

DOI: 10.20103/j.stxb.202401240221

吴光明, 姜亮亮, 刘文利, 李奇锦. 中亚不同植被生产力对干旱事件的敏感性. 生态学报, 2024, 44(24): 11331-11346.

Wu G M, Jiang L L, Liu W L, Li Q J. Vegetation sensitivity analysis of different vegetation productivity to drought events in Central Asia. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11331-11346.

中亚不同植被生产力对干旱事件的敏感性

吴光明^{1,2}, 姜亮亮^{1,2,*}, 刘文利^{1,2}, 李奇锦^{1,2}

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 重庆师范大学地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331

摘要: 在全球变暖背景下, 干旱事件频发。亚洲中部干旱区的干旱事件频发引起植被退化问题日益严重, 对实现联合国土地退化“零增长”目标构成了严峻挑战。然而, 中亚植被生产力对干旱事件敏感性仍缺乏了解。基于此, 使用土地利用数据、ERA5-Land 和干燥指数等数据, 利用游程理论、敏感性计算以及提升回归树(BRT)模型等方法, 研究中亚植被生产力对干旱事件的敏感性, 揭示了 SPEI3—12 间干旱事件的基本特征以及干旱事件期间植被异常的时空变化, 使用 BRT 模型量化了干旱基本特征对植被敏感性的相对重要性。研究结果表明: (1) 随时间尺度增加, 除干旱间隔和干旱次数减少外, 其他干旱特征均逐渐增加, 尤其在半干旱、半湿润地区发生了更频繁, 严重程度更高的干旱事件, 干旱严重度在 SPEI12 时高达 25.11; (2) 随时间尺度变化, 植被初级生产力(GPP)异常值在 SPEI12 时低至-30, 其中在半干旱、半湿润地区的哈萨克斯坦西部、中亚中东部及南部土库曼斯坦东部, 受影响更明显。而 GPP 异常值在箱型图 SPEI3—12 间存在差异, 耕地出现异常负值中位数最低值, 稀疏植被 GPP 异常值波动变化最大; (3) 不同植被对干旱事件的敏感性随时间尺度增加而逐渐减少, 在中亚半干旱和半湿润地区, 尤其是耕地和稀疏植被表现出更高的敏感性。BRT 模型表明, 干旱严重程度是影响植被变化最重要因素, 在模型中, 草地和林地对 SPEI3—12 间干旱严重度的敏感性均值分别达到 37.41% 和 31.70%。因此, 了解植被生产力对干旱事件的敏感性, 尤其在生态脆弱地区, 将有助于为植被退化的防治提供决策参考。

关键词: 植被敏感性; 干旱事件; 不同植被类型; 游程理论; 中亚

Vegetation sensitivity analysis of different vegetation productivity to drought events in Central Asia

WU Guangming^{1,2}, JIANG Liangliang^{1,2,*}, LIU Wenli^{1,2}, LI Qijin^{1,2}

1 School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract: In the context of global warming, the frequency of drought events has increased. Frequent droughts in arid regions of Central Asia have intensified vegetation degradation, presenting a considerable challenge to meeting the United Nations “zero net land degradation” objective. However, the sensitivity of vegetation productivity in Central Asia to drought events remains poorly understood. To tackle this issue, the study utilized land use data, ERA5-Land data, and the aridity index. The sensitivity of vegetation productivity to drought events in Central Asia was investigated through methods including run theory, sensitivity calculation, and the Boosted Regression Tree (BRT) model. The fundamental characteristics of drought events over SPEI3—12 periods and the spatiotemporal variations of vegetation anomalies were identified. The sensitivity of different vegetation types to drought events was assessed and the relative importance of drought characteristics

基金项目: 国家自然科学基金(42201124); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2024NSCQ-LZX0064); 中国博士后科学基金(2023M740433); 重庆市研究生科研创新项目(CYS240366)

收稿日期: 2024-01-24; **采用日期:** 2024-10-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiang@cqnu.edu.com

on vegetation anomalies was quantified based on the BRT model. Findings indicate that with an expanding time scale, drought characteristics generally worsen, with the exception of intervals and frequencies of drought events. Particularly in semi-arid and sub-humid regions, drought events occurred more frequently and the severity remained high, with drought severity (SPEI12) reaching up to 25.11. With the time scale variation, the negative anomalies of Gross Primary Productivity (GPP) dropped to -30 in SPEI12 in semi-arid and semi-humid areas, notably impacting western Kazakhstan, central and eastern portions of Central Asia, and eastern Turkmenistan. There were differences in GPP anomalies between SPEI3 and SPEI12, with cropland showing the lowest negative median anomalies, and sparse vegetation exhibited the greatest fluctuation in GPP anomalies. The sensitivity of different vegetation types to drought events gradually decreased as the time scale expanded. In the semi-arid and semi-humid regions of Central Asia, croplands and sparse vegetation were more sensitive. The BRT model indicated that drought severity was the most important factor affecting vegetation changes. In the model, the mean sensitivity of grasslands and forests to drought severity between SPEI3—12 was 37.41% and 31.70%, respectively. Therefore, understanding the sensitivity of vegetation productivity to drought events, especially in ecologically vulnerable areas, will help provide decision-making references for preventing vegetation degradation.

Key Words: vegetation sensitivity; drought events; different vegetation types; run theory; Central Asia

在全球变暖的背景下,气候变化正引起全球学者的关注^[1]。全球约 58% 的陆地面积表现出干旱危害指数显著增加,主要集中在非洲、中亚、西亚、澳大利亚、亚马逊、南欧等地^[2]。此外,大量的用水使全球干旱频率增加,尤其在亚洲干旱频率的加剧最为严重 $(35\pm 7)\%$ ^[3]。相关研究表明,根据 1951 年至 2016 年的全球 SPEI12 数据,全球 23 个宏观区域在此期间共发生了 157 次严重和极端干旱事件。其中,在中亚地区共经历的 12 次干旱事件中,包括了 8 次严重和极端干旱事件^[4]。从 20 世纪 90 年代中期之后,包括中亚在内的全球干旱面积百分比趋势较高,特别是进入 21 世纪初期后,中亚的干旱面积百分比趋于最高,接近 80%^[4-5]。中亚是世界上最干旱的地区之一,其特点是年降水量和土壤湿度极低,生态系统较脆弱且敏感,目前有 42% 的地区正经历持续干旱^[6-8]。中亚作为全球极易发生干旱事件的地区之一,其干旱极易导致植被退化,使中亚土地退化零增长目标(LDN)的实现面临着巨大挑战^[9]。而包括中亚在内的全球大多数温带地区,植被活动明显受到水分条件的制约,表现出对于干旱事件的高度敏感,干旱对当地生态系统的稳定性和可持续性构成了威胁^[10]。因此,植被对于干旱事件的敏感性是中亚研究的热点。且据全球气候模式的预测,21 世纪,由于潜在蒸散量增加,中亚干旱地区将变得更加温暖和干燥,而湿润地区将变得更加温暖和湿润^[11],这种变化增加了干旱事件发生的频率和概率,可能会引发一系列干旱风险。但目前关于中亚植被生产力对不同干旱事件的敏感性研究较少,且中亚植被较稀疏,植被生态环境脆弱,极易受到气候变化的影响。基于此,研究中亚地区植被生产力对于干旱事件的敏感性,对预防气候变化对植被的影响至关重要。

植被动态对于干旱事件的响应是应对外强迫中的一个关键过程,敏感性这一特征是表征植被对于干旱事件稳定性的重要组成部分,参考前人研究^[10,12-13],在本文中,敏感性是指干旱干扰下植被异常对于干旱事件的敏感程度和幅度,主要通过植被敏感性的参数来量化。近年来,诸多学者使用了一些定量方法来监测干旱影响植被活动变化过程并取得了丰硕成果,例如,采用遥感数据、气候数据、NDVI 等数据^[14-16]和线性回归、偏相关分析、季节性突变趋势分析等方法^[6,16-17]。为便于探究干旱如何影响植被活动变化,这些定量方法通常以整个时间段作为分析对象或检测突变年份进行分段趋势分析^[18],在年际或季节尺度上关注整个时间段中植被指数与干旱指数的相关性,来研究中亚植被对气候变化的敏感性及其稳定性^[19-20]。这些研究极大地提高了对中亚地区植被如何响应气候变化的认识,然而,目前大多数研究仍基于植被趋势的变化及其对平均气候状态变化的响应,而未充分考虑气候累积效应影响下植被生产力对于干旱事件的敏感性。

不断加剧的干旱正在削弱全球植被生产力^[15],然而植被生产力对于干旱事件的敏感性如何随时间尺度变化尚不清楚,尽管研究学者们付出了许多努力来阐明中亚植被变化对气候波动的不同响应^[21-22],但目前,鲜

有学者从干旱事件基本特征(干旱持续时间、干旱严重度、干旱间隔等)角度深入分析对植被敏感性的影响。而量化干旱事件基本特征对不同植被敏感性的影响,能够增加对植被敏感性的深入了解^[23],也可以提高植被退化防治的有效性。近年来的研究表明,中亚气候类型复杂,生态环境脆弱,不同气候区植被对于干旱事件的敏感性不同,植被对于干旱事件的敏感性空间异质性明显^[24],虽已有学者在全球其他地区对植被受干旱影响的敏感性进行研究^[15,25],但鲜有研究考虑了植被敏感性响应的主导时间尺度^[24],且在多时间尺度上识别中亚干旱事件对植被敏感性的研究十分必要。所以,对比不同气候区和不同植被类型,评估植被生产力对干旱事件的敏感性,量化干旱事件基本特征对不同植被敏感性的影响,对中亚生态环境保护和土地退化零增长目标实现具有重要意义。

