

2001—2020 年黄河流域水分利用效率 时空变化及其对环境因素的响应

陈凌伟

(唐山师范学院 资源管理系, 河北 唐山 063000)

摘要: [目的] 分析黄河流域生态系统水分利用效率(water utilization efficiency, WUE)的变化情况及其对不同环境因子的敏感度,为认识植被恢复、干旱及气候条和水资源之间的关系,预测未来陆地表面—大气相互作用和陆地生态系统的动态变化提供理论依据。[方法] 基于 MODIS GPP 和 ET 数据计算了黄河流域 2001—2020 年 WUE,并结合 Theil-Sen 趋势法 + Mann-Kendall 检验法、Hurst 指数法、偏相关分析法、结构方程模型和线性回归残差分析法探究了不同土地利用覆盖区域 WUE 时空动态、未来可能的持续状态以及其对温度植被干旱指数(TVDI)、太阳辐射(RS)和风速(WIN)的响应情况。[结果] ①黄河流域 WUE 空间分布上呈现出从上游—中游—下游逐渐增加。时间变化上总体以下降趋势为主,且未来一段时期内 WUE 仍以减弱趋势为主。②上游 WUE 与 WIN, TVDI 和 RS 为正相关性,RS 主要通过影响 TVDI 和 WIN 来影响 WUE;中游 TVDI, WIN 对 WUE 负影响较大,RS 对 WUE 的影响不显著;下游 WUE 主要受到 WIN 的负影响和 RS 的正影响,TVDI 对 WUE 的影响不显著。③草地和未利用地区域的 WUE 与 RS 呈正相关性,与 TVDI 和 WIN 呈负相关性。其他区域 WUE 与 RS, TVDI 为正相关性。④黄河流域上游 WUE 变化主要受到 TVDI 和 WIN 的负贡献;中游主要受到 RS, TVDI 和 WIN 的正贡献;下游主受到 TVDI 的正贡献和 RS 和 WIN 的负贡献。[结论] 黄河流域 WUE 未来易受到干旱和气候因素影响,后期研究应在气候因子研究基础上进一步分析月尺度干旱、极端气候等对不同土地利用区 WUE 的影响。

关键词: 水分利用效率(WUE); 温度植被干旱指数(TVDI); 太阳辐射(RS); 贡献度; 黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0222-09

中图分类号: Q948, F205

文献参数: 陈凌伟. 2001—2020 年黄河流域水分利用效率时空变化及其对环境因素的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 222-230. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.028; Chen Lingwei. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River basin during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 222-230.

Spatio-temporal Variation of Water Use Efficiency and Its Responses to Environmental Factors in Yellow River Basin During 2001—2020

Chen Lingwei

(College of Resource Management, Tangshan Normal University, Tangshan, Hebei 063000 China)

Abstract: [Objective] The changes in water use efficiency (WUE) of the Yellow River basin ecosystem and its sensitivity to different environmental factors were analyzed in order to understand the relationship between vegetation restoration, drought, climate conditions, and water resources, thereby providing a theoretical basis for predicting future land surface-atmosphere interactions and dynamic changes of terrestrial ecosystems. [Methods] We calculated WUE in the Yellow River basin and determined the temporal and spatial dynamics of WUE in different land use cover areas by combining the Theil Sen trend method + Mann Kendall test, the Hurst index, partial correlation analysis, a structural equation model, and linear regression residual analysis in the future. We determined the WUE response to temperature vegetation drought index (TVDI), solar radiation (RS), and wind speed (WIN). [Results] ① The spatial distribution of WUE gradually increased from upstream to midstream, and then to downstream. An overall downward trend was dominant. WUE will continue to be dominated by a weakening trend in the future. ② Upstream WUE was positively correlated

收稿日期: 2022-02-07

修回日期: 2022-03-16

资助项目: 河北省社科基金青年项目“京津冀协同发展背景下河北省土地压力测度方法与政策响应研究”(HB18GL067)

第一作者: 陈凌伟(1991—), 女(满族), 河北省唐山市人, 硕士, 讲师, 主要从事地理信息技术应用与土地资源管理研究。Email: CLWlove1991@126.com。

with WIN and TVDI. RS had no obvious effect on WUE. TVDI and WIN in the middle reaches had a great negative impact on WUE, and RS was conducive to the improvement of WUE. Downstream WUE was mainly negatively affected by WIN and positively affected by RS, while TVDI had no significant effect on WUE. ③ WUE in grassland and unused land areas was positively correlated with RS, and negatively correlated with TVDI and WIN. WUE in other areas was positively correlated with RS and TVDI. ④ Changes in WUE in the upstream region of the Yellow River basin were mainly negatively associated with TVDI and WIN. Changes in WUE in the midstream region were mainly positively associated with RS, TVDI, and WIN. Changes in the downstream region were positively associated with TVDI and negatively associated with RS and WIN. [Conclusion] The WUE of the Yellow River basin will be vulnerable to drought and climate factors in the future. Future studies should further analyze the effects of monthly drought and extreme climate on WUE of different land use areas on the basis of climate factors.

