2$ ),基于光能利用效率的算法,计算的详细说明见 Running 等<sup>[30]</sup>。ET 为单位时间内植被生态系统总蒸散量(mm),采用基于气候数据的 Thornthwaite 蒸散发经验估算模型模拟研究区气象站点的蒸散发数据,计算的详细说明见 Pereira 等<sup>[31]</sup>,再利用 ArcMap 软件中的薄盘样条函数插值方法将气象站蒸散发数据

插值到整个研究区。相关研究表明,在对气象站点的 ET 进行模拟时,利用 Thornthwaite 经验估算模型的精度较高<sup>[32]</sup>,且模型复杂程度低,更适用于年蒸散发量的模拟<sup>[33]</sup>。

#### 1.4 饱和水汽压差 (VPD) 的计算

VPD 定义为大气饱和水汽压 (SVP) 和实际水汽压 (AVP) 的差值。这里,大气饱和水汽压 (SVP) 是基于公式 (2) 估算得到<sup>[34]</sup>:

$$SVP = 6.11 \times \exp\left(\frac{17.502 \times T}{T + 240.97}\right) \quad (2)$$

式中, SVP 为饱和水汽压 (hPa),  $T$  为平均温度 (°C)。根据公式估算的 SVP 和站点实测的 AVP 空间插值结果相减,将计算得到的气象站点 VPD 用 ArcMap 软件中的薄盘样条函数插值方法插值到整个研究区,得出石羊河流域的 VPD 空间数据。

#### 1.5 统计分析方法

##### 1.5.1 趋势分析

在每个像元的基础上,利用一元线性回归分析模拟 2000—2019 年间 WUE、GPP 和 ET 的变化趋势,计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \left(\sum_{i=1}^n i \times C_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n i\right) \left(\sum_{i=1}^n C_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $\theta_{\text{slope}}$  为趋势斜率,  $n$  为监测时间段的年数 ( $n=20$ ),  $C_i$  为第  $i$  年的 GPP/ET/WUE。利用 GPP/ET/WUE 序列和时间序列的相关关系来判断 GPP/ET/WUE 年际变化的显著性,斜率为负表示 GPP/ET/WUE 下降,反之则表示上升。

##### 1.5.2 GPP/ET/WUE 与 VPD 偏相关分析

偏相关分析是指分析  $x$  和  $y$  两个变量的相关程度时,将其他所有变量的影响去除,只分析  $x$  变量和  $y$  变量之间相关性的分析方法<sup>[35]</sup>。在偏相关分析中,将涉及  $k$  个变量 ( $v_1, v_2, \dots, v_k$ ) 的偏相关系数记为  $R_{1,2,3,\dots,k}$ ,表示将变量  $v_3, \dots, v_k$  固定后,变量  $v_1$  和  $v_2$  之间的线性相关关系。在  $k=3$  时,相关关系和偏相关关系的计算如公式 (4) 和 (5) 所示:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中,  $R_{xy}$  为  $x, y$  两变量的相关系数,  $x_i$  为第  $i$  年的 GPP/ET/WUE,  $y_i$  为第  $i$  年的 VPD,  $\bar{x}$  为多年 GPP/ET/WUE 的平均值,  $\bar{y}$  为多年 VPD 的平均值,  $i$  为样本数。  $R_{xy}$ 、 $R_{xz}$  和  $R_{yz}$  分别代表变量间二元相关系数。在分析 WUE 与 VPD 的相关关系时,为了排除其他气候因子的影响,加入了年平均气温、年降水量和年平均相对湿度作为排除变量,用偏相关系数来表征 WUE 对 VPD 的响应情况。

##### 1.5.3 显著性检验

GPP/ET/WUE 时空变化趋势及其与 VPD 相关关系的显著性检验采用  $F$  检验<sup>[35]</sup>。显著性代表变化趋势及相关关系的可置信程度高低,具体计算公式为:

$$F = U \times \frac{n - 2}{Q} \tag{6}$$

式中,  $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  为回归平方和,  $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  为残差平方和,  $y_i$  是第  $i$  年的 GPP/ET/WUE 值,  $\hat{y}_i$  为其回归值,  $\bar{y}$  为 20 年 GPP/ET/WUE 平均值,  $n=20$  为年数。对于 GPP/ET/WUE 时空变化趋势, 根据  $F$  检验结果将其分为以下 6 个变化等级: 极显著减少 (slope < 0,  $P < 0.01$ ), 显著减少 (slope < 0,  $0.01 < P < 0.05$ ), 不显著减少 (slope < 0,  $P > 0.05$ ); 不显著增加 (slope > 0,  $P > 0.05$ ), 显著增加 (slope > 0,  $0.01 < P < 0.05$ ), 极显著增加 (slope > 0,  $P < 0.01$ )。对于 GPP/ET/WUE 与 VPD 的相关性, 根据  $F$  检验结果将其分为以下 6 个变化等级: 极显著负相关 ( $R < 0, P < 0.01$ ), 显著负相关 ( $R < 0, 0.01 < P < 0.05$ ), 不显著负相关 ( $R < 0, P > 0.05$ ); 不显著正相关 ( $R > 0, P > 0.05$ ), 显著正相关 ( $R > 0, 0.01 < P < 0.05$ ), 极显著正相关 ( $R > 0, P < 0.01$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 总初级生产力(GPP)时空分布与变化特征

