DOI: 10.20103/j.stxb.202407011530

苗沛东,李传华,朱鸿娟,钟诗瑶,乔鹏飞,刘翠,张亮.2001—2020 年中国植被降水敏感性时空演变.生态学报,2025,45(8):3672-3683. Miao P D,Li C H,Zhu H J,Zhong S Y,Qiao P F,Liu C,Zhang L.Spatio-temporal evolution of precipitation sensitivity of vegetation in China from 2001 to 2020.Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8):3672-3683.

2001—2020年中国植被降水敏感性时空演变

苗沛东,李传华*,朱鸿娟,钟诗瑶,乔鹏飞,刘翠,张亮 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

摘要:植被对降水的敏感性作为评估植被对降水响应程度及预测生态系统未来变化的关键指标,其在不同干湿区域及植被类型中的敏感性及其变化趋势尚未明确。研究采用线性回归模型,结合两种植被指数,对中国 2001 年至 2020 年植被对降水的敏感性进行了估算,并对其空间格局及变化趋势进行了分析。研究结果显示,中国植被对降水的敏感性总体呈现正值,并且呈现出增长趋势。空间分布上,植被的降水敏感性与区域干旱程度呈正相关,具体表现为干旱区>半干旱区>半湿润区>湿润区;不同植被类型对降水的敏感性差异显著,其中受水分条件限制较大的温带荒漠和草原区的敏感性最高,而降水常年充足或受温度限制的区域,如热带雨林区和寒温带针叶林区的敏感性最低。从时间上看,干旱区、半干旱区、半湿润区植被的降水敏感性呈上升趋势,而湿润区则呈现下降趋势,这一现象可归因于植被增长导致的需水量增加以及增温引起的地表蒸散发增强。此外,研究还计算了不同干湿区域降水敏感性变化对整体敏感性增加的贡献度,结果指出干旱区对敏感性变化趋势的贡献度最大,两种植被指数均显示干旱区的贡献度超过 50%,其次是半干旱区。因此,在全球持续增温的背景下,植被对降水变化的敏感性将日益增强,必须采取针对性措施加强水资源管理以应对气候变化。

关键词:植被变化;气候变化;回归分析;降水敏感性;中国

Spatio-temporal evolution of precipitation sensitivity of vegetation in China from 2001 to 2020

MIAO Peidong, LI Chuanhua^{*}, ZHU Hongjuan, ZHONG Shiyao, QIAO Pengfei, LIU Cui, ZHANG Liang College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Vegetation responsiveness to precipitation is a vital indicator for evaluating vegetation reactions to water cycle variations and forecasting forthcoming ecological shifts. However, the sensitivity and associated trends across diverse arid and humid ecosystems, as well as varying vegetation types, are still poorly understood. This study employs a linear regression model, integrating two vegetation indices, to estimate the sensitivity of vegetation in China to precipitation from 2001 to 2020, and analyzes its spatial distribution and temporal progression. The findings show that the aggregate precipitation sensitivity of Chinese vegetation is affirmative and displays an upward trajectory. Spatially, there is a positive correlation between vegetation sensitivity to rainfall and regional aridity levels, with the order: arid regions>semi-arid regions>semi-humid regions. Notable disparities in precipitation sensitivity are observed among different vegetation types, with the highest sensitivity found in temperate desert and grassland ecosystems, where water availability is significantly constrained, while the lowest sensitivity is noted in regions with ample precipitation or temperature-limited ecosystems, such as tropical rainforests and boreal coniferous forests. Temporally, the precipitation sensitivity of vegetation in arid, semi-arid, and semi-humid regions exhibits an upward trend, whereas a decline is observed in humid regions. This phenomenon can be

基金项目:国家自然科学基金项目(42161058)

收稿日期:2024-07-01; 网络出版日期:2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lch_nwnu@ 126.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

attributed to increased water demand driven by vegetation growth and enhanced surface evapotranspiration resulting from climate warming. Additionally, this study quantifies the contributions of changes in precipitation sensitivity across different arid and humid zones to the overall increase in sensitivity, indicating that arid regions contribute the most to this trend, with both vegetation indices showing contributions exceeding 50%, followed by semi-arid regions. Consequently, amidst ongoing global warming, it is anticipated that vegetation's sensitivity to precipitation variability will intensify, requiring strategic approaches to bolster water resource management in light of climate change.