Keywords: water use efficiency (WUE); temperature vegetation dryness index (TVDI); solar radiation (RS); contributions; the Yellow River basin

黄河流域作为黄河水系从源头到入海所影响的重要地理生态区域,在国家发展中具有极其重要的战略位置^[1]。但黄河上中下游地理地貌、气候、生态环境差异较大,迥然不同^[2-3]。为减少水土流失,自1999年实施了一系列生态恢复工程(如退耕还林还草)以减少黄河泥沙量^[1,4]。但有研究发现由于前期的植被恢复工程缺乏科学的指导,部分地区的植被恢复不合理规划(如“小树龄”,就是在限水区种植树木而消耗大量土壤和地下水造成的),这会导致土壤水分缺失、径流减少、生物多样性减少和生态系统退化^[4-6]。水分利用效率(water utilization efficiency, WUE)定义为植物光合作用与蒸腾作用的比值,是生态系统功能的一个基本特征,是陆地—大气碳、水和能量交换的中心。在生态系统尺度上,水分利用效率通常定义为年总初级生产力(GPP)与年蒸散发的比值(即 $WUE = GPP/ET$),提供了对土壤植物—大气连续体中碳—水耦合过程的完整理解^[7]。因此,根据WUE的大小和变化可以洞察生态系统对环境变化的响应^[8],有研究也指出WUE提高是黄河流域未来区域可容纳植被阈值提高的关键^[4]。因此,为了黄河流域植被恢复的长期发展,需要一种基于证据的战略认识——自然耦合系统中不同土地利用区域WUE变化情况及对不同环境因子的敏感度,有助于更好了解植被恢复工程下陆地碳—水相互作用的潜在机制,为预测未来陆地表面—大气相互作用和陆地生态系统的动态变化提供理论依据。

生态系统中WUE的变化是由非生物和生物因素共同主导的,特别是气候条件、CO₂施肥和植物功能性状(如生根深度、水力连通性)的变化^[9]。越来越多的研究利用现场监测网络、遥感反演、涡动相关通量测量等手段深入探究了不同生物气候区/生物群落中响应气候变化而改变生态系统WUE的时空格局和潜在驱动因素,研究发现生态系统生产力对气候变

化的响应存在较大差异,干旱地区植被的生态系统WUE普遍较高^[10-14]。然而,变暖引起的干旱加剧可能导致植被生产力下降,并可能增加大气用水需求,从而导致碳—水平衡,以至于对WUE产生影响^[11]。Yang等^[15]利用两个观测数据发现干旱和半干旱/半湿润生态系统的WUE由于不同生物群落对水文气候条件的敏感性,因此对干旱有不同的响应。一些综合研究也发现在不同的生物群落中,最干旱年份往往存在一个共同的最大生态系统水分利用效率,主要是因为干旱影响碳汇,从而导致WUE变化^[10]。然而,也有研究认为WUE在很大程度上取决于植被覆盖情况,当植被覆盖度降低,裸露在外的土壤易受强烈的太阳辐射、风和降水等的侵蚀,植被根系抓地力下降,从而导致WUE降低^[9]。如Strudley等^[13]研究发现植被退化会导致泥沙在土壤成分中的比例增加,间接降低土壤持水量,从而影响植被WUE^[11]。而降水并不总是驱动植被和土壤碳循环可用水的准确量度^[16]。Jongen等^[17]发现小雨事件也有可能影响WUE,但很少补充植被深处的水分,且浅层土壤水分易蒸发,导致WUE对降水的敏感性并不高。近年来,全球植被WUE的研究也表明,草地生态系统WUE相比于其他陆地生态系统的WUE对环境的干扰更为敏感^[18],且尤其是生态环境比较脆弱的地区^[19]。然而,随着气候快速变暖和在水循环加剧,黄河流域干旱的频率和严重性往往会增加,蒸散发也会显著增强^[20]。这可能导致植被生产力降低、大气需水量增加以及由此产生的碳水权衡^[21]。许多研究也表明干旱和植被覆盖变化会影响碳固存,从而导致水分利用效率的变化^[11,15,21]。然而,目前综合评价不同环境因子对陆地功能的影响,例如WUE,仍然知之甚少。越来越多的研究调查了干旱对陆地生产力和蒸散量的影响。然而,对碳—水耦合过程的整体理解还

不太清楚。因此,更好地理解不同环境因子对生态系统 WUE 的影响是更好地预测陆地生态系统应对更极端气候制度的恢复力和适应能力的关键先决条件。

鉴于此,为进一步深入探讨黄河流域 WUE 时空变化特点及其对不同环境因子的敏感性,本研究基于目前使用较多的 MODIS GPP,ET,NDVI 和 LST 产品计算得到 2001—2020 年的 WUE 和 TVDI,并结合风速、MODIS ET 数据辅以 Theil-Sen 趋势法+Mann-Kendall 检验法、变异系数法、Hurst 指数法、偏相关、结构方程模型和多元线性回归残差分析法探究了 2001—2020 年黄河流域不同土地利用覆盖区域 WUE 时空动态、未来可能的持续状态以及 TVDI,RS 和 WIN 对 WUE 的影响程度和相互关系。以期更好地了解陆地碳—水相互作用的潜在机制,预测未来陆地表面—大气相互作用和陆地生态系统的动态变化。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河流域地处中国干旱、半干旱和半湿润地区

(32°—42°N,96°—119°E),流域面积 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1),位于中国西北和北方。从西到东依次横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原。地势总体呈西高东低的态势,西部河源地区平均海拔超过 4 000 m,中部海拔介于 1 000~2 000 m^[1]。黄河流域可以被划分为上游、中游和下游地区。其中,黄河上游区域是从河源到贵德,两岸多系山岭及草地高原,海拔均在 3 000 m 以上,河道呈“S”形,两岸多湖泊、草地、沼泽,河水清水流稳定,水分消耗少,产水量大,气候为高原寒冷。中游从贵德至孟津,多经高山峡谷,水流迅急,坡降大,黄河流经黄土高坡,携带大量泥沙,给下游巨大危害,是根治水害的关键河段。下游是从河南郑州桃花峪以下的河段,流域面积仅 $2.30 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全流域面积的 3%,由于黄河泥沙量大,下游河段长期淤积形成举世闻名的“地上悬河”^[1]。黄河流域土地利用类型主要为草地(49.6%)和耕地(27.2%),其次为林地(9.3%)、未利用地(13.9%)。植被类型丰富,自东向西跨越了落叶阔叶林带、草原带、荒漠带和青藏高原植被带^[3](图 1)。

