

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.047>



近 20 年塔里木河流域植被变化及与气候因子的关系

岳胜如^{1,2}, 王伦澈^{1*}, 曹茜¹, 孙嘉¹, 崔利芳³

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆阿拉尔 843300

3. 黄冈师范学院地理与旅游学院, 湖北黄冈 438000

摘要: 为了解西北“暖湿化”进程中气候因素对塔里木河流域植被变化的驱动作用, 基于线性回归、变异系数、Person 相关系数、Hurst 指数和偏导数方法, 利用 MODIS 卫星遥感数据和气候数据对塔里木河流域植被变化的气候驱动机制进行定量评估。结果表明: 该流域植被最优长势和生产力水平呈波动上升趋势, 指数 NDVI、EVI、NPP 增速分别为 0.036 4/10a、0.023 8/10a、12.606 1 gC/(m²·10a)。Hurst 指数显示, 研究区大部分区域植被存在持续变化的不确定性问题, 持续改善区域分别占流域面积的 19.7%、18.7% 和 6.1%。流域尺度上, 气候因素对 NDVI、EVI、NPP 的贡献分别为 0.0016/10a、0.0010/10a、2.8019 gC/(m²·10a)。相较于气温, 降水是影响植被变化的主要气候因子; 辐射对植被变化有抑制作用。气候变化对植被最优长势变化的贡献有限, 却促进了植被生产力的明显改善, 结果揭示了塔里木河流域植被变化及气候驱动的空间特征。

关键词: 塔里木河流域; 植被变化; 驱动机制; 定量评估; 气候变化。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2025)01-033-13

收稿日期: 2023-12-11

Vegetation Changes in Tarim River Basin over Past 20 Years and Their Relationship with Climate Factors

Yue Shengru^{1,2}, Wang Lunche^{1*}, Cao Qian¹, Sun Jia¹, Cui Lifang³

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. College of Water Resources and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China

3. School of Geography and Tourism, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China

Abstract: To understand the role of climatic factors in driving vegetation changes in the Tarim River Basin during the “warming and humidification” process in Northwest China, based on the linear regression, coefficient of variation, Person correlation coefficient, Hurst index and partial derivative methods, the climate-driven mechanism of vegetation change in the Tarim River Basin was quantitatively evaluated using MODIS satellite remote sensing data and meteorological data. It is found that the optimal vegetation growth and productivity levels in the basin showed a fluctuating upward trend, and the index NDVI, EVI, and NPP growth rates were 0.036 4/10a, 0.023 8/10a, and 12.606 1 gC/(m²·10a), respectively. The Hurst index shows that the study area had the problem of uncertainty of continuous change in vegetation, and the areas of continuous improvement accounted for 19.7%, 18.7%, and 6.1% of the watershed area, respectively. At the watershed scale, the contributions of climatic factors to NDVI, EVI, and NPP were 0.001 6/10a, 0.001 0/10a, and 2.801 9 gC/(m²·10a),

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41975044, 42001314); 湖北省自然科学基金项目(No. 2023AFB020); 兵团科技计划项目(No. 2024AB064)。

作者简介: 岳胜如(1988—), 男, 博士生, 从事气候变化与生态环境遥感研究。ORCID: 0009-0008-8879-8817。E-mail: nmgndysr@163.com

* **通讯作者:** 王伦澈, E-mail: wang@cug.edu.cn

引用格式: 岳胜如, 王伦澈, 曹茜, 孙嘉, 崔利芳, 2025. 近 20 年塔里木河流域植被变化及与气候因子的关系. 地球科学, 50(1): 33–45.

Citation: Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, Sun Jia, Cui Lifang, 2025. Vegetation Changes in Tarim River Basin over Past 20 Years and Their Relationship with Climate Factors. *Earth Science*, 50(1): 33–45.

respectively. Precipitation was the main climatic factor affecting vegetation change compared to air temperature; radiation had an inhibitory effect on vegetation change. Climate change contributed limitedly to the changes in optimal vegetation growth, but promoted significant improvements in vegetation productivity. The results reveal the spatial characteristics of vegetation change and climate-driven changes in the Tarim River Basin.

Key words: Tarim River Basin; vegetation change; driving mechanism; quantitative evaluation; climate change.

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在反映气候变化、水土保持、全球碳平衡、人类活动强度等方面发挥着重要作用,是评价生态系统健康和土地退化的指标(Piao *et al.*, 2011; Newbold *et al.*, 2015).近年来诸多学者针对全球和区域尺度,开展了大量的陆地生态系统监测工作,其中植被变化的影响机制一直是人们关注的焦点(Chen *et al.*, 2010; Jeong *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2020; 王春雅等, 2021).近年来,国内外学者在不同空间尺度上对气候变化与植被之间的关系开展研究,并取得显著进展(Piao *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2020).气候变化与植被生长状况关系密切,降水、气温、辐射强度等是影响植被变化的重要气候因子(Nemani *et al.*, 2003; He *et al.*, 2015),但植被变化对气候的响应存在空间差异.研究表明在全球尺度上,气温升高是北半球中高纬度地区植被生长期延长的主要驱动因素(Nemani *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2019).区域尺度上,特别是在干旱和半干旱地区,植被变化对降水很敏感,理论上降水的增加有利于植被生长(Zhu *et al.*, 2020),而在中低纬度的一些地区气温和辐射可能限制植被生长(Zhang *et al.*, 2016).

塔里木河流域地处欧亚大陆腹地、新疆维吾尔自治区南部,是中国粮食、棉花的主产区.作为中国最敏感和最脆弱的山地-绿洲-沙漠生态系统,近几十年来,塔里木河流域人类活动不断升级,土地利用发生显著变化.已有研究多使用线性回归、相关性分析、土地利用转移矩阵等方法在塔里木河流域植被变化趋势及主导因素方面基本达成共识,即近几十年来该流域植被呈波动增加趋势、土地利用转化剧烈;相较于气候变化,人类活动对该流域植被变化的影响更显著(Zhao *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2022; 岳胜如等, 2024).然而,自 20 世纪 80 年代以来中国西北“暖湿化”现象显著,特别是 1996 年以后表现出“暖湿化”加速现象(Chen *et al.*, 2023).在“暖湿化”加速背景下,现有研究在流域尺度和像元尺度上量化气候因子对植被变化的贡献方面尚不充分,特别是多角度植被变化描述及气候因子定量

驱动贡献研究方面(Pan *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2017).

本研究使用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)来表征植被长势,而植被生产力使用净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指标来表示.从植被最优长势和生产力两个角度,探究塔里木河流域不同空间尺度(流域尺度、像元尺度)植被变化特征和气候驱动机制.研究目标:(1)基于 3 种植被指数,从植被最优长势和生产力两个角度,全面评价塔里木河流域植被变化时空格局的可持续性.(2)定量分析气候因素对植被变化的影响.研究结果可深入了解塔里木河流域植被变化及其气候驱动的空间格局,并为该区域生态环境建设提供一定的理论依据.