研究目的是评估这一地区植被生产力对不同时间尺度干旱事件的敏感性时空格局,并比较植被在不同气候区以及对不同干旱事件的敏感性。基于游程理论,分析不同时间尺度上干旱事件的时空格局。通过计算中亚干旱事件期间植被初级生产力(GPP)和标准化降水蒸散指数(SPEI)的标准化异常值,揭示干旱事件对植被异常的时空变化特征。运用敏感性计算方法量化了植被异常和植被对于干旱事件的敏感性,并利用 BRT 模型计算干旱事件对植被敏感性的相对重要性。以期填补对该地区植被生产力对干旱事件的敏感性特征和规律的了解,促进该地区生态环境的保护。研究结果可为管理和预测全球气候变化背景下植被的演变及其对区域可持续性的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中亚地区横跨北纬 34.25°—55.45°N 和东经 46.50°—96.23°E,由哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦以及中国新疆组成^[20],如图 1 所示。该地区包含低地、大平原和高山,海拔从新疆北部和哈萨克斯坦东部的阿尔泰山、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦、新疆的天山和帕米尔山逐渐向哈萨克斯坦西部和土库曼斯坦的里海沿岸降低。由于地处欧亚大陆深处,中亚属于典型的温带大陆性气候,具有全年降水稀少,太阳辐射高,日照时间长,蒸发量大,极端气候频发等特点,降水和温度的空间变化遵循从山地到平原、从北到南的梯度^[1],气候区逐渐由北部的半湿润区过渡到南部的干旱区,最干旱的地区出现在土库曼斯坦北部的卡拉库姆沙漠和乌兹别克斯坦南部的克孜勒库姆沙漠以及中国新疆的塔克拉玛干沙漠,最湿润的地区位于哈萨克斯坦东北部、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的阿尔泰山、天山和帕米尔高原^[13]。

中亚地区主要植被类型包括林地、草地、耕地、稀疏植被,分别占 1.62%、24.40%、18.71%、19.01%。哈萨克斯坦南部、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦的大部分平原地区以稀疏植被为主,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的山区由于高降水量和垂直地带性,具有丰富的草地和林地,中亚北部主要以雨养耕地为主,南部的阿姆河和锡尔河流域以灌溉耕地为主^[17]。正因中亚地区发生干旱事件的频率大,干旱严重度高,持续时间长,且干旱事件对植被的破坏在不断加重,所以迫切需要分析中亚植被生产力对干旱事件的敏感性,以便更好地应对和防范未来的干旱危机。

1.2 数据

1.2.1 ERA5-land 数据

ERA5 是欧洲中期天气预报再分析中心(ECMWF)发布的最新一代全球气候再分析数据集,并被证明在研究气候变化方面更可靠^[26]。ERA5-Land 是一个再分析数据集,与 ERA5 相比,它具有更高的分辨率。可使用气候数据商店(CDS)应用编程接口下载,也可以直接从(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)获取。ERA5-Land 对各要素的量化将更加精确,其时间和空间分辨率分别为月和 0.1°。该数据集包括气温、潜在蒸散发以及降水等。

1.2.2 土地利用数据

使用了欧洲航天局(ESA)为气候变化倡议(CCI)提供的空间分辨率为 300 m 的土地覆被产品(ESA-

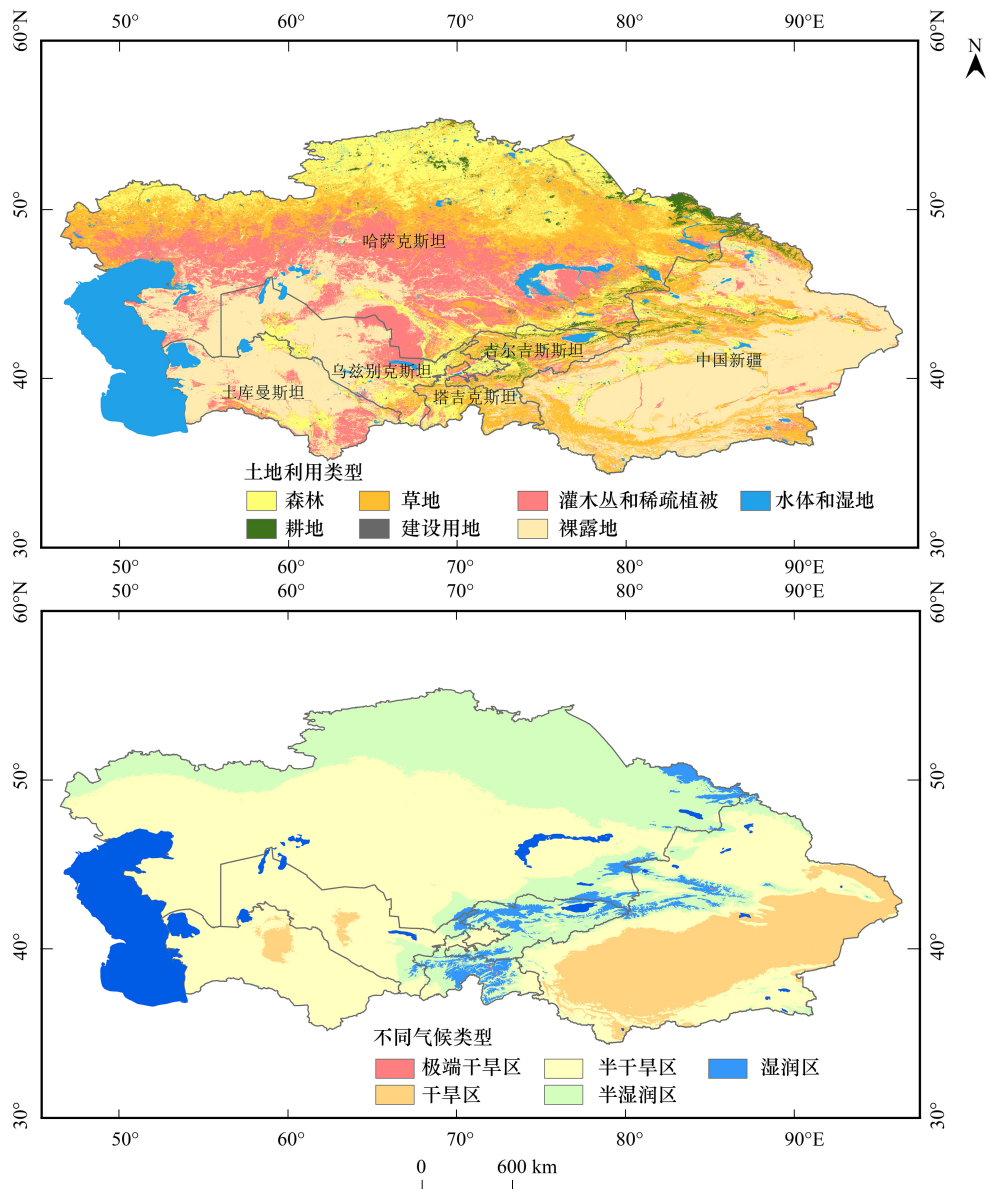


图 1 中亚植被类型和气候区空间分布图

Fig.1 Spatial distribution map of vegetation types and climatic zones in Central Asia

CCI),通过(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>)访问。该产品包含 37 个土地覆被等级,时间跨度为 1992 年至 2018 年,由 AVHRR、SPOT 和 MERIS 数据解译获得,具有高度精准性。为了保持空间分辨率一致,利用双线性插值法对 GPP 数据、土地利用数据和干旱指数数据集(AI)进行 0.1°重采样,以匹配 ERA5-Land 数据集。根据 IGBP(国际地圈-生物圈计划)分类方案区分为 7 种土地覆盖类型:林地、草地、灌木丛和稀疏植被、耕地、水体和湿地、裸地及建设用地,以研究它们之间的差异^[20]。但因裸地和建设用地不纳入研究范围,所以在研究区上,这两种土地利用类型已被掩膜,在后续的研究区上显示为白色区域。

1.2.3 干旱指数数据集

利用干旱指数数据集将研究区域划分为不同的气候区。该指数最早由 Thornthwaite 等在 1948 年首次提出^[27],在 1992 年由联合国环境署(UNEP,1992)采用改进的干旱指数,是根据潜在蒸散量(PET)与月降水可利用量(P)的差值计算得到。遵循 UNEP 提出的分类体系,再结合 Zemer 等^[28]研究将气候区划为 5 类:极端干旱($AI<0.03$),干旱($0.03<AI\leq 0.2$),半干旱($0.2<AI\leq 0.5$),半湿润($0.5<AI\leq 0.65$)和湿润区($AI>0.65$)。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数计算

SPEI 是由 Vicente-Serrano 等^[29]基于降水和温度创建的,用于表示一定时间范围内降水量和蒸散量相差的概率。该指数考虑了蒸散量对温度的敏感性,具有适合多尺度、多空间比对、计算过程简单、精度高等优点,是全球变暖背景下干旱研究的理想指标^[30]。参考 Jiang 和 Deng 等的研究^[10,12]通过使用 R 语言的 SPEI 软件包计算出 1982—2018 年三个时间尺度的 SPEI3、SPEI6、SPEI12,然后利用不同尺度的 SPEI 探索干旱对植被累积影响最大的时间尺度,本文 SPEI3 表示 3 个月时间尺度,SPEI6 表示 6 个月时间尺度,SPEI12 表示 12 个月时间尺度。例如,SPEI3 是当月和前两个月的累积值,SPEI6 是当月和前五个月的累积值。