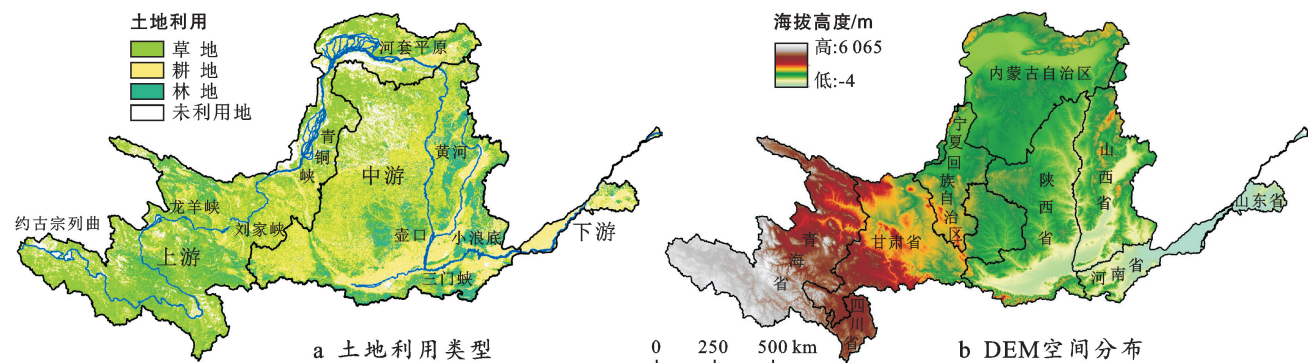


图 1 黄河流域土地利用类型及地形概况

1.2 数据源

本研究遥感数据主要有美国国家航空航天局(NASA)提供的 2001—2020 年的 MOD13A1 (NDVI)、MOD17A2 (GPP)、MOD16A2 (ET) 和 MOD11A2 (LST) 产品(<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov>),时间分辨率分别为 8/16 d,空间分辨率为 500/1 000 m。月数据采用了最大合成法,该方法可以进一步消除云和大气等的干扰,提高数据的精度。其中,GPP 和 ET 用于计算水分利用效率(WUE),NDVI 和 LST 用于计算温度植被干旱指数(TVDI)。

(1) DEM 数据。DEM 数据由资源环境数据与平台网站(<http://www.resdc.cn/User>)提供,分辨率为 1 km。

(2) 土地利用数据。土地利用现状遥感监测数据是在国家科技支撑计划、中国科学院知识创新工程

重要方向项目等多项重大科技项目的支持下经过多年的积累而建立的覆盖全国陆地区域的多时相土地利用现状数据库。数据生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成。土地利用数据包括草地(包括高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地)、林地(包括有林地、灌木林、疏林地和其他林地)、耕地(包括水田和旱地)和未利用地(包括沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸土石质地、其他未利用土地(包括高寒荒漠、苔原等))。其中,耕地分类精度达到 85% 以上,其他土地利用类型平均分类精度达到 75% 以上,可以满足本文研究的要求。

(3) 气候数据(日风速、日照时数)。来源于中国气象数据网的日值数据集(<http://data.cma.cn/data/>),时间跨度为 2001—2020 年。本文采用 FAO

Penman-Monteith 基于日照时数数据计算得到日太阳辐射^[23]。最后 ANUSPLINE 软件将太阳辐射和风速数据插值空间分辨率为 1 k m 的数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 计算 WUE 草地 2001—2020 年平均 WUE 由年总 GPP [g/(m² · a)] (以 C 计) 和年总 ET [kg/(m² · a)] (以 H₂O 计) 的比值计算得到,单位为 (g/kg)^[7]。

1.3.2 温度植被干旱指数(TVDI) Moran 等^[24]对 T_s-NDVI 特征空间的研究中发现地表最低温度与植被覆盖度和植被覆盖类型存在一定的关系。本文使用 2001—2020 年的 MODIS NDVI 和 LST 用于 TVDI 的计算,TVDI 的计算公式为:

TVDI= (T_s - T_{sim}) / (T_{smax} - T_{smin}) (1)

式中:T_s 为地表温度; T_{smax} 为最高地表温度; T_{smin} 为最低地表温度。干湿边方程可表示为

T_{smax} = a₁ + b₁ × NDVI (2)

T_{smin} = a₂ + b₂ × NDVI (3)

式中:a₁, b₁, a₂, b₂ 分别为干湿边拟合方程的系数; NDVI 为归一化植被指数。

1.3.3 趋势分析 采用 Theil-Sen 中位数趋势分析和 Mann-Kendall 检验来研究 WUE 空间趋势特征^[15]。Theil-Sen 中位数趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,对测量误差和离群数据不敏感,用于 WUE 的时间序列趋势分析^[25]。而 Mann-Kendall 趋势检验作为非参数统计检验的方法,用于评估 Theil-Sen 斜率估计的显著性,即检验 WUE 趋势的显著性。具体公式如下:

β = median ((x_j - x_i) / (j - i)) (4)

式中:β 为斜率,i 和 j 代表年份,如果 β>0,数据集时间序列具有正趋势;如果 β<0,数据集序列具有负趋势。

1.3.4 未来趋势分析 Hurst 指数是根据 WUE 的长时间序列数据预测未来数据的变化趋势,基于重标极差(R/S)的 Hurst 指数是一种定量表述时间序列信息长期依赖性的有效方法^[26]。本文用来研究 WUE 未来的趋势,Hurst 指数分为 3 种情况:若 0≤Hurst<0.5,说明 WUE 具有长期的相关性,将来总体趋势和过去趋势相反,时间序列表现出反持续性;所 Hurst=0.5,表明 WUE 互相独立且没有依赖性,现在不会影响未来;0.5<Hurst≤1,表明未来 WUE 总体趋势与过去总体趋势相同,过程具有持续性,越接近 1,持续性越强^[27]。