近 20 年石羊河流域植被 GPP 平均值为  $256.52 \text{ gC/m}^2$ , 其空间分布总体呈现南高北低的特征(图 2)。在流域南部的祁连山和走廊绿洲生态系统中, GPP 平均值多在  $300 \text{ gC/m}^2$  以上, 北部荒漠区 GPP 多在  $200 \text{ gC/m}^2$  以下。2000—2019 年, 流域内 GPP 主要呈增加趋势, 增加的面积为流域总面积的 92.0%(图 3)。GPP 波动范围为  $157.72\text{—}390.33 \text{ gC/m}^2$ , 平均变化率为  $6.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 4)。GPP 不显著变化的区域主要分布在城区周边和北部荒漠区, 占流域总面积的 44.76%; GPP 显著增加的区域主要分布在流域西南部山区草地及河西走廊东部绿洲与荒漠区的交界处, 占流域总面积的 17.11%; GPP 极显著增加的区域主要分布在祁连山区、河西走廊东部绿洲、昌宁绿洲、南湖绿洲和民勤绿洲北部的青土湖, 占流域总面积的 37.57%; GPP 呈显著减少和极显著减少的区域主要分布在中游城区、下游民勤耕地—荒漠区之间, 占流域总面积的 0.55%。不同的植被类型的 GPP 变化速率差异显著, 但均呈增长趋势(表 2)。在各植被类型中, 森林 GPP 平均增长率最高 ( $13.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), 草地次之 ( $7.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), 其余植被类型变化速率的顺序依次为农作物 ( $6.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )、灌丛 ( $1.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )、荒漠植被 ( $1.07 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 和湿地植被 ( $0.88 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )。

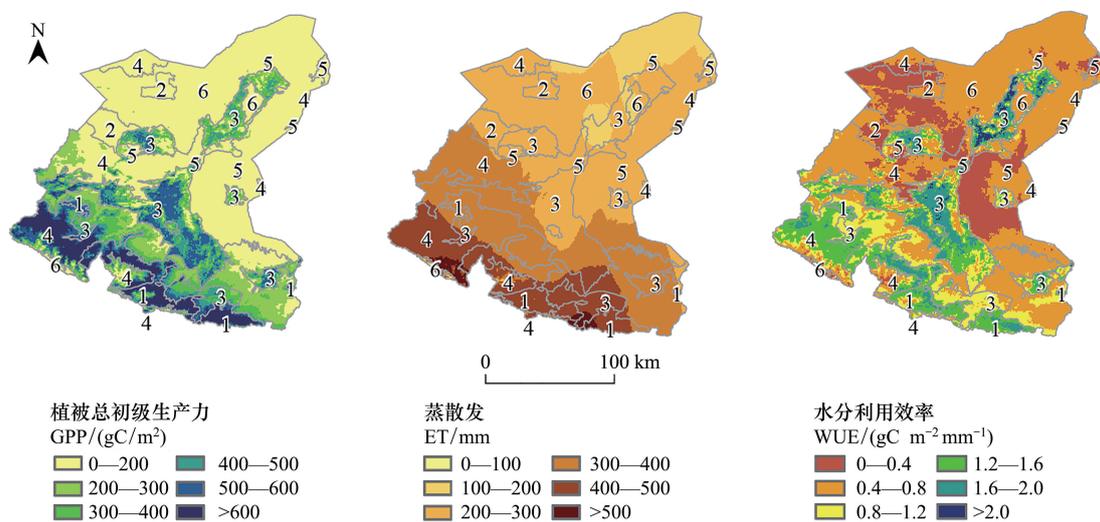


图 2 2000—2019 年石羊河流域植被总初级生产力 (GPP)、蒸散发 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of vegetation gross primary production (GPP), evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) in SRB from 2000 to 2019