SPEI 基于水量平衡计算,通过选取 P 和 PET 数据来计算 SPEI。 P_m 与 PET_m 的差值计算,见公式(1)。

$$D_m = P_m - PET_m \quad (1)$$

其中, m 代表月份, D_m 代表第 m 月的降水与潜在蒸散发的差值, D_m 提供了可分析月尺度的水分赤字或盈余的描述,当 $D_m > 0$,则表示当月处于湿润的状态,而当 $D_m < 0$,说明当月处于干旱的状态。

1.3.2 干旱事件特征识别

利用游程理论来识别干旱事件,以确定干旱事件的开始、持续时间和结束。游程理论最早由 Yevjevich 提出^[31],目前已被广泛应用于识别干旱和描述干旱特征。一个游程是指时间序列中的所有数值中高于或低于某个选定阈值的部分,高于选定阈值的部分被认为是正游程,而低于选定阈值的部分被认为是负游程^[5]。根据 McKee 等对“干旱事件”的定义^[32],通过以下三个标准判定一次干旱事件:SPEI 值持续小于 0,期间 SPEI 最小值低于-1,且总持续时间大于等于 3 个月;当满足这三个标准时,就认为发生了干旱事件。总之,干旱事件事实上是一次最小值小于-1 且持续时间大于等于 3 个月的负游程。图 2 中描述了干旱事件的基本特征。

对研究区范围内每个栅格单元进行干旱识别并计算其基本特征,根据游程理论和干旱的定义,对干旱的基本特征进行描述。这些干旱事件特征包括干旱持续时间(drought duration, DD)、干旱严重度(drought severity, DS)、干旱强度(drought intensity, DI)、干旱间隔(drought interval, DIV)和干旱次数(drought times, DT)。其中,干旱持续时间 DD 是指处于干旱状态下的时长,即干旱开始时间到干旱结束时间之间的月份数,干旱严重度 DS 指干旱事件发生期间 SPEI 累加值的绝对值,其计算方法见式(2)。干旱强度 DI 是干旱事件期间的 SPEI 值的平均值,是干旱严重度与干旱持续时间的比值,见式(3)。干旱间隔 DIV 是指发生两次干旱事件之间的时间间隔,将干旱次数 DT 定义为总时间序列中干旱事件所发生的次数,可以在一定程度上直观地反映干旱风险的变化情况。

$$DS = \sum_{i=1}^{DD} |SPEI_i| \quad (2)$$

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^{DD} |SPEI_i|}{DD} \quad (3)$$

式中, DD 是某一干旱事件的持续时间; $SPEI_i$ 是第 i 个月 SPEI 值; DS 、 DI 分别表示一次干旱事件的干旱严重度和干旱强度。

1.3.3 植被敏感性指数计算

为了评估植被对干旱的响应,计算每个像元的月 GPP、SPEI 的标准化异常值,依据 Jiang 和 Deng 等的研

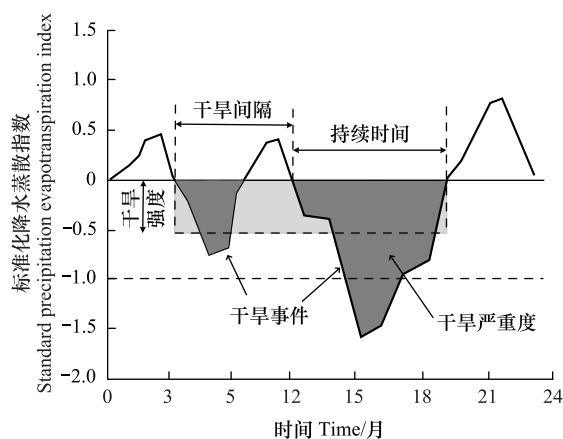


图 2 中亚干旱事件特征识别示意图

Fig.2 Schematic diagram of identifying features of drought events in Central Asia

究^[10,12],对每个网格和每个月的条件导出了指数的标准化异常(SA):

$$SA_i = \frac{x_i - u_i}{\delta(x)} \quad (4)$$

式中, SA_i 是指数在第 i 个月的标准化异常; $\delta(x)$ 和 u_i 分别是指研究期间第 i 个月指数的标准差和均值。 x_i 是指第 i 个月的指标值。

然后,敏感性指标可以由下面的方程定义:

$$\text{敏感性} = \frac{SA_{\text{植被}}}{SA_{\text{SPEI}}} \quad (5)$$

式中,敏感性是指植被异常对干旱事件的敏感程度和幅度; $SA_{\text{植被}}$ 是指干旱事件期间 GPP 的标准化异常; SA_{SPEI} 是干旱事件期间 SPEI 的标准化异常。

1.3.4 提升回归树模型

BRT 是一种拟合统计模型,主要以二进制的方式来提取输入因素和响应因素之间的关系。BRT 使用了提升技术和简单的决策树,即分类和回归树。参考前人的研究^[10],该模型具有复杂的非线性关系,可以在不事先转换解释数据的情况下解决相互作用的影响,因变量中的缺失值可以被修正,不相关的输入变量在模型中表现为不敏感。BRT 中的 Boosting 建立了精确的规则来提高准确性^[25],利用 R 语言环境下的“dismo”包建立了 BRT 模型,并利用 BRT 模型确定了干旱特征对植被敏感性的影响,该模型中以下三个关键参数分别设置:(1)树的复杂度为 6;(2)装袋分数为 0.5;(3)学习率为 0.005;在该组合下,证明该模型具有良好的预测精度,考虑到解释因子的选择频率,在模型中量化了干旱特征对植被敏感性的相对重要性。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度干旱事件基本特征分析

干旱强度受干旱严重度和持续时间的综合影响,在不同时间尺度上表现出复杂性和随机性。干旱强度和严重度的空间分布如图 3 所示。随着时间尺度的增加,干旱强度高值从 SPEI3 的 1.5 减少到 SPEI12 的 1.3,干旱强度的高值地区逐渐扩大。在 SPEI6 和 SPEI12 的时间尺度上,哈萨克斯坦东北部和中亚东部的干旱强度相对较高;相比之下,中亚西部和哈萨克斯坦南部的干旱强度较低。干旱严重度呈现出明显的空间差异性,在 SPEI3 时,哈萨克斯坦东北部和吉尔吉斯斯坦的干旱严重度较高;在 SPEI6 上,干旱严重度高值影响的区域在不断扩大,显示出向中部扩散的趋势;而到 SPEI12 后,中亚东部的大多数地区有相对较高的干旱严重度值,高值从 SPEI3 的 12.43 增加到 SPEI12 的 25.11。总体而言,中亚东部经历了严重和强烈的干旱事件。

干旱持续时间、干旱间隔和干旱次数具有明显的空间差异性(图 4)。干旱持续时间和干旱间隔随时间尺度变化而增加,在 SPEI3,大部分地区经历了持续 3 个月以上的干旱事件,尤其在哈萨克斯坦东部半干旱区经历长达 10 个月的干旱事件,在 SPEI6 和 SPEI12 上,中亚大部分地区干旱持续时间在增加,持续时间最长可达 26 个月,特别在中亚东部地区半干旱区经历长时间的干旱。对于 SPEI3 的干旱间隔,大多数地区检测到干旱间隔最小值 3 个月,其在空间上有较强的相似性,而在 SPEI6 和 SPEI12 时,高值逐渐增加,尤其在哈萨克斯坦西部和中亚中部影响明显。就干旱次数而言,随时间尺度的变化,较长时间尺度的干旱次数总体在减少。在 SPEI3 上中亚半湿润和湿润区经历较高的干旱次数,在 SPEI6 上,除了中亚西部半干旱区受影响较小外,中亚的其他区域均受到高干旱次数的影响,并随时间尺度的增加,受影响的区域在扩大。总体而言,大多数干旱区经历严重程度较低的干旱事件,但一些半干旱和半湿润区发生更多且严重程度较高的干旱事件。

2.2 干旱事件期间植被异常的时空变化分析

干旱事件对植被异常的时空变化特征,如图 6 所示。在 SPEI3 的绝大多数地区,GPP 异常值较高,特别是在哈萨克斯坦北部和中亚东部的半干旱、半湿润地区,异常值的高值较为明显,最高达到-0.25。相反,在哈萨克斯坦西部、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦东部,GPP 异常值的低值相对集中,最低达到-16。在 SPEI6 上,

