DOI: 10.5846/stxb202010232707

张世喆,朱秀芳,刘婷婷,徐昆,郭锐.气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应.生态学报,2022,42(8):3429-3440. Zhang S Z, Zhu X F, Liu T T, Xu K, Guo R.Response of gross primary production to drought under climate change in different vegetation regions of China. Acta Ecologica Sinica,2022,42(8):3429-3440.

气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的 响应

张世喆^{1,3},朱秀芳^{1,2,3,*},刘婷婷³,徐 昆³,郭 锐³

1 北京师范大学遥感科学国家重点实验室,北京 100875
2 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875
3 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院,北京 100875

摘要:干旱变化具有明显的空间分异,不同植被类型对干旱的响应亦有差别。开展气候变化下不同植被覆盖类型对干旱响应的差异分析,厘清温升干旱化进程对植被的影响,对了解植被发展动态及预测未来格局有着非常重要的意义。基于 1982—2017 年的总初级生产力(GPP)数据和同时期东安格利亚大学气候研究中心(CRU)时间序列(TS)气候数据,分析了中国 8 个植被区 GPP 和干旱的变化趋势,通过对比标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)的趋势差异识别了典型的温升干旱化 区域,在此基础上研究气温上升如何影响 GPP 对干旱的响应,进一步讨论了不同植被类型对干旱的敏感性差异。结果表明: (1) 36 年来 8 个植被区除青藏高原高寒植被区呈湿润化,其他植被区均呈现变干趋势;(2)气温上升大面积加剧了温带荒漠区 和温带草原区的变干趋势;(3) 亚热带常绿阔叶林区和热带季风雨林、雨林区的 GPP 受温度和干旱影响相当,青藏高原高寒植 被区和针叶、落叶林混交林区的 GPP 受温度主导,其他植被区 GPP 均受干旱主导。

关键词:总初级生产力(GPP);干旱;温升干旱化;趋势分析;敏感性

Response of gross primary production to drought under climate change in different vegetation regions of China

ZHANG Shizhe^{1,3}, ZHU Xiufang^{1,2,3,*}, LIU Tingting³, XU Kun³, GUO Rui³

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China

2 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Variations of drought have obviously spatial differentiation, and different vegetation types have different responses to drought. However, few studies have been conducted to distinguish the contribution of temperature increase to the variations of drought and to investigate the differences in the responses of different vegetation types to warming aridification on a large scale. Analyzing differences in the response of different vegetation cover types to drought under climate change and clarifying the impact of warming aridification on vegetation in China are of great importance for understanding the development dynamics of vegetation and predicting future patterns. In this study, based on climatic data from the University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU) Time-series (TS) version 4.04 dataset, the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) were calculated in 1982—2017. Using Theil-Sen

收稿日期:2020-10-23; 网络出版日期:2021-12-17

基金项目:国家重点研发计划资助(2019YFAO606900);国家自然科学基金面上基金项目(42077436)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhuxiufang@ bnu.edu.cn

median trend analysis and the Mann-Kendall test, we analyzed trends in gross primary production (GPP) and drought in the eight vegetation regions of China. By comparing the trend differences between SPI and SPEI, typical warming aridification areas were identified under three scenarios ([SPI not significantly drier+SPEI significantly drier], [SPI wetter+SPEI not significantly drier], and [SPI wetter+SPEI significantly drier]). Finally, after detrending GPP and temperature, the correlation analysis and multiple regression were used to investigate how temperature increase affected the response of GPP to drought and further discuss the differences in sensitivity of different vegetation regions to drought. The results showed that all eight vegetation regions showed a drying trend over past 36 years, except for Qinghai-Tibet plateau high cold vegetation region, which was getting wet. The GPP of each vegetation region mainly increased, among which the Qinghai-Tibet plateau high cold vegetation region showed the most significant increase in GPP, which might be related to the warming and wetting trend in this region. The temperature increase had the strongest exacerbating effect on drying in temperate desert region and temperate steppe region, and the weakest exacerbating effect on drying in temperate needleleaf and broadleaf forest region and cold temperate needleleaf forest region, while it significantly increased the sensitivity of GPP to drought in the latter. There was variability in the response of GPP to temperature and drought conditions in different vegetation regions: the GPP of the subtropical evergreen broad-leaved forest region and the tropical monsoon forest and rain forest region was comparably affected by both temperature and drought, the GPP of the Qinghai-Tibet plateau high cold vegetation region and temperate needleleaf and broadleaf forest region was dominantly affected by temperature, and the GPP in all other vegetation regions was mainly affected by drought.