Key Words: vegetation changes; climate change; regression analysis; precipitation sensitivity; China

降水是植被生长的关键因素之一,直接影响植物的水分供应和营养吸收。然而,由于降水分布格局的不 均衡变化,受水分限制的区域仍在扩大^[1]。随着全球持续变暖和植被持续变绿^[2],各地区大气需水量和植被 需水量也不断增加,导致干旱加剧和植被可利用水减少^[3-4],对植被生长造成不利影响。

植被对降水的敏感性具有明显的空间异质性,整体上随着降水量的增加而降低^[3]。这种差异往往还受 到其他因素影响,例如温度、太阳辐射、土壤条件、干旱程度等环境因素^[6-7];水分利用策略、生根深度等植物 本身的生理特征也会影响降水敏感性,例如草原、灌木以及阔叶林地区的降水敏感性较高,而针叶林和混交林 的敏感性则较低^[8]。植被的降水敏感性不是固定不变的,2001—2018 年全球植被对降水的敏感性呈现下降 趋势^[8],另外一项研究表明 1981—2015 年旱地的降水敏感度显著增加,湿润地区的降水敏感度则显著降 低^[9]。气候变化是敏感性变化的主要原因,降水是提供植被需水的直接因子,温度变化通过影响地表蒸散发 和植被蒸腾,从而影响水分供给和植被的水分需求^[3,10]。氮沉积和 CO₂的施肥效应能提高植物的水分利用效 率^[11-12],从而影响植被对降水的敏感性。也有研究表明,植被会适应气候变化,如在水分胁迫时会关闭气孔, 通过减少水的消耗来防止对水分敏感性增加^[13]。总体来说,在全球气候变化的背景下,植被对降水敏感性的 时空格局已经发生了重要变化,且影响机制复杂多样。然而,中国整体植被的降水敏感性的空间分布及其变 化趋势尚不明确,不同干湿区域、植被类型的降水敏感性差异仍然值得进一步研究。找出植被对降水的敏感 区域以及敏感性显著变化的区域,对合理分配水资源和生态环境保护具有重要意义。

本研究选用叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和植被近红外反射率指数(Vegetation Near-infrared Reflectance Index, NIRv),这两种植被指数已广泛应用于植被生长监测和作物产量估算并表征植被生产力^[14-15]。首先利用线性回归模型估算植被对降水的敏感性,再使用五年移动窗口计算敏感性的变化趋势,最后根据干湿程度和植被类型分区讨论了降水敏感性的影响因素。

1 数据与方法

1.1 数据及预处理

降水和气温数据来自国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),时间分辨率为月,空间分辨 率为 0.0083°,该数据根据 CRU(Climatic Research Unit, https://crudata.uea.ac.uk/cru)发布的全球0.5°气候数 据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集,通过 Delta 空间降尺度方案在降尺度生成,使用中国 496 个独立气象观测点数据进行验证,验证结果可信^[16-20]。

叶面积指数数据(LAI)为GLASS-LAI数据产品,下载自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),空间分辨率为0.05°×0.05°,时间尺度为月。

NIRv 是一种新型植被指数,NIRv 是由近红外波段(Near-infrared Reflectance,NIR)与归一化差值植被指数(Normalized Differential Vegetation Index,NDVI)相乘得到的,NDVI 与 NIR 数据来源于 MODIS 卫星的 MOD13C2 产品(https://ladsweb.nascom.nasa.gov/),空间分辨率为 0.05°×0.05°,时间尺度为月。NIRv 数据已 广泛用于全球或区域尺度的植被动态监测,相比于 NDVI,NIRv 能有效解决植被和非植被混合像元的问题,并

干燥度指数(Aridity Index, AI)数据来自第3版全球干旱指数和潜在蒸散数据库(https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v5)。是由潜在蒸散发和降水量的比值计算得来,空间分辨率为0.0083333°,时间分辨率为月。AI是表征一个地区干湿程度的指标,根据AI分类可以概括地把区域分为湿润(AI>0.65)、半湿润(0.65>AI≥0.5)、半干旱(0.5>AI≥0.2)和干旱地区(AI<0.2)^[21]。