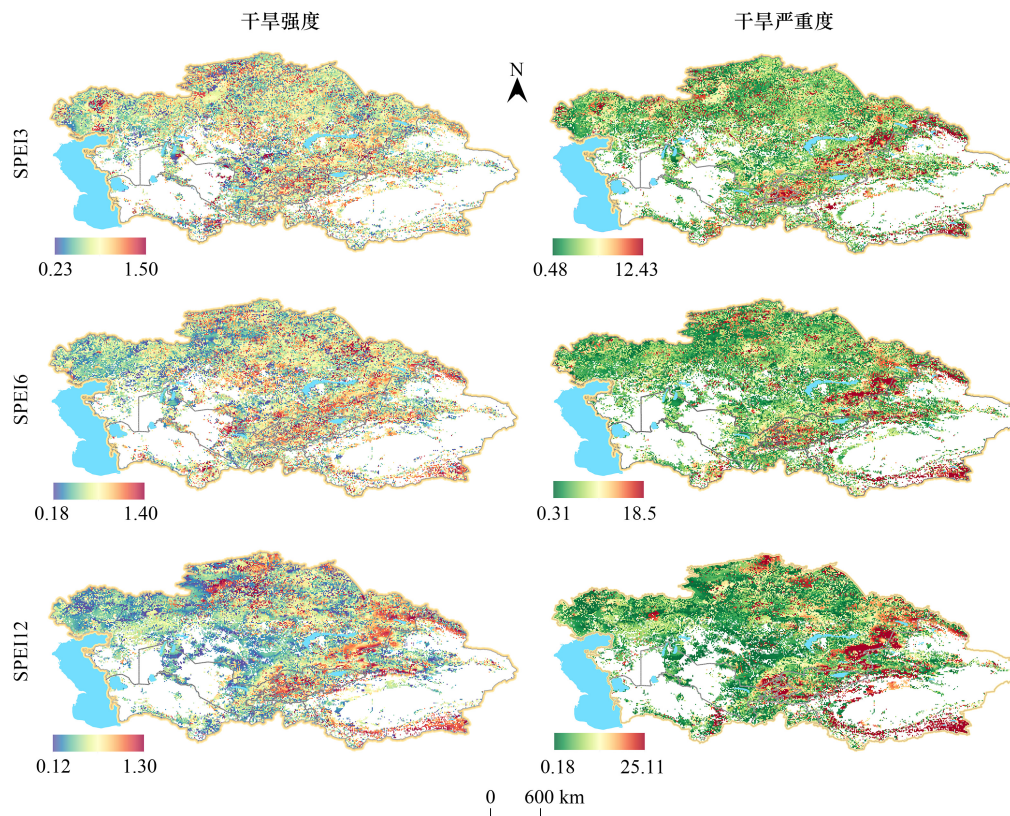


图3 干旱强度和干旱严重度时空分布图

Fig.3 Spatial and temporal distribution of drought intensity and severity

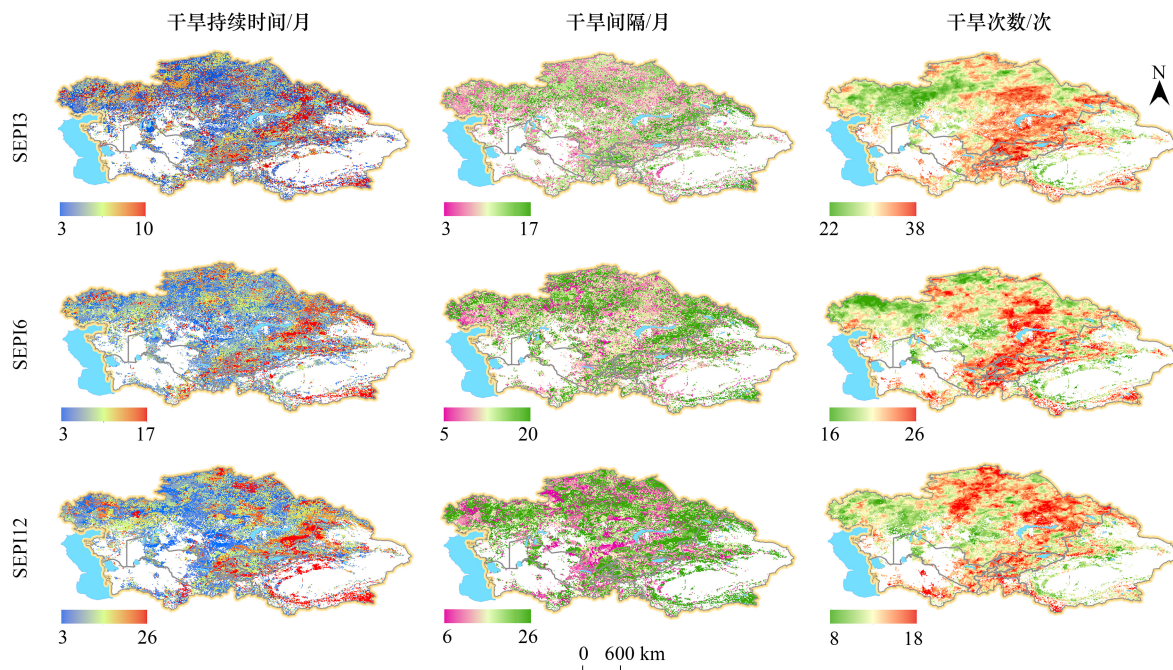


图4 干旱持续时间、干旱间隔和干旱次数的时空分布图

Fig.4 Spatial and temporal distribution of drought duration, intervals and times

中亚西部地区 GPP 异常值低值较 3 个月尺度在增加,而受低值影响的区域面积则在减少。在 SPEI12 尺度上,这种趋势更为显著,不同植被受到的影响更为明显,异常负值的低值进一步降低,最低为-30,受影响区域虽然面积减少,但分布更为集中,尤其是在中亚中部和南部的半湿润、半干旱地区,以及土库曼斯坦东部。总的来说,随时间尺度的增加,GPP 异常值的低值影响逐渐增强,少数地区的 GPP 异常值基本保持稳定外,低值区域主要集中在哈萨克斯坦西南部沿海低地、乌兹别克斯坦阿姆河下游的灌溉区、中部锡尔河流域沿岸,以及新疆天山以南的喀什绿洲等地。

为了检验数据是否差异,利用 K-S 检验进行数据的正态性检验,以及利用方差齐性检验方法进行数据的方差齐性,然后通过使用非参数检验方法 Kruskal-Wallis H 检验、Friedman 检验、Mann-Whitney U 检验进行显著性差异检验,发现通过这三种非参数检验的渐进显著性 P 值均 <0.05 ,则可以认为不同植被类型对不同时间尺度的 GPP 异常值存在显著性差异(如图 5)。

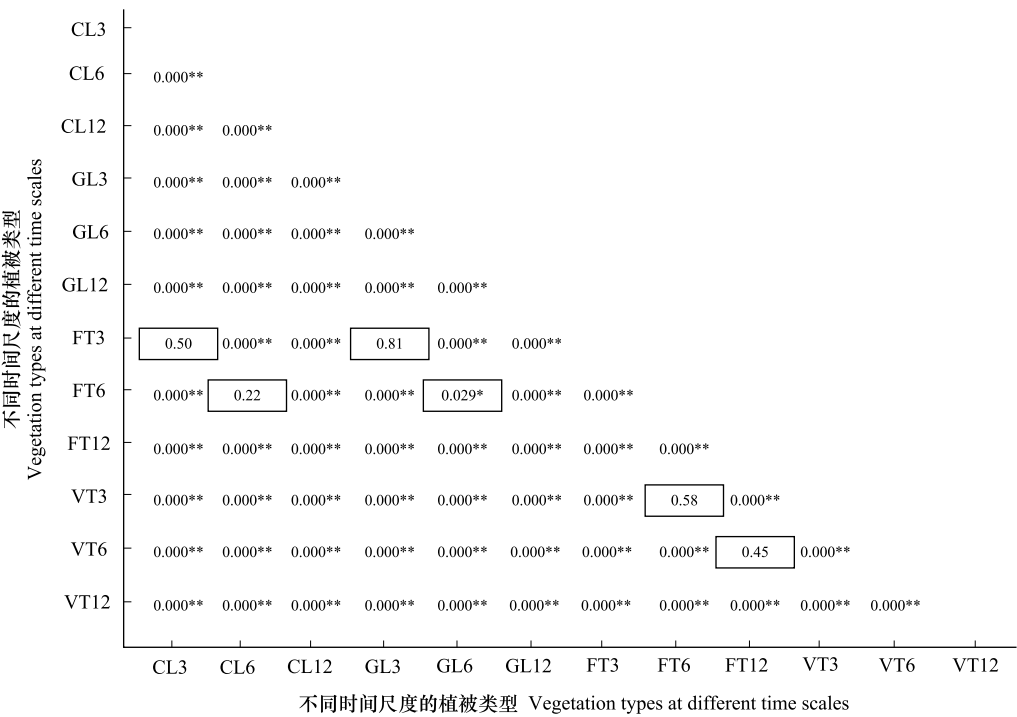


图 5 不同植被类型对不同时间尺度的植被初级生产力(GPP)异常值显著性检验

Fig.5 Significance test of gross primary productivity (GPP) anomalies for different vegetation types at different time scales

CL3—12;3—12 个月尺度的耕地 Cropland of SPEI3—12;GL3—12;3—12 个月尺度的草地 Grassland of SPEI3—12;FT3—12;3—12 个月尺度的林地 Forest of SPEI3—12;VT3—12;3 个月尺度的稀疏植被 Sparse vegetation of SPEI3—12;黑色方框表示未通过或仅通过 0.05 水平(双侧检验)渐进显著性

对比不同植被类型在不同时间尺度下的 GPP 异常值箱型图变化,如图 6 所示。在 SPEI3 时,耕地的中位数最低,为-4.55,稀疏植被具有最小值(-17.62)和最大的四分位距(IQR,9.39)。在 SPEI6 下,稀疏植被展现了最小值(-20.61)、最小中位数(-5.61),以及最大的四分位距(5.27)。在 SPEI12 中,耕地具有最小的中位数(-6.14),而稀疏植被的四分位距(IQR)变化最大,为 9.39。总体来看,耕地在 SPEI3 和 SPEI6 上的 GPP 异常值中位数均为最低,表明其受干旱胁迫的影响范围更广,且 GPP 异常值的下降趋势最为显著。草地在短期干旱条件下的 GPP 异常值波动小,然而,随着干旱时间的延长,其 GPP 异常值下降,波动变化也相应增加。林地在 SPEI3 和 SPEI6 下 GPP 异常值波动较小,但到 SPEI12 时,GPP 异常值下降,波动性增加。稀疏植被在所有时间尺度上均显示出 GPP 异常值波动大,长期干旱条件下 GPP 异常值下降尤为显著。