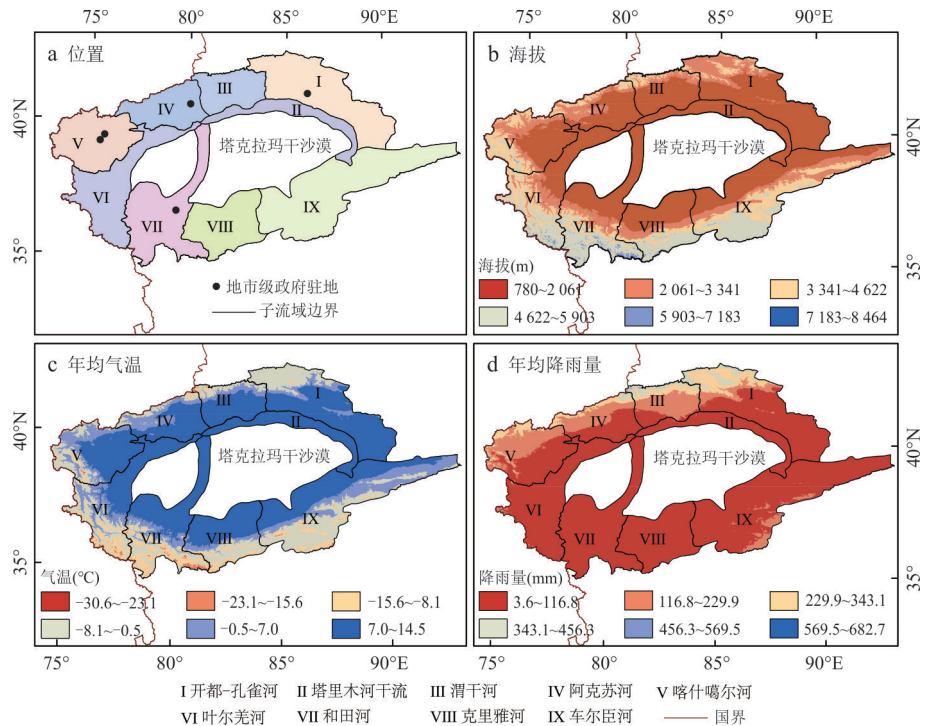
1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域($73^{\circ}10'E\sim 94^{\circ}05'E$, $34^{\circ}55'N\sim 43^{\circ}08'N$)位于新疆南部,天山与昆仑山、喀喇昆仑山之间,面积约 $68.5\times 10^4\text{ km}^2$ (不含塔克拉玛干沙漠,见图 1).近年来由于气候变化以及人类活动影响,特别是绿洲农业的持续开发,各支流上游用水持续增加,相继与塔里木河干流失去联系,目前只有开都-孔雀河、阿克苏河、叶尔羌河和田河对塔里木河干流进行补给(郭宏伟等, 2017; 魏豪等, 2023).研究区海拔 780~8 464 m,大部分属极端干旱气候,多年平均气温为 $-30.6\sim 14.5^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 3.6~682.7 mm.考虑到植被在塔里木河流域的分布,本文选取塔里木河流域内 NDVI 大于 0.1、海拔小于 5 000 m (高山雪线)的区域作为研究对象(赵杰等, 2018; 邓刚, 2021).

1.2 数据来源

本研究采用 NDVI、EVI、NPP 植被指数和再分析气候数据集,数据来源及说明见表 1.利用 MODIS 重投影工具(MRT)进行图像拼接、格式和投影转换,使用 MATLAB、ArcGIS 对数据加工处理.为探究植被对气候变化和其他因素响应的敏感度,考



该图基于国家青藏高原科学数据中心塔里木河流域边界数据集(2000)绘制,底图边界无修改;国界基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号:GS(2019)1822号)绘制,底图边界无修改.下同

表 1 数据来源及说明					
Table 1 Data source and description					
数据	产品	时段(年)	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
MOD13 A3	NDVI,EVI	2001–2020	月	1 km	https://www.earthdata.nasa.gov/
MOD17 A3HGF	NPP	2001–2020	年	500 m	https://www.earthdata.nasa.gov/
气温	月平均气温	2001–2020	月	1 km	http://www.geodata.cn/
降水	月累计降水	2001–2020	月	1 km	http://www.tpdc.ac.cn
辐射	月平均辐射	2001–2020	月	0.1°	https://www.copernicus.eu/en

考虑到气候变化及物候对植被生长的影响,NDVI、EVI采用年最大值(逐月最大合成值),用以表示植被年最优长势状态,下文所有NDVI、EVI均为最大值合成,不再赘述;NPP为2001–2020年逐年植被净初级生产力数据,重采样至1 km和其他数据分辨率匹配.气温和降水数据分别来自经过空间降尺度处理的CRU和WorldClim高分辨率数据集,并进一步处理得到年均气温和年累计降水.辐射数据来自哥白尼气候数据存储系统提供的ERA5-Land再分析数据集,重采样处理得到1 km年均辐射.

1.3 数据处理

1.3.1 线性最小二乘回归 采用线性最小二乘回归方法对植被指数和气候因子进行一元线

性回归处理,计算逐个像元观测值随时间序列变化趋势,得到趋势线的斜率(*Slope*),其值大于0表示趋势增加,小于0表示趋势减少,等于0表示趋势不变,计算公式为:

$$Slope = \frac{t \times \sum_{i=1}^t i \times f_i - \sum_{i=1}^t i \sum_{i=1}^t f_i}{t \times \sum_{i=1}^t i^2 - (\sum_{i=1}^t i)^2}, \quad (1)$$

式中:*Slope*表示2001–2020年平均变化率;*t*为时间序列长度,取值为20;*i*取值为1~20,表示2001–2020年;*f_i*表示第*i*年植被指数或气候因子观测值.

1.3.2 变异系数 变异系数(Coefficient of Variation, *CV*)是用来衡量植被指数观测值变异程度的统计量,计算公式为:

$$CV = \sigma / \mu, \quad (2)$$

式中: σ 为观测值标准差; μ 为观测值算术平均值.

1.3.3 Person 相关性系数 采用 Person 相关性系数来表示植被指数和气候因子之间的相关性, 并在 0.05 水平下进行显著性检验, 计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^t (x_i y_i) - \frac{\sum_{i=1}^t x_i \sum_{i=1}^t y_i}{n}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^t (x_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^t x_i)^2}{n})(\sum_{i=1}^t (y_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^t y_i)^2}{n})}} \quad (3)$$

式中: r 为 Person 相关性系数; x 代表气候因子; y 代表植被指数; t 为时间序列长度.

1.3.4 Hurst 指数 赫斯特指数是由英国水文学家赫斯特提出 (Hurst, 1951), 经多人完善发展, 用来评估长时间序列数据变化的持久性, 已广泛应用于水文、气候学和植被等研究领域 (Jiang *et al.*, 2017), 计算公式为 (Qu *et al.*, 2020):

$$H = (\log(R/S) - \log c) / \log(n), \quad (4)$$

式中: H 为赫斯特指数; c 为常数; n 为观察值的个数. H 值范围从 0 到 1, 分为三种类型. 当 $H=0.5$ 时, 则该序列为标准的随机游走序列, 即过去的增量和未来的增量没有关系. 当 $0 \leq H < 0.5$ 时, 则该序列不是随机游走, 是一种反相关性的时间序列, 即过去的增量和未来的增量是负相关, 当 H 值越接近 0, 这种反相关性表现得越明显. 当 $0.5 < H \leq 1$, 则该序列不是随机游走, 是一种正相关的时间序列, 即过去的增量和未来的增量是正相关, 当 H 值越接近 1, 这种正相关性表现得越明显.

1.3.5 驱动因子对植被变化的贡献 为进行 2001—2020 年塔里木河流域植被时空变化及驱动因子贡献分析, 采用偏导数的方法估算驱动因子对植被指数年际变化的贡献 (Zhang *et al.*, 2016; Qu *et al.*, 2020). 影响植被变化的因素可分为气候因子 (气温、降水、辐射) 和其他因素 (包括但不限于开垦农田、植树造林、城镇化等人类活动, CO_2 排放, 及其他潜在因素) 两部分 (Zhang *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021). 气候因子和其他因素的贡献计算公式为:

$$\frac{dV}{dt} = \epsilon_1 \frac{dT}{dt} + \epsilon_2 \frac{dP}{dt} + \epsilon_3 \frac{dR}{dt} + OF = T^* + P^* + R^* + OF, \quad (5)$$

式中: T^* 、 P^* 、 R^* 分别代表气温、降水、辐射对植被指数变化率的贡献; dV/dt 为植被指数在时间变量 t 上

的年变化率, 由公式 (1) 计算; dT/dt 、 dP/dt 、 dR/dt 可视为气温、降水、辐射在像元尺度上对时间 t 的线性回归的斜率; 系数 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 可以用 $\epsilon_1 = \partial V / \partial T$ 、 $\epsilon_2 = \partial V / \partial P$ 、 $\epsilon_3 = \partial V / \partial R$ 估算, 即植被指数与气温、降水、辐射线性回归的斜率; OF 是植被指数变化与气候因子贡献之间的残差, 即其他因素对植被变化的贡献.