1. 森林; 2. 灌丛; 3. 农作物; 4. 草地; 5. 湿地植被; 6. 荒漠植被

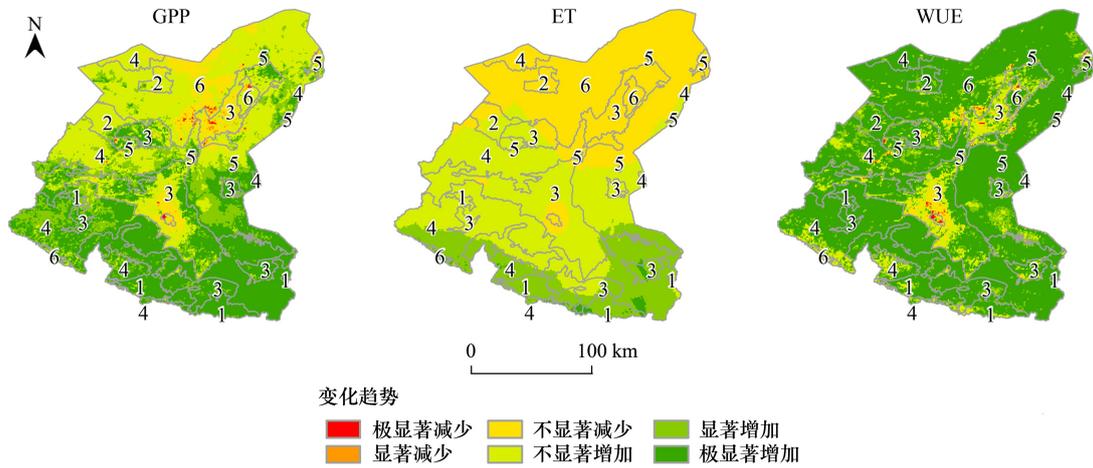


图3 2000—2019年石羊河流域植被总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)和水分利用效率(WUE)变化趋势  
Fig.3 The trend of vegetation GPP, ET and WUE in SRB from 2000 to 2019

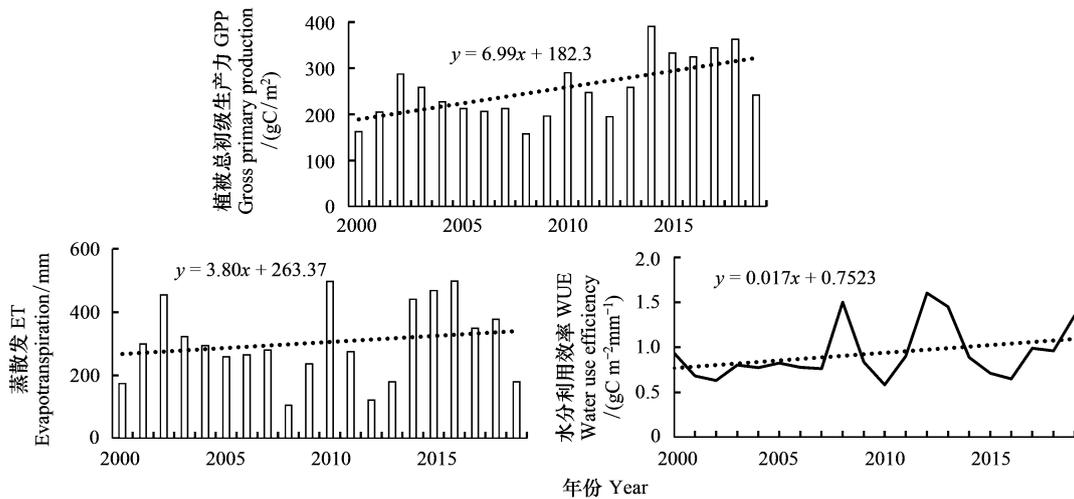


图4 2000—2019年石羊河流域植被总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)和水分利用效率(WUE)逐年变化  
Fig.4 Annual changes of vegetation GPP, ET and WUE in SRB from 2000 to 2019

表2 2000—2019年石羊河流域各植被类型WUE、GPP、ET变化趋势

Table 2 Trend of WUE, GPP and ET of vegetation types in SRB from 2000 to 2019

	森林 Forest	灌丛 Shrub	农作物 Crop	草地 Grass	湿地植被 Wetland vegetation	荒漠植被 Desert vegetation
水分利用效率变化 Trend of WUE/(gC m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	0.018	0.008	0.019	0.015	0.004	0.006
总初级生产力变化 Trend of GPP/(gC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	13.47	1.47	6.45	7.04	0.88	1.07
蒸散发变化 Trend of ET/(mm/a)	5.68	-0.58	1.72	3.03	-0.30	-0.52

WUE: 水分利用效率 Water use efficiency; GPP: 总初级生产力 Gross primary production; ET: 蒸散量 Evapotranspiration

## 2.2 蒸散发(ET)时空分布与变化特征

近20年石羊河流域植被ET平均值为302.52 mm,与GPP空间分布相同,ET空间分布总体呈南高北低的特征(图2)。在流域南部的祁连山和走廊绿洲生态系统中,ET平均值多在400 mm以上,北部荒漠区ET多

在 300 mm 以下。2000—2019 年,流域内 ET 呈缓慢增加趋势,增加的面积为流域总面积的 60.9%(图 3)。ET 波动范围为 105.01—498.35 mm,变化率平均值为 3.80 mm/a(图 4)。ET 不显著变化的区域主要分布在荒漠区、走廊绿洲中西部和祁连山中低海拔地区,占流域总面积的 80.43%;ET 显著增加的区域主要分布在祁连山中高海拔地区和河西走廊绿洲东部,占流域总面积的 18.43%;ET 极显著增加的区域主要分布在祁连山东部高海拔地区,占流域总面积的 1.13%;ET 呈显著减少和极显著减少的区域在民勤南部的红崖山水库,仅占流域总面积的 0.01%。不同的植被类型的 ET 变化的速率差异显著(表 2),在各植被类型中,森林、草地和农作物的 ET 呈增加趋势,分别为 5.68 mm/a, 3.03 mm/a 和 1.72 mm/a;灌丛、湿地植被和荒漠植被的 ET 呈减少趋势,分别为 -0.58 mm/a, -0.52 mm/a 和 -0.30 mm/a。