 CO_2 数据来自 NASA 发布的 AIRS CO_2 数据集(https://disc.gsfc.nasa.gov),该数据被认为是全球范围内二 氧化碳观测数据最可靠的产品之一^[22-23],空间分辨率为 2°×2.5°,时间分辨率为月。

中国植被区划数据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/)。 图 1反映了我国 8 大植被区被的区域性分布和地带性分异,分别为寒温带针叶林区域(R1);暖温带落叶阔叶 林区域(R2);青藏高原高寒植被区域(R3);热带季风雨林、雨林区域(R4)主要是半常绿季雨林或季节雨林; 温带草原区域(R5)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;温带荒漠区域(R6)典型植 被为温带荒漠植被,普遍具有旱生特征;温带针叶、落叶阔叶混交林(R7);亚热带常绿阔叶林区域(R8)^[24]。



图 1 中国干湿分区示意图和中国植被类型图

Fig.1 Schematic diagram of dry and wet regions in China and map of vegetation types in China

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

为统一数据的空间分辨率,使用双线性插值法将以上数据重采样为5km×5km。

Ŷ

1.2 研究方法

1.2.1 敏感性计算

线性回归模型中,以植被指数为因变量,降水量为自变量,使用线性回归的斜率来定义植被对降水的敏感性^[8,25-26],该方法被广泛用于敏感性计算,公式如下:

$$r_i = \alpha(\text{PRE}) + \varepsilon$$

式中, y_i表示 2001—2020 年 LAI、NIRv 标准化值, PRE 表示降水, α 是斜率, ε 为常数项。斜率的值表示植被对 降水的敏感性, 正值表示降水量增加对植被为正影响。敏感性绝对值越大, 表明降水变化对植被生长影响 越大。

1.2.2 敏感性时间变化计算

基于五年的移动窗口计算 2001—2020 年期间植被对降水敏感性的变化趋势,对移动窗口的植被指数与 降水数据进行线性回归,以1年为间隔移动窗口并重复上述计算,直到完成对整个研究时段的遍历。将计算 结果赋予窗口中心年份,如使用 2001—2005 年窗口计算的结果作为 2003 年的敏感性值。

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

Theil-Sen Median 方法又被称为 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算 效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,常被用于长时间序列数据的趋势分析中^[27]。

(1)

(2)

$$\beta = \operatorname{mean}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \ \forall j > i$$
(3)

式中: x_i 和 x_i 为时间序列数据。 β 大于0表示上升趋势, β 小于0表示下降。

Mann-Kendall 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^[28]。

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} \tag{4}$$

$$\operatorname{vas}(S) = \frac{n \times (n-1) \times (2n-5)}{18}$$
 (5)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i)$$
(6)

$$\operatorname{sgn}(x_{j}-x_{i}) = \begin{cases} 1 & x_{j}-x_{i} > 0 \\ 0 & x_{j}-x_{i} = 0 \\ 1 & x_{i}-x_{i} < 0 \end{cases}$$
(7)

式中,x_j和x_j是样本时间序列数据集,n和 sgn 分别是时间序列长度和符号函数。Z>0表示时间序列有增加趋势,Z<0表示减少趋势,Z=0表示时间序列无变化趋势。

1.2.4 区域贡献率计算

j区域的敏感性对或全局敏感性的贡献值定义为^[29]:

$$f_{j} = \frac{\sum_{i} \frac{X_{ji} |X_{i}|}{|X_{i}|}}{\sum_{i} |X_{i}|}$$

$$\tag{8}$$

式中:t表示年份,即 2001—2020,j代表研究时段内不同干湿类型区域,x_{jt}是j 区域在t年的通量距平,X_t是全局通量距平。根据该定义,f_j是j 区域的相对距平 x_{jt}/X_t,用绝对全局距平值|X_t|加权。

区域对全局的贡献率为公式(8)中全局通量距平为区域通量距平之和,即

$$X_{t} = \sum_{j} x_{jt}$$
(9)

2 结果与分析

2.1 两种植被指数时空变化

2001—2020 年期间两种植被指数的变化趋势一致,整体上均呈现显著增加趋势(图2),年均变化率分别为:0.761×10⁻²、0.106×10⁻²。说明中国植被状况不断改善。两种指数变化速率相差不大,波动情况也较为相似。