Key Words: gross primary production; drought; warming aridification; trend analysis; sensitivity

总初级生产力(Gross primary production, GPP)表征进入到陆地生态系统的初始能量和物质,是全球陆地 碳通量中最大的组成部分,其变化影响着整个陆地碳循环^[1-3]。干旱是对陆地生态系统 GPP 影响最强烈的 极端气候^[2],直接影响植被生长和发育。近年来全球气候变化频繁,温度升高通过影响大气环流及全球水循 环,改变了降水的时空分布^[4],进而使得干旱具有时间和空间变化特征^[5]。研究气候变化下总初级生产力对 干旱的响应对了解植被发展动态及预测未来格局有着非常重要的意义。

一般来说,干旱胁迫是限制陆地生态系统的主要环境因子,在一定程度上削弱了生态系统碳汇功能,引起 植被生产力的下降^[6]。部分学者在我国云贵高原^[7]、汉江流域^[8]、湖北^[9]和东北^[10]等地区的研究结果均揭 示了干旱对植被生产力的显著影响。然而,植被生产力对气候变化的响应比较复杂,局部尺度的研究很容易 忽略气候环境、植被覆盖类型等因素对气候变化的响应差异,不利于认识植被受气候变化影响的宏观格局。 越来越多学者注重在大尺度范围内开展"植被-干旱"研究,发现植被生产力对干旱的响应格局与植被类 型^[11-12]、干湿环境^[13]和干旱的时间尺度^[13]密切相关。如Flach等指出在全球范围内森林较其他植被类型更 能适应极端气候,对干旱事件敏感低甚至在干旱期间 GPP 有所增加,而草原和农田 GPP 在干旱期间普遍减 少^[12]。Sun 等研究了近40年中国 GPP 对干旱的响应,结果表明干旱地区植物可以通过生理策略快速适应缺 水,湿润地区的土壤水分有效缓冲了干旱对植被生长的影响^[13]。综上,在气候频繁变化的背景下,生态研究 具有明显的尺度依赖性。大尺度探讨不同植被类型生产力对干旱的响应差异,有利于全面认识气候变化对植 被的影响过程。

中国植被类型丰富,不同植被在物种组成、群落结构、根系分布等方面存在较大差别,对外界环境变化的 响应有明显差异^[14]。目前我国已有学者在全国范围内开展植被生产力时空分布及其对干旱响应的研究,为 揭示我国植被生产力变化及其与干旱的相关关系做出了巨大贡献^[2,15]。然而,干旱不仅受水分亏缺控制,还 与温度密切相关,不少研究表明高温会显著加剧干旱对植被生长的限制^[11,16]。截止目前在全球气温升高背 景下区分温度对干湿变化的贡献、探讨不同植被类型对温升干旱化响应差异的研究鲜有报道。鉴于此,本文 利用 1982—2017 年的总初级生产力数据、同时期 CRU-TS 气候数据和中国植被区划矢量边界数据,分析中国 36 年来 GPP 和干旱指数(SPL/SPEI)的变化趋势特征,识别温升干旱化的典型区域,探讨八类植被区温度和 干旱对 GPP 的影响,突出植被类型对干旱响应的差异性。本研究对了解温升背景下我国各植被区 GPP 与干 旱变化的响应关系,辅助进行适当的农业生产决策以及理解全球生态系统碳循环的生物化学动态过程有重要 意义。

1 研究区概况及数据获取

1.1 研究区概况

本文的研究区域为中国(北纬18°10′—53°33′),未包含我国南海地区(图1)。基于中国植被图集编委会 1:100万植被图,在植被地理地带性原则下结合气候、地貌和土壤等辅助指标将研究区划分为八类植被区,是 目前最新最为公认的植被区划方案^[17]。温带荒漠区(R1)典型植被为温带荒漠植被,普遍具有旱生特征;温 带草原区(R2)主要植被为禾草草原,以耐旱的多年生根茎禾本科草类为主;青藏高原高寒植被区(R3)植被 较为复杂,植被呈垂直地带性分异;亚热带常绿阔叶林区(R4)典型植被为亚热带常绿阔叶林;热带季风雨林、 雨林区(R5)地带性植被是以梧桐科、龙脑香科植物组成的半常绿季雨林或季节雨林;暖温带落叶阔叶林区 (R6)的地带性植被是以栋林为代表的落叶阔叶林;温带针叶、落叶混交林区(R7)地带性植被是以红松为优 势种,伴生有多种阔叶树的"阔叶红松混交林";寒温带针叶林区(R8)地带性植被为兴安落叶松林。





