

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.005

黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应

薛联青^{1,2}, 肖颖¹, 刘远洪¹, 杨明杰¹, 刘赛华¹, 章郁涵¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要:利用植被总初级生产力和蒸散发数据,结合标准化降水蒸散发指数(SPEI)数据,分析了1982—2018年黄河流域植被水分利用效率的变化特征,量化了干旱对植被水分利用效率的累积效应。结果表明:干旱对植被水分利用效率的累积影响可利用多尺度SPEI和植被水分利用效率之间具有最大显著相关性的月份来衡量;黄河流域多年平均植被水分利用效率呈北低南高的分布格局,与多年平均植被总初级生产力的空间分布呈现一定的相似性,植被水分利用效率呈上升趋势,主要原因是植被总初级生产力增速大于蒸散发增速;干旱对黄河流域内58.48%区域的植被水分利用效率存在累积效应,其中累积时间尺度为1~2月、6~8月和19~24月尺度的占比分别达到了43.58%、23.10%和16.96%;干旱对植被水分利用效率的累积时间尺度因植被类型和水文气候条件而异,干旱对北部靠近沙漠区域的草地和农田的累积影响是长期(>18月)的,对湿润半湿润区的草地和森林的累积影响是短期(≤4月)的;平均累积时间尺度随着年均SPEI的增加而下降,SPEI越大,干旱对植被水分利用效率的累积时间尺度越短。

关键词:植被水分利用效率;累积效应;标准化降水蒸散发指数;干旱;黄河流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0032-10

Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin //
XUE Lianqing^{1,2}, XIAO Ying¹, LIU Yuanhong¹, YANG Mingjie¹, LIU Saihua¹, ZHANG Yuhua¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan 243031, China)

Abstract: Using gross primary productivity (GPP) of vegetation and evapotranspiration (ET) data, combined with standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) data, the variation characteristics of vegetation water use efficiency (WUE) in the Yellow River Basin from 1982 to 2018 were revealed, and the cumulative effect of drought on vegetation WUE were quantified. The results indicate that the cumulative impact of drought on WUE can be measured by the months with the most significant correlation between multi-scale SPEI and WUE. The annual average WUE shows a distribution pattern of low in the north and high in the south, showing a certain similarity to the spatial distribution of annual average GPP. The WUE shows an upward trend, mainly because the GPP growth rate is greater than the ET growth rate. Drought has a cumulative effect on 58.48% area of vegetation WUE in the Yellow River Basin, with cumulative time scales of 1~2 months, 6~8 months, and 19~24 months accounting for 43.58%, 23.10%, and 16.96%, respectively. The cumulative time scale of drought on WUE varies depending on vegetation types and hydrological and climatic conditions. The cumulative impact of drought on grasslands and farmland near desert areas in the north is long-term (>18 months), while the cumulative impact on grasslands and forests in humid and semi humid areas is short-term (≤4 months). The average cumulative time scale decreases with the increase of annual average SPEI, and the larger the SPEI, the shorter the cumulative time scale of drought on vegetation WUE.

Key words: vegetation water use efficiency; cumulative effect; standardized precipitation evapotranspiration index; drought; Yellow River Basin

基金项目:湖南省水利科技项目重大项目(XSKJ2021000-10);兵团科技合作计划项目(2022BC001);国家自然科学基金项目(51779074)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lqxue@hhu.edu.cn

干旱是一种重要的易于反复发生的不利气候扰动,在全球气候变化加速的背景下,干旱发生的频率和强度都在增加^[1-2]。干旱会对陆地生态系统的碳水循环产生不利影响,例如限制植被生长、减少土壤水分的可用性、扰乱全球水平衡^[3]。植被生态系统作为陆地生态系统的核心,可以通过增加陆地生态系统碳汇、改变植被物理过程来适应气候变化。植被的水分利用效率被定义为生产力与水损失的比率^[4],其将植被的生物过程与物理过程紧密联系,是表征陆地生态系统水碳循环相互作用的关键参数^[5],在评估陆地生态系统对气候变化的响应中发挥着重要作用。因此,研究植被水分利用效率不仅能够深入了解植被生态系统的生态水文过程,还可以解释生态系统对气候变化与水资源限制的响应机理,为人类应对干旱胁迫提供理论依据。

干旱对植被生态系统的影响研究已成为热点问题,相较于其他干旱指数,标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)结合了温度和降水数据,能够反映不同时间尺度上的累积水分亏缺,被广泛应用于干旱特征研究^[6-9]。目前,众多学者选取不同的植被生长指标开展植被生长对干旱的响应研究,常采用的植被生长指标有归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[10-11]、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)^[10]、日光诱导叶绿素荧光(sun/solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)^[12]和植被总初级生产力^[13]。研究发现干旱对植被生长具有并发、遗留影响以及持续影响^[14-16],如Ahmadi等^[3]的研究表明干旱对全球植被总初级生产力有累积影响,这种累积效应时间因植被类型而异,草地的持续时间最长;Zhao等^[17]则是通过NDVI研究了黄土高原草地的累积效应,结果表明草地的累积效应较强且累积时间尺度较长。这些植被生长指标虽然反映了植被的光合作用,但是并未考虑植被生长过程中的蒸腾作用消耗。近年来,随着气候变化和水资源危机的加剧,植被水分利用效率作为综合考虑碳吸收与水损失的生理生态指标,逐渐成为干旱半干旱地区研究中的热点^[18]。邹杰等^[19]研究了中亚的干旱区生态系统植被水分利用效率对干旱的响应,发现这种响应为负效应,同时前一年干旱对当前植被水分利用效率存在滞后影响;Pei等^[20]研究了黄土高原干旱区不同季节性干旱与植被水分利用效率的关系,发现植被水分利用效率对季节性干旱程度的敏感性受到区域干湿条件的影响,干旱地区植被水分利用效率对于干旱程度的敏感性普遍高于半干旱、半湿润地区或湿润地区;Ji