图 3 显示两种植被指数的空间分布格局具有较高的一致性,整体上都呈现由西北向东南递增的分布格局。2001—2020 年间中国植被整体呈增加趋势,LAI、 NIRv 的增加区域占比均大于 79%,显著增加(P<0.05)的区域分别占 64%和 45%,主要集中在黄土高原、华东南部、中南、华北、华中、华南以及东北等地区。下降趋







势主要集中在青藏高原、华东中部和北部、西北北部等区域。显著下降(P<0.05)的区域占比较少,分别为 0.4%和 2.3%。

2.2 植被对降水敏感性的空间格局

按自然间断点分级法将敏感性值分为6个等级,即高度、中度和轻微正敏感,轻微、中度和高度负敏感, 图 4中用数值依次表示为3、2、1、-1、-2、-3。来代表植被对降水不同程度的响应。

总体来看,图4两种植被指数的降水敏感性空间分布格局比较相似,LAI和NIRv对降水敏感性的均值分别为0.18×10⁻⁴/mm、1.34×10⁻⁴/mm。总体上正敏感性区域大于负敏感性,高度和中度敏感的区域主要分布在华北中北部内蒙古高原和呼伦贝尔高原地区、东北西部地区以及西北东部地区,该区域的植被类型主要为温带草原和暖温带落叶阔叶林区域,青藏高原部分地区也显示出较高的敏感性。然而,敏感性最高值却没有出现在最干旱的地区,而是在半干旱区。高度负敏感的区域主要集中在东北最北部地区,主要植被类型为寒温带针叶林。从像元占比来看,轻微正敏感的区域最多,分别占比为34.31%、45.24%。NIRv 对降水显示正敏感的区域普遍大于LAI,像元占比分别为76.41%和59.79%。显示负敏感的区域则普遍小于LAI 像元占比,分别为23.59%和40.21%。





将干旱指数按照数值区间分为20个干湿梯度,统计各梯度内的敏感性均值,并根据AI数据的分类标准,将AI=0.5作为干旱和湿润的分界线。两种植被指数对降水的敏感性均随着湿润程度的增加而减少(图5),整体上NIRv对降水的敏感性高于LAI,并且随着湿润程度的增加两者更加趋于一致。根据敏感性在各干湿区域均值的统计结果(图6),同样显示出敏感性会随着干旱程度的增加而增加。

不同植被类型对降水的敏感性存在明显差异。大部分植被类型对降水的敏感性为正值(图6),表明年降水量的增加有利于大部分植被生长。寒温带针叶林区域(R1)的敏感性值普遍为负,说明该区域植被对降水变化是负响应。热带季风雨林、雨林区域(R4)、亚热带常绿阔叶林区域(R8)等植被类型的降水敏感性绝对 值较低,说明降水对该区域植被生长影响较小。在暖温带落叶阔叶林区域(R2)、青藏高原高寒植被区域





(R3)、温带草原区(R5)、温带荒漠区(R6)以及温带针叶、落叶阔叶混交林(R7)的敏感性较高。

2.3 植被对降水敏感性的变化趋势

根据方法 1.2.2 对敏感性时间趋势的计算结果,在 2001—2020 年期间,LAI 和 NIRv 对降水的敏感性总体上均呈增加趋势(图7)。平均变化率分别为:0.148×10⁻⁴/mm、0.318×10⁻⁴/mm。

两种植被指数敏感性趋势的空间分布较为一致(图8)。但总体上 NIRv 的敏感性趋势增加的像元数量大 于减少的,而 LAI 则相反。LAI 敏感性显著增加像元占比为 14.2%,显著减少像元占比为 18.4%。NIRv 的敏 感性显著增加和减少趋势的占比分别是 18.1%和 11.3%。显著增加的区域主要在大兴安岭北部、青藏高原、 内蒙古草原、青藏高原等地区。显著减少的区域主要分布在长白山、东北平原、准噶尔盆地、云贵高原等地区。

湿润区的敏感性趋势均值均显示为负值(图9),说明湿润区的敏感性总体上是下降的,而半湿润区的敏 感性趋势为正。半干旱区和干旱区的敏感性趋势普遍为正,说明旱地的敏感性总体上是增加的。从植被类型 来看(图9),敏感性增加趋势较大的区域主要为寒温带针叶林区域(R1)、青藏高原高寒植被区域(R3)和热 带季风雨林、雨林区域(R4)。该结果表明这些区域对可用水的脆弱性增加,在未来气候变化背景下可能面临 更加严峻的挑战。温带草原区域(R5)和温带针叶、落叶阔叶混交林(R7)的敏感性趋势变化较小,这些区域 对降水变化的响应相对稳定。