1.3.5 偏相关分析 本文采用高阶偏相关分析法研

究了黄河流域水分利用效率与不同环境因子之间的关系^[27]。假设有 k (k>2) 个变量,则任意两个变量的 n (n≤k-2) 阶样本偏相关系数计算公式如下:

r_{ij · 112...1n} = (r_{ij · 112...1n-1} - r_{i1n · 112...1n-1} r_{j1n · 112...1n-1}) / ((1 - r_{i1n · 112...1n-1}²) (1 - r_{j1n · 112...1n-1}²)) (5)

式中:r_{ij} 为水分利用效率 i 和环境因子 j 之间的偏相关系数,控制变量为其他环境因子的变量。

1.3.6 结构方程模型 采用 AMOS23 软件构建结构方程模型(SEM),该模型基于研究者的先验知识预先设定各因素之间的依赖关系,以此判断各因素之间关系强弱,可获得自变量对因变量影响的直接效果、间接效果和总效果,并能够拟合和判断整体模型,可更全面地了解研究系统^[28]。本文使用 SEM 模型中极大似然估计来研究 WUE,TVDI,WIN 和 RS 之间的直接影响和间接影响,后根据整体模型拟合检验(卡方)以及个别参数检验(p 值)来评估整体模型^[28]。

1.3.7 一元线性回归残差分析 本文采用一元线性回归分析法研究不同环境因子对 WUE 变化的相对贡献。该方法主要有:①基于 WUE 及不同的环境因子的时间序列数据,以 WUE 为因变量,不同环境因子为自变量,建立一元线性回归模型,计算模型中的各项参数;②基于环境因子以及回归模型参数,计算得到 WUE_{cc} 预测值,用来表示环境因子对 WUE 影响。③使用预测的 WUE_{cc} 的变化速率和 WUE 观测值的变化速率间的比值作为环境因子对 WUE 的贡献度^[29](表 1)。

WUE_{cc} = a × T + c (6)

采用一元线性回归分析法分析 20 a 间预测和观测的 WUE 的斜率。公式如下:

slope = (n ∑_{i=1}ⁿ i × p_i - ∑_{i=1}ⁿ i ∑_{i=1}ⁿ p_i) / (n ∑_{i=1}ⁿ i² ∑ - (∑_{i=1}ⁿ i)²) (7)

式中:slope 为预测 WUE_{cc} 和观测 WUE 指数变化趋势; p_i 为第 i 年的 WUE 数据; i 为年变量。

表 1 WUE 变化的环境因素判定标准及贡献率计算方法

slope(WUE _{obs})	slope(WUE _{cc})	环境因子的贡献度/%
>0	>0	slope(WUE _{cc}) / slope(WUE _{obs}) × 100
	<0	100
<0	>0	100
	<0	100 slope(WUE _{cc}) / slope(WUE _{obs}) × 100

2 结果与分析

2.1 黄河流域 WUE 的时空变化特征

根据 2001—2020 年黄河流域多年平均 WUE,

WUE 变化趋势和未来可能的持续状态图(图 2)可知: WUE 空间分布上呈现出从上游—中游—下游逐渐增强,平均值为 1.55 g/kg(以 C/H₂O 计)。其中 WUE 介于 0~1 g/kg(比例 15.1%),主要分布在黄河源区;介于 1~1.5 g/kg(比例 31.5%),集中在上游;1.5 以上的比例为 53.4%,集中在中游和下游区域(图 2a)。草地(1.34 g/kg)和未利用地(1.08 g/kg)的 WUE 较低,耕地(1.89 g/kg)的 WUE 较高(图 2d)。从年均时间序列变化发现 WUE 在 20 a 间整体以每年 0.006 4 g/kg 的速率在下降,但整体波动性较大,在 2014 年 WUE 有最低值,2002 年有最大值(图 2e)。黄河流域 WUE 在 2001—2020 年主要以下降趋势为主(通过 $p<0.05$ 的正像元比例为 10.38%,负像元比例为 44.45%),在中

游陕西和甘肃境内下降趋势较为显著。WUE 呈增加趋势的集中在兰州至河口镇和三门峡至花园口附近。整个区域 WUE 减少速率集中在 0.1~0.5 g/kg/20 a 的像元比例为 49.8%,集中在 0~0.5 g/kg/(20 a) 的像元比例为 30.7%(图 2b)。黄河流域未来变化趋势具有 Hurst 现象,Hurst 指数(H)均值为 0.54,即未来一段时期内 WUE 的变化趋势与 2001—2020 年的变化趋势整体表现为相同趋势。 H 在 0.5 以上的面积占 80.5%。结合前面的 WUE 变化趋势发现黄河流域 WUE 在未来一段时间仍会大面积降低。未来 WUE 变化趋势与 2001—2020 年的变化趋势相反的面积($0.5<H\leq 1$)占总面积 19.5%(图 2c)。其中,林地的持续性最强(0.565),未利用地的持续性最弱(0.534)(图 2d)。