温带荒漠区(R1),温带草原区(R2),青藏高原高寒植被区(R3),亚热带常绿阔叶林区(R4),热带季风雨林、雨林区(R5),暖温带落叶阔叶林区(R6),温带针叶、落叶林混交林区(R7)和寒温带针叶林区(R8)

1.2 数据来源

研究数据主要包括三类:1)来源于东安格利亚大学气候研究中心(CRU)4.04时间序列(TS)数据集(https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/89e1e34ec3554dc98594a5732622bce9)的分辨率为0.5度的1982—2017年逐月潜在蒸散量、近地表平均温度和降水量数据。为了与GPP数据的分辨率一致,采用最近邻法将0.5°气候数据重新采样到0.05°。CRU TS数据已被广泛应用于气候变化研究领域。许多研究验证了CRU TS数据集的准确性,包括对潜在蒸散量^[18]、降水^[18—20]和温度^[19]的研究,证明了该数据集在气候变化研究分析中的有效性。2)来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn)的1982—2017年的时间尺度为8d的0.05度分辨率的总初级生产力GPP数据。该数据集由袁文平等开发的光能利用率模型(EC-LUE模型)估算得到,对该数据集的验证结果显示其模拟能力超过了MODIS-GPP产

品^[21]。3)来源于中国科学院地理科学与资源研究所数据共享中心(http://www.resdc.cn/)的中国植被区划数据。该图详细反映了我国 8 大植被区 36 个子区的植被的区域性分布和地带性分异。

2 研究方法与技术路线

本文技术路线如图 2 所示。主要包括:去趋势 GPP、去趋势温度和干旱指数计算,GPP、和干旱指数时间 序列趋势分析,去趋势 GPP、去趋势温度和干旱指数之间的相关分析与回归分析。



Fig.2 Technical flowchart

2.1 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen median 可以用来计算序列斜率的中值,能够减少噪声对于斜率的影响,对离散数据和测量误差 有较强的规避能力。Mann-Kendall 检验可以计算不受离群值影响的时间序列变化的显著性,适用于长时间序 列的趋势检验和分析,是世界气象组织推荐并已广泛应用的非参数统计的方法^[22]。在采用 Mann-Kendall 检 验前需要去掉生态时间序列的 lag-1 序列相关影响,以免高估检测出显著趋势的概率^[23]。

2.2 温度和 GPP 去趋势值计算

去趋势值反映数据样本的波动,正负去趋势值分别代表样本针对数据长期一般状况所产生的增加量或减少量。本研究按照 Papagiannopoulou 等^[24]的方法计算 GPP 与温度序列的去趋势值。在每个像元上,对年均 GPP 和年均温度时间序列进行线性趋势去除:

$$y_t \approx y_t^{T_r} = \alpha_0 + \alpha_1 t \tag{1}$$

$$y_t^{\ D} = y_t - y_t^{\ Tr} \tag{2}$$

其中, y_t 为 GPP 和温度的原始时间序列, y_t^{Tr} 为研究期内的趋势值序列, y_t^{D} 为去除了线性趋势的序列数据, t为研究期内的时间序列数据, α_0 和 α_1 分别是 GPP/温度与时间序列线性拟合的截距和斜率。去趋势后的 GPP和年均温在后文分别记做 D-GPP 和 D-T。

2.3 干旱指标

本文同时使用了标准化降水指数(SPI)和标准化蒸散指数(SPEI)两个干旱指数。SPEI由 Vicente-Serrano于2010年提出^[25],该指数同时考虑了降水和蒸散对干旱的影响,对潜在蒸散发的计算模式很敏感。 为匹配 GPP 与温度序列的时间尺度,本研究计算了12个月尺度的 SPI12和 SPEI12^[25-26](以下简称 SPI 和 SPEI),其中潜在蒸散量(Potential evapotranspiration, PET)根据联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 方法 计算得到^[27]。

