

黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱 水分亏缺的响应

薛联青^{1,2}, 王文壮¹, 刘远洪¹, 韩强¹, 杨明杰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高精度分层土壤含水量数据分析了2001—2020年黄河流域生长季总初级生产力时空分布和变化特征, 量化了流域不同深度土壤湿度之间的相关关系, 探究了不同植被类型在生长季的总初级生产力对土壤连续水分亏缺事件的响应关系。结果表明: 黄河流域总初级生产力空间上呈东高西低、南高北低的分布特征, 生长季耕地累积总初级生产力最大、林地次之、草地最小, 研究期内流域总初级生产力整体呈上升趋势, 耕地相对增速最大、草地次之、林地最小; 流域土壤湿度在空间和时间上均有显著差异, 表层土壤含水量波动对深层土壤含水量的影响随深度增加而减小, 林地和耕地表层与深层土壤含水量的相关性远高于草地; 流域草地和耕地总初级生产力对土壤水分的深度敏感区间为0~40 cm, 林地的深度敏感区间为0~100 cm, 在深度敏感区间内, 随着土壤连续水分亏缺天数的增加, 草地和耕地总初级生产力依次经历短暂平稳、加速下降、降速趋缓的变化过程, 而林地总初级生产力则表现出短暂下挫、长时间平稳、加速下降的变化特征。

关键词: 总初级生产力; 土壤含水量; 持续性干旱; 水分亏缺; 黄河流域

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0044-08

Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin // XUE Lianqing^{1,2}, WANG Wenzhuang¹, LIU Yuanhong¹, HAN Qiang¹, YANG Mingjie¹ (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 data on the gross primary productivity (GPP) of vegetation and high-precision stratified soil moisture content, the spatiotemporal distribution and change characteristics of GPP during the growing season in the Yellow River Basin from 2001 to 2020 were analyzed. The correlation between soil moisture at different depths in the basin was quantified, and the response of GPP of different vegetation types to continuous soil moisture deficit events during the growing season was investigated. The results indicate that GPP in the Yellow River Basin exhibits a spatial distribution characterized by higher in the east and south, and lower in the west and north. During the growing season, the cumulative GPP is highest in cropland, followed by woodland and grassland. There is an overall increasing trend of GPP in the basin in the study period, with cropland showing the highest relative growth rate, followed by grassland and woodland. There are significant spatial and temporal differences in soil moisture across the basin. The influence of surface soil moisture fluctuation on deep soil water content diminishes with increasing depth, and the correlation between surface and deep soil moisture contents in woodland and cropland is much higher than that in grassland. The sensitive depth range of GPP to soil moisture is 0 to 40 cm in grassland and cropland in the Yellow River Basin, while it extends to 0 to 100 cm in woodland. Within the depth sensitive zones, as the duration of continuous soil moisture deficit increases, GPP of grassland and cropland undergoes a process of brief stability, followed by an accelerated decline, and then a decelerated decline. In contrast, GPP of woodland shows a brief decline, followed by a process of prolonged stability, and then an accelerated decline.

Key words: gross primary productivity; soil moisture content; persistent drought; water deficit; Yellow River Basin

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206804); 新疆生产建设兵团科技合作项目(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

干旱是一种常见的自然灾害,广义上指自然和人为因素导致的水分异常亏缺,进而造成生态及经济损失,或是水量不足以满足生物生存及社会经济发展的现象^[1-2]。受全球气候变化的影响,近年来干旱的发展呈加剧趋势,对世界农业生产、水资源利用和生态环境状况产生了深刻的影响^[3-5]。植被作为连接大气、水体、土壤的重要纽带,参与并影响着环境能量、水量和动量的交换过程^[6],在陆地生态系统中占据着核心地位,是研究干旱形成机理及生态系统变化的重要指示因子^[7]。土壤水分与植被功能间关系密切,是大部分陆面植被的最主要水分来源,研究表明土壤的连续水分亏缺是引发干旱的最直接原因,而生长季的水分供应对植被全年生长的影响则更为深远^[8]。因此,通过研究植被功能与土壤水分的关系,尤其是二者在生长季的响应模式,有助于更好地理解 and 预测干旱的影响,为干旱防治提供科学依据。