2 结果分析

2.1 植被格局和动态特征

2.1.1 植被指数的空间格局 2001—2020 年塔里木河流域植被长势和生产力水平较低, 且空间差异显著. 平均 NDVI、EVI 和 NPP 分别为 0.272、0.182、62.196 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 均呈现北高南低、西高东低的空间分布特征 (图 2a、图 2b、图 2c). 高值区域主要分布在北部开都—孔雀河源流区、阿克苏河、渭干河、喀什噶尔河及叶尔羌河沿岸; 而东部的开都—孔雀河东南部、车尔臣河东北部, 南部高山区 3 种指数均接近于 0.

为表征塔里木河流域植被波动变化特征, 计算了 2001—2020 年像元尺度植被指数变异系数 (CV), 空间特征见图 2d、图 2e、图 2f, 分类及统计结果见表 2. 塔里木河流域植被波动表现出一定的空间聚集性, 且与海拔关系密切. 其中 NDVI 和 EVI 变异系数空间分布特征基本一致, 表现出北部变异强度高于南部的空间特征. 中度及以上变异区域分别占流域总面积的 10.4%、7.4%, 主要分布在开都—孔雀河上游的高寒草场、渭干河、塔里木河干流、阿克苏河中下游、喀什噶尔河及叶尔羌河, 且在南部植被较低地区, NDVI 的变异敏感性高于 EVI. NPP 中度及以上变异分布在塔里木河干流中下游、阿克苏河、叶尔羌河和和田河交汇区域占总面积的 1.6%; 此外, 波动较大区域还出现在北部天山及南部昆仑山. 植被指数及其变异系数随海拔的变化规律如图 2g、图 2h、图 2i 所示. 3 种植被指数均随海拔升高呈波动变化趋势, 即在 1 000~1 500 m、2 500~3 500 m 出现峰值, 但其最大值出现的海拔范围则存在差异, NDVI 和 EVI 最大值出现在海拔 1 000~1 500 m 之间, 而 NPP 最大值出现在海拔 2 500~3 500 m 之间. 植被在 3 000~3 500 m 内稳定性最高, 当海拔超过 3 500 m 时, 植被指数呈急剧下降趋势. 变异系数随海拔的增加出现先降低后升高的趋势, NPP 变化在 700~2 000 m 之间较 NDVI 和 EVI 更剧烈.

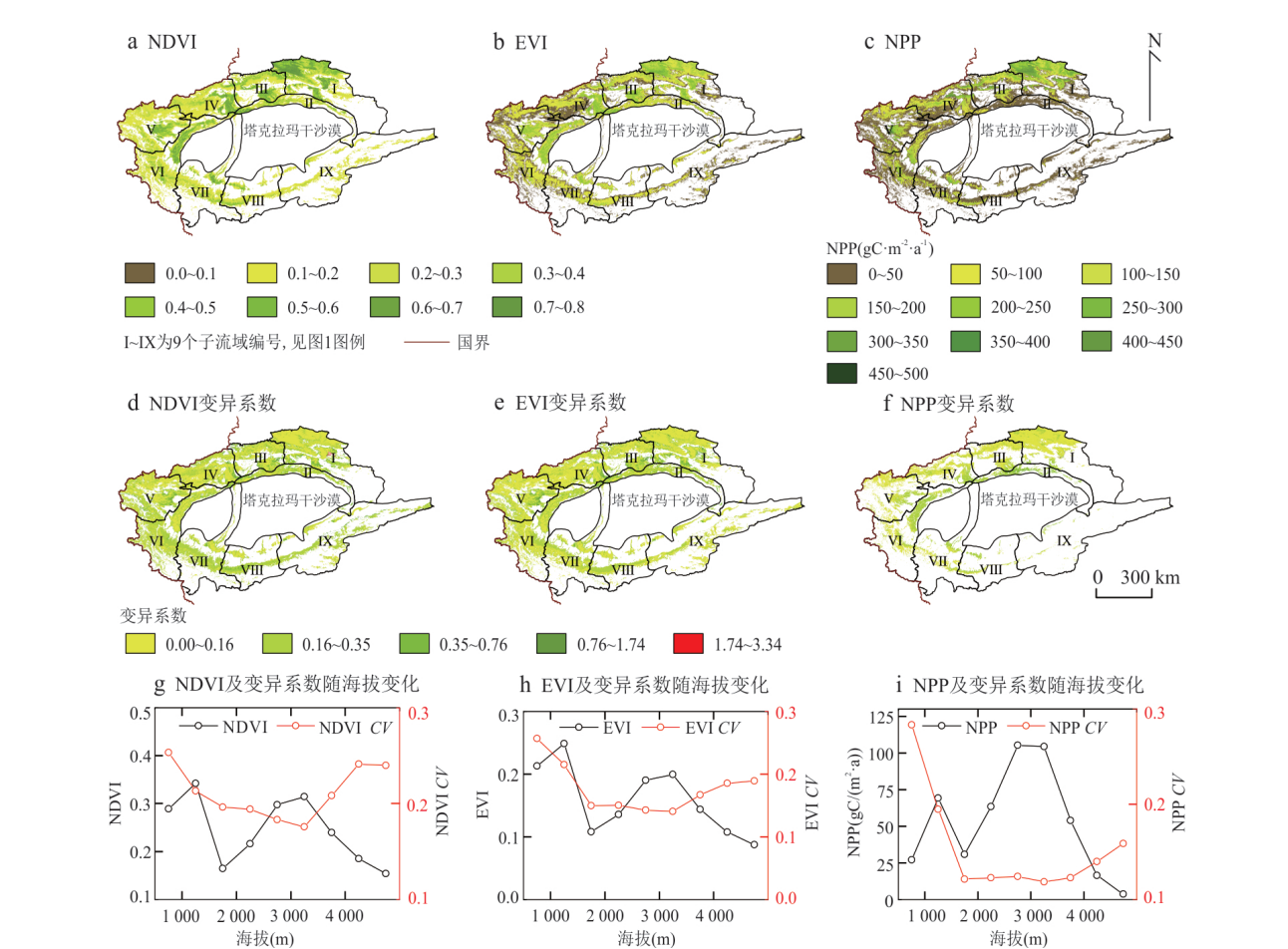


图 2 2001–2020 年塔里木河流域植被指数和变异系数空间格局及随海拔的变化特征

Fig.2 Spatial pattern of vegetation index and coefficient of variation and its variation characteristics with altitude in Tarim River Basin from 2001 to 2020

表 2 塔里木河流域 NDVI、EVI、NPP 变异系数面积比例(%)				
Table 2 NDVI, EVI, NPP coefficient of variation area ratio in Tarim River Basin (%)				
变异系数	波动程度	NDVI	EVI	NPP
0.00<CV<0.16	低波动	46.2	58.0	83.2
0.16<CV<0.35	相对较低波动	43.5	34.6	15.2
0.35<CV<0.76	中度波动	8.9	6.5	1.4
0.76<CV<1.74	相对较高波动	1.3	0.9	0.2
CV>1.74	高波动	0.1	0	0

2.1.2 植被指数的动态特征 2001–2020 年塔里木河流域植被长势和生产力有明显改善,NDVI、EVI、NPP 年际变化均呈波动增加趋势,增长率分别为 0.036 4/10a、0.023 8/10a、12.606 1 gC/(m²·10a)(为准确反映 NPP 特征,下文统计仅包含 NPP 有值区),但在 2006–2009 年及 2014–2015 年有所下降(图 3g、图 3h、图 3i)。此外,NDVI、EVI、NPP 呈上升趋势区域分别占总面积的 88.6%、86.7%、96.63%(图 3a、图 3b、图 3c)。其中具有显著增加趋势区域($S>0, p<0.05$)分别占总流域面积的 46.6%、43.7%、41.58%,主要分布在研究区西北部各河流两岸、天山南麓和昆仑山北麓地带;NDVI、EVI、NPP 呈显著下降区域分别仅占总面积的 1.6%、1.9%、1.39%,其中 NPP 呈明显下降区域主要集中在渭干河下游及塔里木河干流中游附近,NDVI、EVI 呈显著下降区域主要环塔克拉玛干沙漠边缘分布(图 3d、图 3e、图 3f)。