2.4 相关分析与回归分析

相关分析和回归分析是研究植被生长对气候变化响应的常用统计分析方法^[28-29]。相关系数可以表征气候变化对植被总初级生产力的影响程度,回归系数可以帮助对比植被生产力对不同气候因子的敏感性大小。 本研究中,逐像元计算 D-GPP、D-T 以及干旱指数之间的 Pearson 相关系数^[22]和复相关系数,分别采用 T 检验 法(简单相关)和 F 检验法(复相关)对相关程度进行显著性检验。其中,复相关反映的是温度和干旱两者与 GPP 之间的复相关程度。在此基础上,进一步利用多元回归量化分析气候变化对 GPP 影响的大小^[30]:

$$y_i = a_i x_{iT} + b_i x_{iS} + \varepsilon_i \tag{3}$$

式中, y_i 是标准化的 D-GPP 序列, x_{ir} 、 x_{is} 分别是标准化的 D-T 和干旱指数(SPI 或 SPEI)。标准化序列用公式 4 计算得到。回归系数 a_i 、 b_i 反映 D-GPP 对 D-T 和干旱指数的敏感性,表示温度和干旱指数每变化一个标准差所导致的 GPP 变化量。 ε_i 为残留误差。

$$Z(\gamma) = \frac{\gamma - \overline{\gamma}}{S(\gamma)} \tag{4}$$

其中, γ 代表 D-GPP、D-T 和干旱指数序列, $\overline{\gamma}$ 是相应数据的平均值, $S(\gamma)$ 是相应数据的标准差。

3 结果分析

3.1 不同植被区 GPP、干旱指数趋势分析

GPP、干旱指数的趋势如图 3 所示。就 GPP 来说,我国有 38.7%的像元通过显著性统计检验(P<0.05)。 GPP 主要表现出增加趋势,多数植被区 GPP 增加像元占比为减少像元占比的 2—4 倍,其中青藏高原高寒植 被区(R3)增加趋势最为显著,表现为显著增加的像元占比可达 55%。GPP 减少趋势较强的有温带草原区 (R2)和热带季风雨林、雨林区(R5),减少区域的像元占比接近 40%。植被生产力的整体趋势与 Chen^[31]、 Wang^[32]等人在国内的研究结果类似。

就干旱来说, SPI和 SPEI 分别显示有 41.4%和 82.1%的像元呈变干趋势。这与 Yang 等^[26]研究 1961—2013 年 7 项干旱指数(包括 SPI/SPEI)呈一致下降趋势的结果相吻合。变湿像元主要分布在高寒植被区 (R3)及其与温带荒漠区(R1)的交界地带,其中 SPI的变湿面积和变湿趋势程度高于 SPEI。全国范围内 SPEI 呈现变干趋势的占比更高,分布范围更广,在温带荒漠区(R1)尤其明显。

SPI 计算过程仅考虑降水量,而 SPEI 同时考虑了降水和温度的作用,可以捕捉到温度上升对干旱的影响,检测出的干旱化趋势更显著、面积更大。本研究通过叠置 SPI 和 SPEI 的趋势图,根据三种情形(SPI 不显 著变干而 SPEI 显著变干、SPI 变湿而 SPEI 不显著变干、SPI 变湿而 SPEI 显著变干)识别温升干旱化的典型区 域以区分变暖条件下温度对干旱化的贡献,结果如图 4 所示。温带荒漠区(R1)、温带草原区(R2)和暖温带 落叶阔叶林区(R6)的温升干旱像元占比分别达到 87%、72%和 53%,是典型的温升干旱化地区。其中温升干 旱化程度较高的像元主要集中在温带荒漠区(R1)和温带草原区(R2),表明气温升高对该地区变干趋势有明 显的加剧作用。相反,温带针叶、落叶林混交林区(R7)和寒温带针叶林区(R8)干湿状况对温升的敏感性较低,温升干旱像元占比仅为 3%和 13%。

3.2 不同植被区 GPP 与温度、干旱指数之间的相关分析

图 5 为逐像元计算的 D-GPP 与 D-T/干旱指数间的 Pearson 相关系数。D-GPP 与 SPEI、SPI 的相关系数 分别介于-0.65—0.80 和-0.74—0.81 之间,且在各植被区均以正相关为主。温带草原区(R2)GPP 与 SPEI (SPI)的正相关性最强,正相关像元占该区总像元数的 93%(93%),可见自然水分亏缺是限制草原生产力的 主要因素^[33]。青藏高原高寒植被区(R3)GPP 与 SPEI(SPI)的负相关性最强,弱负相关像元占比分别为 52% (44%)。神祥金等研究发现青藏高原沼泽植被生长季 NDVI 与降水呈负相关的区域占整个沼泽分布区的 45.11%^[29],同时有研究指出降水的同时往往伴随着降温过程,降水增多可能会引起霜冻或洪涝等灾害,进而