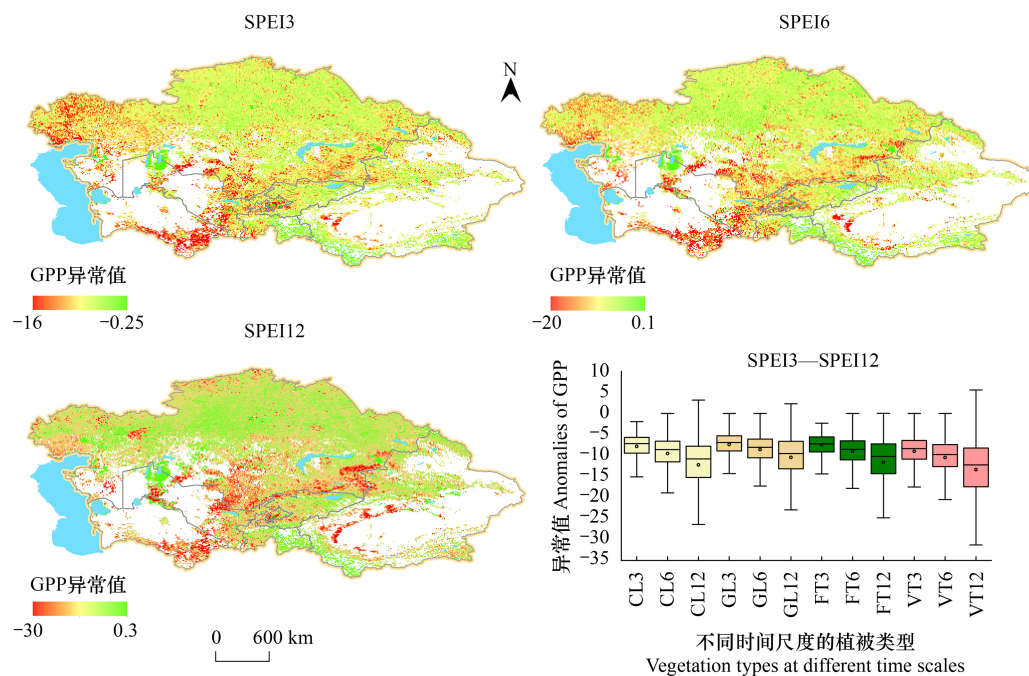


图 6 不同时间尺度 GPP 异常值的空间分布及不同植被类型 GPP 异常值比较

Fig.6 The spatial distribution of GPP anomalies across different time scales and comparative analysis of GPP anomalies among different vegetation types

2.3 植被对于干旱事件的敏感性评估

在不同气候区,植被对于干旱事件的敏感性存在较大差异(图 8)。在 SPEI3 上,高敏感性地区位于中亚北部的半干旱以及中部和东南部的半湿润区,整体而言,植被对短期干旱事件敏感性影响范围较广。在 SPEI6 上,敏感性逐渐减弱,敏感性较高地区主要集中在中部的半干旱区及东南部的半湿润区,整体呈现西北半湿润区向中部的半干旱和东南部的半湿润区,敏感性由低到高的变化趋势。而在 SPEI12 上,高敏感性地区总体缩小,主要集中在中部的部分区域和南部的阿姆河下游灌溉区。

同样为了检验数据是否差异,通过 K-S 检验进行数据的正态性检验,并利用方差齐性检验方法检验数据的方差齐性,然后使用非参数检验方法 Kruskal-Wallis H 检验、Friedman 检验、Mann-Whitney U 检验进行显著性差异检验,发现通过这三种非参数检验的渐进显著性均 P 值 < 0.05 ,则可以认为不同植被类型对不同时间尺度的敏感性异常值存在显著性差异(如图 7)。

对比不同植被在不同时间尺度上敏感性的变化,如图 8 箱型图所示上。在 SPEI3 上,大部分植被对于干旱表现出较高敏感性,其中林地尤为敏感,其敏感性的中位数达到 0.65,最大值更是高达 2.62,到 SPEI6 时,敏感性开始逐渐降低,稀疏植被的敏感性表现出最高的中位数(0.51)和最大值(1.99),到 SPEI12 时,敏感性继续降低,其中稀疏植被的敏感性最高中位数和最大值分别为 0.36 和 1.90。总体而言,整个中亚区域,北部的半湿润区植被的敏感性较低,而中部的半干旱和东南部的半湿润区植被的敏感性较高,在 SPEI3 上,中亚大部分地区植被的敏感性要明显高于另外两个时间尺度,尤其是北部半湿润和中部半干旱地区以及南部的半湿润区,在 SPEI6 和 SPEI12 上,南部半湿润区以及中部的半干旱区植被敏感性相对较高,其余地区植被敏感性较低。

在不同时间尺度下,利用 BRT 模型计算了干旱事件期间干旱特征对植被敏感性相对重要值,通过对不同气候区和不同植被类型进行 BRT 模型精度验证,得到训练数据相关性和交叉验证相关性最高、 R^2 较好、交叉验证均方根误差最小的 BRT 建模最佳预测组合。如在 SPEI12 中,BRT 模型的平均训练数据相关性为 0.754,

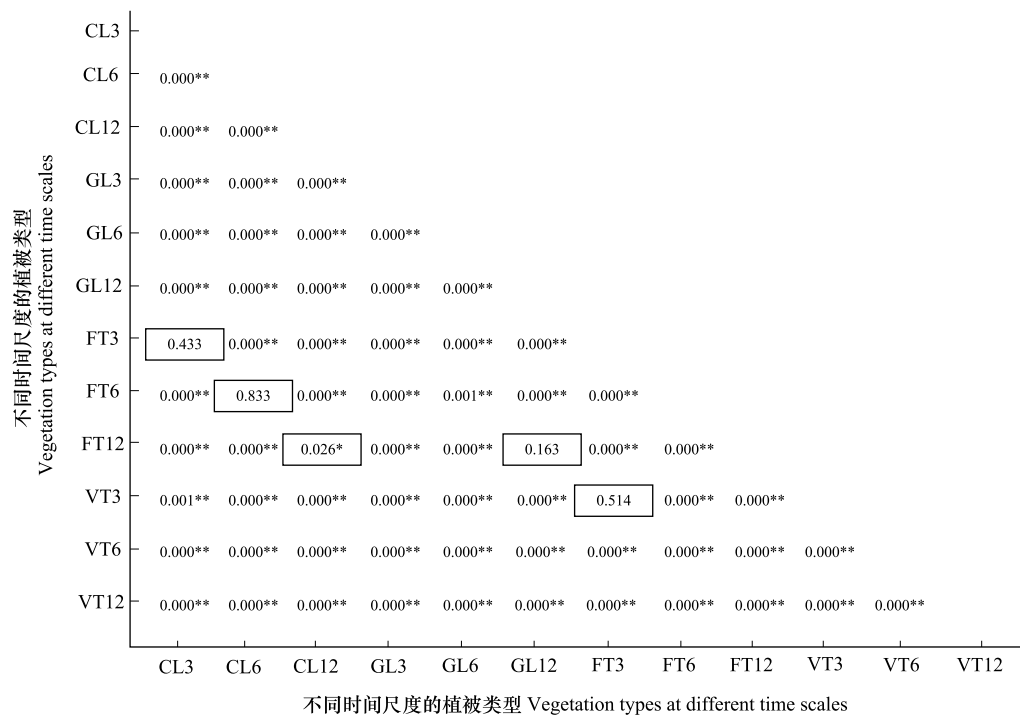


图 7 不同植被类型对不同时间尺度的敏感性显著性检验

Fig.7 Significance test of sensitivity anomalies for different vegetation types at different time scales

平均交叉验证相关性为 0.692,平均 R^2 为 0.69,平均 RMSE 为 0.183,通过表 1 和表 2 共同说明模型具有较好的预测效果。

表 1 不同气候区提升回归树(BRT)模型精度验证(SPEI12)

Table 1 Boosted regression tree (BRT) model accuracy validation for different climate zones (SPEI12)					
参数 Parameters	极端干旱区 Hyper-arid	干旱区 Arid	半干旱区 Semi-arid	半湿润区 Sub-humid	湿润区 Humid
训练数据相关性 Training data correlation	0.709	0.778	0.754	0.796	0.783
交叉验证相关性 Cross validation correlation	0.656	0.711	0.702	0.683	0.691
树的数量 Number of trees	5700	7700	6350	1850	1900
决定系数 R^2	0.671	0.698	0.687	0.718	0.701
均方误差 Mean squared error	0.068	0.047	0.038	0.037	0.033
均方根误差 Root mean squard error	0.202	0.168	0.195	0.151	0.182

表 2 不同植被类型 BRT 模型精度验证(SPEI12)

Table2 BRT model accuracy validation for different vegetation types (SPEI12)				
参数 Parameters	耕地 Cropland	草地 Grassland	林地 Forests	稀疏植被 Sparse vegetation
训练数据相关性 Training data correlation	0.758	0.718	0.764	0.721
交叉验证相关性 Cross validation correlation	0.713	0.684	0.708	0.676
树的数量 Number of trees	5750	4650	1400	6300
决定系数 R^2	0.681	0.669	0.706	0.678
均方误差 Mean squared error	0.039	0.047	0.022	0.042
均方根误差 Root mean squard error	0.187	0.213	0.168	0.184