等^[21]分析了全球陆地生态系统植被水分利用效率对土壤水分干旱的滞后响应,结果表明干旱对全球70.87%植被覆盖区域的植被水分利用效率的影响滞后。这些研究多分析了当前时期或者前一时特定时间点的干旱对当前植被生态系统的影响,忽略了持续时间跨度的水分胁迫,长时间尺度上的水分不足可以抑制植物光合作用,甚至导致植物死亡^[15]。因此考虑一段时间内的持续干旱,开展其对植被水分利用效率的累积响应规律研究对植被生态系统的稳定发展维持具有重要意义。

黄河流域横跨我国东中西部,是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道,流域内大部分区域为干旱、半干旱区,降水稀少且分布不均,水资源短缺严重,是我国干旱频发地之一^[22]。黄河流域作为中国北方的生态屏障,2000年以来一直在实施各项生态保护措施,同时全球气候变暖导致区域干旱频发,致使植被生长发生重大变化,不仅会改变流域内植被的生产力,还会加剧植被的蒸散发。因此,本文对黄河流域植被水分利用效率对干旱的响应进行研究,以期为黄河流域生态建设与管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河是中国第二长河流,全长约为5464 km,发源于巴彥喀拉山脉,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等9个省区,最终流入渤海湾。黄河流域(图1)位于32°10'N~41°50'N、95°53'E~119°05'E,总面积79.5万km²,流域自西至东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原4个地貌单元,地势高低起伏显著。黄河流域多年平均降水量约476 mm,多年平均蒸发量为800~1800 mm,空间差异较大^[23]。流域北部为干旱气候,中部为半干旱气候,南部为湿润半湿润气候。受自然气候条件的限制和人类活动的影响,流域内干旱灾害发生频率不断增加,给当地水资源、能源、粮食和生态安全带来了巨大挑战。

1.2 数据来源

总初级生产力和蒸散发数据集来自GLASS(global land surface satellite)产品^[24],研究时间为1982—2018年,空间分辨率为0.05°。GLASS产品是在高级甚高分辨率辐射计场景的基础上生成的,已经通过现场测量进行了验证,表现出较高的可靠性^[25-26],并已广泛应用于大尺度区域生态系统水分利用效率研究^[21-27]。对植被总初级生产力和蒸散发数据集进行格式转换、单位转换、投影变换以及裁剪等预处理后,分别汇总得到月尺度和年尺度数据。

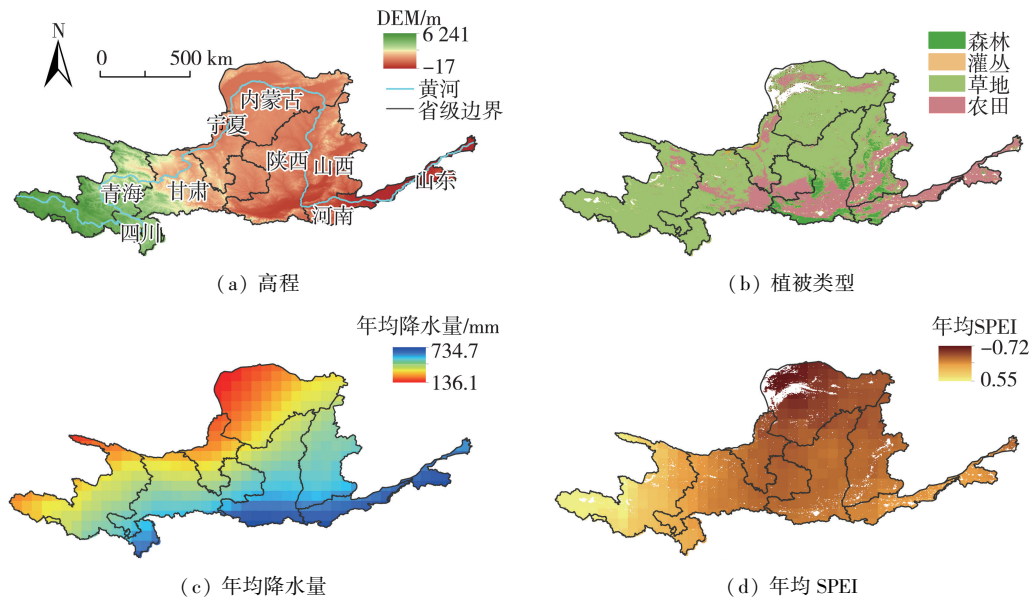


图1 黄河流域概况

Fig.1 Overview of the Yellow River Basin

SPEI 数据库 SPEIbase^[28] 以 0.5° 的空间分辨率和 1~48 月的时间分辨率提供全球范围内的干旱状况。本研究采用 SPEIbasev. 2.6 数据集提供的 1~24 月尺度数据分析干旱对黄河流域植被水分利用效率的累积效应,该数据集以 CRUTSv. 4.03 数据集中的月降水量和潜在蒸散量作为输入,其中潜在蒸散量的计算基于 FAO-56 Penman-Monteith 模型^[27]。SPEIbase 数据集的可靠性已得到证实,并在黄河流域范围内得到了广泛使用^[29-31]。为获得与植被总初级生产力、蒸散发数据集相同的空间分辨率,采用最近邻算法对 SPEI 数据集进行重采样。

MODIS 土地覆盖类型产品 (MCD12Q1) 由美国国家航空和航天局发布,其分辨率为 500 m,涵盖了 2001—2020 年的数据。本文以植被生态系统作为研究对象,因此将土地覆被类型重新分类为森林、灌丛、草地和农田 4 个类别。

2 研究方法

生态系统水分利用效率是生态系统 CO_2 固定量与水分蒸散量的比值^[4],反映了植物消耗单位质量水分所固定的 CO_2 的量,本文采用植被总初级生产力与蒸散发的比值来定义植被水分利用效率。

Sen 斜率^[32]是地学领域常用的统计方法之一,用于分析各水文气象要素的趋势变化幅度,相对于一元线性回归,其可以消除异常值对斜率的影响。Mann-Kendall 法^[33-34]在 Sen 斜率判断出时间序列变化趋势大小的基础上,用来检验时间序列变化趋势的显著性。本文采用 Sen 斜率分析植被水分利用效率序列的趋势变化大小,并采用 Mann-Kendall 法检