2.4 不同干湿区域对降水敏感性趋势贡献度的空间分布

不同地区对敏感性趋势贡献度的空间分布如图 10。对 LAI 的敏感性趋势显示高正贡献的区域主要分布 在大兴安岭、长白山脉以及中国西南地区,高负贡献的区域主要分布在呼伦贝尔高原、华北平原和云贵高原。 对 NIRv 的敏感性趋势显示高正贡献的区域主要位于华北、东北、西北西部地区,高负贡献的区域主要分布在 华北南部、西北北部、东北部分地区以及青藏高原部分地区。

干旱区对敏感性趋势的贡献度最大,均大于 50%。不同区域对 NIRv 的敏感性趋势贡献度随着干旱程度的增加而增加,而半湿润区对 LAI 的敏感性趋势贡献度仅次于干旱区,为 41.19%,大于半干旱区的贡献度

12.30%。湿润区对敏感性趋势的贡献最小,其中 LAI 显示为负贡献(图 10)。由此结果可见,不同区域对两种指数趋势的贡献度具有较高的一致性。

3 讨论

3.1 降水敏感性的空间格局

植被对降水的敏感性存在明显的空间差异性,总体 规律是敏感性随着干旱程度的增加而增加,正敏感性主 要集中在半干旱和干旱地区,这与植被对降水和土壤水 分敏感性的全球模式具有一致性^[8,14]。在半干旱地区, 由于持续的气候变化,温度升高导致的蒸发增加,许多 地区的土壤水分正在下降^[30-31],植被更加依赖于足够



的降水来维持生长和健康,降水能快速对植被的生长产生积极的影响,因此显示出较高的敏感性。但在部分 干旱的地区也出现了较低的敏感性,比如准噶尔盆地、腾格里沙漠、青藏高原等地区,主要原因是植被大多生 长在荒漠或者高原极寒地区,由于相对生长率低、蒸发率高等,从而导致敏感性较低或者为负^[32-34]。



图 8 2001—2020 年敏感性趋势的空间分布及面积占比 Fig.8 Spatial distribution and area proportion of the sensitivity trend from 2001 to 2020

在不同植被类型区域,温带草原区(R5)、温带荒漠区(R6)的敏感性最高,植被主要是草地和灌木,其气 孔调节能力较弱^[35-36],植物生长需要竞争有限的水资源,更容易受到降水变化的影响,供水量的小幅增加往 往会引发植被指数的急剧变化^[37]。寒温带针叶林(R1)敏感性为负,该区位于高纬度地区,降水丰沛,但较高 的降水往往伴随着太阳辐射减少和温度降低^[1,38],限制了植物光合作用,从而导致植被生产力的下降,因而敏 感性为负。热带季风雨林、雨林区域(R4)的敏感性接近零值,该区域常年降水充足,植被根系发达,土壤能够 较好地保持水分供应^[39],因此对降水变化不敏感。

3.2 降水敏感性的变化趋势

2001—2020年期间降水敏感性总体上呈现增加趋势,其中湿润区呈现下降趋势,其他区域则呈现上升趋势。最近多个研究证实了该结论,这应该与植被需水量和植被可用水量这两方面的变化有关^[40-42]。研究期间,植被指数显著增加,表明植被需水量增加;温度增加导致蒸散发增加^[43],土壤干燥和更频繁的干旱导致土











Fig.10 Sensitivity trend contribution distribution and contribution rate of each dry and wet region

http://www.ecologica.cn

壤水分含水量减少^[44],因此植被可用水量减少;以上两个因素是植被对降水敏感性增加的整体原因。但与近 期报道的 2001—2018 年全球植被对降水敏感性的变化趋势相反^[8],该研究称敏感性大幅下降的区域主要是 由于降水增加导致的,与本文研究结果不同的原因可能是研究区域及时段的差异。