目前,有关土壤含水量波动与植被生长趋势变化的研究已成为学界普遍关注的热点问题^[7,9]。随着遥感技术的日益成熟,发展出了众多基于遥感数据构建的植被生长指数,常用的有归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[10]、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)^[11]、温度植被指数(temperature vegetation index, TVI)^[12]、日光诱导叶绿素荧光(sun-induced chlorophyll fluorescence, SIF)指数^[13]、总初级生产力、净初级生产力^[14-15]等。在现有研究中,根据植被盖度构建的植被功能指数(如 NDVI)占大多数,但植被盖度不能较好地跟踪植被实际生态功能属性,且受季节因素影响较大。大量研究表明,植被盖度对于土壤水分波动的响应显现出明显的时滞效应^[11,16],这与植被应对水分胁迫的生理机制密切相关^[17]。因此,有学者选择能够即时反映植被实际生理属性的参数表征植被功能。Ni 等^[13]的研究表明,SIF 指数比 NDVI 等能够更迅速地响应植被水分亏缺状态,但目前 SIF 指数的时间分辨率多为 8 d 乃至更长^[18]。受限于植被指标的即时性和观测周期,国内外学者对于植被生长与土壤水分响应关系的研究在时间尺度上往往不够精细,多采用月尺度和旬尺度。与 NDVI 等植被盖度指标不同,总初级生产力表征通过光合作用将碳固定在生态系统中的能力,可以直接反映植被生长状况和生产力,且时间分辨率可达日尺度^[19],被认为是进行日尺度研究的最佳植被指标之一。

国内学者在黄河流域的植被功能-土壤水分响应关系研究中,已经明确了二者存在相关性^[7,20],但植被功能与土壤水分之间响应机制复杂,涉及土壤

水分的动态变化、水分波动对植被生产力乃至生态系统整体健康的作用,以及植被对土壤水分的调节过程,目前学界对土壤水分亏缺如何影响植被功能的定量研究较为缺乏。本文在以往研究的基础上,探索了黄河流域 2001—2020 年生长季不同植被类型总初级生产力对土壤连续水分亏缺事件的响应关系(文中总初级生产力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),揭示了土壤含水量变化对植被生长的影响,对干旱监测及生态保护具有一定的意义,可为黄河流域生态建设与管理提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于中国最西部的巴颜喀拉山区,全长 5464 km,是中国第二长河,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 省区,最终流入渤海。黄河流域(图 1)位于 32°10'N ~ 41°50'N、

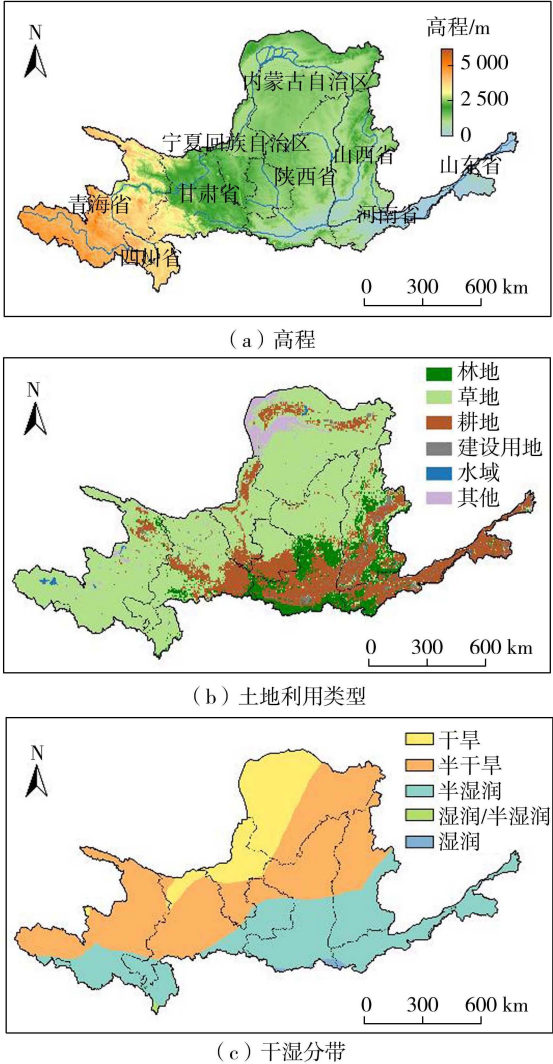


图 1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

95°53'E ~ 119°05'E, 横跨我国东中西三大区域, 总面积为 79.5 万 km² (其中内流面积 4.2 万 km²), 占中国国土面积的 8.3%^[21]。流域内大部分区域属于干旱和半干旱区, 年降水量不足 500 mm, 降水稀少且分布不均, 水资源短缺严重, 是中国干旱频发地之一^[22]。流域内雨养型植被数量较少, 植物水分的主要来源为土壤水、地下水及人工灌溉^[23-24]。黄河流域植被功能对干旱响应具有独特的地理和气候特点, 开展相关研究对于理解生态系统的干旱适应机制、促进区域水资源管理和生态保护具有重要的科学和实践价值。