验其显著性,在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,临界值 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。当 $|Z_{1-\alpha/2}| \leq 1.96$ 时,趋势不显著;当 $|Z_{1-\alpha/2}| > 1.96$ 时,趋势显著。

采用皮尔逊相关系数法来衡量干旱对植被水分利用效率的累积效应^[35]。计算 1~24 月时间尺度的逐月 SPEI 与逐月植被水分利用效率之间的皮尔逊相关系数 R_i ,仅保留不同累积月份中通过显著性检验的相关系数作为累积效应强度的候选值。 $R_{\max}$ 为所有通过显著性检验的 R_i 中的最大值,定义为累积效应强度, $R_{\max}$ 对应的 i 月份为累积时间尺度值。

为评估水文条件对植被水分利用效率累积效应的影响,选用 1982—2018 年的 12 月尺度 SPEI (SPEI-12) 数据集来表示年度水平衡,该数据可以揭示区域的年度湿度情况。同时,将多年平均 SPEI-12 按 0.05 的间距划分水平衡梯度,分析累积时间尺度和累积效应强度随不同水文条件的变化。

3 结果与分析

3.1 植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率的空间分布特征

1982—2018 年,黄河流域多年平均植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率的空间分布如图 2 所示。整个流域总初级生产力的多年均值为 533.9 g/m^2 (本文中植被总初级生产力是指生态系统中植物群落单位面积上所产生的有机碳总量,以碳为计量依据),总初级生产力的高值区域 ($> 909.9 \text{ g/m}^2$) 主要分布在四川、甘肃西南部、陕西南部以及山西、河南、山东的大部分区域,主要原因是这些区域常年降水量较多,对植被生长有一定程度的促进作用;低值区

($<230.5\text{ g/m}^2$) 主要分布在青海西部、甘肃北部、宁夏北部以及内蒙古南部,这部分区域处于干旱半干旱气候区,常年降水量少。4种植被类型的总初级生产力均值相比较,由大到小次序为:森林、农田、草地、灌丛。黄河流域蒸散发总体呈东高西低的分布格局,全流域的年均蒸散发为 474.7 mm 。4种植被类型相比较,森林的年均蒸散发最高,其次为农田,灌丛和草地的年均蒸散发相近。

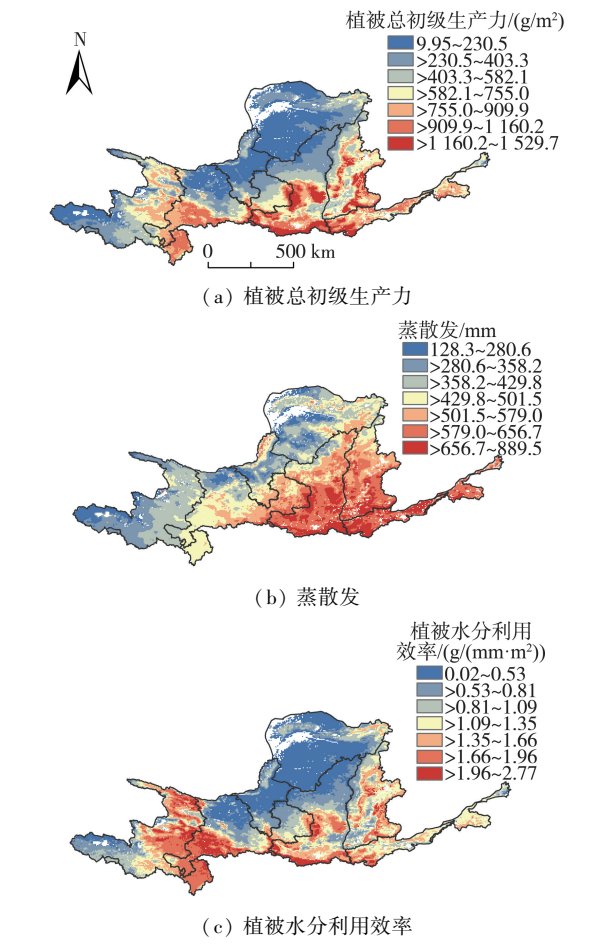


图2 多年平均植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average vegetation gross primary productivity, evapotranspiration, and vegetation water use efficiency

黄河流域的多年平均植被水分利用效率空间分布与植被总初级生产力呈高度一致性。全流域的植被水分利用效率值范围为 $0.03\sim2.77\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$, 年均值为 $1.05\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$ 。植被水分利用效率的高值区($>1.66\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$) 主要分布在青海东部、甘肃西南部、四川、陕西、河南与山西的森林覆盖区;低值区($<0.53\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$) 主要分布在青海西部、甘肃北部、宁夏中部、陕西北部和内蒙古大部分区域。总体上,黄河流域的植被水分利用效率分布呈现空间异质性,流域西南部的草地和东南部的森林因植被总初级生产力较高,使得植被水分利用效率也呈现高值。流域北部的草地生态系统的年均降水量低,植被生产力弱,同时较多的水分通过土壤蒸发消耗,故植被水分利用效率最低。1982—2018年,黄河流域不同植被类型下的植被水分利用效率均值存在明显差异,其中森林的水分利用效率最高,为 $1.90\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$;农田的水分利用效率仅次于森林,均值为 $1.17\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$;草地的水分利用效率均值为 $0.96\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$;灌丛的水分利用效率最低,为 $0.75\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$ 。这与 Chang 等^[36] 的研究一致。

3.2 植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率的时间变化特征

表1为黄河流域不同植被类型的植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率均值及年际变化速率。由表1可知,1982—2018年,黄河流域的植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的年际变化均呈显著上升趋势,植被总初级生产力的上升速率为 $6.01\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,蒸散发的上升速率为 3.33 mm/a ,可见同时期植被总初级生产力的增长速率明显高于蒸散发,致使植被水分利用效率以 $0.0077\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的速率上升。植被水分利用效率由1980年的 $0.81\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$ 上升到2018年的 $1.26\text{ g}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2)$, 上升幅度高达55.56%。不同植被类型的年际变化速率也存在明显差异,灌丛、草地和农田的年际植被