旱地敏感性增加主要是因为半干旱区植被增长迅速(图3),植被需水量增加导致的,虽然降水总量增加 会缓解水分需求,但降水的变异性增加^[43]也会减少植被水分可利用量。另一原因可能是温度增加以及饱和 水汽压差普遍增加导致干旱区植物蒸腾量和水分蒸发速率加快,植物受到的水分胁迫进一步增加,从而造成 敏感性的增加^[44-45]。湿润地区植被的降水敏感性下降,该地区降水增加趋势的面积占 83%,水分供应更加 充足,因此敏感性下降。CO₂浓度升高(图 11),植物的气孔导度和水分蒸发减少,这可以提高其水分利用效 率^[46]。然而,旱地植被覆盖增加导致需水量随之也必然增加,这可能抵消了 CO₂增加形成的节水效应,增加 植被对降水的敏感性。在湿润地区,植被生长所需水资源压力较小,CO₂浓度升高的直接节水效应使植物所 需的水量减少,降低了植被对降水的敏感性^[47-48]。



Fig.11 Trends in precipitation, temperature and CO₂

近年来,人类活动对陆地植被的影响在持续上升,并在干旱半干旱区等环境脆弱区取代气候变化成为影响植被变化的决定性因素^[49-50]。持续实施的三北防护林工程、退耕还林还草工程等大规模的生态工程项目, 对中国北方植被恢复起到重大作用^[51-53]。由于人类活动干预使干旱区植被覆盖度总体呈现增加趋势,加剧 某些区域的水资源短缺问题,从而加剧水分胁迫,导致植被对降水更加敏感^[54]。

4 结论

本文利用 2001—2020 年中国 LAI 和 NIRv 计算了植被对降水的敏感性,并探讨其时空格局变化及影响因素。从空间上看,干旱地区的敏感性大于湿润地区,干旱地区植被更容易受到降水变化的影响。因中国植被持续增加,增加了水分需求,并且增温加剧了地表蒸散发,导致研究期间中国植被对降水的敏感性整体呈上升趋势,尤其是半干旱区和干旱区植被增加速率最快,加剧了该区域植被降水敏感性。干旱区对中国降水敏感性贡献最大,湿润区的降水敏感性下降。在进一步增温和降水分布更加不平衡的气候变化背景下,中国植被生产力特别是在旱地生态系统将受到更严峻的挑战。

参考文献(References):

- [1] Jiao W Z, Wang L X, Smith W K, Chang Q, Wang H L, D'Odorico P. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades. Nature Communications, 2021, 12(1): 3777.
- [2] Pascolini-Campbell M, Reager J T, Chandanpurkar H A, Rodell M. RETRACTED ARTICLE: a 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. Nature, 2021, 593: 543-547.