1.2 研究数据与处理

本文采用的总初级生产力数据来自中国区域 PML-V2 陆地蒸散发与总初级生产力数据集, 从国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 获取。数据原始时空分辨率为 1 d 和 500 m。该数据集选用中国 26 个涡动通量站实测数据进行模型校正, 覆盖国内 9 种典型植被功能型, 在中国区域的适用性较之全球同类型产品更佳^[19]。为便于后续计算, 对原数据集进行格式转换、投影变换、裁剪, 并重采样至 0.05°, 汇总得到研究区日尺度总初级生产力数据。

为了判定土壤水分亏缺情况, 本文使用了基于站点观测的中国 1 km 土壤含水量日尺度数据集, 数据集从国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 免费获取。经全球 2 346 个地面观测站点验证, 结果表明该数据集具有较好的精度, 能够满足大流域范围的土壤含水量分布特征分析^[25]。基于以往研究, 本文将土壤分为表层、中层和深层, 对应的各层土壤深度分别为 0 ~ 10 cm、>10 ~ 40 cm、>40 ~ 100 cm, 同时采用最近邻算法将分层土壤含水量数据集重采样至与总初级生产力数据相同的空间分辨率。

MODIS 土地覆盖类型产品 (MCD12Q1) 来源于美国国家航空航天局, 数据分辨率为 500 m, 涵盖了 2001—2020 年的数据。因其在全球范围内具备较好的识别精度, 被广泛应用于生态环境监测及演变研究。本文以植被生态系统作为研究对象, 将土地覆被类型重新分类为林地、草地和耕地 3 种植被类型 (图 1(b))。图 1(c) 干湿分带数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心。

2 研究方法

根据全年总初级生产力主要贡献月份确定生长季长度。将一年中各连续月份的总初级生产力求和, 将求和结果超过全年总初级生产力 75% 的最短

连续月份定义为当年的生长季, 选取所有年份计算结果中出现频率最高的月份组合作为流域常年生长季。

Theil-Sen 趋势分析^[26]和 Mann-Kendal (M-K) 检验^[27]相结合, 被广泛应用于各类研究的趋势分析。本文在 Theil-Sen 法计算出总初级生产力时间序列变化趋势基础上, 采用 M-K 法检验该变化趋势的显著性。文中置信水平 α 取 0.05, 即 $|Z| \geq 1.96$ 表示通过显著性检验。

Z-score 标准化是一种将数据转换为标准正态分布的方法, Z-score 标准化值表示原始数据距离平均水平的偏移程度, 正负号表示偏移的方向。本文根据总初级生产力的偏移量估计生产力损失, 量化连续水分亏缺对生态系统的影响。

统计 2001—2020 年生长季研究区内各网格点每日各层土壤湿度的 33% 分位数, 将其定义为土壤水分亏缺阈值, 低于阈值的网格点视作发生水分亏缺。只考虑在生长季内发生的首次土壤水分胁迫事件, 以初次发生水分亏缺格点的连续水分亏缺天数为横轴, 亏缺终止日总初级生产力偏移量为纵轴, 绘制散点图。使用不受数据分布形态影响的孤立森林算法^[28]去除异常值, 并沿横轴分列, 将每一列的 99% 分位数作为边界点, 使用限制性立方样条回归拟合散点云的边界约束线^[29-30], 进而得到最理想状态下横纵坐标之间可能存在的临界关系。

3 结果与分析

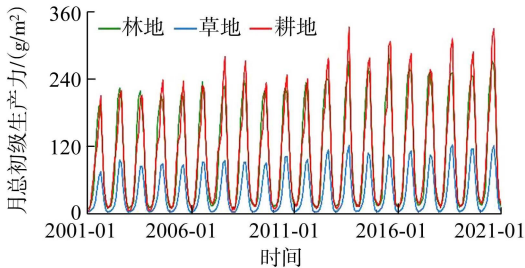
3.1 流域常年生长季划分

依次计算各年总初级生产力的主要贡献月份, 得到研究区 2001—2020 年逐年生长季月份组合情况。除 2002 年和 2015 年为 4—8 月外, 其余年份均为 5—9 月, 即黄河流域 2001—2020 年总初级生产力的主要贡献月份为 5—9 月, 因此将这 5 个月份定义为流域的常年生长季月份。

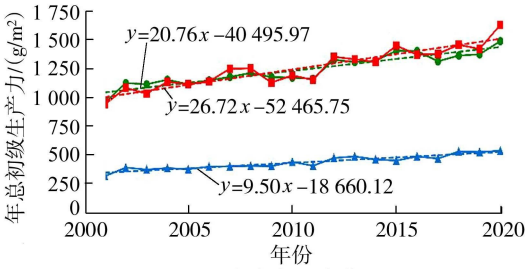
3.2 总初级生产力空间分布和时间变化特征

2001—2020 年流域生态系统不同植被类型 (林地、草地和耕地) 月总初级生产力均呈现出较明显的季节模式 (图 2(a)), 即 1—3 月值偏低, 4 月后迅速攀升, 7—8 月达到全年峰值, 9 月后进入下降阶段。此外, 林地和耕地的月总初级生产力在整个时间序列上重合度较高, 且显著高于同期草地生产力水平。对流域不同植被类型年总初级生产力的变化趋势进行分析, 发现林地、草地和耕地均呈明显上升趋势, 并在 2020 年达到序列最大值, 分别为 1 495.74、541.18、1 637.19 g/m² (图 2(b)), 年均增