表1 不同植被类型的植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率均值及年际变化速率
Table 1 Mean values and interannual variation rates of vegetation gross primary productivity, evapotranspiration, and vegetation water use efficiency of different vegetation types

植被类型	面积占比/%	植被总初级生产力			蒸散发	植被水分利用效率	
		均值/ (g/m^2)	变化速率/ ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)	均值/ mm	变化速率/ (mm/a)	均值/ ($\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$)	变化速率/ ($\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$)
森林	5.06	1267.4	1.33 **	666	2.17 **	1.9	-0.0039 **
灌丛	0.21	406.8	4.24 **	434.3	4.38 **	0.75	0.0040 **
草地	73.12	442	5.94 **	433	3.59 **	0.96	0.0082 **
农田	21.61	684.8	8.12 **	574.9	3.04 **	1.17	0.0089 **
总体	100	533.9	6.01 **	474.7	3.33 **	1.05	0.0077 **

注:**表示时间序列的变化趋势通过 $p<0.05$ 的显著性水平。

水分利用效率均呈上升趋势,速率分别为 0.004 0、0.008 2、0.008 9 g/(mm·m²·a),农田水分利用效率的增速最快,主要是因为受人类活动影响较大。森林水分利用效率的年际变化率为 -0.003 9 g/(mm·m²·a),这是因为森林的总初级生产力增长较慢,而蒸散发增速高于其总初级生产力近 2 倍,最终导致森林水分利用效率呈下降趋势。

图 3 为植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率趋势检验结果,可见,1982—2018 年,黄河流域高达 94.16% 区域的植被总初级生产力呈上升趋势,79.31% 的区域呈显著上升。黄河流域高达 98.90% 区域的植被蒸散发呈上升趋势,其中 92.74% 的区域呈显著上升。植被总初级生产力和蒸散发的增加是气候变化和生态建设工程共同作用的结果,进而导致了植被水分利用效率的变化。约 84.38% 区域的植被水分利用效率呈上升趋势,其中 63.96% 的区域呈显著上升趋势,主要分布在流域西部和北部、陕西与山西的农田区域;仅有 15.62% 区域的植被水分利用效率呈下降趋势,约 6.56% 的区域呈显著变化,主要分布在流域东南部的森林覆盖区,是由非显著上升的植被总初级生产力与显著上升的蒸散发共同作用导致的。

3.3 干旱对植被水分利用效率的累积效应

不同时期的水分条件会促进或抑制植被的碳水过程,并随后作用于植被当前生长阶段的水分利用效率^[37],这些共同作用形成了对下一阶段植被水分利用效率的累积效应。干旱对黄河流域约 58.48% 区域的植被水分利用效率表现出一定程度的累积效应(图 4),累积时间尺度的平均值为 7.26 月,表明区域的植被水分利用效率会受到前期一段时间内的水分亏缺的影响。在表现出累积效应的区域中,1~2 月的累积时间尺度面积占比最高,达到了 43.58%,其次是 6~8 月尺度,占比为 23.10%,19~24 月的长尺度的占比也达到了 16.96%。山西、陕西东部、内蒙古东北部、青海最西端与流域最南端的植被水分利用效率对干旱的累积反应主要是短期(≤4 月)的,这些区域常年降水较多,但是水土流失严重,生态环境极其脆弱,导致植被抗旱能力很弱。相比之下,内蒙古中部、陕西的部分区域和甘肃北部的植被水分利用效率对干旱的累积反应是较长期(>18 月)的,这些区域靠近沙漠,沙漠边缘的草地对干旱敏感程度较低,长期暴露在干旱环境中使得植被发展出了长根系,已具备能够忍受更长干旱的能力^[38]。