8期

- [3] Zuidema P A, Heinrich I, Rahman M, Vlam M, Zwartsenberg S A, van der Sleen P. Recent CO₂ rise has modified the sensitivity of tropical tree growth to rainfall and temperature. Global Change Biology, 2020, 26(7): 4028-4041.
- [4] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Lienert S, Liu S G, Nabel J E M S, Qin Z C, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.
- [5] Maurer G E, Hallmark A J, Brown R F, Sala O E, Collins S L. Sensitivity of primary production to precipitation across the United States. Ecology Letters, 2020, 23(3); 527-536.
- [6] Liu M, Yang G J, Yuan W P, Li Z H, Gao M L, Yang Y, Long H L, Meng Y, Li C C, Hu H T, Li H L, Yuan Z L. Overridingly increasing vegetation sensitivity to vapor pressure deficit over the recent two decades in China. Ecological Indicators, 2024, 161: 111977.
- [7] Cui J P, Lian X, Huntingford C, Gimeno L, Wang T, Ding J Z, He M Z, Xu H, Chen A P, Gentine P, Piao S L. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport. Nature Geoscience, 2022, 15: 982-988.
- [8] Zeng X, Hu Z M, Chen A P, Yuan W P, Hou G L, Han D R, Liang M Q, Di K, Cao R C, Luo D N. The global decline in the sensitivity of vegetation productivity to precipitation from 2001 to 2018. Global Change Biology, 2022, 28(22) : 6823-6833.
- [9] Zhang Y, Gentine P, Luo X Z, Lian X, Liu Y L, Zhou S, Michalak A M, Sun W, Fisher J B, Piao S L, Keenan T F. Increasing sensitivity of dryland vegetation greenness to precipitation due to rising atmospheric CO₂. Nature Communications, 2022, 13(1): 4875.
- [10] Yin P, Li C H, Wei Y F, Zhang L, Liu C, Chen J H, Liu Y F, Xiong X T. Impact of relative temperature changes on vegetation growth in China from 2001 to 2017. Journal of Cleaner Production, 2024, 451: 142062.
- [11] Adams M A, Buckley T N, Binkley D, Neumann M, Turnbull T L. CO₂, nitrogen deposition and a discontinuous climate response drive water use efficiency in global forests. Nature Communications, 2021, 12(1): 5194.
- Ueyama M, Ichii K, Kobayashi H, Kumagai T, Beringer J, Merbold L, Euskirchen E S, Hirano T, Marchesini L B, Baldocchi D, Saitoh T M, Mizoguchi Y, Ono K, Kim J, Varlagin A, Kang M, Shimizu T, Kosugi Y, Bret-Harte M S, Machimura T, Matsuura Y, Ohta T, Takagi K, Takanashi S, Yasuda Y. Inferring CO₂ fertilization effect based on global monitoring land-atmosphere exchange with a theoretical model. Environmental Research Letters, 2020, 15(8): 084009.
- [13] Konings A G, Williams A P, Gentine P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation. Nature Geoscience, 2017, 10: 284-288.
- [14] Li W T, Migliavacca M, Forkel M, Denissen J M C, Reichstein M, Yang H, Duveiller G, Weber U, Orth R. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. Nature Communications, 2022, 13(1): 3959.
- [15] Badgley G, Field C B, Berry J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. Science Advances, 2017, 3(3): e1602244.
- [16] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(1): 79-94.
- [17] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901–2100. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [18] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019,11(4): 1931-1946.
- [19] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [20] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, Chen Y M. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100. International Journal of Climatology, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [21] 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.
- [22] Engelen R J, McNally A P. Estimating atmospheric CO₂ from advanced infrared satellite radiances within an operational four-dimensional variational (4D-var) data assimilation system: results and validation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D18): e2005jd005982.
- [23] Yang H, Feng G F, Xiang R, Xu Y J, Qin Y, Li S N. Spatio-temporal validation of AIRS CO₂ observations using GAW, HIPPO and TCCON. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3583.
- [24] 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.
- [25] Abel C, Horion S, Tagesson T, De Keersmaecker W, Seddon A W R, Abdi A M, Fensholt R. The human-environment nexus and vegetation-rainfall sensitivity in tropical drylands. Nature Sustainability, 2021, 4: 25-32.
- [26] Liu Q, Yao F M, Garcia-Garcia A, Zhang J H, Li J, Ma S Y, Li S J, Peng J. The response and sensitivity of global vegetation to water stress: a comparison of different satellite-based NDVI products. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 120: 103341.
- [27] Liu Y X, Liu X F, Hu Y N, Li S S, Peng J, Wang Y L. Analyzing nonlinear variations in terrestrial vegetation in China during 1982—2012. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(11): 722.
- [28] Guo M, Li J, He H S, Xu J W, Jin Y H. Detecting global vegetation changes using Mann-Kendal (MK) trend test for 1982—2015 time period. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 907-919.
- [29] Korth H, Tsyganenko N A, Johnson C L, Philpott L C, Anderson B J, Al Asad M M, Solomon S C, Jr McNutt R L. Modular model for Mercury's

magnetospheric magnetic field confined within the average observed magnetopause. Journal of Geophysical Research Space Physics, 2015, 120(6): 4503-4518.