长率分别为2.8%、3.4%、3.7%，20 a 累计增长率分别为55.3%、68.9%、73.1%。这些变化的产生可能与近年来区域气候变暖、流域植树造林和土地荒漠化治理等生态措施有关^[31-32]。



(a) 季节变化



(b) 年际变化

图2 总初级生产力季节和年际变化

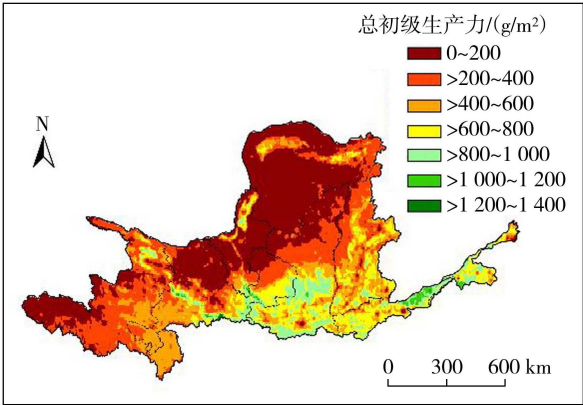
Fig.2 Seasonal and interannual variations of GPP

2001—2020 年流域生长季的年均总初级生产力空间分布如图 3 (a) 所示。流域生长季总初级生产力在空间分布上差异显著,主要特征为东高西低、南高北低。生长季总初级生产力高值主要出现在甘肃东南部(兰州至天水一线)、陕西中部(关中平原)和河南东北部(华北平原)。相比之下,低值主要出现在甘肃东北部、宁夏大部、陕西北部、内蒙古高原南部(毛乌素沙地)和青藏高原上游。

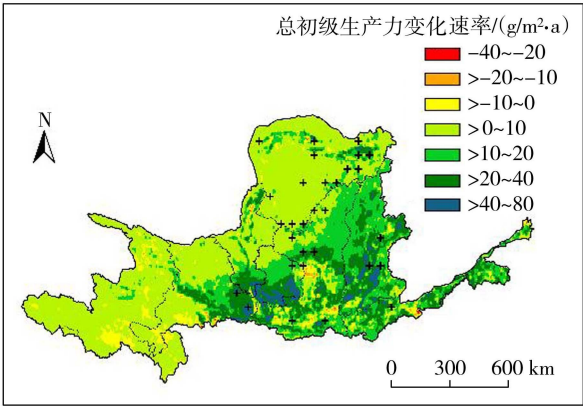
采用 Theil-Sen 法对流域生长季总初级生产力进行趋势分析,结合 M-K 法对其变化趋势做显著性检验,结果如图 3 (b) 所示,图中十字符号表示时间序列的变化趋势通过 $p<0.05$ 显著性水平。结果表明,2001—2020 年黄河流域大部分地区总初级生产力呈上升趋势,仅在青海和甘肃南部、陕西中部以及河南北部零星区域有小幅下降。同时,流域东南部增长水平普遍高于西北部,增长幅度最大的区域为甘肃东南部和陕西中部。

3.3 流域生长季土壤含水量状况

根据黄河流域 2001—2020 年逐日土壤含水量数据计算出的生长季土壤日含水量随时间演变情况如图 4 所示,图中阴影区域的宽度代表流域土壤日含水量的空间变异程度。从图 4 可以看出,黄河流域土壤含水量在日尺度和年尺度上存在显著差异,且随着深度的增加,土壤含水量随时间的波动幅度减弱,表明随着深度增加,地表过程对土壤含水量的



(a) 多年均值分布



(b) 变化趋势

图3 生长季总初级生产力空间分布特征及变化趋势

Fig.3 Spatial distribution characteristics and trends of GPP during growing season

影响逐渐减小。

尽管表层土壤含水量数据波动程度较大,但观察不同土层每日土壤含水量的均值曲线可见,三者表现出明显的同步变化趋势。进一步分析不同植被类型表层与中层和表层与深层土壤含水量相关关系对应的面积占比情况(相关系数区间设定为 0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1.0),结果见表 1。从表 1 可见,3 种植被类型中,80% 以上面积的表层与中层土壤含水量相关系数大于 0.6,其中,林地为 98.6%,草地为 81.9%,耕地为 98.2%,此外,3 种植被类型的表层与中层土壤含水量相关性均高于表层与深层土壤含水量相关性。在所有植被类型中,草地表层与深层土壤含水量之间的相关性最小,仅有 48.4% 的面积相关性大于 0.4,而在林地和耕地中这一数值分别为 91.6% 和 91.7%。造成这一现象的原因可能为:①为适应频繁的干扰,例如放牧和火灾,大量草地植被进化出浅根系统,在放牧或烧毁后能够快速重新生长^[33],使得表土层和深土层中缺乏水分交换的根系通道;②草原气候使其降水稀少但蒸发量大,水分难以渗透到深层土壤,进一步加剧了草地从表土层到深土层的含水量梯度差异^[34]。