图 3 1982—2017 年 GPP 和 SPI/SPEI 的趋势空间分布及各植被区不同 GPP、SPI 和 SPEI 趋势的像元个数占总像元个数的比例 Fig.3 The Spatial distributions of the GPP and SPI/SPEI trends, and the proportion of pixels with different GPP, SPI, and SPEI trends to the total number of pixels in the eight vegetation regions of China from 1982—2017

抑制植被生长^[34]。

相比于干旱指数,多数植被区 GPP 与 D-T 呈正相关关系但相关程度整体较低。与 D-T 正相关性最强的 为常绿阔叶林区(R4),显著正相关像元与正相关像元分别占该区总像元数的 17%和 78%,这可能是由于亚热 带常绿阔叶林分布地区属于亚热带季风气候区,降水充沛,无明显的旱季,温升在一定程度上提高了细胞的光 合作用效率,而其负面作用被降水缓解。温带草原区(R2)GPP 对温度的敏感性远低于干旱,仅有 34%的区域 与温度有正相关性,这一结果与已有的研究结论相符合^[35]。

图 6 为逐像元计算的 D-GPP、D-T 和干旱指数间的复相关系数。D-GPP、D-T、SPEI(SPI)的复相关系数在 0.3—0.82(0.3—0.83)之间,通过显著性检验的像元占总像元数的 43.93%(43.65%)。整体来看两类复相关的 空间分布高度接近,北方植被与气候因子的相关性高于南方地区,与候英雨等人的研究结果^[36]相吻合。温带 草原区(R2)、亚热带常绿阔叶林区(R4)和暖温带落叶阔叶林区(R6)的显著像元占比在 50%以上。其中,暖 温带落叶阔叶林区(R6)显著像元占比高达 70%,表明该植被区受温度和干旱的共同影响最为广泛;温带草原 区(R2)受温度和干旱的共同影响程度最高,区域平均复相关系数在 0.44 左右。



图 4 典型温升干旱化区域分布及各植被区不同温升干旱化程度的像元个数占总像元个数的比例

Fig.4 The spatial distributions of the typical warming aridification areas, and the proportion of the number of pixels of warming aridification under different levels to the total number of pixels in each vegetation region WA 表示温升于旱化



图 5 D-GPP 与气候指标的 Pearson 相关系数空间分布及各植被区不同相关程度的像元占比

Fig.5 The spatial distribution of Pearson correlation coefficients of de-trending GPP (D-GPP) and climate indicators, and the proportion of pixels under different correlation levels in each vegetation region

http://www.ecologica.cn



图 6 D-GPP 与气候指标的复相关系数空间分布及各植被区不同复相关程度的像元占比

Fig.6 The spatial distribution of multiple correlation coefficients of D-GPP and climate indicators, and the proportion of pixels under different multiple correlations levels

MCLs 表示复相关程度

3.3 不同植被区 GPP 与温度、干旱指数之间的回归分析

图 7 为以 D-T 和干旱指数为自变量、以 D-GPP 为因变量进行逐像元回归得到的 D-T 和干旱指数的标准 化回归系数,回归系数越大表明 GPP 对气候要素变化的敏感性越强。D-T 的标准化回归系数介于-0.7—0.8, SPI 和 SPEI 的标准化回归系数分别在-0.7—0.84 和-0.73—0.96 之间。通过比较 GPP 对温度和干旱指数的 敏感性发现,温带草原区(R2)和暖温带落叶阔叶林区(R6) GPP 对干旱的敏感性相比对温度更加明显,特别 是温带草原区(R2)受干旱影响更大的区域达到了 78%。青藏高原高寒植被区(R3)和温带针叶、落叶林混交 林区(R7)GPP 对温度的敏感性略大于干湿变化,前者可能是由于温度上升导致青藏高原的冻土和积雪减少, 环境进一步变湿,有利于植被的生长发育;后者对温度的高敏感像元沿长白山脉分布,而温度对山地高寒植被 的生长发育有着至关重要的作用。