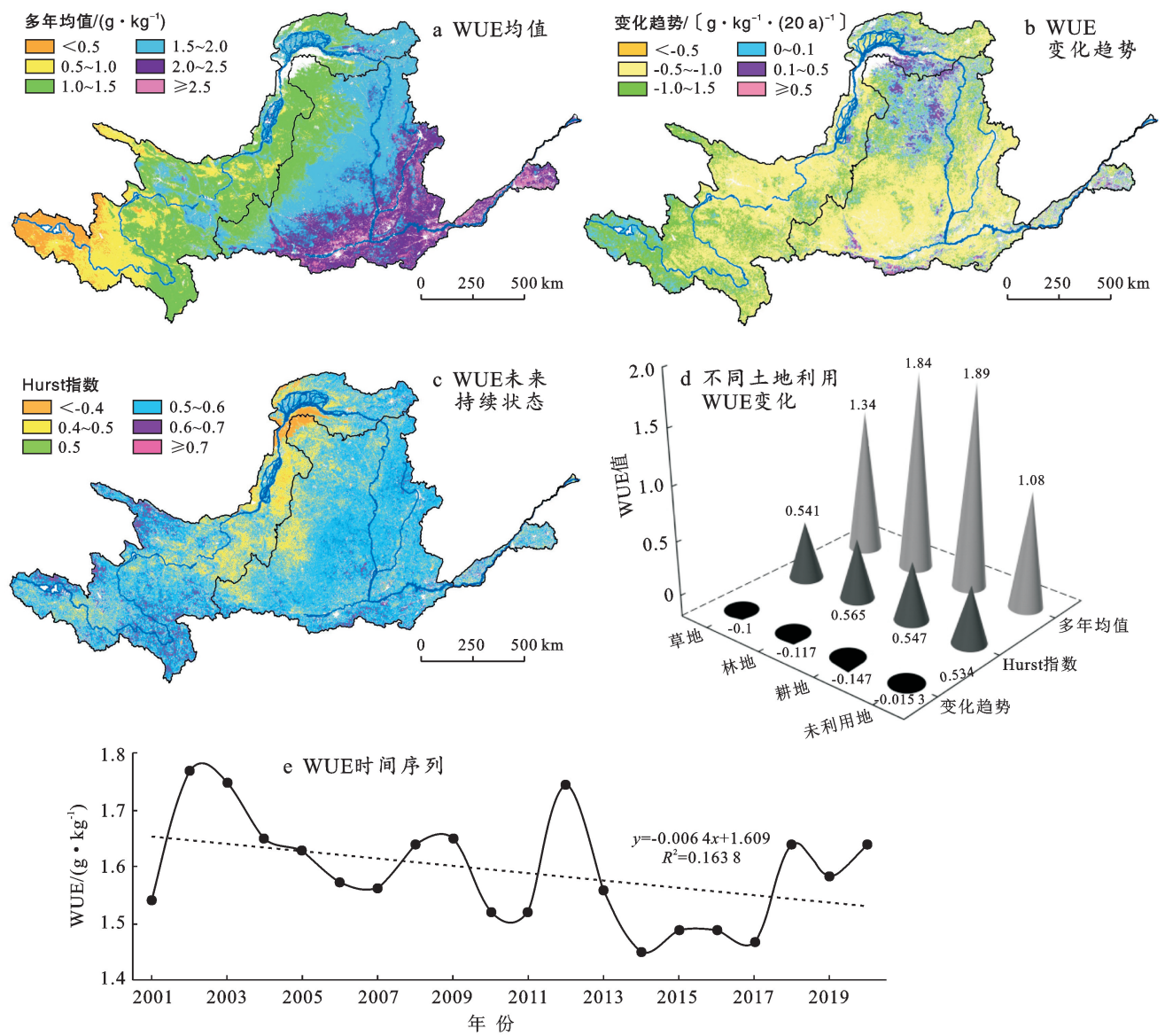


图 2 黄河流域水分利用效率(WUE,以 C/H₂O 计)时空变化动态

2.2 黄河流域 WUE 与主要环境因子的关系

通过构建影响 WUE 变化的结构方程模型得到各

因子间的路径系数。SEM 模型表明黄河流域 WUE 与不同环境因子间存在复杂的交互作用(图 3)。其中,上

游区域 WIN(0.69**),TVDI(0.59**)和 RS(0.11**)主要对 WUE 为显著的正影响。此外,在整个相互作用路径中,WIN 和 TVDI 对 WUE 的影响系数均高于0.5。由此可知,上游 WUE 变化的主导因子主要为 WIN 和 TVDI,RS 主要为 WUE 变化的间接因子,通过影响 TVDI 和 WIN 来影响 WUE。中游对 WUE 负影响较大的因素为 WIN(0.43**)和 TVDI(0.42**),主要对 WUE 起到抑制作用,RS 对 WUE 的影响不显著(0.03)。下游 WUE 主要受到 WIN 的负影响(0.24**)和 RS 的正影响(0.38**),TVDI 对 WUE 的影响不显著(0.09)。

为进一步分析不同环境因子与 WUE 的关系,采用高阶偏相关分析法对 WUE 和不同环境因子逐像元分析(图 4),发现 WUE 与 RS 在整个区域以正相关性为主,即 RS 的增强会导致 WUE 的增加(图 4a)。WUE 与 TVDI 在上游以负相关为主,尤其在黄河源区尤为显著,但在中游的河口镇和龙门峡镇以正相关关系为主,正相关系数在 0.2 以上。通过统计数据可以发现在草地和未利用地覆盖区域,TVDI 与 WUE 整体表现为负相关,而其他区域为正相关(图 4b)。WIN 对林地、草地和未利用地覆盖区域的 WUE 负影响较为显著,其他区域均影响不大(图 4c)。