表1 不同植被类型不同土层土壤含水量相关关系对应的面积占比

Table 1 Percentage of soil area corresponding to correlation between soil moisture content of different layers for different vegetation types

植被类型	土层	不同相关系数对应的土层面积占比/%				
		0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
林地	表层与中层	0	0.1	1.3	43.7	54.9
	表层与深层	1.2	7.2	78.5	13.1	0
草地	表层与中层	2.0	3.8	12.2	47.0	34.9
	表层与深层	19.1	30.1	46.4	1.8	0
耕地	表层与中层	0	0.1	1.7	29.0	69.2
	表层与深层	0.5	7.8	73.1	18.6	0

3.4 总初级生产力对土壤水分亏缺程度的响应关系

图5给出了植被生长季总初级生产力较历史同期水平的偏移量随不同土层连续水分亏缺天数的变化情况(图中 σ 为标准差)。从图5可以看出,随着土层深度的增大,不同植被类型连续水分亏缺的最大天数递增,这个变化规律可由土壤水分波动程度随深度递减的规律解释。表层土壤的水分亏缺状况可能因单场降水补给而终止,而随深度增加,土壤含水量受表层干扰程度降低,中层和深层土壤的水分

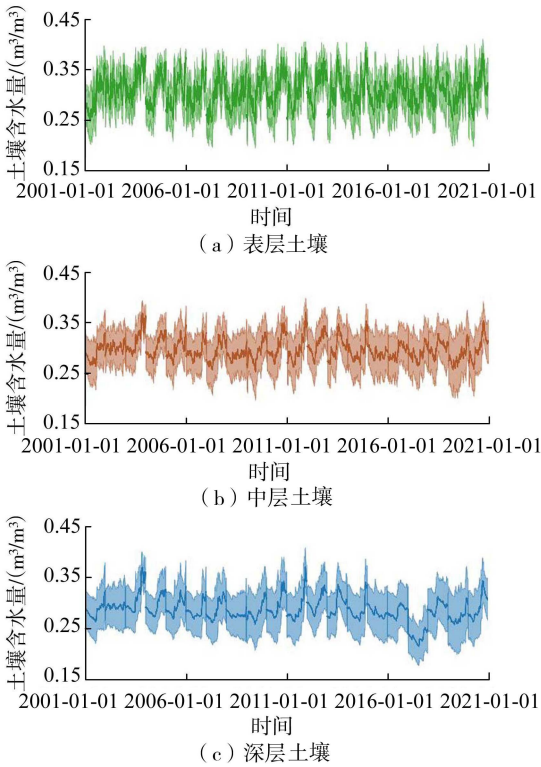


图4 生长季不同深度土壤日含水量随时间的变化
Fig.4 Temporal variation of average daily soil moisture content at different depths during growing season