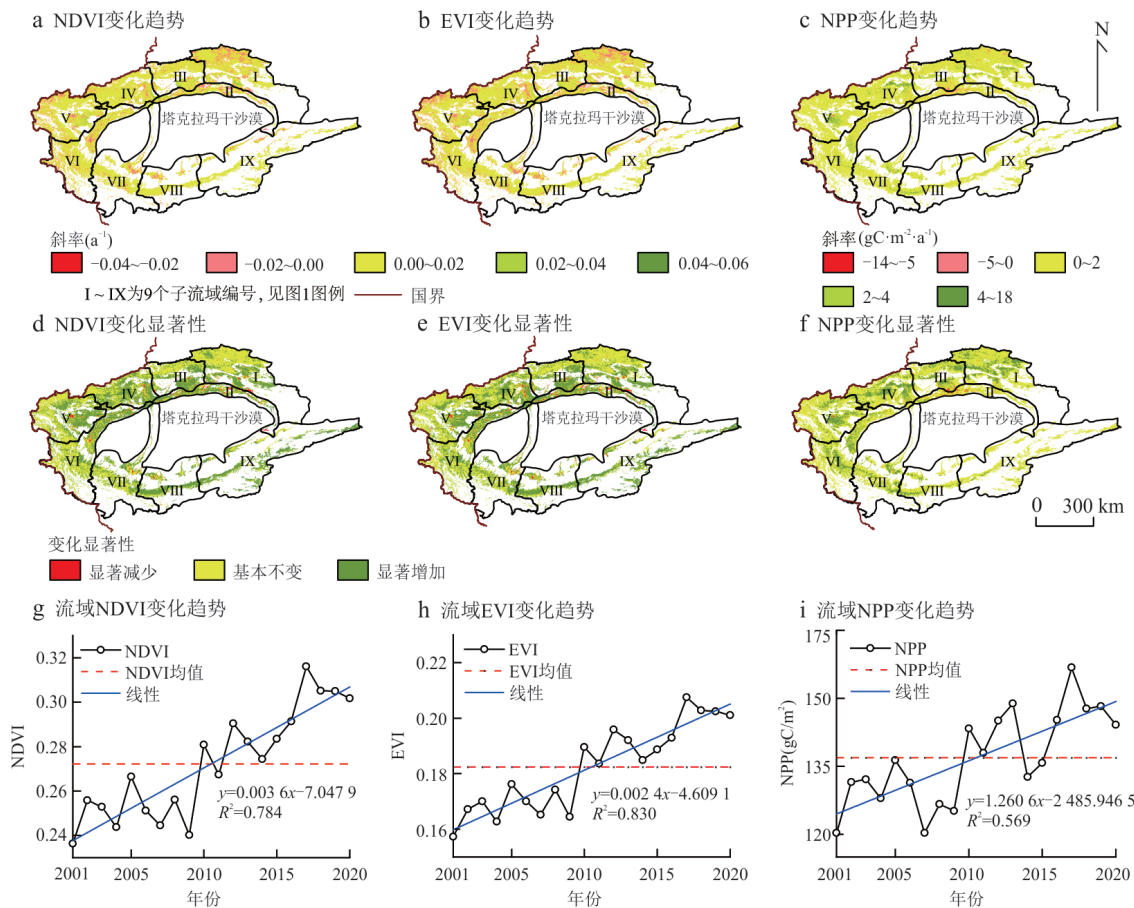


图3 2001–2020年塔里木河流域NDVI、EVI、NPP变化趋势

Fig.3 NDVI, EVI and NPP trends in the Tarim River Basin from 2001 to 2020

表3 NDVI、EVI、NPP可持续性变化分类

Table 3 NDVI, EVI, NPP sustainability change classification

Hurst	斜率	<i>P</i>	变化类型	NDVI(%)	EVI(%)	NPP(%)
$H>0.5$	$S<0$	$P\leq 0.05$	持续显著减少	0.8	1.0	1.1
$H>0.5$	$S<0$	$P>0.05$	持续不显著减少	1.9	3.9	1.0
$H>0.5$	$S>0$	$P\leq 0.05$	持续显著增加	19.1	17.0	5.8
$H>0.5$	$S>0$	$P>0.05$	持续不显著增加	12.3	3.4	7.7
$H=0.5$	—	—	随机游走分布	0.3	10.0	54.1
$H<0.5$	$S<0$	$P\leq 0.05$	反持续显著减少	0.8	0.9	1.3
$H<0.5$	$S<0$	$P>0.05$	反持续不显著减少	6.3	7.4	1.7
$H<0.5$	$S>0$	$P\leq 0.05$	反持续显著增加	28.9	26.7	10.5
$H<0.5$	$S>0$	$P>0.05$	反持续不显著增加	29.6	29.7	16.8

2.2 植被变化趋势一致性分析

基于Hurst指数,将植被指数趋势分析结果叠加其上,得到持续性波动与变化趋势的叠加信息,结果分为9种,如图4所示,统计结果见表3.塔里木河流域植被变化主要呈反持续趋势,且不确定性问题较大.NDVI、EVI和NPP变化持续面积分别占总面积的34.1%、25.2%和15.5%,其中退化面积

分别占2.7%、4.9%和2.1%.持续退化区域分布在环塔克拉玛干沙漠边缘区,特别是塔里木河干流的中下游,结合图3f和图4f发现,该区域植被波动大、呈持续减少趋势,这可能与上游开垦农田致使下游可利用水资源减少,从而导致土地利用类型转变有关(Chen *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2022).对于NDVI和EVI而言,反持续增加是主要变化形式,分

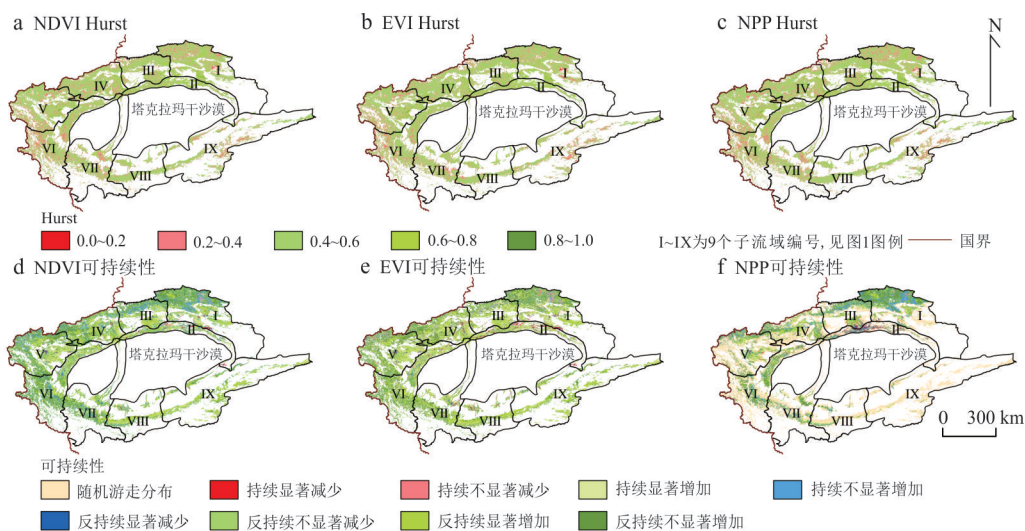


图4 塔里木河流域NDVI、EVI、NPP的Hurst指数及可持续性的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of NDVI, EVI, NPP Hurst index and sustainability in Tarim River Basin