### 2.3 水分利用效率(WUE)时空分布与变化特征

#### 2.3.1 WUE 空间分布特征

近 20 年石羊河流域植被 WUE 平均值为  $0.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,与 GPP 和 ET 空间分布相同,WUE 空间分布总体呈南高北低的特征(图 2)。在流域南部的祁连山和中部农耕地区,WUE 平均值在  $1.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  以上,北部荒漠区 WUE 数值在  $0.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  以下。在石羊河流域 6 种植被类型中,森林的 WUE 平均值最高,为  $1.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ;湿地植被最低,平均值为  $0.41 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (表 3)。由于石羊河流域上游山区、走廊绿洲与民勤绿洲水分条件的差异性,农作物 WUE 分异显著,上游为  $0.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,下游为  $1.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,流域平均值为  $1.29 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ;草地 WUE 在祁连山区 WUE 大于  $1.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,下游地区介于  $0.3—0.6 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,流域平均值为  $0.83 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。

表 3 2000—2019 年石羊河流域各植被类型 WUE、GPP、ET 年平均值

Table 3 Annual value of WUE, GPP and ET of vegetation types in SRB from 2000 to 2019

	森林 Forest	灌丛 Shrub	农作物 Crop	草地 Grass	湿地植被 Wetland vegetation	荒漠植被 Desert vegetation
年水分利用效率 Annual WUE/( $\text{gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ )	1.43	0.58	1.29	0.83	0.41	0.47
年总初级生产力 Annual GPP/( $\text{gC/m}^2$ )	616.56	148.10	404.69	312.43	89.79	110.49
年蒸散发 Annual ET/mm	431.53	263.08	323.32	356.09	209.25	238.61

#### 2.3.2 WUE 时空变化特征

2000—2019 年,流域内 WUE 总体呈增加趋势,增加的面积为流域总面积的 97.1%(图 3)。WUE 波动范围为  $0.58—1.60 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,平均变化率为  $0.017 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (图 4),即近 20 年中每蒸散 1 mm 水,流域内植被平均每年增加同化  $\text{CO}_2$  约  $0.017 \text{ g}$ 。WUE 不显著变化的区域主要分布在祁连山高海拔区、河西走廊绿洲城区周边和民勤绿洲耕地,占流域总面积的 12.52%;WUE 显著增加的区域呈破碎化分布,主要分布在绿洲与荒漠区交界处,占流域总面积的 10.45%;流域内大部分地区的 WUE 呈极显著增加趋势,占流域总面积的 76.58%;WUE 呈显著减少和极显著减少的区域主要分布在中游城区和民勤绿洲耕地—荒漠区交接处,占流域总面积的 0.45%。

在不同的植被类型中,植被 WUE 变化的速率具有明显的差异性(图 3),但均呈增长趋势。如表 2 所示,WUE 平均增长率最高植被是农作物( $0.019 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ),其后依次为森林( $0.018 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )、草地( $0.015 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )、灌丛( $0.008 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )、荒漠植被( $0.006 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ),WUE 增长率最低为湿地植被,平均增长率为  $0.004 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。

### 2.4 GPP/ET/WUE 空间分布与 VPD 的相关性

近 20 年,石羊河流域 GPP 与 VPD 呈正相关关系的面积为 41.1%,主要分布在祁连山中高海拔地区、河西走廊绿洲东部和荒漠区东部,其中呈显著正相关和极显著正相关关系的地区主要分布在祁连山东部和河西走廊绿洲东部,占流域总面积的 5.01%;GPP 与 VPD 呈负相关关系的面积为 58.9%,主要分布在河西走廊绿洲

中西部、民勤绿洲和大部分荒漠区地区;其中呈显著负相关和极显著负相关关系的地区主要分布在民勤绿洲中部,占流域总面积的 4.56%(图 5)。ET 与 VPD 的相关关系分布与 GPP 相似,流域内 ET 与 VPD 呈正相关关系的面积为 31.4%,呈显著正相关和极显著正相关关系的地区分布在祁连山东部,占流域总面积的 0.11%;ET 与 VPD 呈负相关关系的面积为 68.6%,呈显著负相关和极显著负相关关系的地区主要分布在民勤绿洲中部和河西走廊绿洲西部,占流域总面积的 13.90%(图 5)。WUE 与 VPD 呈正相关关系的面积为 78.5%,呈显著正相关和极显著正相关关系的地区主要分布在河西走廊绿洲东部和荒漠区东部;WUE 与 VPD 呈负相关关系的面积为 21.5%,主要分布在祁连山高海拔地区、河西走廊绿洲中部和沙漠西部,呈显著负相关和极显著负相关关系的地区主要分布在中游城区,占流域总面积的 0.65%(图 5)。六种植被类型中,植被 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性具有明显的区域性特征。例如,森林和灌丛的 GPP/ET/WUE 与 VPD 均呈正相关关系;湿地植被与荒漠植被的 GPP/ET 与 VPD 均呈负相关关系,但荒漠植被的 WUE 与 VPD 呈正相关关系;分布范围广的草地和农田生态系统,在流域东侧以及祁连山区的 GPP/ET/WUE 与 VPD 均呈正相关关系,分布在流域西侧以及北部荒漠区的 GPP/ET/WUE 与 VPD 均呈负相关关系。