在每个植被区内利用温升干旱化像元的 GPP 和干旱指数的敏感性均值(即标准化回归系数的均值)减去 非温升干旱化像元的 GPP 和干旱指数的敏感性均值,比较温升干旱化地区(图4)GPP 和其他地区 GPP 对干 旱的敏感性大小,进一步探究变暖造成的干旱变化在"GPP-干旱"响应过程中的作用(图8)。结果表明,温升 轻微弱化了温带荒漠区(R1)、青藏高原高寒植被区(R3)和暖温带落叶阔叶林区(R6) GPP 对干旱的响应,在 暖温带落叶阔叶林区(R6)的减弱程度达 0.03;相反温升加剧了干旱对其他植被区 GPP 的影响,其中针叶、落 叶林混交林区(R7)和寒温带针叶林区(R8)的温升地区 GPP 对干旱的敏感性大于非温升地区,敏感性差异为 0.08 和 0.16,远超其他植被区。



图 7 D-GPP 与气候指标的回归系数空间分布以及 D-GPP 最敏感的气候因子的像元占比

Fig.7 The spatial distribution of regression coefficients of D-GPP and climate indicators, and the proportion of pixels of the most sensitive climate factors of D-GPP

MSCFs 表示最敏感的气候因子

4 讨论与结论

4.1 讨论

植被生产力增加是人类活动与气候变化共同驱动的结果,本研究中青藏高原区 GPP 显著增加一方面归 因于该区域的变湿趋势,另一方面柴立夫等人指出青藏高原植被覆盖改善与该地近年来的植被动态研究和生态修复工作(如三江源自然保护区)密切相关^[37]。全国 GPP 整体具有增加趋势,侧面反映我国退耕还林还 草、三北防护林等生态恢复工程具有正向实施效果,有力遏制了生态退化趋势,推动了我国生态文明建设 进程^[38]。

温带草原、亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林是受干旱和温度共同影响较大的植被区。其中温带草 原和暖温带落叶阔叶林与干旱指数呈正相关的像元的占比在90%以上,对干旱敏感性大于对温度敏感性的 像元的占比在65%以上,整体受干旱影响更大;亚热带常绿阔叶林与干旱指数/温度呈正相关的像元的占比



图 8 各植被区中温升干旱化区域与其他区域 GPP 对干旱敏感性的差异

Fig.8 Differences in GPP sensitivity to drought between warming aridification areas and other areas in each vegetation region WAAs, OAs 分别表示温升干旱化区域和其他区域

在75%左右,对干旱敏感性大于对温度敏感性的像元的占比在50%左右,整体受干旱和温度影响相当。而对 于多数植被区,GPP 受干旱的影响大于受温度的影响。我国学者针对植被生产力(草原植被^[35]、森林植 被^[39]、各植被类型^[15])与气候的关系开展了许多相关研究,结果表明水分条件是影响植被生长发育的主要气 候因素,而干旱在很大程度上取决于水分亏缺程度,因此本研究结论与前人研究结果具有一致性。

气候变化背景下温度的持续升高加剧了我国的变干趋势,进而不同程度地影响了各植被区 GPP 对干旱的响应情况。针叶、落叶林混交林区(R7)和寒温带针叶林区(R8)纬度高,年均温低,气温上升虽然仅加剧了 少数区域的干旱状况(图4),但显著提高了该部分地区 GPP 对干湿状况的敏感程度(图8),指示着该区域的 干旱变化相比以往会对植被生长发育造成更大影响。

不足方面,本研究确定了 GPP 和干旱指数(SPI/SPEI)的年际变化趋势,但没有考虑年内的变化趋势。未 来可以结合多种生长季提取算法,如 SSA 奇异谱分析法^[40]、分段逻辑函数的斜率提取法^[41]等,得到生长季 GPP 数据,结合植被生长季选取最适和的干旱指数进行研究,例如生长季的时间是 4—9 月,则使用 SPEI9—6 (9 月份的 6 个月时间尺度的 SPEI 值)进行分析,在此基础上进一步通过 M-K 突变检验得到变化趋势中的拐 点,对产生这种趋势的原因作进一步解释,或根据拐点分段分层,更好地开展气候变化对 GPP 的影响。此外, GPP 除受到气候因素影响,还与很多因素有关,如植被物候期^[42-43]、太阳辐射^[24]、土壤和人为因素^[44-45]等。 未来可以在气候因素的基础上综合考虑其它因素对 GPP 的影响。