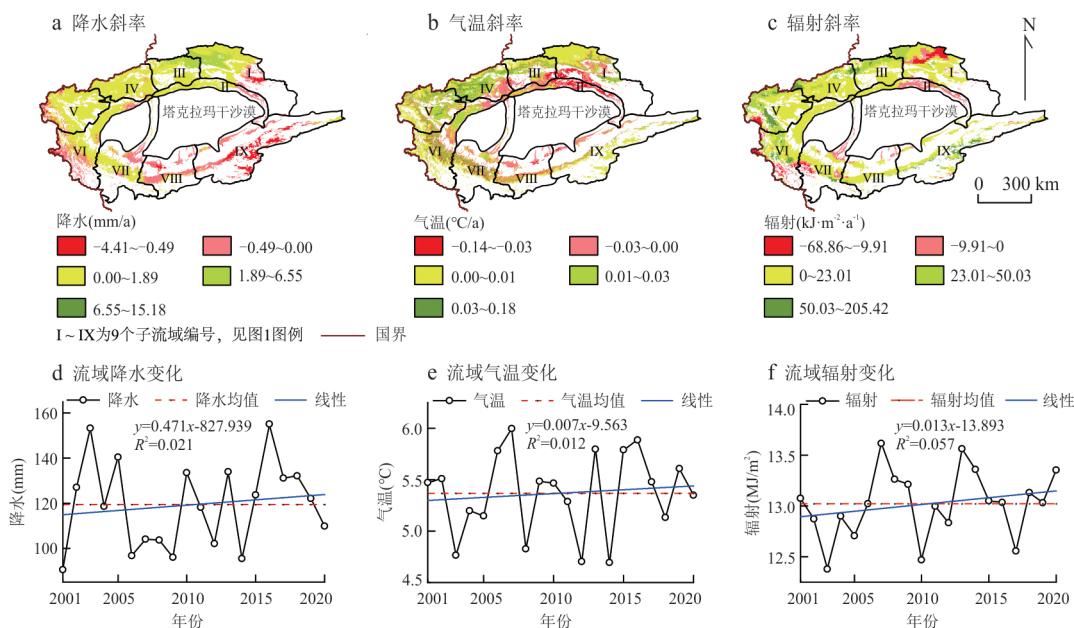


图5 2001–2020年塔里木河流域气候变化特征

Fig.5 Characteristics of climate change in Tarim River Basin from 2001 to 2020

别占总面积的 58.5% 和 56.4%。而 NPP 则有研究区面积的 54.2% 呈基本稳定或随机游走分布,这与研究区土地利用类型主要为荒地有关。此外,由于 Hurst 指数接近于 0.5,且 NDVI、EVI 和 NPP 变化的 Hurst 指数在 0.4~0.6 范围的面积占比分别为 65.4%、66.4%、65.4%,这说明研究区大部分区域植被存在持续变化的不确定性问题。

2.3 气候因子对植被指数年际变化的贡献

2.3.1 气候变化趋势及其对植被指数的影响

2001–2020 年间塔里木河流域降水、气温和辐射

强度变化速率为 4.71 mm/10a、0.07 °C/10a、0.13 kJ/(m²·10a),均不显著,如图 5d、图 5e、图 5f 所示。降水变化空间特征为北部、西北部增加而东部和东南部减少。高海拔区域气温基本不变,气温升高区域主要集中在 1 000~2 000 m 附近,气温降低区域则主要集中在海拔低于 1 000 m 的塔里木河干流中下游及其附近。流域绝大部分区域辐射强度增加,降低区域则分布在北部高寒草场、塔里木河干流中下游以及研究区西部(图 5a、图 5b、图 5c)。降水、气温和辐射强度呈上升趋势区域分别占

总面积的 74.78%、70.30%、86.73%，这与前人研究结果基本一致 (Su *et al.*, 2017; 李哲等, 2020)。

为探究气候变化对植被的影响,对植被指数和气候因子进行相关性分析,发现气候因子对 NDVI、EVI、NPP 的相关性表现出一定的规律性,但也存在空间和强度上的异质性(图 6a~图 6i)。气候因子对 NDVI、EVI 的影响在空间特征上基本一致,但作用强度方面仍有区别。降水对 NDVI、EVI 的作用在空间上表现为西正东负,气温则表现为西负东正的空间格局,辐射对 NDVI、EVI 的作用则表现为四周负而中部正的空间格局。降水对 NPP 的作用则表现为北高南低,气温对北部高寒草场有明显的促进作用,辐射对 NPP 的抑制作用主要分布在北部高寒草场、西部天山山脉、叶尔羌河中游地区,以及和田河、克里雅河靠近沙漠区域。

在流域尺度上降水与 NDVI、EVI、NPP 的相

关系系数分别为 0.199、0.194、0.256;气温与 NDVI、EVI、NPP 的相关系数分别为 -0.002、-0.019、0.018;辐射与 NDVI、EVI、NPP 的相关系数分别为 -0.131、-0.115、-0.114,即流域尺度上降水促进了植被生长,气温对植被影响不明显,而辐射抑制了植被生长,但降水对 NPP 的作用强度明显高于对 NDVI、EVI 的作用(图 6j、图 6k、图 6l)。

2.3.2 气候因子对植被指数年际变化的贡献 相关系数描述了植被指数与气候变量之间可能存在的关系,但未能量化各气候因子对植被指数年际变化的贡献 (Zhang *et al.*, 2016),因此,利用偏导数方法研究气候驱动因子对植被指数年际变化趋势的贡献,即平均每年贡献值,如图 7 所示。流域尺度上,降水对 NDVI、EVI、NPP 变化的贡献分别为 0.002 2/10a、0.001 4/10a、1.697 3 gC/(m²·10a);气温对 NDVI、EVI、NPP 变化的贡献分别为