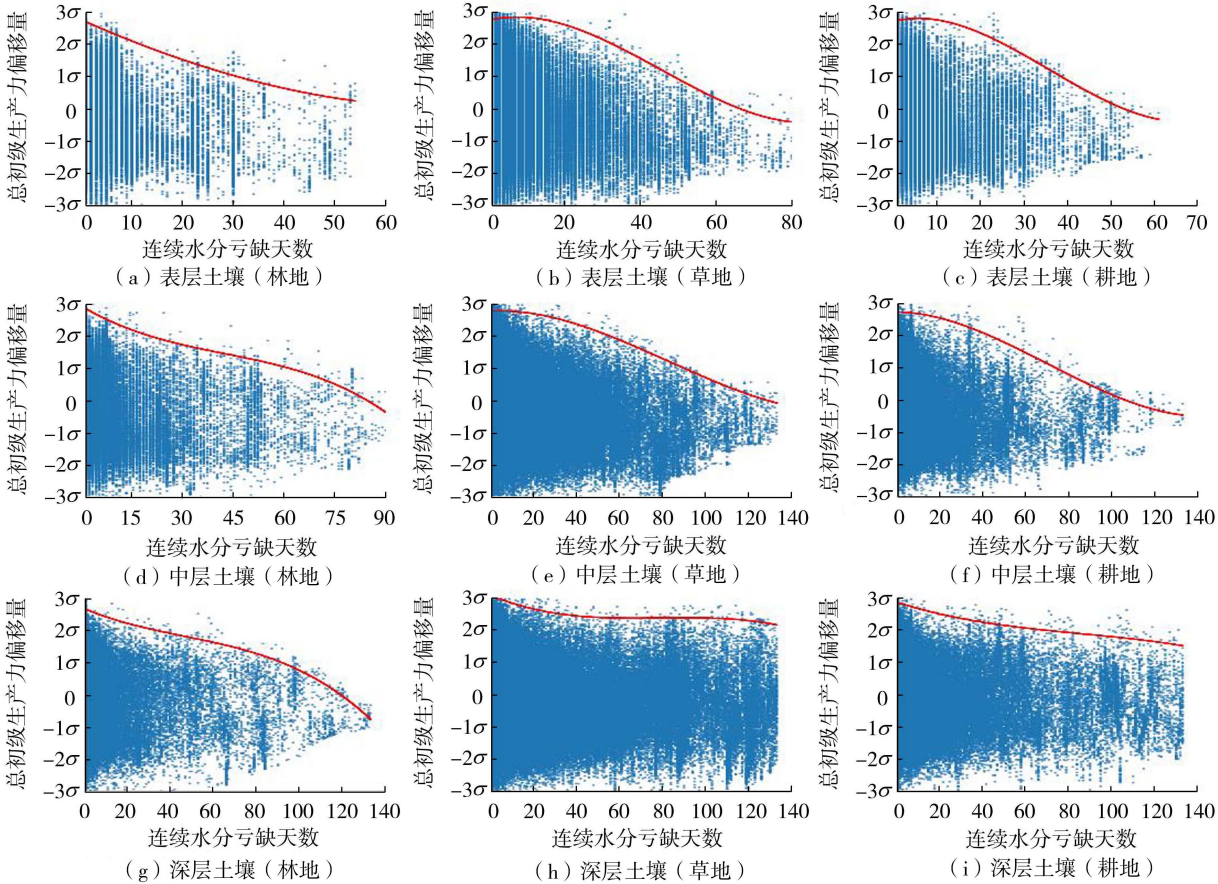


图5 生长季总初级生产力偏移量随土壤连续水分亏缺天数的变化

Fig.5 Variation of GPP offset to continuous soil moisture deficit days during growing season

亏缺状态较难被单一场次的小降水事件打破。从图5可以看出,表层土壤中,林地、草地、耕地发生连续水分亏缺最大天数分别为54、80和62天;中层土壤中,林地发生连续水分亏缺最大天数少于90天,而草地和耕地均不超过120天;深层土壤中,林地连续水分亏缺事件主要集中在100天之内,超过100天的事件点密度远小于草地和耕地。在3种土壤深度条件下,林地发生连续水分亏缺时间的最大天数均小于草地和耕地,相较于其他植被类型,林地覆盖下的土层含水量更难受到表层土壤成旱因素的影响,从而表现出更强的抗干旱性。

借助图5中的边界约束线,能够发现两个变量之间可能存在的临界关系^[35]。通过绘制不同植被类型总初级生产力偏移量-连续水分亏缺天数约束曲线,发现表层土壤中,林地总初级生产力偏移量随连续水分亏缺天数增加而下降,其趋势近似为一条直线;而草地和耕地则存在一个5至10天的短暂平台期,随后加速下降,并在临近各自最大连续水分亏缺天数时降速放缓。中层土壤中,林地总初级生产力偏移量下降趋势曲率变化显著,主要特征为前期15天下降趋势明显,约20天时趋势放缓,进入为期约40天的平台期,此时总初级生产力偏移量由初始的 3σ 降至 σ ,在60天时加速下降;草地和耕地总初级生产力偏移量下降过程与表层土壤中类似。深层土壤中,林地总初级生产力偏移量下降特征与中层土壤中一致,而草地和耕地总初级生产力的下降趋势较上一土层显著放缓,同时二者数据散点几乎布满整个图,在该深度范围内,草地和耕地总初级生产力所表现出的轻微下降趋势可能主要受到相邻土层含水量波动的影响。上述情况表明林地总初级生产力对深度为0~100 cm土壤含水量均表现出较高的敏感性,而草地和耕地总初级生产力的土壤含水量深度敏感区间为0~40 cm,这与3种植被类型的根区深度相吻合^[7]。

4 讨论

本文研究发现,植被对根区土壤含水量的波动表现出较强的敏感性,林地总初级生产力对土壤含水量的响应区间大于草地和耕地,不同植被对土壤水分亏缺的敏感程度也存在差异。而在土壤深度敏感区间内,植被生产力属性与土壤水分连续亏缺天数表现出了反“S”形临界关系曲线,即干旱初期植被功能几乎不下降甚至略有上升,干旱持续期间植被生产力加速下降,干旱结束前植被生产力仅小幅波动。这一现象与植被适应缺水的生理机制相吻合,可能是因为植被响应干旱是“渐进加突变”的过