4.2 结论

本文利用 1982—2017 年的总初级生产力数据、同时期 CRU TS 气候数据和中国植被区划矢量边界数据, 分析了中国 36 年来 GPP 和干旱指数(SPL/SPEI))的变化趋势特征,探讨了变暖条件下不同植被区 GPP 对干 旱响应的差异。结果表明:(1)36 年来各植被区的 GPP 以增加为主,除青藏高原高寒植被区(R3)外其他植 被区以变干为主。(2)气温升高对温带荒漠区(R1)和温带草原区(R2)变干的加剧作用最强,对针叶、落叶林 混交林区(R7)和寒温带针叶林区(R8)变干的加剧作用最弱,同时显著提高了后者植被区 GPP 对干旱的敏感 程度。(3)不同植被区 GPP 对温度和干旱状况的变化响应存在差异性:亚热带常绿阔叶林区(R4)和热带季 风雨林、雨林区(R5)受温度和干旱影响相当,青藏高原高寒植被区(R3)和针叶、落叶林混交林区(R7)受温 度主导,其他植被区均受干旱主导。

参考文献(References):

[1] 叶许春,杨晓霞,刘福红,吴娟,刘佳.长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及气候驱动因子分析.生态学报,2021,41(17):

8期

10.5846/stxb201906221320.

- [2] 杜文丽,孙少波,吴云涛,宋照亮. 1980—2013 年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征. 生态学杂志, 2020, 39(1): 23-35.
- [3] Chen W Z, Zhu D, Huang C J, Ciais P, Yao Y T, Friedlingstein P, Sitch S, Haverd V, Jain A K, Kato E, Kautz M, Lienert S, Lombardozzi D, Poulter B, Tian H Q, Vuichard N, Walker A P, Zeng N. Negative extreme events in gross primary productivity and their drivers in China during the past three decades. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 47-58.
- [4] Overland J E, Wang M Y. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2010, 62(1): 1-9.
- [5] Pachauri K, Meyer A. Climate change 2014: Synthesis Report. Environmental Policy Collection, 2014, 27(2): 408.
- [6] Boyer J S. Plant productivity and environment. Science, 1982, 218(4571): 443-448.
- [7] Ge W Y, Han J Q, Zhang D J, Wang F. Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China. Ecological Indicators, 2021, 127: 107743.
- [8] Jiang W X, Wang L C, Zhang M, Yao R, Chen X X, Gui X, Sun J, Cao Q. Analysis of drought events and their impacts on vegetation productivity based on the integrated surface drought index in the Hanjiang River Basin, China. Atmospheric Research, 2021, 254: 105536.
- [9] 赵林,徐春雪,刘雪莹,李汉青,江浩鸿,林爱文.干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响.长江流域资源与环境,2014,23(11): 1595-1602.
- [10] 于成龙,刘丹. 基于 MODIS 的东北地区自然植被生产力对干旱的响应. 生态学报, 2019, 39(11): 3978-3990.
- [11] Fu Z, Ciais P, Bastos A, Stoy P C, Yang H, Green J K, Wang B X, Yu K L, Huang Y Y, Knohl A, Šigut L, Gharun M, Cuntz M, Arriga N, Roland M, Peichl M, Migliavacca M, Cremonese E, Varlagin A, Brümmer C, De L a Motte L G, Fares S, Buchmann N, El-Madany T S, Pitacco A, Vendrame N, Li Z L, Vincke C, Magliulo E, Koebsch F. Sensitivity of gross primary productivity to climatic drivers during the summer drought of 2018 in Europe. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2020, 375(1810): 20190747.
- [12] Flach M, Brenning A, Gans F, Reichstein M, Sippel S, Mahecha M D. Vegetation modulates the impact of climate extremes on gross primary production. Biogeosciences, 2021, 18(1): 39-53.
- [13] Sun S B, Du W L, Song Z L, Zhang D B, Wu X C, Chen B Z, Wu Y T. Response of gross primary productivity to drought time-scales across China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(4): e2020JG005953.
- [14] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.
- [15] 赵苗苗,刘熠,杨吉林,刘羽,赵娜,岳天祥. 基于 HASM 的中国植被 NPP 时空变化特征及其与气候的关系. 生态环境学报, 2019, 28 (2): 215-225.
- [16] Zhu X F, Zhang S Z, Liu T T, Liu Y. Impacts of heat and drought on gross primary productivity in China. Remote Sensing, 2021, 13(3): 378.
- [17] Fang J Y, Song Y C, Liu H Y, Piao S L. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [18] Mutti P R, Dubreuil V, Bezerra B G, Arvor D, De Oliveira C P, Silva C M S E. Assessment of gridded CRU TS data for long-term climatic water balance monitoring over the São Francisco watershed, Brazil. Atmosphere, 2020, 11(11): 1207.
- [19] Kanda N, Negi H S, Rishi M S, Kumar A. Performance of various gridded temperature and precipitation datasets over Northwest Himalayan Region. Environmental Research Communications, 2020, 2(8): 085002.
- [20] Quaye-Ballard J A, An R, Ruan R, Adjei K A, Akorful-Andam S. Validation of climate research unit high resolution time-series rainfall data over three source region: results of 52 years. Advanced Materials Research, 2013, 726-731: 3542-3546.
- [21] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, Bonnefond J M, Chen J Q, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E, Verma S B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416-1431.
- [22] Gado T A, El-Hagrsy R M, Rashwan I M H. Spatial and temporal rainfall changes in Egypt. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(27): 28228-28242.
- [23] Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [24] Papagiannopoulou C, Miralles D G, Decubber S, Demuzere M, Verhoest N E C, Dorigo W A, Waegeman W. A non-linear Granger-causality framework to investigate climate - vegetation dynamics. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5): 1945-1960.
- [25] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [26] Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, Ma Z G. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. Science China Earth Sciences,