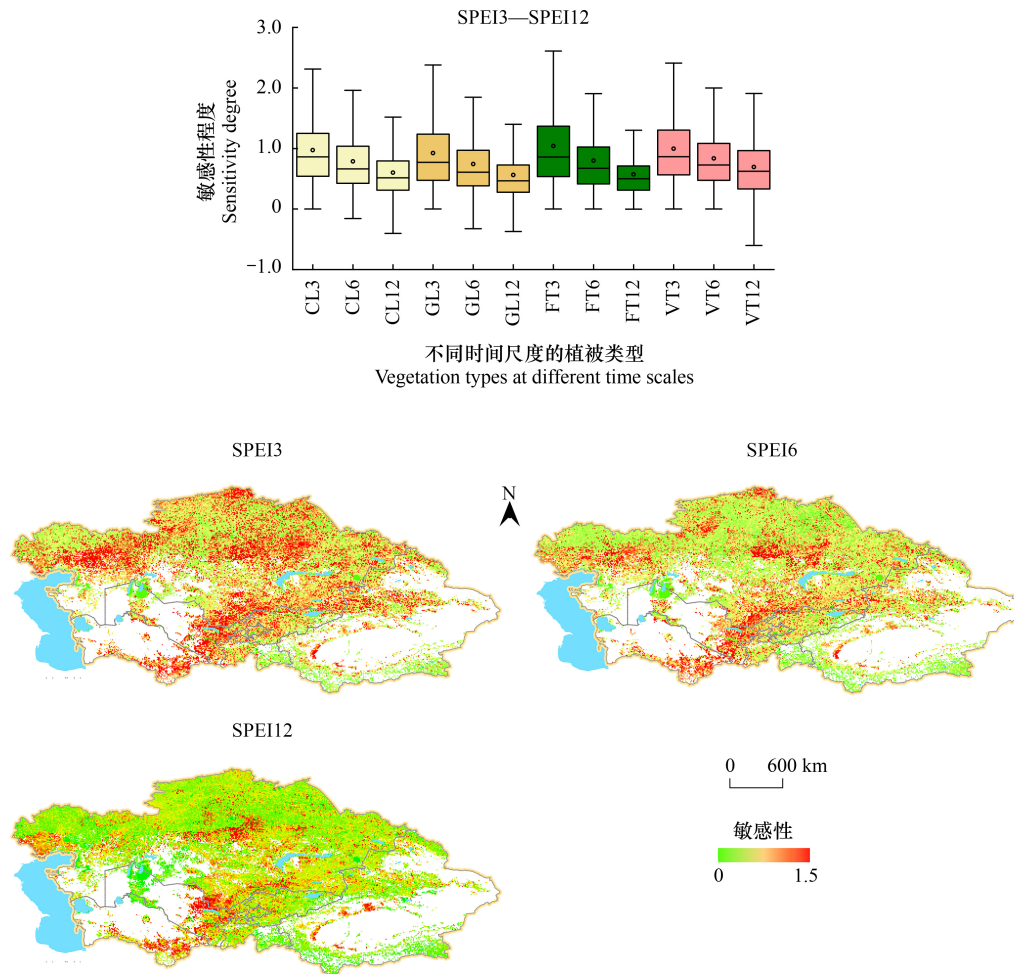


图 8 不同时间尺度植被敏感性的空间分布及不同植被类型敏感性比较

Fig.8 The Spatial distribution of vegetation sensitivity at different time scales and comparative sensitivity analysis among different vegetation types

在 3 个月尺度上(如图 9),干旱强度、干旱间隔和干旱严重度是影响植被敏感性变化最显著因子,占模型解释的 75%。相比之下,干旱持续时间和干旱次数占模型解释仅贡献了约 25%。在气候类型中除干旱区外,其他气候区的干旱严重度主导效应均占比最高,分别达到 28.96%、30.68%、33.93%和 32.17%。干旱特征对植被敏感性相对重要值在三个时间尺度上有一定差异性,如在 SPEI6 上,极端干旱区、干旱区的干旱间隔占主导效应,而其他气候区则是干旱严重度占主导效应,到 SPEI12 时,干旱区和湿润区分别由干旱间隔和干旱严重度占主导效应,而其余气候区主要受干旱强度影响。

就不同植被类型而言,SPEI3 的所有植被类型受干旱严重度主导效应所占比例最高,草地和林地分别为 41.31%、36.23%,而在不同植被类型的 BRT 模型中干旱次数和干旱持续时间共同贡献了约 22%。在 SPEI6 时,相较于 SPEI3,耕地、草地和林地的干旱严重度主导效应占比均有所下降,特别地,在 BRT 模型中,草地和林地的干旱严重度贡献率分别被观测到 34.66%和 33.29%。与 SPEI3 相比,SPEI6 的干旱强度对耕地、林地和稀疏植被的影响减弱,而草地则是在增强。稀疏植被的干旱间隔百分比高于 SPEI3,但耕地、草地和林地恰恰相反,这种现象与干旱严重度的变化一致。在 SPEI12 上,干旱间隔对所有植被类型的影响均强于 SPEI6,而在干旱强度的影响中,除了草地和林地外,耕地与稀疏植被则相反。总体而言,干旱间隔、强度和严重程度是解释干旱期间植被异常变化的主要影响因素,占模型解释植被异常的 75%以上。

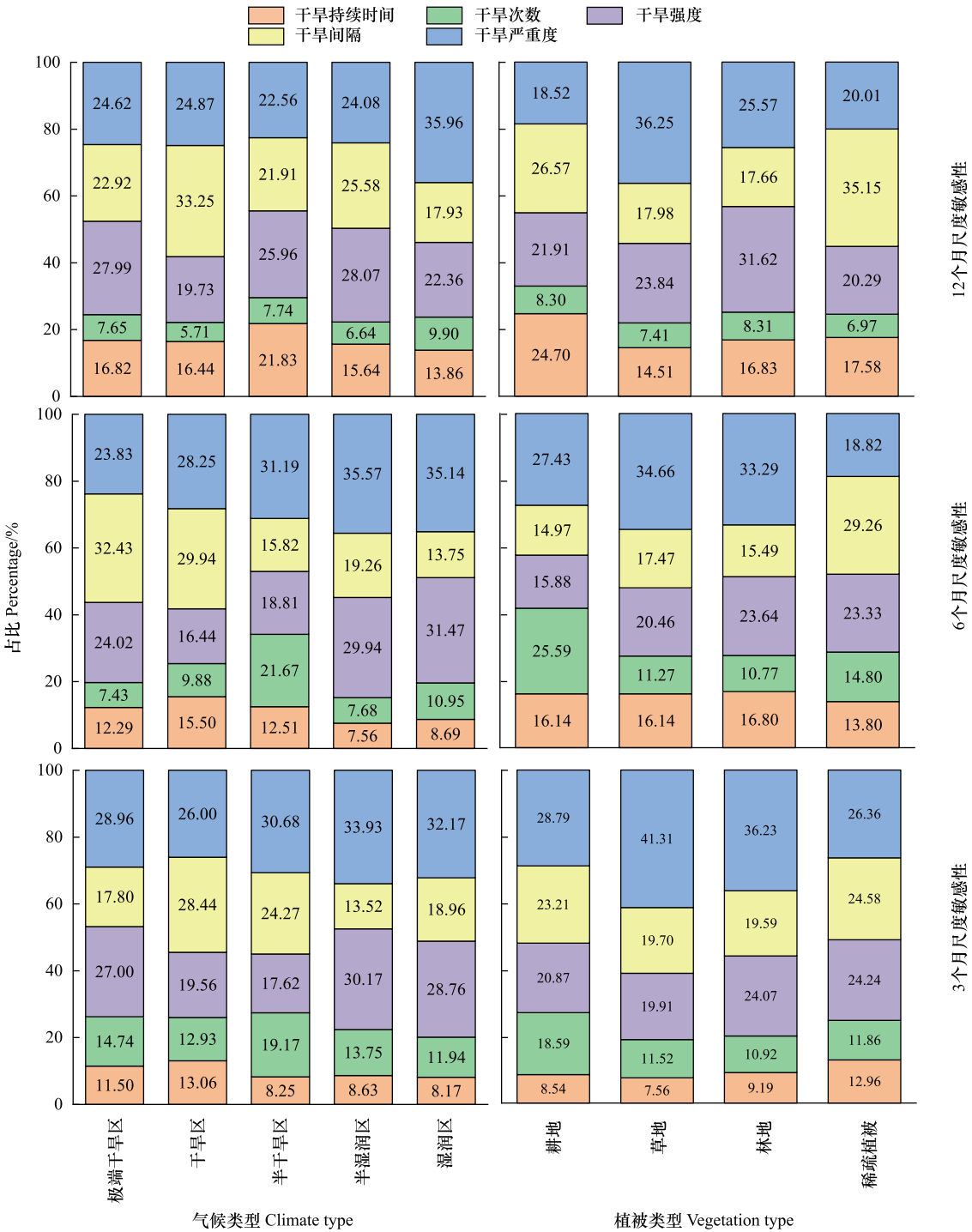


图9 BRT模型中干旱特征对植被敏感性相对重要值

Fig.9 The relative importance of drought characteristics to vegetation sensitivity in BRT models

3 讨论

3.1 干旱事件的植被异常

在全球变暖的影响下,中亚经历了显著的气候变化。20 世纪 80 年代以来,该地区所有类型的气候都出现了气温升高的现象^[5],植被异常变化更明显,这与前人的研究一致^[17,20]。在中亚,因自然地貌和气候变化