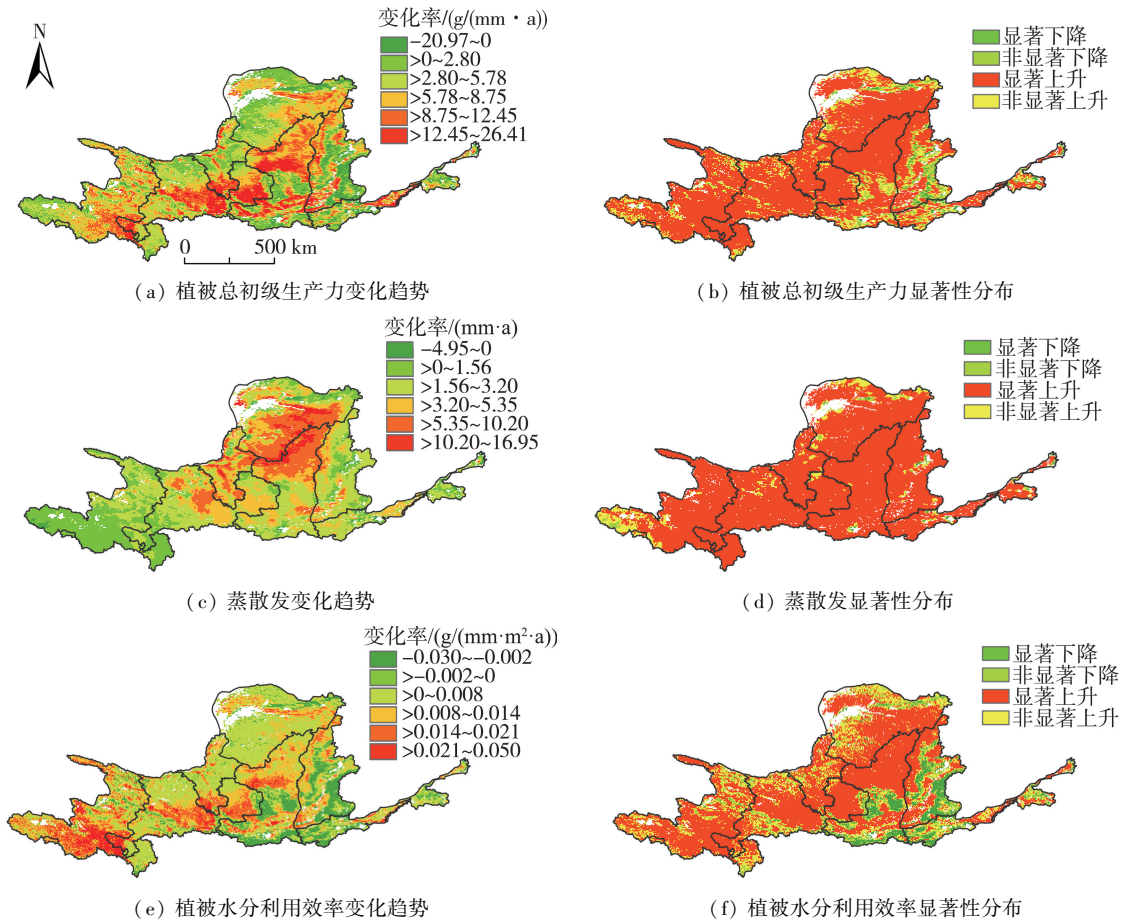


图 3 植被总初级生产力、蒸散发、植被水分利用效率趋势检验结果

Fig. 3 Trend test result of vegetation gross primary productivity, evapotranspiration, vegetation water use efficiency

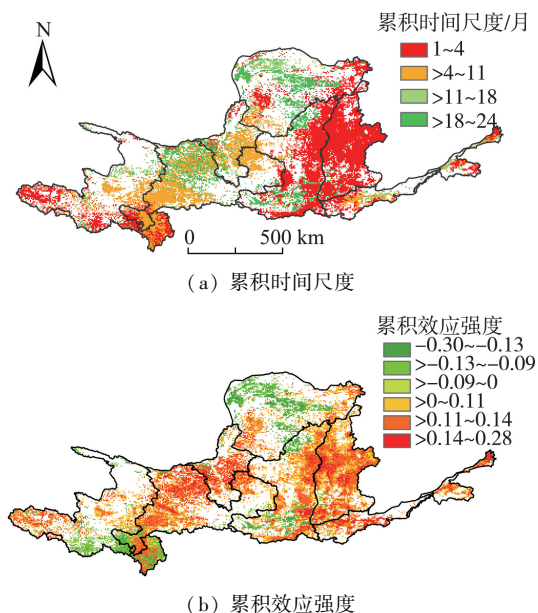


图4 干旱对植被水分利用效率的累积时间尺度与累积效应强度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of cumulative time scale and cumulative effect intensity of drought on vegetation water use efficiency

表现出累积效应的区域中,20.45%区域的累积效应强度($R_{\max}$)为负,主要分布在内蒙古西北部与东南部、陕西南部以及流域最南端;其余区域(79.55%)的累积效应强度为正。有研究指出生态系统受到干旱胁迫时,生物群落能够增强其水分利用效率以应对水分胁迫^[39],尤其对于长期受到水分胁迫的植被来说,其可以通过在长期适应环境的过程中改变其结构和生理特征来提高其抗旱性。研究发现累积效应时间尺度与累积效应强度的分布格局呈现相似性,即累积时间尺度大于18月的区域的累积效应强度通常为负,当长期干旱发生时这些区域的植被为应对干旱胁迫,会关闭部分气孔来减少水损失,因此植被总初级生产力和蒸散发均呈下降趋势,且蒸散发的下降速率快于植被总初级生产力,导致了植被水分利用效率的升高^[40],再次证实了这些区域的植被具备较强能力的抗旱能力。同样,除了若尔盖区域外,累积效应时间尺度较小的区域的累积效应强度基本表现为正,即植被水分利用效率随着干旱的加剧而降低。在干旱半干旱区域水分可用性作为植被生长的主要限制因素^[41],对于根系较浅且未受到长期水分胁迫的植被,干旱的发生可能会导致其总初级生产力的下降速率略快于蒸散发,使得植被水分利用效率下降。而在湿润半湿润地区,能量是主要限制因素,干旱会加剧植被的蒸散发损耗,从而导致了植被水分利用效率的下降。

进一步分析流域内表现出累积效应的植被区,

发现不同植被对干旱累积时间尺度和累积效应强度也存在较大差异,具体见图5和表2。干旱对森林水分利用效率的累积效应时间尺度主要为1~2月;草地则主要为1~2月与6~8月尺度,在19~22月尺度也有少许分布;农田的累积效应时间尺度主要为1~3月,也有部分的尺度为6~8月和15月以上。可知干旱对同一种植被的累积时间尺度也存在差异,主要是因为水文气候条件等环境因子的不同导致了植被总初级生产力与蒸散发对干旱的响应差异,这种差异在草地植被中最为明显,西南部湿润半湿润区的草地的累积时间尺度主要小于4月,而北部干旱区的草地累积时间尺度则为中长期(>11月)。干旱对4种植被水分利用效率的累积效应强度主要为正效应,但有14.56%的草地和3.82%的农田的累积效应强度为负效应,西部草地地处高海拔降水充沛温度较低区域,干旱的发生会改变入射太阳辐射强度,减弱了该地区植被的碳吸收能力^[42],高山生态系统中的草地根系较浅,可能对水热稀缺的叠加状态非常敏感^[43],遭遇干旱时植被的总初级生产力下降快于蒸散发可能导致了植被水分利用效率的快速上升。而北部的农田区域处于沙漠边缘,长期受到水分胁迫对干旱已具有强烈的记忆效应,短期干旱很难对植被的总初级生产力和蒸散发产生较大程度的变化^[44]。因此这些区域的草地