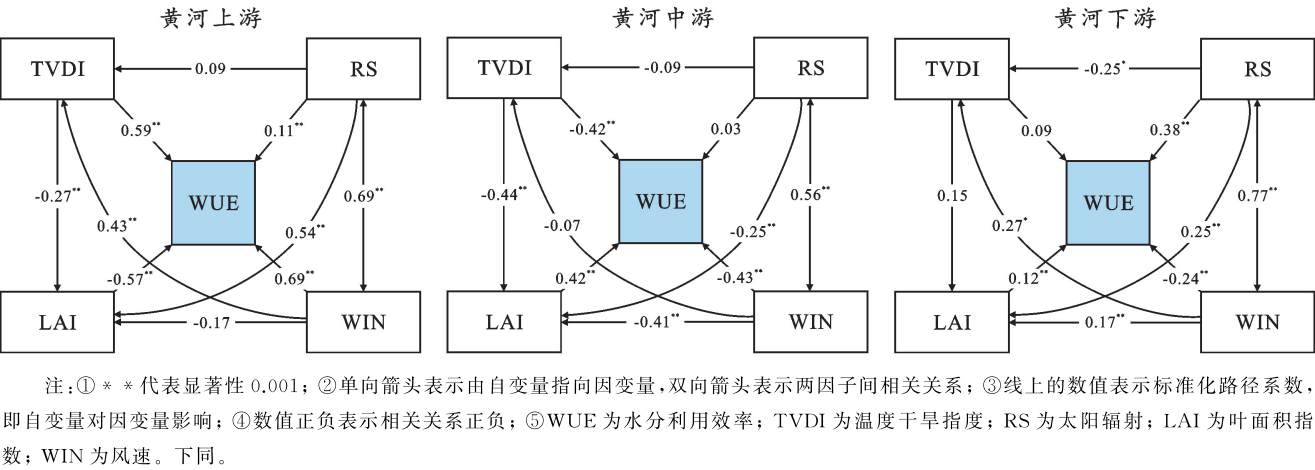


图 3 黄河流域水分利用效率(WUE)与环境要素的结构方程模型

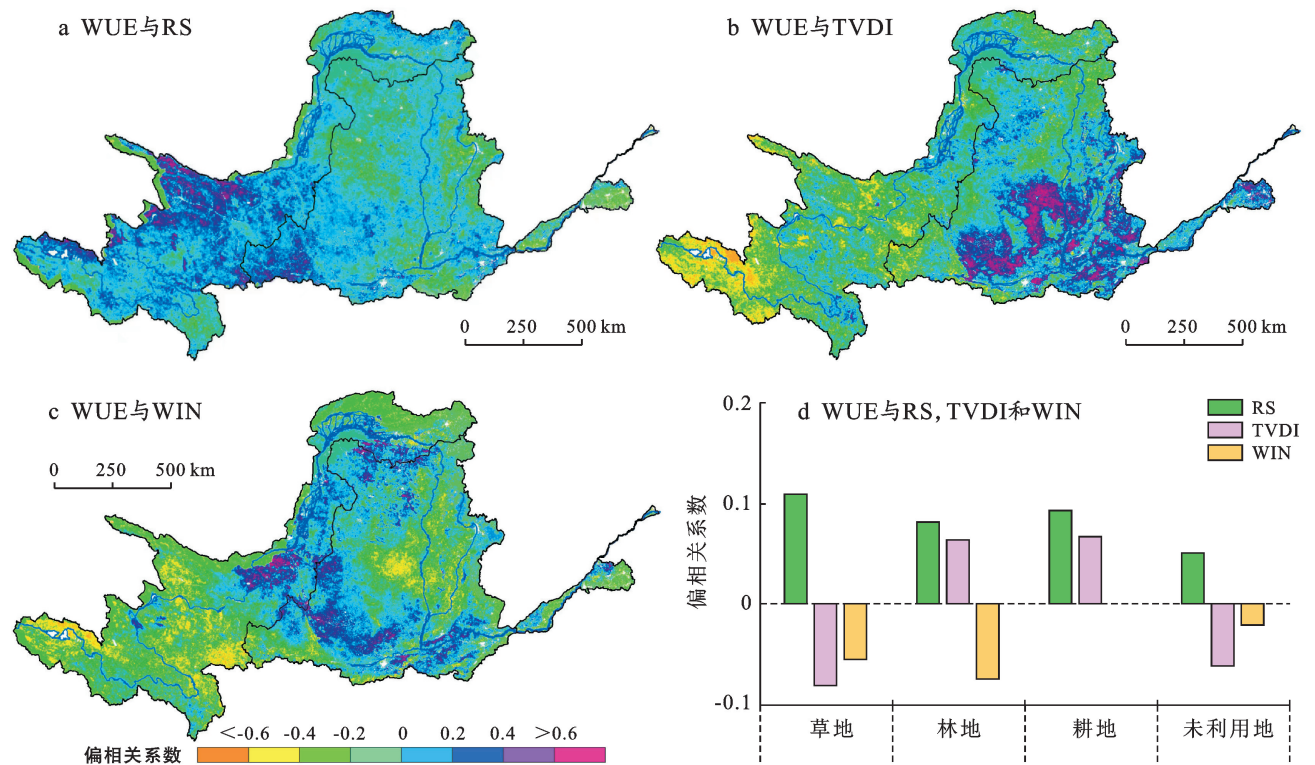


图 4 黄河流域水分利用效率(WUE)与环境要素偏相关系数分析

2.3 黄河流域 WUE 对环境因子变化的敏感性响应

黄河流域 2001—2020 年的 TVDI,RS 和 WIN 对 WUE 贡献的空间分布如图 5 所示(通过 $p<0.05$ 的像元比例依次为 54.17%,29.88%和 11.23%)。不同环境因子对 WUE 的贡献均有明显的空间差异。其中 RS 对 WUE 高贡献的区域主要分布在 WUE 对 RS 呈正相关性的区域(图 5a)。TVDI 和 WIN 对 WUE 高贡献的区域主要分布在 WIN 和 TVDI 对 WUE 呈负相关性的区域(图 5b,5c)。结合偏相关分析结果,上游 WUE 变化主要受到 TVDI 和 WIN 的负贡献;中游主要受到 RS,TVDI 和 WIN 的正贡献;下游主受到 TVDI 的正贡献和 RS 和 WIN 的负贡献(图 5)。