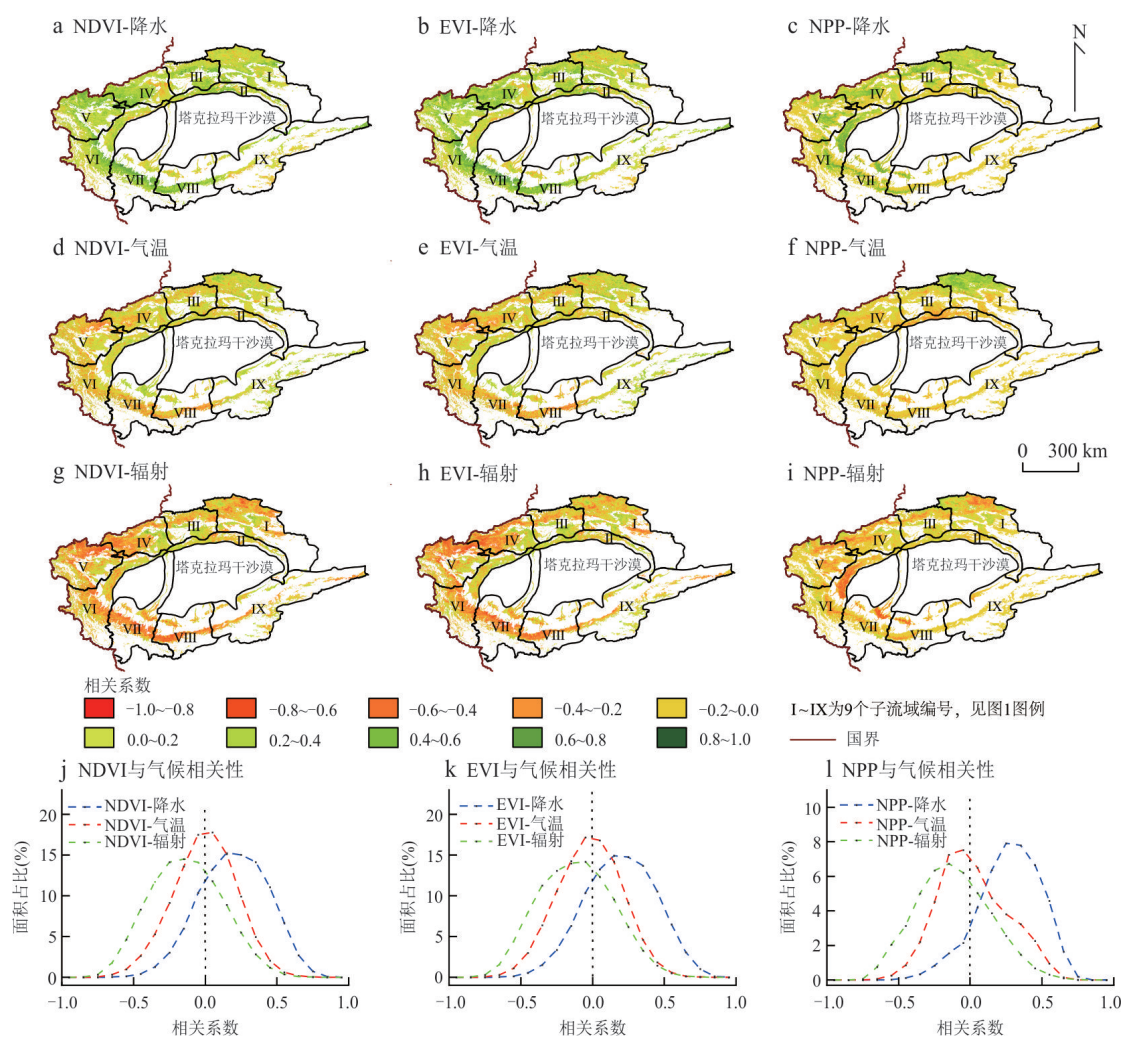


图 6 2001–2020 年塔里木河流域 NDVI、EVI、NPP 与气候因子相关系数分布

Fig.6 Correlation coefficient distribution of NDVI, EVI, NPP and climatic factors in Tarim River Basin from 2001 to 2020

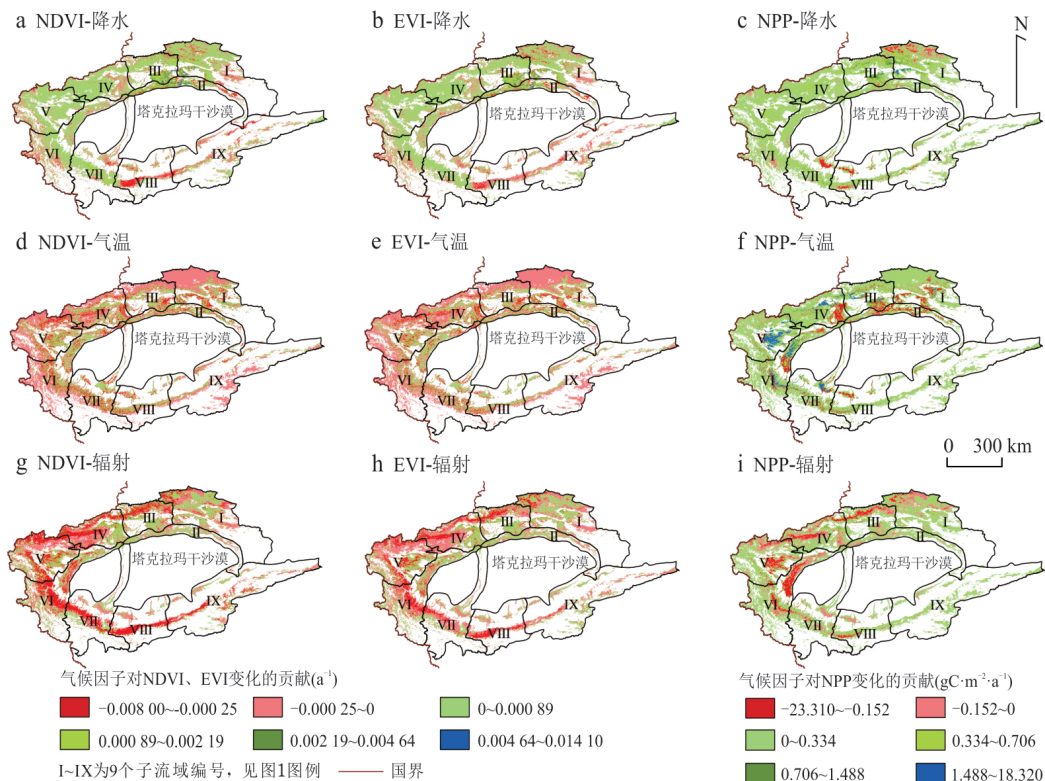


图7 气候因子对塔里木河流域NDVI、EVI、NPP变化的贡献

Fig.7 Contribution of climatic factors to NDVI, EVI and NPP changes in the Tarim River Basin

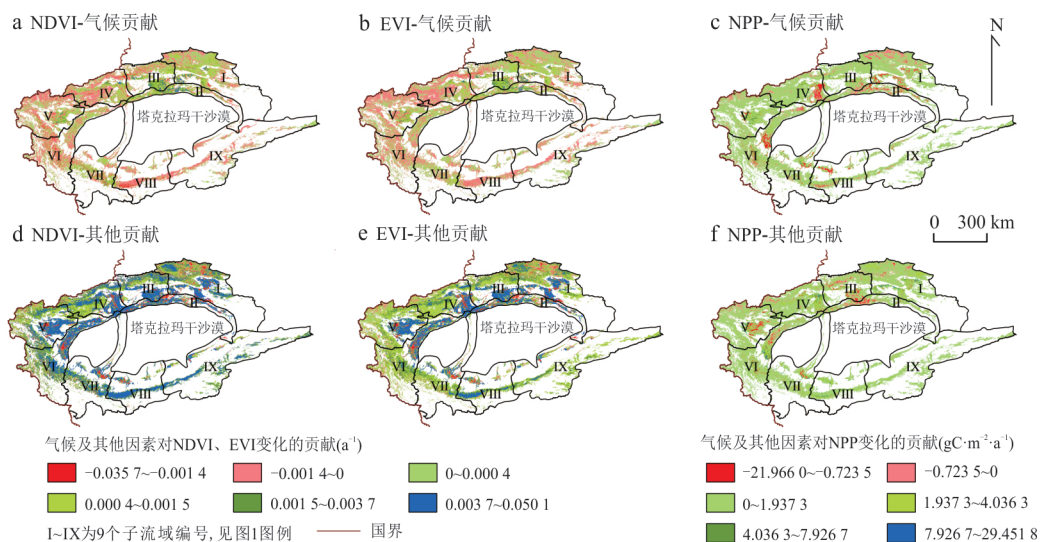


图8 气候因子和其他因素对塔里木河流域植被变化的贡献

Fig.8 Contribution of climatic factors and other factors to vegetation change in Tarim River Basin

$-0.000\ 1/10\text{a}$ 、 $-0.000\ 1/10\text{a}$ 、 $0.662\ 6\ \text{gC}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$ ；辐射对NDVI、EVI、NPP变化的贡献分别为 $-0.000\ 6/10\text{a}$ 、 $-0.000\ 2/10\text{a}$ 、 $-0.340\ 2\ \text{gC}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$ 。总的来说,降水对3种指数呈现积极作用且强度最大,对NDVI、EVI有积极作用区域主要分布在研究区中西部,而在除北部高寒草场、和田河部

分区域外的大部分地区降水主要对NPP有积极作用。气温对NDVI、EVI在研究区四周主要呈消极作用,在中部有积极作用,而对NPP作用的空间分布则大致相反。辐射对3种指数呈消极作用。

基于气温、降水和辐射对植被变化的贡献和公式(5),得到气候因子和其他因素对NDVI、

EVI、NPP 年际变化的贡献的空间分布,如图 8 所示. 2001—2020 年 NDVI、EVI、NPP 变化率分别为 $0.036\ 4/10a$ 、 $0.023\ 8/10a$ 、 $12.606\ 1\ gC/(m^2\cdot 10a)$,其中气候因子贡献分别为 $0.001\ 6/10a$ 、 $0.001\ 0/10a$ 、 $2.801\ 9\ gC/(m^2\cdot 10a)$,其他因素贡献分别为 $0.034\ 8/10a$ 、 $0.022\ 8/10a$ 、 $9.804\ 2\ gC/(m^2\cdot 10a)$.由此可得,对于 NDVI、EVI 和 NPP 而言,气候变化对塔里木河流域植被最优长势变化的解释力有限,贡献率分别仅占 4.4%、4.2%;但对植被生产力变化有较高解释力,贡献率为 22.2%.