程。干旱开始时,植物首先经历一个抵抗阶段,此时承受缺水且不偏离功能上限,该功能上限取决于观察的时空尺度以及物种的生理和物理限制;随着干旱加剧,植物和生态系统承受干旱的胁迫作用,使得植被通过关闭气孔、形成更小更厚的叶片、发展深根等“避热”行为以适应不利环境;对于长时期的干旱,植物可能会继续通过功能变化应对日益增加的干旱强度,或者在干旱强度的阈值水平上,其功能发生非线性突变,最终造成植被永久性功能损伤或死亡^[36]。本文研究结果为寻找植被响应土壤持续性水分亏缺的阈值提供了一种思路,通过在植被种类、气候类型、生长阶段等方面设置更精细的划分条件,结合统计学和试验方法,有望进一步完善植被功能响应干旱事件的模型机制,实现对植被因干旱导致的功能损失和恢复力的预测。

5 结论

a. 黄河流域植被总初级生产力年内存在明显的季节模式,主要贡献月份为5—9月,并在空间上呈现东高西低、南高北低的分布格局。在3种植被类型中,林地和耕地在生长季的总初级生产力相近,并显著高于草地。

b. 2001—2020年生长季,黄河流域超过90%区域的植被总初级生产力呈显著上升趋势。不同植被类型的总初级生产力相对增速由大到小依次为耕地、草地、林地。流域东南部总初级生产力增长水平普遍高于西北部,增长幅度最大的区域为甘肃东南部、陕西中部和河南东北部。

c. 黄河流域土壤含水量在日尺度和年尺度上均存在明显差异,不同深度土壤含水量间存在同步变化趋势,表层土壤水分的波动对深层土壤含水量的影响随着深度增加逐渐减小。3种植被类型中,草地仅有48.4%的面积表层与深层土壤含水量相关系数大于0.4,而林地和耕地相应的面积占比分别为91.6%和91.7%。

d. 草地和耕地总初级生产力对土壤水分的深度敏感区间为0~40 cm,林地总初级生产力对0~100 cm深度的土壤水分均表现出敏感性。生长季林地表现出的抗干旱性优于草地和耕地。在深度敏感区间内,随着根区深度土壤水分连续亏缺天数的增加,草地和耕地总初级生产力依次经历短暂平稳、加速下降、降速趋缓的变化过程,而林地总初级生产力则表现出短暂下挫、长时间平稳、加速下降的变化特征。

参考文献:

[1] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率

- 对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(4):32-41. (XUE Lianqing, XIAO Ying, LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):32-41. (in Chinese))
- [2] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护, 2023, 39(2):40-49. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):40-49. (in Chinese))
- [3] KANG H, SRIDHAR V, MAINUDDIN M, et al. Future rice farming threatened by drought in the Lower Mekong Basin [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):9383.
- [4] 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))
- [5] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):1-9. (in Chinese))
- [6] FOLEY J A, LEVIS S, COSTA M H, et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models [J]. Ecological Applications, 2000, 10(6):1620-1632.
- [7] 路洁, 王学风, 曹永强. 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4):7-14. (LU Jie, WANG Xuefeng, CAO Yongqiang. Effects of climate and human activities on vegetation variation in Liaoning Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4):7-14. (in Chinese))
- [8] JI Lei, PETERS A J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1):85-98.
- [9] WANG Cong, FU Bojie, ZHANG Lu, et al. Soil moisture-plant interactions: an ecohydrological review [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1):1-9.
- [10] 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 Xian'gang, 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))
- [11] SCHNUR M T, XIE Hongjie, WANG Xianwei. Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA [J]. Ecological Informatics, 2010, 5(5):400-409.
- [12] YAN Feng, QIN Zhihao, LI Maosong, et al. Progress in soil moisture estimation from remote sensing data for agricultural drought monitoring [C]//Proceedings of SPIE: Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VI. Stockholm: SPIE, 2006: 636601.
- [13] NI Zhuoya, HUO Hongyuan, TANG Shihao, et al. Assessing the response of satellite sun-induced chlorophyll fluorescence and MODIS vegetation products to soil moisture from 2010 to 2017: a case in Yunnan Province of China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(5/6):2278-2295.
- [14] WANG Tiejun, FRANZ T E, LI Ruopu, et al. Evaluating climate and soil effects on regional soil moisture spatial variability using EOFs [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5):4022-4035.
- [15] ZHANG Miao, YUAN Xing, OTKIN J A. Remote sensing of the impact of flash drought events on terrestrial carbon dynamics over China [J]. Carbon Balance and Management, 2020, 15(1):20.
- [16] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6):2128-2138. (ZHANG Chong, LEI Tianwang, SONG Dianxing. Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6):2128-2138. (in Chinese))
- [17] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought [J]. Science, 2020, 368(6488):266-269.
- [18] LI Xing, XIAO Jingfeng. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data [J]. Remote Sensing, 2019, 11(5):517.
- [19] HE Shaoyang, ZHANG Yongqiang, MA Ning, et al. A daily and 500 m coupled evapotranspiration and gross primary production product across China during 2000-2020 [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12):5463-5488.
- [20] 刘庚, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 黄土丘陵区不同植被土壤水分的分异性特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):83-88. (LIU Geng, NIU Junjie, ZHU Weixin, et al. Heterogeneous characteristics of soil moisture of different vegetation types in loess hilly regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6):83-88. (in Chinese))