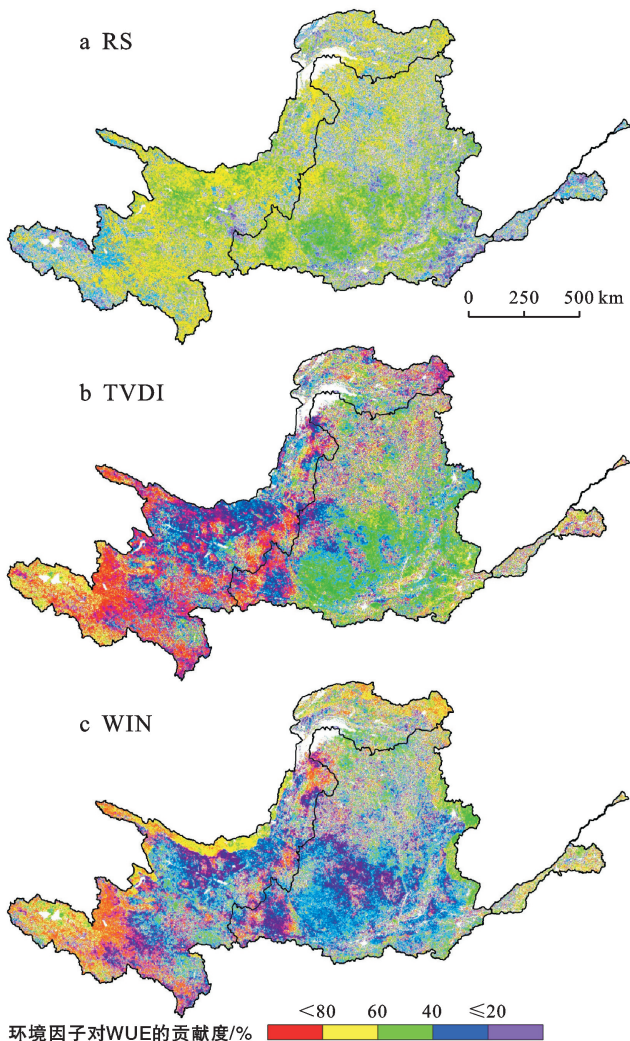


图 5 黄河流域不同环境要素对 WUE 的贡献度

3 讨论

有学者通过对黄土高原研究发现通过大规模的生态恢复工程虽然减少了黄河泥沙量,生态环境也得到改善^[5,6,30],但有研究发现新种植的 NPP 和 ET 增

加,从而导致土壤水分减少从而造成土壤表层干旱化^[30-33]。因此,本文基于 MODIS GPP/ET 法得到 2001—2020 年黄河流域 WUE 时空分布,发现整个流域 WUE 平均值为 1.55 g/kg(以 C/H₂O 计,下同),但大于 2 g/kg 的面积比例为 21.6%。而很多基于该算法得到的 WUE 变化在全球范围从 0.5 g/kg 到 6.0 g/kg^[15],表明黄河流域 WUE 相较其他地区较低。从不同土地利用类型来看,与干旱程度较大的草地和未利用地区不同,较为湿润的林地和耕地的 WUE 明显高于干旱程度较大的区域,尽管 WUE 在草地和未利用地区也减小,但其减小程度明显低于较为湿润的地区。因此,WUE 空间分布特征与变化速率间没有保持一致。有研究也发现灌丛的 WUE 高于草地与两个生物群落的水分利用策略和植被根系特征有关^[34]。其次,在任何降水梯度下,草地对地表土壤水分的利用程度均高于灌丛,而灌丛可以利用中深层土壤水分,这就是较为湿润的地区水利用效率高于草地覆盖区域的原因^[34],这一研究结果与本文研究结果保持一致。

WUE 变化是一个周期性、持续性的动态过程,变化的制约因素众多,且各因素之间也存在一定的制约关系^[14]。其中,植被生长和太阳辐射被认为是影响植被变化的重要气象因子^[9],但与干旱相比,干旱发生具有突发性、预测性和破坏性大等特点,因此可能会因为气候的突变而严重影响陆地生态系统结构、组成和功能及区域陆地生态系统的碳循环,从而影响植被生长而影响植被 WUE^[35]。但目前针对植被 WUE 对干旱等环境因子的敏感性的比较研究较少。因此,本文综合前人研究选择了干旱、风速和太阳辐射分析不同因子对 WUE 变化的贡献度。我们发现上游区域 WIN,TVDI 和 RS 主要对 WUE 为显著的正影响,RS 主要通过影响 TVDI 和 WIN 来影响 WUE。主要是因为上游地处干旱和半干旱区,常年受风蚀、水蚀显著影响,而干旱不但会导致植被生长减缓、生物量减少以及增加植被死亡率,也会使土壤沙化严重,土壤水分和植被冠层水分的蒸散发增加,使 WUE 降低^[9,34]。同时随着蒸散发增大,地表干燥度增加,裸露在外的土壤在强烈的太阳辐射、风和极端降水的侵蚀下,植被根系抓地力下降,从而进一步导致 WUE 降低^[35]。中游对 WUE 负影响较大的因素为 WIN 和 TVDI,主要对 WUE 起到抑制作用,RS 对 WUE 的影响不显著。TVDI 对 WUE 正贡献可能是干旱半干旱的植被很可能已经适应了干旱气候,因此普遍具有较强的耐旱能力,而干旱程度的增强可能会导致植被进一步吸取地下水资源,从而提高水分利

用效率。因此,在干旱持续的情况下,植物仍表现相对较好,WUE略有增加^[36],且干旱地区植被通过降低气孔导度来降低水分胁迫,从而增加 WUE^[11],这一结论与本文研究结论一致。其次,有研究表明自20世纪70年代以来,东亚夏季风强度总体表现为显著减弱趋势,导致黄土高原东、南部干旱呈不显著增加趋势^[37],同时,全球气候持续变暖也会导致植被蒸腾作用加快,蒸散发增加,使土壤水分减少,抑制了植被(尤其是草地)的生长,是草地退化现象出现导致干旱程度加深,从而进一步增加植被 WUE 的持续降低^[38]。所以说黄河流域生态工程不仅要充分了解植被的组成、结构及用水策略,而且还要考虑目前国际气候变化模型对未来区域生态和经济可持续发展可能产生的影响,以期制定人与自然和谐相处的生态恢复工程策略。