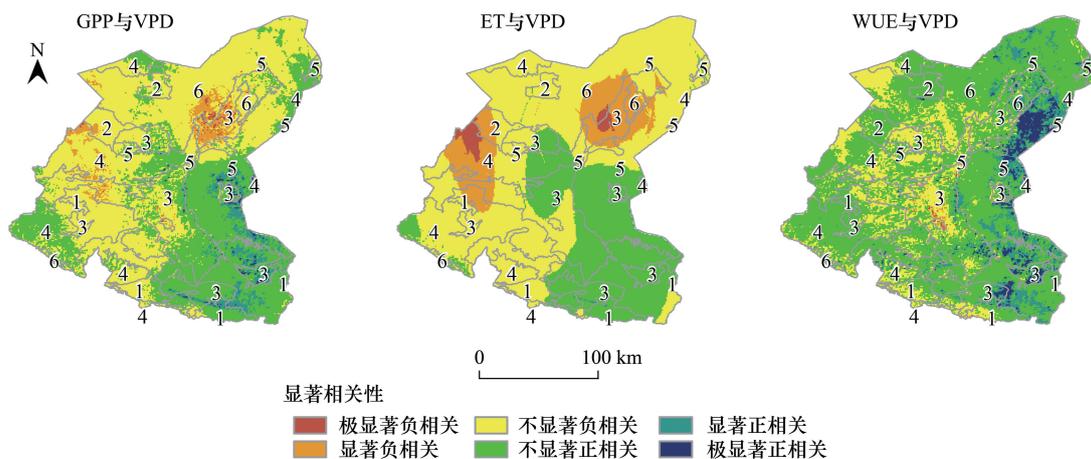


图 5 2000—2019 年石羊河流域植被总初级生产力 (GPP)、蒸散发 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 与饱和水汽压差 (VPD) 的相关性空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of correlation between GPP, ET, WUE and VPD in SRB from 2000 to 2019

### 3 讨论

#### 3.1 模型验证

石羊河流域以往基于遥感估算的研究主要集中在 NPP 和月尺度 ET 上<sup>[20,36–37]</sup>,对年际 GPP 和 ET 遥感估算的研究较少,无法通过直接对比文献结论验证本研究的模型估算结果。MODIS 的 GPP 和 ET 产品已在全球碳水循环研究中得到广泛应用,因此将本研究估算结果与 MODIS GPP 和 ET 产品进行对比。由于 MODIS GPP/ET 产品在计算过程中加入了土地利用类型参数,在植被稀少的荒漠区和居民地,GPP 和 ET 均无值,因此仅对比其它植被类型的估算结果(图 6)。两者近 20 年平均值相差分别为 42.78 gC/m<sup>2</sup>和 0.04 mm,GPP 估算结果得到的总体标准差(166.46)略高于 MODIS 产品(156.93),ET 估算结果得到的总体标准差(71.67)略低于 MODIS 产品(101.01)。GPP、ET 的均方根误差(RMSE)分别为 96.35 和 68.52,平均相对误差分别为 16.97%和 16.68%。总体来看,估算的 GPP 和 ET 符合石羊河流域的实际境况。

#### 3.2 2000—2019 年植被 WUE 时空动态变化分析

石羊河流域地处黄土、青藏、蒙新三大高原的交汇过渡带,复杂地貌特征以及水热差异造就了生态区植被类型的南高北低分异特征<sup>[20,22,26–27]</sup>,植被格局区域性特征是形成植被 WUE 总体呈现出南高北低空间分布的决定原因<sup>[25]</sup>。石羊河流域南部冰雪融水补给充足,土壤含水量高,昼夜温差大,高大乔木和高覆盖草地为碳