交互作用导致干旱频繁,呈现空间异质性。特别在中亚东部半干旱、半湿润地区中的天山山脉西部山区、哈萨克斯坦北部的科斯塔奈州和北哈萨克斯坦州以及中国新疆的干旱强度大、严重程度高、持续时间长(图3、图4)。在中亚东部半干旱、半湿润地区,特别在干旱期间的西天山山脉山区,高温可能会改变冰雪的融化时间,山区降水较少会减少源头地区的积雪^[33],如果持续时间足够长,降水不足和高温可能会导致土壤干燥,对植被健康产生负面影响,增加灌溉用水需求并加剧已经存在的水危机^[34]。此外,长期干旱事件还可能导致地下水位下降^[14],对植被供水产生负面影响,如果没有足够的水供应,生态系统将受到很大影响,因为半干旱和半湿润区生态系统高度依赖水资源供给^[35]。在哈萨克斯坦北部的科斯塔奈州和北哈萨克斯坦州,主要也以雨养耕地和草地为主,特别在干旱期间,降水水量比正常时候少,导致干旱天数增加,对当地的气候和生态系统产生了重大影响,前人研究表明在这个地区的气候变得更温暖湿润^[36],可能是受季节性水分缺失和土壤水分状况带来的干旱胁迫^[37],如季节降水变化减少导致的土壤变干,或是某月降雨量减少或蒸发增强^[38],以及地下水位降低等水文干旱胁迫^[36],或因当地长期气候干湿状况的持续性或周期性变化^[39],让该地区的雨养耕地和草地变得异常敏感且脆弱。在新疆,气候在九十年代由干燥温暖转为湿润温暖^[33],尽管出现了这种转变,但降水量在20世纪90年代后并没有继续增加,甚至在2000年后呈现出减少的趋势,降水减少和气温升高的共同作用导致新疆干旱加剧,气温不断升高导致土壤湿度降低,降水减少和气温升高的共同作用导致该地区干旱加剧^[34]。因此中国新疆大规模和集中的农田、草原以及脆弱的生态系统,作物产量、畜牧业和当地环境生态系统将受到干旱事件增加的影响,尤其是准噶尔盆地和塔里木盆地^[33,40]。

干旱期间,在不同时间尺度上,GPP异常对SPEI有明显区域差异性^[34],如在SPEI6和SPEI12上,大多数地区GPP呈负异常;利用箱型图对比发现,发现耕地在SPEI3和SPEI12的中位数最小,可能是因为这种植被类型受水分匮乏的影响较强^[24],而稀疏植被在SPEI6和SPEI12存在最小中位数和最小值,说明稀疏植被在SPEI6和SPEI12上受干旱事件影响程度高^[10]。GPP异常高值主要分布在哈萨克斯坦北部水资源丰富的草原、阿尔泰山脉东北部和海拔较高的天山、昆仑山,可能由于这些地区的干湿状况对GPP异常值产生的影响小,植被稳定性较强^[6]。而受GPP异常低值的影响区域主要是哈萨克斯坦西部、锡尔河和阿姆河流域和新疆的塔里木河流域沿岸地区,可能是这些区域的降水量少、蒸发量大、水分胁迫严重^[9],土壤的干湿条件在该地区的植被动态中起着重要的作用^[7]。而GPP异常值变化对以耕地和草地为主的流域异常变化更加明显,因为与林地和稀疏植被相比,这些土地类型的水分利用效率更高^[10,13]。

3.2 植被对干旱事件的敏感性

植被对干旱事件的敏感性表示干旱事件干扰下对某一区域植被的响应程度和幅度,受水分胁迫、植被特性、物种丰富度、生物群落差异等因素制约^[6,13]。通常情况下,因水分胁迫的影响,干旱和半干旱地区的植被敏感性较高;湿润地区的植被敏感性较低^[13]。敏感性高的植被在面对干旱干扰时变化显著,且弹性(包括抵抗性和恢复性)较低^[41],可能就意味着其稳定性较差。相反,敏感性低的植被弹性较高,能够在干扰后迅速恢复,因此能表现出更好的稳定性。对于不同气候区,在不同时间尺度上,植被敏感性受到干旱特征影响存在明显差异,如图7所示。湿润地区较高的物种丰富度和植被覆盖度对于干旱事件具有较高的抵抗能力,此外,植被敏感性随着区域干旱程度的降低而逐渐降低,在湿润区往往表现出较低的敏感性^[20],因伴随降水量较高的因素,能为植被生长提供了更多的可利用水分,有利于干旱干扰后植被的快速恢复。在半干旱地区和半湿润区,大多数区域经历了更高频率的干旱事件(图3、图4),由于水储量减少,总可利用水容量较低,植被对干旱事件的敏感性较高,此现象已经威胁到了植被的生长^[42]。

中亚植物对于干旱事件的适应是复杂的,在不同的气候区,中亚植物倾向于采用稳健适应的机制不同,是为了提高植被本身的适应力和存活可能性^[43]。在发生干旱事件时,植被利用调节气孔安全裕度适应干旱,主要通过调节叶片上的气孔大小来控制水分流失率以换取二氧化碳吸收和保持水力系统的完整性^[1]。在干旱条件下,植物通常会关闭气孔以减少水分散失,从而保持气孔和水力性状之间的协调和权衡来提高植物的整体耐旱性和适应力^[44]。然而,这种调节同时会限制二氧化碳的吸收,影响光合作用的进行。而光合作用是植物

利用太阳辐射将二氧化碳和水转化为有机物和氧气的过程,在干旱条件下,光合作用通常会受到抑制,导致植物生长受限^[45]。为了适应这种情况,一些植物会通过增加叶绿素含量或调整光合作用来提高水分利用效率^[45]。而水分利用效率的提高往往涉及到植物在光合作用过程中每消耗单位水分所固定的碳量,这一过程包括增加根系深度以获取更多地下水,或者通过减少叶片蒸腾来降低水分损失^[46]。此外,中亚不同植被类型对不同时间尺度的干旱(SPEI3、SPEI6、SPEI12)表现出不同的敏感性(图8)。作为长期干旱的地区之一,中亚植物具备较强的耐旱性;植物在短期干旱期间主要通过气孔调节和减少叶面积来减少水分流失^[44];但随着干旱时间的延长,它们可能依赖更深的根系、提高水分利用效率并调整光合作用以适应干旱^[1],然而长期干旱可能导致物种丰富度减少和生态系统结构改变,同时干旱强度和干旱严重度的增加将导致植被生理功能受损和生长受限,甚至可能面临大规模死亡和生态系统功能丧失^[46],从而导致该地区的土地退化。

同时,植被类型是调控响应的重要因素,植被对干旱的响应能力因不同植被类型而异。从不同植被类型来看,中部半干旱区的草地植被相对稳定,具有抵抗一定外界干扰的能力^[13]。而南部地区耕地和稀疏植被敏感性较高,植被生态易受到外界干扰,在一定程度上会抑制植被生长^[20]。从整体上看,植被对长时间干旱胁迫下具有一定的抵抗性,干旱事件对植被的影响在很大程度上取决于生态系统类型。先前的研究发现在半干旱区草地具有较高的敏感性^[47],草本植物由于根系较浅,木质部水力阻力较低,是更易发生干旱的植被类型,但进一步研究发现,南部湿润区的耕地和稀疏植被受干旱事件的影响更大,在不同时间尺度上其敏感性较高,存在退化的风险^[10]。在中亚敏感性较高的植被类型,主要是南部湿润区耕地与北部半湿润区耕地和稀疏植被,结合不同时间尺度来看,它们受短期干旱事件的影响显著,所以短期干旱会导致这些地区生态系统遭受破坏^[9]。

相比其他植被类型,耕地对干旱事件的响应更快、更强烈,受旱灾影响比其他植被类型更大^[10],而在中亚地区的农业生态系统中,短期的干旱胁迫对哈萨克斯坦北部的雨养耕地高度敏感,而在长时间的干旱胁迫下,在中亚南部的灌溉耕地更敏感^[1]。但稀疏植被比耕地和草地拥有更宽的水力安全裕度,所以相比于耕地,其对长期干旱胁迫更敏感^[20]。在湿润区林地表现出较高的敏感性,在短期干旱胁迫下就开始反应,可能是因其在短期缺水下敏感性以及水分利用效率高,表明这种植被类型极易受到干旱的影响^[17]。最后是草地,在干旱地区,虽其根系较浅,但随着其适应能力增强,它们对中长期的干旱事件反应更敏感,在水分胁迫下,草地叶片脱落以保护液压系统和叶片生长限制以平衡生产和生存^[48]。有研究表明,尽管在农业系统中进行了人类干预的灌溉措施,但耕地在轻度干旱时的延迟期较短,并经历了更严重的破坏^[1,10];根系较浅的耕地只能吸收和利用浅层土壤湿度,其中土壤湿度对降水响应较快^[37]。相反,树木发达的深层根系使其能够从深层土壤层中吸收水分,从而在干旱胁迫期间为其提供一定的缓冲能力^[23]。

4 结论

(1)随着时间尺度的增加,除了干旱强度和干旱次数减少外,从 SPEI3 到 SPEI12 的其他干旱特征逐渐增加,干旱严重程度高值从 SPEI3 的 12.43 增加到 SPEI12 的 25.11,而干旱次数高值从 SPEI3 的 38 降到 SPEI12 的 18。在中亚中东部经历了严重和强烈的干旱事件,尤其在 SPEI6 到 SPEI12 上。总体而言,在半干旱地区、半湿润地区发生了更频繁,严重程度更高的干旱事件。