在植被长势方面,气候变化对北部高寒草场、开都河、渭干河流域和塔里木河干流中游三者交汇处以及研究区西南地区昆仑山北麓草地产生显著积极影响.在描述研究区西南部草地受气候变化影响的过程中,NDVI 相较于 EVI 表现出更为敏感的特点;而在研究区北部高植被覆盖区,EVI 对气候变化的响应相较于 NDVI 更为敏感(图 8a、图 8b).在植被生产力方面,气候变化对北部边缘的高寒草场、塔里木河干流中下游、阿克苏河东南部及叶尔羌河等地区植被生产力有消极影响(图 8c).其他因素主导流域植被变化,其对开都河中上游、塔里木河干流中下游、渭干河下游、阿克苏河下游、喀什噶尔河流域、叶尔羌河、研究区南部的昆仑山北侧地区植被长势产生显著积极影响(图 8d、图 8e);而对塔里木河干流中游以及喀什噶尔河流域、叶尔羌河中游地区植被生产力有消极影响(图 8f).

综上所述,塔里木河流域降水对植被变化有积极影响,且作用大于气温和辐射.气候变化对植被长势和生产力的影响存在强度和空间的差异.

3 讨论

3.1 植被变化及对驱动因子的响应

NDVI、EVI、NPP 的空间格局基本一致,高值分布在北部高寒草场和各绿洲,中低值则分布在中海拔山区和绿洲边缘.这是因为降水、冰雪融水及相对适宜气温和辐射条件为北部高寒草场及中海拔山区植被生长提供了保障,人类活动对水资源的分配则决定了绿洲植被格局(邓铭江和石泉, 2014; Jiang *et al.*, 2022).流域尺度上,植被增加趋势显著,且在气候驱动因素中,降水对植被变化的影响最大,这表明在干旱的塔里木河流域,水是植被生长的关键限制因素,这与以往的研究结果一致(Liu *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2020).降水的增加及

气温升高所引起的冰雪融水增加可能是塔里木河流域植被改善的重要驱动因素(Jiang *et al.*, 2022; Yue *et al.*, 2024).此外,虽然有研究表明中海拔山区的植被改善可能与降水和温度增加有关,但天山中段开都河流域高寒草场的退化与过度放牧和局部干旱有关(Bai *et al.*, 2021).其他因素在绿洲区及其周边驱动强度较高,这与塔里木河流域人口增长、经济发展和产业政策等人类活动所引起的土地利用变化关系密切(Wang *et al.*, 2021).

3.2 局限性和不确定性

很多指标可以用来表征植被状态,但是不同指标或相同指标的不同处理方式反映植被状态的角度并不相同(Piao *et al.*, 2011; Qu *et al.*, 2020; 王春雅等, 2021; 何旭洋等, 2022).选取多个指标有利于全面反映植被生长状态,但考虑到植被的结转效应及对气候变化响应的异质性等因素(Nemani *et al.*, 2003; Lian *et al.*, 2021),与之匹配的气候数据选择和处理方法有必要进一步讨论.氮沉积、CO₂施肥、极端气候等因素对植被变化的定量评估(Nemani *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021),多种因素对植被动态的耦合效应将是下一步研究目标.考虑到数据本身的不确定性及驱动估算模型的局限性,本研究所得结论存在一定偏差,但仍基于 3 个植被指标,从植被最优长势、植被生产力两个方面评价了气候因子的定量贡献,这对深入了解塔里木河流域植被动态和气候驱动机制有一定意义.

4 结论

本文利用 MODIS 卫星遥感数据、再分析气候数据,基于线性回归、变异系数、Hurst 指数和偏导数处理,分析了 2001—2020 年塔里木河流域植被指数 NDVI、EVI、NPP 变化的空间格局及气候对植被动态的相对贡献.主要结论有:在流域尺度上,NDVI、EVI、NPP 均呈波动上升趋势,增长率分别为 $0.036\ 4/10a$ 、 $0.023\ 8/10a$ 、 $12.606\ 1\ gC/(m^2\cdot 10a)$.研究区大部分区域植被指数存在持续变化的不确定性问题.流域尺度上,气候因素对 NDVI、EVI、NPP 的贡献分别为 $0.001\ 6/10a$ 、 $0.001\ 0/10a$ 、 $2.801\ 9\ gC/(m^2\cdot 10a)$,降水对植被变化有积极影响且强度大于气温和辐射.相较于植被最优长势,气候变化对植被生产力的解释力更高.

References

- Bai, J., Li, J. L., Bao, A. M., et al., 2021. Spatial-Temporal Variations of Ecological Vulnerability in the Tarim River Basin, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 13(8): 814—834. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0079-0>
- Chen, F. H., Xie, T. T., Yang, Y. J., et al., 2023. Discussion of the “Warming and Wetting” Trend and Its Future Variation in the Drylands of Northwest China under Global Warming. *Science China Earth Sciences*, 66(6): 1241—1257. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1098-x>
- Chen, S. Y., Zhang, Y. L., Wu, Q. L., et al., 2021. Vegetation Structural Change and CO₂ Fertilization More than Offset Gross Primary Production Decline Caused by Reduced Solar Radiation in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 296: 108207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108207>
- Chen, X. X., Wang, L. C., Niu, Z. G., et al., 2020. The Effects of Projected Climate Change and Extreme Climate on Maize and Rice in the Yangtze River Basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282: 107867. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107867>
- Chen, Y. N., Chen, Y. P., Xu, C. C., et al., 2010. Effects of Ecological Water Conveyance on Groundwater Dynamics and Riparian Vegetation in the Lower Reaches of Tarim River, China. *Hydrological Processes*, 24(2): 170—177. <https://doi.org/10.1002/hyp.7429>
- Chen, Y. N., Pang, Z. H., Hao, X. M., et al., 2008. Periodic Changes of Stream Flow in the last 40 Years in Tarim River Basin, Xinjiang, China. *Hydrological Processes*, 22(21): 4214—4221. <https://doi.org/10.1002/hyp.7024>
- Chu, H. S., Venevsky, S., Wu, C., et al., 2019. NDVI-Based Vegetation Dynamics and Its Response to Climate Changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650: 2051—2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>
- Deng, G., 2021. Temporal and Spatial Dynamics of Snow Cover and Its Influencing Factors in High Mountain Areas of Asia (Dissertation). Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Deng, M. J., Shi, Q., 2014. Management and Regulation Pattern of Water Resource in Inland Arid Regions. *Advances in Earth Science*, 29(9): 1046—1054 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H. W., Xu, H. L., Ling, H. B., 2017. Study of Ecological Water Transfer Mode and Ecological Compensation Scheme of the Tarim River Basin in Dry Years. *Journal of Natural Resources*, 32(10): 1705—1717 (in Chinese with English abstract).
- He, B., Chen, A. F., Wang, H. L., et al., 2015. Dynamic Response of Satellite-Derived Vegetation Growth to Climate Change in the Three North Shelter Forest Region in China. *Remote Sensing*, 7(8): 9998—10016. <https://doi.org/10.3390/rs70809998>
- He, X. Y., Zhang, F. P., Li, L., et al., 2022. Quantitative Analysis of the Impact of Climate Changes and Human Activities on the NPP of Vegetation in the Inland River Basins of Northwest China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(5): 650—660 (in Chinese with English abstract).
- Hurst, H. E., 1951. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116(1): 770—799. <https://doi.org/10.1061/taceat.0006518>
- Jeong, S. J., Ho, C. H., Gim, H. J., et al., 2011. Phenology Shifts at Start vs. End of Growing Season in Temperate Vegetation over the Northern Hemisphere for the Period 1982—2008. *Global Change Biology*, 17(7): 2385—2399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x>
- Jiang, L. L., Guli•Jiapaer, Bao, A. M., et al., 2017. Vegetation Dynamics and Responses to Climate Change and Human Activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 599: 967—980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.012>
- Jiang, N., Zhang, Q. Q., Zhang, S. C., et al., 2022. Spatial and Temporal Evolutions of Vegetation Coverage in the Tarim River Basin and Their Responses to Phenology. *Catena*, 217: 106489. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106489>
- Li, Z., Ding, Y. J., Chen, A. J., et al., 2020. Hiatus Phenomenon and Its Characteristics in Climate Change in Northwest China from 1960 to 2019. *Acta Geographica Sinica*, 75(9): 1845—1859 (in Chinese with English abstract).
- Lian, X., Piao, S. L., Chen, A. P., et al., 2021. Seasonal Biological Carryover Dominates Northern Vegetation Growth. *Nature Communications*, 12: 983. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21223-2>
- Liu, C., Liu, B., Zhao, W. Z., et al., 2020. Temporal and Spatial Variability of Water Use Efficiency of Vegetation and Its Response to Precipitation and Temperature in Heihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 40(3): 1—