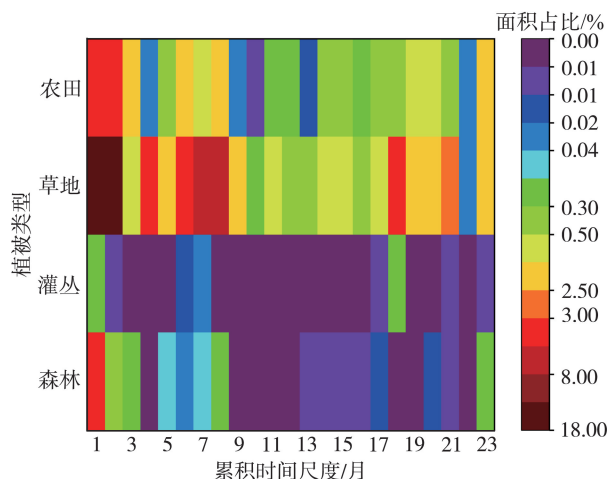


图5 不同植被类型的累积时间尺度占比

Fig.5 Percentage of cumulative time scales of different vegetation types

表2 不同植被类型的累积效应强度占比

Table 2 Percentage of cumulative effect intensity of different vegetation types

效应类型	累积效应强度占比/%			
	森林	灌丛	草地	农田
正效应	6.21	0.21	59.70	15.40
负效应	0.10	0.00	14.56	3.82
总计	6.31	0.21	74.26	19.22

和农田在遭遇干旱时,能够通过调整自身结构和生理来提高水分利用效率以应对干旱胁迫^[45]。

3.4 干旱对不同水分条件下植被水分利用效率的累积效应

干旱对植被水分利用效率的累积效应与水分平衡条件之间存在密切联系,图6为年均 SPEI 与累积效应的关系。可见,累积时间尺度均值与年均 SPEI 呈线性负相关,表明水分供应越充足,干旱对植被水分利用效率的累积时间尺度越短。干旱对较干旱地区 ($I_{SPEI} \leq 0.50$) 的植被水分利用效率具有 10 月以上的累积时间尺度,对年均水分条件处于正常 ($-0.50 < I_{SPEI} \leq 0.50$) 区域的植被水分利用效率的累积时间尺度分布在 3 ~ 12 月。当年均 SPEI 值处于 0.80 ~ 0.40 时, R_{max} 均值为负,其绝对值随着 SPEI 的增加而减小。随着年均 SPEI 值从 -0.50 增加 0.30, R_{max} 呈下降趋势,如若年均 SPEI 值在继续增加, R_{max} 将随之增加。总之, SPEI 值越低,累积时间尺度越长,干旱对植被水分利用效率的负效应也越强,当 SPEI 值高于临界值 0.30 后,累积时间尺度越来越短,干旱对植被水分利用效率的正效应不断加强。

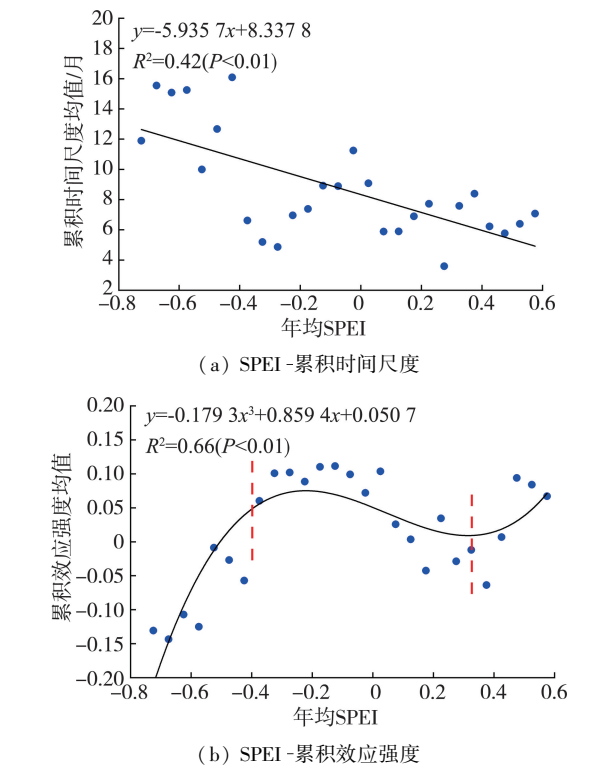


图6 年均 SPEI 与累积效应的关系

Fig. 6 Relationship between annual average SPEI and cumulative effects

4 讨论

以往的研究多基于 NDVI、总初级生产力等植被生长指标来探讨干旱对植被生长的累积影响,忽略

了干旱对植被蒸腾作用和土壤蒸发的直接影响,以及水分可用性对植被光合作用的间接影响^[41]。植被水分利用效率综合考虑了植被的生理过程(以植被总初级生产力表示)和物理过程(以蒸散发表示),使得植被水分利用效率能不同程度地响应干旱。本文研究结果表明,在 1 ~ 2 月、6 ~ 8 月和 19 ~ 24 月的不同累积时间尺度上,累积水分亏缺均会对黄河流域的植被碳水过程产生一定程度的影响(图 4)。表明干旱对不同植被水分利用效率在不同水文气候条件下的累积效应响应存在差异。植被水分利用效率是由植被的生物和物理过程共同决定的,气候因子的差异导致了植被总初级生产力和蒸散发对干旱的响应差异,这种差异影响了不同区域的植被水分利用效率与干旱关系。在干旱半干旱地区,陆地生态系统通常主要受制于水分的可用性,植被水分利用效率的变化主要是由植被总初级生产力的变化引起的,而在湿润半湿润地区,短波太阳辐射是主要的限制因素,植被水分利用效率的变化主要是由蒸散发的变化引起的^[41]。已有研究表明,草地总初级生产力对干旱的响应快于森林^[46],尽管干旱对东南区域的森林总初级生产力的影响存在较强时间尺度的滞后,但是区域常年水分供应充足,干旱发生时仍有一定数量的土壤水分用于植被生长和土壤蒸发,导致了植被水分利用效率对短期干旱就能做出较强的响应,但是一旦干旱期结束,这些潮湿地区的植被可以迅速恢复到以前的状态^[47]。对于草地,研究发现湿润半湿润地区的累积效应短于干旱半干旱区,可能是干旱半干旱区的草地长期处于水分胁迫的环境,为适应水分胁迫,进化出可以减少水分流失,呼吸消耗和光合作用的生理机制^[46],因而短期的水分胁迫不足以对植被水分利用效率产生重大影响。但需要说明的是,尽管这些区域植被已能适应较长持续时间的干旱,但是这种干旱持续加剧可能会对植被生长产生不可逆的影响^[16]。此外,在黄河流域中游陕北黄土高原区域发现草地的短期累积效应,可能是大规模的生态恢复加上干旱的发生会加剧植被更高程度的蒸散发消耗,加快了植被水分利用效率对干旱的响应。北部的河套平原的农田与南部的渭河平原农田均表现出较强的累积效应尺度,可能是农业活动的实施(例如灌溉、施肥)改变了农田水分利用效率对干旱的敏感性。本文的研究结果能帮助管理者更好地了解植被在受到干旱胁迫时的用水策略,并为生态系统水管理提供理论依据。