2017, 60(4): 745-760.

- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [28] 包春兰, 陈华根. 东北平原植被对气候变化的滞后响应研究. 测绘标准化, 2020, 36(3): 14-20.
- [29] 神祥金,张佳琦,吕宪国.青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(18): 6259-6268.
- [30] Wang M M, Wang S Q, Wang J B, Yan H, Mickler R A, Shi H, He H L, Huang M, Zhou L. Detection of positive gross primary production extremes in terrestrial ecosystems of China during 1982 - 2015 and analysis of climate contribution. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(9): 2807-2823.
- [31] Chen X J, Mo X G, Hu S, Liu S X. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 661-680.
- [32] Wang J, Dong J, Yi Y, Lu G, Oyler J, Smith W K, Zhao M, Liu J, Running S. Running. Decreasing net primary production due to drought and slight decreases in solar radiation in China from 2000 to 2012. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(1): 261-278.
- [33] Knapp A K, Briggs J M, Koelliker J K. Frequency and extent of water limitation to primary production in a mesic temperate grassland. Ecosystems, 2001, 4(1): 19-28.
- [34] Poiani K A, Johnson W C. Potential effects of climate change on a semi-permanent prairie wetland. Climatic Change, 1993, 24(3): 213-232.
- [35] 潘萌甜,梁俊红,李佳,姜群鸥,聂承静.内蒙古温带草原 NPP 时空变化特征分析.西北林学院学报,2018,33(1):233-240.
- [36] 侯英雨,柳钦火,延昊,田国良.我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应.应用生态学报,2007,18(7):1546-1553.
- [37] 柴立夫,田莉,奥勇,王小青.人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响.水土保持研究,2021,28(6):10.13869/j.cnki.rswc. 20210527.001.
- [38] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,李宜展,赵安周. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [39] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, 18(5): 478-483.
- [40] Zhou S, Zhang Y, Caylor K K, Luo Y Q, Xiao X M, Ciais P, Huang Y F, Wang G Q. Explaining inter-annual variability of gross primary productivity from plant phenology and physiology. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 226-227: 246-256.
- [41] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [42] Richardson A D, Anderson R S, Arain M A, Barr A G, Bohrer G, Chen G S, Chen J M, Ciais P, Davis K J, Desai A R, Dietze M C, Dragoni D, Garrity S R, Gough C M, Grant R, Hollinger D Y, Margolis H A, McCaughey H, Migliavacca M, Monson R K, Munger J W, Poulter B, Raczka B M, Ricciuto D M, Sahoo A K, Schaefer K, Tian H Q, Vargas R, Verbeeck H, Xiao J F, Xue Y K. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American carbon program site synthesis. Global Change Biology, 2012, 18(2): 566-584.
- [43] Kim Y, Kimball J S, Zhang K, McDonald K C. Satellite detection of increasing Northern Hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: implications for regional vegetation growth. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 472-487.
- [44] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桄, 宋开山, 李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008(08): 1226-1235.
- [45] 陶波,李克让,邵雪梅,曹明奎.中国陆地净初级生产力时空特征模拟.地理学报,2003(03):372-380.