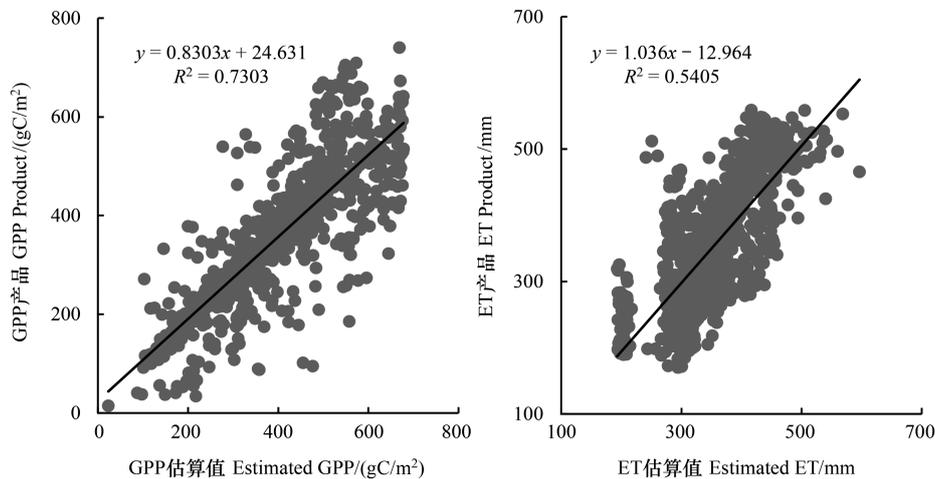


图 6 GPP、ET 估算值与 MODIS GPP/ET 产品数据间的回归分析

Fig.6 The regression analysis between estimated GPP/ET and MODIS GPP/ET Product

累加提供了基础,良好的植被覆盖和充沛的水分是该地区 GPP 和 ET 偏高的重要原因;北部荒漠区地下水匮乏、地表径流补给不稳定,低矮稀疏的荒漠植被是造成 GPP 偏小的直接原因,也是 ET 小的主要条件(图 2)<sup>[23]</sup>。流域内 6 种植被类型中,WUE 最高值分布在南部森林,最低值分布在北部荒漠区的湿地中。这是由于在祁连山区丰富的降水和充足径流促进了植被的生长发育,良好的植被覆盖条件增加了单位面积干物质积累量,是 GPP 高的重要原因;植被发育条件良好增强了光合作用与蒸腾作用的耗水量,是导致 ET 高的必要条件,这也是造成森林 WUE 数值高于其他植被类型的根本原因。在湿地植被生态系统中,水域面积广,为蒸腾/蒸发提供良好场地,使得此生态系统 ET 高于其他植被类型;荒漠区植被相对低矮稀疏,是 GPP 低于研究区其他植被类型的重要原因<sup>[23]</sup>,因此湿地植被类型 WUE 低于流域内其他植被类型(图 2)。

植物 WUE 的空间分布特征表征了不同区域和植被类型对生态系统内水分利用的特征,而 WUE 年际变化规律则突显了植物耗水量与生产力对自然环境以及人类干预过程的适应结果<sup>[15-16,38]</sup>。2000—2019 年,流域内 WUE 增加的主要原因是植被生产能力的提升,WUE 下降的区域主要是由于城市扩张和非农产业的发展造成 GPP 降低引起的<sup>[26]</sup>(图 3)。流域内植被 WUE 增加趋势从大到小的顺序为农作物、森林、草地、灌丛、荒漠植被、湿地植被。农作物 WUE 的变化趋势受人类活动影响显著,其变化率的大小直接由 GPP 决定。农作物 GPP 的提高主要通过选育优良作物、指导田间管理<sup>[37]</sup>以及实施节水工程<sup>[16]</sup>,因此在农田区应通过改良技术和科学管理提高水的利用效率,即耗水量相同的前提下生产更多的生物总量,以便获取更高的经济效益。森林植被 GPP 高于其它植被类型,郁闭的林冠能够吸收更多的太阳辐射<sup>[8]</sup>,同时随着植被的生长也提高了树叶蒸腾的相对比率<sup>[39]</sup>,但由于在近 20 年的过程中森林 ET 增长速率小于 GPP 的增长速率(表 2),因此该生态系统的 WUE 呈增加趋势。湿地植被 WUE 在大部分区域保持稳定趋势,这是因为石羊河流域湿地多位于荒漠区,受人为干扰较小,稳定的自然环境对湿地植物水分利用效率的影响不大。灌丛和荒漠植被 WUE 增加区域主要分布在绿洲与荒漠区的交界,这由于 1980 年实施科学化、标准化人工治沙工程以来,绿洲与荒漠区交界的人工植被面积增加,覆盖度呈增长趋势<sup>[22]</sup>,同时 ET 呈减少或略增加趋势,因此绿洲与荒漠交界的植被 WUE 在近 20 年来稳步增长(图 3),是人类干预对自然植被 WUE 变化趋势的集中表现。

### 3.3 GPP/ET/WUE 与 VPD 的相关性分析

VPD 是造成植物干旱死亡的直接贡献者,是独立于气候变化的驱动因素,是影响陆地生态系统的外在动力<sup>[12]</sup>。2000—2019 年间,石羊河流域区域内 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性特征具有显著的小区域气候特征,变化的小环境因子深刻的影响了植物生理过程。分布在东南部的祁连山区水分相对充裕,VPD 的增加将会带动植物固碳和蒸腾耗水量的增加<sup>[4,18-19]</sup>,因此 GPP/ET 与 VPD 呈正相关(图 5);流域西北部中下游地区属

于干旱或极度干旱气候区,增加的大气  $\text{CO}_2$  浓度会通过关闭的植物气孔阻碍植被固碳和蒸腾速率<sup>[39]</sup>,因此该区域 GPP/ET 与 VPD 呈负相关(图 5)。在流域变暖过程中,增加的 VPD 会导致植被叶片气孔导度降低<sup>[17,40]</sup>,植物可以利用更少的水换取等量的碳, $\text{CO}_2$  富集的生理效应对植被水分胁迫的缓解作用大于大气水分亏缺加剧对植被生长的胁迫作用,从而大幅度降低了生态系统的水分需求,提高植物水分利用效率<sup>[19]</sup>,因此 WUE 表现出与 VPD 正相关的关系;流域内少数区域 WUE 与 VPD 呈负相关,主要分布于荒漠区和城区,这是由于在 GPP 反演过程中荒漠地区数据的量级过低,以及城市化进程使原生植被消失,导致生产力降低造成的。