12. <https://doi.org/10.5846/stxb201810282323>
- Liu, Q., Liu, Y., Niu, J., et al., 2022. Prediction of the Irrigation Area Carrying Capacity in the Tarim River Basin under Climate Change. *Agriculture*, 12(5): 657. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050657>
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., et al., 2003. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625): 1560—1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
- Newbold, T., Hudson, L. N., Hill, S. L. L., et al., 2015. Global Effects of Land Use on Local Terrestrial Biodiversity. *Nature*, 520(7545): 45—50. <https://doi.org/10.1038/nature14324>
- Pan, T., Zou, X. T., Liu, Y. J., et al., 2017. Contributions of Climatic and Non-Climatic Drivers to Grassland Variations on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 108: 307—317. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.039>
- Piao, S. L., Wang, X. H., Ciais, P., et al., 2011. Changes in Satellite-Derived Vegetation Growth Trend in Temperate and Boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 17(10): 3228—3239. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x>
- Qu, S., Wang, L. C., Lin, A. W., et al., 2020. Distinguishing the Impacts of Climate Change and Anthropogenic Factors on Vegetation Dynamics in the Yangtze River Basin, China. *Ecological Indicators*, 108: 105724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105724>
- Su, B. D., Jian, D. N., Li, X. C., et al., 2017. Projection of Actual Evapotranspiration Using the COSMO-CLM Regional Climate Model under Global Warming Scenarios of 1.5 °C and 2.0 °C in the Tarim River Basin, China. *Atmospheric Research*, 196: 119—128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.015>
- Tian, H. J., Cao, C. X., Chen, W., et al., 2015. Response of Vegetation Activity Dynamic to Climatic Change and Ecological Restoration Programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012. *Ecological Engineering*, 82: 276—289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.098>
- Tong, X. W., Wang, K. L., Yue, Y. M., et al., 2017. Quantifying the Effectiveness of Ecological Restoration Projects on Long-Term Vegetation Dynamics in the Karst Regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54: 105—113. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.013>
- Wang, C. Y., Wang, J. N., Cui, X., et al., 2021. Spatio-Temporal Change in Vegetation Patterns and Its Climatic Drivers in the Core Region of Three Parallel Rivers in Southeast Tibet. *Geographical Research*, 40(11): 3191—3207 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Xia, T. T., Shataer, R., et al., 2021. Analysis of Characteristics and Driving Factors of Land - Use Changes in the Tarim River Basin from 1990 to 2018. *Sustainability*, 13(18): 10263. <https://doi.org/10.3390/su131810263>
- Wei, H., Li, J. G., Tan, H. C., 2023. Channel Morphological Evolution in Confluence Area of Hotan River in Tarim Basin. *Earth Science*, 48(1):359—374 (in Chinese with English abstract).
- Yue, S. R., Wang, L. C., Cao, Q., et al., 2024. Vegetation Dynamics and Potential Factors Driving Mechanisms in the Tarim River Basin. *Earth Science*, 49(9):3399—3410 (in Chinese with English abstract).
- Yue, Y. M., Wang, L., Zhang, X. B., et al., 2024. Towards Achieving Carbon Neutrality: The Role of Vegetation Restoration in Karst Regions of Southwest China. *Journal of Earth Science*, 35(3): 1044—1048. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-2010-z>
- Zhang, H., Xue, L. Q., Wei, G. H., et al., 2020. Assessing Vegetation Dynamics and Landscape Ecological Risk on the Mainstream of Tarim River, China. *Water*, 12(8): 2156. <https://doi.org/10.3390/w12082156>
- Zhang, Y. L., Song, C. H., Zhang, K. R., et al., 2014. Spatial-Temporal Variability of Terrestrial Vegetation Productivity in the Yangtze River Basin during 2000—2009. *Journal of Plant Ecology*, 7(1): 10—23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt025>
- Zhang, Y., Zhang, C. B., Wang, Z. Q., et al., 2016. Vegetation Dynamics and Its Driving Forces from Climate Change and Human Activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *Science of the Total Environment*, 563: 210—220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.223>
- Zhao, J., Du, Z. Q., Wu, Z. T., et al., 2018. Seasonal Variations of Day- and Nighttime Warming and Their Effects on Vegetation Dynamics in China's Temperate Zone. *Acta Geographica Sinica*, 73(3): 395—404 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R. F., Chen, Y. N., Shi, P. J., et al., 2013. Land Use and Land Cover Change and Driving Mechanism in the Arid Inland River Basin: A Case Study of Tarim River, Xinjiang, China. *Environmental Earth Sciences*, 68(2): 591—604. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1763-3>
- Zhou, Z. Q., Ding, Y. B., Shi, H. Y., et al., 2020. Analysis

and Prediction of Vegetation Dynamic Changes in China: Past, Present and Future. *Ecological Indicators*, 117: 106642. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106642>

Zhu, L. J., Meng, J. J., Zhu, L. K., 2020. Applying Geodetector to Disentangle the Contributions of Natural and Anthropogenic Factors to NDVI Variations in the Middle Reaches of the Heihe River Basin. *Ecological Indicators*, 117: 106545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106545>

中文参考文献

邓刚, 2021. 亚洲高山区积雪时空动态及其影响因素研究 (硕士学位论文). 湘潭: 湖南科技大学, 24—27.

邓铭江, 石泉, 2014. 内陆干旱区水资源管理调控模式. *地球科学进展*, 29(9): 1046—1054.

郭宏伟, 徐海量, 凌红波, 2017. 塔里木河流域枯水年生态调水方式及生态补偿研究. *自然资源学报*, 32(10):

1705—1717.

何旭洋, 张福平, 李玲, 等, 2022. 气候变化与人类活动对中国西北内陆河流域植被净初级生产力影响的定量分析. *兰州大学学报(自然科学版)*, 58(5): 650—660.

李哲, 丁永建, 陈艾姣, 等, 2020. 1960—2019 年西北地区气候变化中的 Hiatus 现象及特征. *地理学报*, 75(9): 1845—1859.

王春雅, 王金牛, 崔霞, 等, 2021. 藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析. *地理研究*, 40(11): 3191—3207.

魏豪, 李嘉光, 谭虎成, 2023. 塔里木盆地和田河流域的平面形态演变. *地球科学*, 48(1): 359—374.

岳胜如, 王伦澈, 曹茜, 等, 2024. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制. *地球科学*, 49(9): 3399—3410.

赵杰, 杜自强, 武志涛, 等, 2018. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响. *地理学报*, 73(3): 395—404.