5 结论

a. 黄河流域多年蒸散发均值呈东高西低的分

布局,多年植被总初级生产力均值与多年植被水分利用效率均值分布格局基本一致,自北向南递增。4种植被类型中,森林的总初级生产力、蒸散发和水分利用效率均为最高,其次是农田的总初级生产力、蒸散发和水分利用效率,灌丛的蒸散发和草地的蒸散发相近,但灌丛总初级生产力最低,导致灌丛水分利用效率低于草地水分利用效率。

b. 1982—2018年,黄河流域的植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率均呈显著上升趋势。森林的年际水分利用效率呈下降趋势,灌丛、草地和农田的年际水分利用效率均为正,其中农田的年际增速最快。全流域超过90%区域的植被总初级生产力和蒸散发呈上升趋势,约84.38%区域的植被水分利用效率呈上升趋势。

c. 干旱对黄河流域58.48%区域的植被水分利用效率表现出累积效应,累积时间尺度的平均值为7.26月。总体上,累积时间尺度呈现东低西高的分布格局,与累积效应强度空间分布格局相似。干旱对同一种植被的累积时间尺度因气候条件等因素的不同而存在差异。干旱对4种植被类型的水分利用效率的累积效应强度表现主要为正,对14.56%的草地和3.82%的农田的累积效应强度为负效应。

d. 年均SPEI与累积时间尺度均值呈线性负相关,干旱对较干旱地区的植被水分利用效率具有10个月以上的累积时间尺度,对年均水分条件正常区域的植被水分利用效率的累积时间尺度范围为3~12月。随着SPEI增加到-0.40,累积效应强度相应增加,SPEI继续增加到0.30时累积效应强度呈下降趋势。

参考文献:

[1] DIFFENBAUGH N S, SWAIN D L, TOUMA D. Anthropogenic warming has increased drought risk in California[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(13): 3931-3936.

[2] 薛联青,张竞楠,刘晓群,等.基于改进的综合气象干旱指数的洞庭湖流域干旱时空特征[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1): 1-6. (XUE Lianqing, ZHANG Jingnan, LIU Xiaoqun, et al. Spatial and temporal patterns of droughts in Dongting Lake watershed based on improved meteorological drought composite index[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2014, 42(1): 1-6. (in Chinese))

[3] AHMADI B, MORADKHANI H. Revisiting hydrological drought propagation and recovery considering water quantity and quality[J]. *Hydrol Process*, 2019, 33(10): 1492-1505.

[4] REICHSTEIN M, TENHUNEN J D, ROUPSARD O, et

al. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(10): 999-1017.

[5] PONTON S, FLANAGAN L B, ALSTAD K P, et al. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 294-310.

[6] 郑丽虹,刘懿,任立良,等.黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. *水资源保护* 2022, 38(3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 87-95. (in Chinese))

[7] 冯怡,薛联青,张敏,等.基于两种SPEI序列的淮河流域干湿特征变化[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 35-40. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 35-40. (in Chinese))

[8] 栗晓玲,褚江东,张特,等.西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))

[9] 曹永强,李可欣,任博,等.基于SPEI的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5): 28-36. (in Chinese))

[10] 解晗,同小娟,李俊,等.2000—2018年黄河流域生长季NDVI、EVI变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 1-14. (XIE Han, TONG Xiaojuan, LI Jun, et al. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000-2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 1-14. (in Chinese))

[11] 肖祖香,朱双,罗显刚,等.三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))

[12] 曹银轩,黄卓,徐喜娟,等.黄土高原植被日光诱导叶绿素荧光对气象干旱的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33