虽然本文综合评价了干旱、风速和太阳辐射对 WUE 变化影响情况,但有研究显示极端气候增多可能会对 WUE 产生更显著的影响,且不同因子间存在的交互作用对 WUE 的影响远远强于单个因子的作用,例如,一个异常温暖季之后的一年内,草原中土壤异养呼吸作用增强,抵消了生态系统曾经因为变暖对碳的净吸收,从而影响 WUE^[4-5]。因此,在后期的研究中应该着重关注多因素是如何共同作用于 WUE 值得进一步深入探究。

4 结论

本文分析了2001—2020年黄河流域不同土地利用区 WUE 空间分布、变化趋势及干旱、风速和太阳辐射对 WUE 的影响,为综合评价 WUE 对不同环境因子的响应研究提出一个重要研究框架。WUE 空间分布上呈从上游—中游—下游逐渐增加,平均值为1.55 g/kg(以 C/H₂O 计),总体以下降趋势为主,未来一段时期内 WUE 仍以减弱趋势为主。上游 WUE 主要受 WIN, TVDI 和 RS(0.11**)正影响,RS 主要通过影响 TVDI 和 WIN 来影响 WUE。中游主要受 WIN 和 TVDI 负影响,RS 对 WUE 影响不显著。下游 WUE 主要受 WIN 负影响和 RS 正影响, TVDI 对 WUE 的影响不显著。较为湿润的林地和耕地的 WUE 明显高于干旱程度较大草地和未利用地区域,但干旱区减小程度明显低于较为湿润地区。这项研究表明,黄河流域 WUE 未来易受到干旱和气候因素影响。因此,后期研究应在气候因子研究基础上进一步分析月尺度干旱、极端气候等对不同土地利用区 WUE 的影响,为进一步预测 WUE 对未来气候的响应提供模板。

[参考文献]

- [1] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017,45:223-243.
- [2] Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang, et al. Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021,80(3):1-12.
- [3] Liang Wei, Bai Dan, Jin Zhao, et al. A study on the streamflow change and its relationship with climate change and ecological restoration measures in a sediment concentrated region in the loess plateau, China [J]. *Water Resources Management*, 2015,29(11):4045-4060.
- [4] 郜国明,田世民,曹永涛,等.黄河流域生态保护问题与对策探讨[J].*人民黄河*,2020,42(9):112-116.
- [5] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(11):1019-1022.
- [6] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9(1):38-41.
- [7] Zheng Han, Lin H, Zhu Xianjin, et al. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2019,181:102995.
- [8] 胡中民,于贵瑞,王秋凤,等.生态系统水分利用效率研究进展[J].*生态学报*,2009,29(3):1498-1507.
- [9] Scanlon T M, Albertson J D. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in Southern Africa [J]. *Global Change Biology*, 2004,10(3):329-341.
- [10] Huxman T E, Cable J M, Ignace D D, et al. Response of net ecosystem gas exchange to a simulated precipitation pulse in a semi-arid grassland: The role of native versus non-native grasses and soil texture [J]. *Oecologia*, 2004,141(2):295-305.
- [11] Sun Yan, Piao Shilong, Huang Mengtian, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016,25(3):311-323.
- [12] Zhang Tian, Peng Jian, Liang Wei, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,565:105-122.
- [13] Strudley M W, Green T R, Ascough J C II. Tillage

- effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(1): 4-48.
- [14] Liu Miao, Zhang Zhenchao, Sun Jian, et al. Restoration efficiency of short-term grazing exclusion is the highest at the stage shifting from light to moderate degradation at Zoige, Tibetan Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106323.
- [15] Yang Yuting, Guan Huade, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23284.
- [16] Biederman J A, Scott R L, Goulden M L, et al. Terrestrial carbon balance in a drier world: The effects of water availability in Southwestern North America [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(5): 1867-1879.
- [17] Jongen M, Pereira J S, Aires L M I, et al. The effects of drought and timing of precipitation on the inter-annual variation in ecosystem-atmosphere exchange in a Mediterranean grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(5): 595-606.
- [18] Kwon H, Law B E, Thomas C K, et al. The influence of hydrological variability on inherent water use efficiency in forests of contrasting composition, age, and precipitation regimes in the Pacific Northwest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 488-500.
- [19] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 119-125.
- [20] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河流域 NDVI/土地利用对蒸散发时空变化的影响[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 158-167.
- [21] 陈晨, 王义民, 黎云云, 等. 黄河流域 1982—2015 年不同气候区植被时空变化特征及其影响因素[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(2): 56-62.
- [22] 王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(9): 1169-1183.
- [23] ElNesr M N, Alazba A A. Simple statistical equivalents of Penman-Monteith formula's parameters in the absence of non-basic climatic factors [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2012, 5(4): 757-767.
- [24] Moran M S, Hymer D C, Qi Jiaguo, et al. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(1/2/3): 69-80.
- [25] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [26] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6600-6612.
- [27] Ma Yujun, Shi F, Hu Xia, et al. Threshold vegetation greenness under water balance in different desert areas over the silk road economic belt [J]. *Remote Sens*, 2020, 12: 2452.
- [28] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- [29] Fu Bojie, Liu Yu, Lü Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [30] Wang Cong, Wang Shuai, Fu Bojie, et al. Integrating vegetation suitability in sustainable revegetation for the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143572.
- [31] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(12): 2105-2114.
- [32] Zhao Maosheng, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [33] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: A model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.
- [34] Xie Yingying, Wang Xiaojing, Silander J A Jr. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(44): 13585-13590.
- [35] Deng Ying, Wang Xuhui, Wang Kai, et al. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298/299: 108307.
- [36] 邵薇薇, 杨大文, 孙福宝, 等. 黄土高原地区植被与水循环的关系[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(12): 1958-1962.
- [37] 冯丽丽. 北半球主要生态类型植被水分利用效率的变化特征及影响因子分析[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2017.
- [38] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 533-558.