(2)随时间尺度变化,受 GPP 异常低值影响的区域扩大,哈萨克斯坦西部、中亚中东部及南部土库曼斯坦东部的半干旱、半湿润地区受影响更严重。在 SPEI3 上,哈萨克斯坦西部、中亚南部和土库曼斯坦东部是 GPP 异常值低值区域。利用箱型图对比发现,在 SPEI3 和 SPEI6 上耕地均出现 GPP 异常值中位数最低值, GPP 的下降趋势最为显著,稀疏植被在所有时间尺度上均出现 GPP 异常值波动变化最大和异常值最低值。

(3)植被对干旱事件的敏感性随时间尺度增加而逐渐降低,植被敏感性较高集中在中亚半干旱和半湿润区,尤其是耕地和稀疏植被。干旱特征对植被敏感性相对重要值中,干旱间隔、干旱强度和干旱严重程度对 BRT 模型在大部分地区占模型贡献率约为 75%,干旱严重程度是影响植被变化的最显著因子,在 SPEI3 的草地

和林地敏感性中,干旱严重度占模型解释达到了 41.31%和 36.23%。

本研究旨在探究中亚植被生产力对不同干旱事件在空间和时间尺度上变化的差异性,以及对不同干旱事件敏感性的差异,对预测中亚未来植被动态受干旱事件影响提供了新的视角,为中亚生态环境保护与改善提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Yuan Y, Bao A M, Jiang P, Hamdi R, Termonia P, De Maeyer P, Guo H, Zheng G X, Yu T, Prishchepov A V. Probabilistic assessment of vegetation vulnerability to drought stress in Central Asia. *Journal of Environmental Management*, 2022, 310: 114504.
- [2] Wang T T, Sun F B. Integrated drought vulnerability and risk assessment for future scenarios: an indicator based analysis. *Science of the Total Environment*, 2023, 900: 165591.
- [3] Wada Y, van Beek L P H, Wanders N, Bierkens M F P. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 034036.
- [4] Spinoni J, Barbosa P, De Jager A, McCormick N, Naumann G, Vogt J V, Magni D, Masante D, Mazzeschi M. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, 22: 100593.
- [5] Guo H, Bao A M, Liu T, Jiapaer G, Ndayisaba F, Jiang L L, Kurban A, De Maeyer P. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966—2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1523-1538.
- [6] Liu L, Peng J, Li G Y, Guan J Y, Han W Q, Ju X F, Zheng J H. Effects of drought and climate factors on vegetation dynamics in Central Asia from 1982 to 2020. *Journal of Environmental Management*, 2023, 328: 116997.
- [7] Su Y N, Chen S Q, Li X, Ma S, Xie T T, Wang J B, Yan D Z, Chen J H, Feng M, Chen F H. Changes in vegetation greenness and its response to precipitation seasonality in Central Asia from 1982 to 2022. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(10): 104002.
- [8] Li Z, Chen Y N, Fang G H, Li Y P. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1316.
- [9] Jiang L L, Bao A M, Jiapaer G, Liu R, Yuan Y, Yu T. Monitoring land degradation and assessing its drivers to support sustainable development goal 15.3 in Central Asia. *Science of The Total Environment*, 2022, 807: 150868.
- [10] Jiang L L, Liu W L, Liu B, Yuan Y, Bao A M. Monitoring vegetation sensitivity to drought events in China. *Science of The Total Environment*, 2023, 893: 164917.
- [11] Davi N K, D'Arrigo R, Jacoby G C, Cook E R, Anchukaitis K J, Nachin B, Rao M P, Leland C. A long-term context (931—2005 C.E.) for rapid warming over Central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 121: 89-97.
- [12] Deng Y, Wang X H, Wang K, Ciais P, Tang S C, Jin L, Li L L, Piao S L. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298: 108307.
- [13] Jiang L L, Liu B, Guo H, Yuan Y, Liu W L, Jiapaer G. Assessing vegetation resilience and vulnerability to drought events in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: 131012.
- [14] Gessner U, Naeimi V, Klein I, Kuenzer C, Klein D, Dech S. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 74-87.
- [15] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [16] 刘海, 姜亮亮, 刘冰, 刘睿, 肖作林. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响. *生态学报*, 2023, 43(19): 7936-7949.
- [17] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 967-980.
- [18] Zhang Y, Liu X H, Jiao W Z, Wu X C, Zeng X M, Zhao L J, Wang L X, Guo J Q, Xing X Y, Hong Y X. Spatial heterogeneity of vegetation resilience changes to different drought types. *Earth's Future*, 2023, 11(4): e2022EF003108.
- [19] Wei X N, He W, Zhou Y L, Cheng N, Xiao J F, Bi W J, Liu Y B, Sun S L, Ju W M. Increased sensitivity of global vegetation productivity to drought over the recent three decades. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(7): e2022jd037504.
- [20] Yuan Y, Bao A M, Liu T, Zheng G X, Jiang L L, Guo H, Jiang P, Yu T, De Maeyer P. Assessing vegetation stability to climate variability in Central Asia. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113330.
- [21] Ma W, Ding J L, Wang J L, Zhang J Y. Effects of aerosol on terrestrial gross primary productivity in Central Asia. *Atmospheric Environment*, 2022, 288: 119294.
- [22] Na L, Shi Y, Guo L. Quantifying the spatial nonstationary response of influencing factors on ecosystem health based on the geographical weighted regression (GWR) model: an example in Inner Mongolia, China, from 1995 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(29): 73469-73484.
- [23] Ma M Y, Wang Q M, Liu R, Zhao Y, Zhang D Q. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in Northern China considering extreme climate and time-lag and -accumulation effects. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160527.

- [24] Chen Q, Timmermans J, Wen W, van Bodegom P M. A multi-metric assessment of drought vulnerability across different vegetation types using high resolution remote sensing. *Science of the Total Environment*, 2022, 832: 154970.
- [25] 刘海红, 殷淑燕, 许丽婷, 毛喜玲. 山东省极端气候和人类活动对不同植被类型 NDVI 的影响. *生态学报*, 2023, 43(21): 8780-8792.
- [26] Jiang L L, Liu B, Yuan Y. Quantifying vegetation vulnerability to climate variability in China. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3491.
- [27] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55.
- [28] Zomer R J, Xu J C, Trabucco A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 409.
- [29] Vicente-Serrano S M, Beguería-Portugués S. Estimating extreme dry-spell risk in the middle Ebro valley (northeastern Spain): a comparative analysis of partial duration series with a general Pareto distribution and annual maxima series with a gumbel distribution. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(9): 1103-1118.
- [30] Musei S K, Nyaga J M, Dubow A Z. SPEI-based spatial and temporal evaluation of drought in Somalia. *Journal of Arid Environments*, 2021, 184: 104296.
- [31] Yevjevich V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 1967.
- [32] McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, pp. 17-22.
- [33] Yao J Q, Chen Y N, Guan X F, Zhao Y, Chen J, Mao W Y. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China. *Earth-Science Reviews*, 2022, 226: 103957.
- [34] Hu Z Y, Chen X, Chen D L, Li J F, Wang S, Zhou Q M, Yin G, Guo M Y. "Dry gets drier, wet gets wetter": a case study over the arid regions of central Asia. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(2): 1072-1091.
- [35] Liu X F, Wang S X, Zhou Y, Wang F T, Li W J, Liu W L. Regionalization and spatiotemporal variation of drought in China based on standardized precipitation evapotranspiration index (1961—2013). *Advances in Meteorology*, 2015, 2015(1): 950262.
- [36] Zhang R W, Zhao C Y, Ma X F, Brindha K, Han Q F, Li C F, Zhao X N. Projected spatiotemporal dynamics of drought under global warming in central Asia. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4421.
- [37] Wang X C, Li Y K, Chen Y N, Li Y P, Wang C, Kaldybayev A, Gou R K, Luo M, Duan W L. Intensification of heatwaves in central Asia from 1981 to 2020—Role of soil moisture reduction. *Journal of Hydrology*, 2023, 627: 130395.
- [38] Hu Q, Han Z H. Northward expansion of desert climate in central Asia in recent decades. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): e98895.
- [39] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. *生态学报*, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [40] Li Z, Chen Y N, Li W H, Deng H J, Fang G H. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(24): 12345-12356.
- [41] Yao Y, Liu Y X, Song J X, Tao S L, Li Y, Wu T J, Wang Y J, Wang S, Fu B J. Declining tradeoff between resistance and resilience of ecosystems to drought. *Earth's Future*, 2024, 12(5): e2024EF004665.
- [42] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [43] Ali S, Tariq A, Kayumba P M, Zeng F J, Ahmed Z, Azmat M, Mind'je R, Zhang T J. Local surface warming assessment in response to vegetation shifts over arid lands of Central Asia (2001—2020). *Science of the Total Environment*, 2024, 929: 172628.
- [44] Corak N K, Otkin J A, Ford T W, Lowman L E L. Unraveling phenological and stomatal responses to flash drought and implications for water and carbon budgets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2024, 28(8): 1827-1851.
- [45] Zhao Y, Xiong L H, Yin J B, Zha X N, Li W B, Han Y J. Understanding the effects of flash drought on vegetation photosynthesis and potential drivers over China. *Science of The Total Environment*, 2024, 931: 172926.
- [46] Li J H, Han W Q, Zheng J B, Yu X J, Tian R K, Liu L, Guan J Y. Grassland productivity in arid Central Asia depends on the greening rate rather than the growing season length. *Science of the Total Environment*, 2024, 933: 173155.
- [47] Chen T T, Wang Y X, Peng L. Advanced time-lagged effects of drought on global vegetation growth and its social risk in the 21st century. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119253.
- [48] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morín-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 52-57.