- (2):457-66. (CAO Yinxuan, HUANG Zhuo, XU Xijuan, et al. Responses of solar-induced chlorophyll fluorescence to meteorological drought across the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33 (2): 457-466. (in Chinese))
- [13] 程曼,王让会,薛红喜,等. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6):1-7. (CHEN Man, WANG Ranghui, XUE Hongxi, et al. Effects of drought on ecosystem net primary production in northwestern China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6):1-7. (in Chinese))
- [14] ANDEREGG W R L, KONINGS A G, TRUGMAN A T, et al. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought [J]. Nature, 2018, 561 (7724): 538-541.
- [15] WU Xiuchen, LIU Hongyan, LI Xiaoyan, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere [J]. Global Change Biology, 2018, 24(1):504-516.
- [16] WEI Xiaonan, HE Wei, ZHOU Yanlian, et al. Global assessment of lagged and cumulative effects of drought on grassland gross primary production [J]. Ecological Indicators, 2022, 136:108646.
- [17] ZHAO Anzhou, YU Qiuyan, FENG Lili, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261:110214.
- [18] 崔茜琳,何云玲,李宗善. 青藏高原植被水分利用效率时空变化及与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6):1525-32. (CUI Xilin, HE Yunling, LI Zongshan. Spatial-temporal variation of vegetation water use efficiency and its relationship with climate factors over the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6):1525-1532. (in Chinese))
- [19] 邹杰,丁建丽,秦艳,等. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9):145-152. (ZOU Jie, DING Jianli, QIN Yan, et al. Response of water use efficiency of Central Asia ecosystem to drought based on remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9):145-152. (in Chinese))
- [20] PEI Tingting, HOU Qingqing, CHEN Ying, et al. Vegetation in arid areas of the Loess Plateau showed more sensitivity of water-use efficiency to seasonal drought[J]. Forests, 2022, 13(5):634.
- [21] JI Yadong, LI Yi, YAO Ning, et al. The lagged effect and impact of soil moisture drought on terrestrial ecosystem water use efficiency [J]. Ecological Indicators, 2021, 133:108349.
- [22] 牛玉国,王煜,李永强,等. 黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障布局 and 措施研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(8):1-6. (NIU Yuguo, WANG Yu, LI Yongqiang, et al. Water security layout for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2021, 43(8):1-6. (in Chinese))
- [23] 黎云云,畅建霞,樊晶晶,等. 气候和土地利用变化下黄河流域农业干旱时空演变及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19):84-93. (LI Yunyun, CHANG Jianxia, FAN Jingjing, et al. Agricultural drought evolution characteristics and driving mechanisms in the Yellow River Basin under climate and land use changes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19):84-93. (in Chinese))
- [24] LIANG Shunlin, ZHANG Xiaotong, XIAO Zhiqiang, et al. Global Land Surface Satellite (GLASS) products: algorithms, validation and analysis [M]. Singapore: Springer Science & Business Media, 2013.
- [25] YU Tao, SUN Rui, XIAO Zhiqiang, et al. Estimation of global vegetation productivity from Global Land Surface Satellite Data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2):327.
- [26] SONG Lisheng, LIU Shaomin, KUSTAS William P, et al. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 219:72-88.
- [27] GUO Limai, SHAN Nan, ZHANG Yongguang, et al. Separating the effects of climate change and human activity on water use efficiency over the Beijing-Tianjin Sand Source Region of China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 690:584-595.
- [28] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [29] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. CRU 产品在中国大陆的干旱事件时间性效用评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(2):112-120. (WEI Linyong, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Utility assessment of CRU products for temporality of drought events in mainland China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):112-120. (in Chinese))
- [30] SHI Xiaoliang, CHEN Fei, DING Hao, et al. Assessing vegetation ecosystem resistance to drought in the middle reaches of the Yellow River Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(7):4180.
- [31] ZHAO Anzhou, WANG Dongli, XIANG Kaizheng, et al. Vegetation photosynthesis changes and response to water constraints in the Yangtze River and Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143:109331.
- [32] 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.
- [33] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J].

- Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945, 13(3):245-259.
- [34] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [35] PENG Jie, WU Chaoyang, ZHANG Xiaoyang, et al. Satellite detection of cumulative and lagged effects of drought on autumn leaf senescence over the Northern Hemisphere[J]. Global Change Biology, 2019, 25(6): 2174-2188.
- [36] CHANG Xiaoge, WANG Zhihui, WEI Fengyuan, et al. Determining the contributions of vegetation and climate change to ecosystem water use efficiency variation over the last two decades on the Loess Plateau, China[J]. Forests, 2021, 12(11):1442.
- [37] ZU Jiaxing, ZHANG Yangjian, HUANG Ke, et al. Biological and climate factors co-regulated spatial-temporal dynamics of vegetation autumn phenology on the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 69:198-205.
- [38] BOWRING S P K, MILLER L M, GANZEVELD L, et al. Applying the concept of "energy return on investment" to desert greening of the Sahara/Sahel using a global climate model[J]. Earth System Dynamics, 2014, 5(1): 43-53.
- [39] PONCE-CAMPOS G E, MORAN M S, HUETE A, et al. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions [J]. Nature, 2013, 494(7437): 349-352.
- [40] 罗丹丹,王传宽,金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4333-4343. (LUO Dandan, WANG Chuankuan, JIN Ying. Stomatal regulation of plants in response to drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4333-4343. (in Chinese))
- Applied Ecology, 2019, 30(12): 4333-4343. (in Chinese))
- [41] LIU Yibo, XIAO Jingfeng, JU Weimin, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 13799.
- [42] TESFAYE S, TAYE G, BIRHANE E, et al. Spatiotemporal variability of ecosystem water use efficiency in Northern Ethiopia during 1982-2014 [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:126863.
- [43] KARNIELI A, AGAM N, PINKER R T, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations [J]. Journal of Climate, 2010, 23(3): 618-633.
- [44] DE KEERSMAECKER W, LHERMITTE S, TITS L, et al. A model quantifying global vegetation resistance and resilience to short-term climate anomalies and their relationship with vegetation cover[J]. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(5): 539-548.
- [45] KATUL G G, PALMROTH S, OREN R A M. Leaf stomatal responses to vapour pressure deficit under current and CO₂-enriched atmosphere explained by the economics of gas exchange[J]. Plant Cell and Environment, 2009, 32(8): 968-979.
- [46] LIU Yangyang, ZHOU Ronglei, WEN Zhongming, et al. Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones[J]. Ecological Indicators, 2021, 130:108146.
- [47] VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): 52-57.

(收稿日期:2022-07-30 编辑:王芳)

(上接第 25 页)

- [21] 陆堃,毛劲乔,田明明,等. 基于耦合随机排序 SCE 算法的多目标生态调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 53-61. (LU Kun, MAO Jinqiao, TIAN Mingming, et al. SCE algorithm coupled with stochastic ranking-based study on multi-objective ecological operation of reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(7): 53-61. (in Chinese))
- [22] 要震,许继平,孔建磊,等. 基于 GA-Elman 的河流水位预测方法研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 34-37. (YAO Zhen, XU Jiping, KONG Jianlei, et al. Prediction of river water level by GA-Elman model [J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 2018, 35(9): 34-37. (in Chinese))
- [23] PARK E. Ageostatistical evolution strategy for subsurface characterization; theory and validation through hypothetical two-dimensional hydraulic conductivity fields [J]. Water Resources Research, 2020, 56(3): e2019WR026922.
- [24] TIKHAMARINE Y, SOUAG-GAMANE D, AHMED A N, et al. Rainfall-runoff modelling using improved machine learning methods: harris hawks optimizer vs. particle swarm optimization [J]. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125-133.
- [25] 黄显峰,吴志远,李昌平,等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 1-7. (in Chinese))
- [26] XU Yuanhao, HU Caihong, WU Qiang, et al. Research on particle swarm optimization in LSTM neural networks for rainfall-runoff simulation [J]. Journal of Hydrology, 2022, 608: 1-15.

(收稿日期:2022-5-30 编辑:王芳)