不同植被类型 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性分布格局的异质性显著,这主要是由立地环境(如,干旱区依托水分条件)与微气候参数决定<sup>[8,25,41]</sup>。因此,流域内 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性的空间分布特征与石羊河径流方向具有高度一致性,特别是 WUE 与 VPD 相关性分布特征与土地利用类型以及河流径流方向空间分布一致。WUE 与 VPD 呈正相关的区域主要分布在河西走廊绿洲东部和荒漠区东部,呈负相关区域主要分布在祁连山高海拔地区、河西走廊绿洲中部和荒漠区西部。不同植被类型空间分布决定了该植被类型 WUE 与 VPD 的相关性,这与其他学者在不同地域中的 WUE 与气候因子相关性研究结论相一致<sup>[4,15,19]</sup>。

#### 4 结论

本研究通过光能利用模型和蒸散发经验模型,结合卫星遥感和地面观测数据,模拟石羊河流域 2000—2019 年植被总初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)数据,估算了 2000—2019 年不同植被类型的 WUE 空间分布特征,分析了 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性,探讨了干旱区不同类型植被对水分利用及水分胁迫的适应策略。为了保证模拟结果的有效性,对模型估算结果做了验证。主要结论如下:

(1) 2000—2019 年石羊河流域区域内植被 WUE 的平均值为  $0.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , GPP 平均值为  $256.52 \text{ gC/m}^2$ , ET 平均值为  $302.52 \text{ mm}$ ,三者空间分布特征为南高北低,即由流域源头至下游逐渐减少的空间分布格局。

(2) 2000—2019 年,流域内 WUE 平均变化率为  $0.017 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , GPP 平均变化率为  $6.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , ET 平均变化率为  $3.80 \text{ mm/a}$ ,总体呈现波动上升的趋势,但中游城区和民勤耕地-荒漠交接处呈不同程度的减少趋势。

(3) 流域内不同类型植被的 WUE 平均值关系为森林>农作物>草地>灌丛>荒漠植被>湿地植被,WUE 变化速率的平均值关系为:农作物>森林>草地>灌丛>荒漠植被>湿地植被,与 GPP 基本一致,ET 在灌丛、荒漠、湿地地区呈现降低趋势。

(4) 流域内 GPP/ET/WUE 与 VPD 相关性的空间分布特征与石羊河径流方向分布具有高度一致性,WUE 与 VPD 相关性分布特征与土地利用类型相似度高。WUE 与 VPD 呈正相关的区域主要分布在河西走廊绿洲东部和荒漠区东部,呈负相关区域主要分布在祁连山高海拔地区、河西走廊绿洲中部和荒漠区西部。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Huang M T, Piao S L, Ciais P, Peñuelas J, Wang X H, Keenan T F, Peng S S, Berry J A, Wang K, Mao J F, Alkama R, Cescatti A, Cuntz M, De Deurwaerder H, Gao M D, He Y, Liu Y W, Luo Y Q, Myneni R B, Niu S L, Shi X Y, Yuan W P, Verbeeck H, Wang T, Wu J, Janssens I A. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(5): 772-779.
- [ 2 ] Ponce-Campos G E, Moran M S, Huete A, Zhang Y G, Bresloff C, Huxman T E, Eamus D, Bosch D D, Buda A R, Gunter S A, Scalley T H, Kitchen S G, McClaran M P, McNab W H, Montoya D S, Morgan J A, Peters D P C, Sadler E J, Seyfried M S, Starks P J. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 2013, 494(7437): 349-352.
- [ 3 ] Sun Y, Piao S L, Huang M T, Ciais P, Zeng Z Z, Cheng L, Li X R, Zhang X P, Mao J F, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Wang X H, Wang Y P, Zeng H. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 311-323.
- [ 4 ] 于贵瑞,王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科学出版社, 2010.