Chinese))

[21] 王光谦,王思远,陈志祥. 黄河流域的土地利用和土地覆盖变化[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(9):1218-1222. (WANG Guangqian, WANG Siyuan, CHEN Zhixiang. Land-use land-cover changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Sciences), 2004, 44(9):1218-1222. (in Chinese))

[22] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in source region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):1-7. (in Chinese))

[23] LOU Dan, WANG Guojie, SHAN Chan, et al. Changes of soil moisture from multiple sources during 1988-2010 in the Yellow River Basin, China [J]. Advances in Meteorology, 2018, 2018:1950529.

[24] 王力,卫三平,张青峰,等. 榆神府矿区土壤-植被-大气系统中水分的稳定性同位素特征[J]. 煤炭学报,2010, 35(8):1347-1353. (WANG Li, WEI Sanping, ZHANG Qingfeng, et al. Isotopic characteristics of water within the soil-vegetation-atmosphere system in the Yushenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):1347-1353. (in Chinese))

[25] ZHENG Chaolei, JIA Li, ZHAO Tianjie. A 21-year dataset (2000-2020) of gap-free global daily surface soil moisture at 1-km grid resolution[J]. Scientific Data, 2023, 10(1):139.

[26] 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.

[27] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3):245-259.

[28] LIU F T, TING K M, ZHOU Zhihua. Isolation forest[C]// Proceedings of 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. Pisa: IEEE, 2008:413-422.

[29] BHASKARAN K, DOS-SANTOS-SILVA I, LEON D A, et al. Association of BMI with overall and cause-specific mortality:a population-based cohort study of 3.6 million adults in the UK [J]. The Lancet Diabetes & Endocrinology, 2018, 6(12):944-953.

[30] LI Delong, CAO Wenfang, DOU Yuehan, et al. Non-linear effects of natural and anthropogenic drivers on ecosystem services:integrating thresholds into conservation planning [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321:116047.

[31] 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.

[32] LI Congcong, ZHANG Yongqiang, SHEN Yanjun, et al. LUCC-driven changes in gross primary production and actual evapotranspiration in northern China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(6):e2019JD031705.

[33] MUELLER K E, TILMAN D, FORNARA D A, et al. Root depth distribution and the diversity-productivity relationship in a long-term grassland experiment [J]. Ecology, 2013, 94(4):787-793.

[34] MENG Tingting, SUN Pei. Variations of deep soil moisture under different vegetation restoration types in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):4957.

[35] GRUBB P J. Trade-offs in interspecific comparisons in plant ecology and how plants overcome proposed constraints[J]. Plant Ecology & Diversity, 2016, 9(1):3-33.

[36] MUNSON S M, BRADFORD J B, HULTINE K R. An integrative ecological drought framework to span plant stress to ecosystem transformation [J]. Ecosystems, 2021, 24(4):739-754.

(收稿日期:2023-09-20 编辑:施业)

Yuefu, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7):684-690. (in Chinese))

[39] 刘谦. VIC 大尺度陆面水文模型在中国区域的应用 [D]. 长沙:湖南大学, 2004.

[40] 李秀清. 基于 VIC 模型的丹江流域水文模拟及水资源管理对策 [D]. 西安:西北大学, 2021.

[41] 陈思. VIC 大尺度陆面水文模型在永定河流域的应用研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2018.

(收稿日期:2023-11-22 编辑:施业)

(上接第 34 页)

[37] 李荣磊,陈留美,邵明安,等. 黄土高原不同土质和植被类型下 Cl⁻ 运移特征及影响因素 [J]. 土壤学报, 2021, 58(5):1190-1201. (LI Ronglei, CHEN Liumei, SHAO Ming'an, et al. Cl⁻ transport and its influencing factors in soil as affected by soil texture and vegetation cover in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5):1190-1201. (in Chinese))

[38] 贾立华,赵长星,王月福,等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(7):684-690. (JIA Lihua, ZHAO Changxing, WANG