- [ 5 ] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.
- [ 6 ] Niu S L, Xing X R, Zhang Z, Xia J Y, Zhou X H, Song B, Li L H, Wan S Q. Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1073-1082.
- [ 7 ] Huang M T, Piao S L, Zeng Z Z, Peng S S, Ciais P, Cheng L, Mao J F, Poulter B, Shi X Y, Yao Y T, Yang H, Wang Y P. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change. *Global Change Biology*, 2016, 22(6): 2165-2177.
- [ 8 ] 周雄, 孙鹏森, 张明芳, 刘世荣. 西南高山亚高山区植被水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 628-641.
- [ 9 ] Lawrence M G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: a simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(2): 225-234.
- [ 10 ] Zhang H M, Wu B F, Yan N N, Zhu W W, Feng X L. An improved satellite - based approach for estimating vapor pressure deficit from MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 119(21): 12256-12271.
- [ 11 ] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [ 12 ] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, Novick K A, Poulter B, Siegwolf R T W, Sperry J S, McDowell N G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [ 13 ] Huang M T, Piao S L, Sun Y, Ciais P, Cheng L, Mao J F, Poulter B, Shi X Y, Zeng Z Z, Wang Y P. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2366-2378.
- [ 14 ] 郑鹏飞, 余新晓, 贾国栋, 刘自强, 张永娥, 朱翔辉. 北京山区侧柏人工林水分利用效率及其影响因素. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 727-734.
- [ 15 ] Tian F, Zhang Y, Lu S H. Spatial-temporal dynamics of cropland ecosystem water-use efficiency and the responses to agricultural water management in the Shiyang River Basin, northwestern China. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 106176.
- [ 16 ] Tian F, Zhang Y. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration, gross primary productivity, and water use efficiency of cropland in agroecosystems and their relation to the water-saving project in the Shiyang River Basin of Northwestern China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 172: 105379.
- [ 17 ] Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Zheng Z M. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1609-1619.
- [ 18 ] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. *生态学报*, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [ 19 ] Lian X, Piao S L, Chen A P, Huntingford C, Fu B J, Li L Z X, Huang J P, Sheffield J, Berg A M, Keenan T F, McVicar T R, Wada Y, Wang X H, Wang T, Yang Y T, Roderick M L. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nat Rev Earth Environ* 2021, 2(3): 232-250.
- [ 20 ] Li C H, Wang Y T, Wu X D, Cao H J, Li W P, Wu T H. Reducing human activity promotes environmental restoration in arid and semi-arid regions: A case study in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144525.
- [ 21 ] 张强, 林婧婧, 刘维成, 韩兰英. 西北地区东部与西部汛期降水跷跷板变化现象及其形成机制. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 2064-2078.
- [ 22 ] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 1108-1118.
- [ 23 ] 张新中, 李育, 张成琦, 刘和斌. 2000-2014 年石羊河流域净生态系统生产力变化分析. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(4): 486-492.
- [ 24 ] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York: Springer, 2011.
- [ 25 ] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 朱钊岑. 黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应. *生态学报*, 2020, 40(3): 888-899.
- [ 26 ] 姚玉璧, 李耀辉, 石界, 王莺, 王劲松, 丁文魁, 杨金虎. 基于 GIS 的石羊河流域干旱灾害风险评估与区划. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(2): 21-28.
- [ 27 ] Guo L M, Sun F B, Liu W B, Zhang Y G, Wang H, Cui H J, Wang H Q, Zhang J, Du B X. Response of ecosystem water use efficiency to drought over China during 1982-2015: spatiotemporal variability and resilience. *Forest*, 2019, 10(7): 598.
- [ 28 ] 李任君, 高懋芳, 李强, 李百寿. 基于 ANUSPLIN 的降水空间插值方法研究. *中国农业信息*, 2019, 31(1): 48-57.
- [ 29 ] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC\_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [ 30 ] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6): 547-560.
- [ 31 ] Pereira A R, De Camargo Â P. An analysis of the criticism of thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. *Agricultural and*

- Forest Meteorology, 1989, 46(1/2): 149-157.
- [32] Hafeez M, Bakhsh A, Basit A, Chattha Z A, Khan A A, Majeed M A, Tahira F. Penman and thornwait equations for estimating reference evapotranspiration under semi-arid environment. Current Research in Agricultural Sciences, 2020, 7(1): 6-14.
- [33] 裴步祥, 邹耀芳. 三种计算可能蒸发方法的比较. 气象, 1986, 12(7): 26-30.
- [34] Gao J G, Zhao P, Shen W J, Niu J F, Zhu L W, Ni G Y. Biophysical limits to responses of water flux to vapor pressure deficit in seven tree species with contrasting land use regimes. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 258-269.
- [35] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [36] 刘春雨, 赵军, 刘英英, 魏伟. 石羊河流域蒸散发量遥感估算及时空格局分析. 国土资源遥感, 2011, 23(3): 117-122.
- [37] Zhang C W, Qi Y Q, Dai M H, Zhang Y C, Shen Y J. Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 876-886.
- [38] Sullivan P F, Welker J M. Variation in leaf physiology of *Salix arctica* within and across ecosystems in the High Arctic: Test of a dual isotope ( $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{18}\text{O}$ ) conceptual model. Oecologia, 2007, 151(3): 372-386.
- [39] Niu Z E, He H L, Zhu G F, Ren X L, Zhang L, Zhang K, Yu G R, Ge R, Li P, Zeng N, Zhu X B. An increasing trend in the ratio of transpiration to total terrestrial evapotranspiration in China from 1982 to 2015 caused by greening and warming. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279: 107701.
- [40] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, Dragoni D, Munger J W, Schmid H P, Richardson A D. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. Nature, 2013, 499(7458): 324-327.
- [41] Brümmer C, Black T A, Jassal R S, Grant N J, Spittlehouse D L, Chen B Z, Nesic Z, Amiro B D, Arain M A, Barr A G, Bourque C P A, Coursolle C, Dunn A L, Flanagan L B, Humphreys E R, Lafleur P M, Margolis H A, McCaughy J H, Wofsy S C. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 153: 14-30.