- [30] Li W T, Migliavacca M, Forkel M, Walther S, Reichstein M, Orth R. Revisiting global vegetation controls using multi-layer soil moisture. Geophysical Research Letters, 2021, 48(11): e92856.
- [31] Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Peñuelas J, Seneviratne S I. Quantifying soil moisture impacts on light use efficiency across biomes. New Phytologist, 2018, 218(4): 1430-1449.
- [32] Liu H H, Liu Y, Chen Y, Fan M G, Chen Y, Gang C C, You Y F, Wang Z N. Dynamics of global dryland vegetation were more sensitive to soil moisture: evidence from multiple vegetation indices. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 331: 109327.
- [33] 陈甲豪,吴凯,胡中民,杨涵. 2000—2021 年青藏高原生长季植被敏感性的时空变异. 生态学报, 2023, 43(10): 4054-4065.
- [34] Hsu J S, Powell J, Adler P B. Sensitivity of mean annual primary production to precipitation. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2246-2255.
- [35] Anderegg W R L, Trugman A T, Bowling D R, Salvucci G, Tuttle S E. Plant functional traits and climate influence drought intensification and landatmosphere feedbacks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(28): 14071-14076.
- [36] Carminati A, Javaux M. Soil rather than xylem vulnerability controls stomatal response to drought. Trends in Plant Science, 2020, 25(9); 868-880.
- [37] Knapp A K, Carroll C J W, Denton E M, La Pierre K J, Collins S L, Smith M D. Differential sensitivity to regional-scale drought in six central US grasslands. Oecologia, 2015, 177(4): 949-957.
- [38] 游桂莹,张志渊,张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性. 生态学报,2018,38(23): 8392-8399.
- [39] Maurel C, Nacry P. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. Nature Plants, 2020, 6(7): 744-749.
- [40] Li Z, Ciais P, Wright J S, Wang Y, Liu S, Wang J M, Li L Z X, Lu H, Huang X M, Zhu L, Goll D S, Li W. Increased precipitation over land due to climate feedback of large-scale bioenergy cultivation. Nature Communications, 2023, 14(1): 4096.
- [41] Yang Y T, Roderick M L, Guo H, Miralles D G, Zhang L, Fatichi S, Luo X Z, Zhang Y Q, McVicar T R, Tu Z Y, Keenan T F, Fisher J B, Gan R, Zhang X Z, Piao S L, Zhang B Q, Yang D W. Evapotranspiration on a greening earth. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4: 626-641.
- [42] Zhang Y, Parazoo N C, Williams A P, Zhou S, Gentine P. Large and projected strengthening moisture limitation on end-of-season photosynthesis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(17): 9216-9222.
- [43] Liu G, Liu H Y, Yin Y. Global patterns of NDVI-indicated vegetation extremes and their sensitivity to climate extremes. Environmental Research Letters, 2013,8(2): 025009.
- [44] Cheng Y M, Liu L, Cheng L, Fa K Y, Liu X C, Huo Z L, Huang G H. A shift in the dominant role of atmospheric vapor pressure deficit and soil moisture on vegetation greening in China. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128680.
- [45] Li S J, Wang G J, Zhu C X, Lu J, Ullah W, Fiifi Tawia Hagan D, Kattel G, Liu Y, Zhang Z Y, Song Y, Sun S L, Zheng Y, Peng J. Vegetation growth due to CO₂ fertilization is threatened by increasing vapor pressure deficit. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129292.
- [46] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R, Yang Y T. A simple hypothesis of how leaf and canopy-level transpiration and assimilation respond to elevated CO₂ reveals distinct response patterns between disturbed and undisturbed vegetation. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017,122(1): 168-184.
- [47] Cui J P, Piao S L, Huntingford C, Wang X H, Lian X, Chevuturi A, Turner A G, Kooperman G J. Vegetation forcing modulates global land monsoon and water resources in a CO₂-enriched climate. Nature Communications, 2020, 11(1): 5184.
- [48] Gedney N, Cox P M, Betts R A, Boucher O, Huntingford C, Stott P A. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. Nature, 2006, 439(7078): 835-838.
- [49] Liu D, Chen W F, Li L N. Disentangling the relative effects of climate change and anthropogenic activities on paddy expansion in the northern Sanjiang Plain of China. Ecological Indicators, 2023, 154: 110543.
- [50] Zhang R Y, Wang Z W, Han G D, Schellenberg M P, Wu Q, Gu C. Grazing induced changes in plant diversity is a critical factor controlling grassland productivity in the Desert Steppe, Northern China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 73-83.
- [51] Niu Q F, Xiao X M, Zhang Y, Qin Y W, Dang X H, Wang J, Zou Z H, Doughty R B, Brandt M, Tong X W, Horion S, Fensholt R, Chen C, Myneni R B, Xu W H, Di G Z, Zhou X M. Ecological engineering projects increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid Northern China. Land Degradation & Development, 2019, 30(13): 1620-1631.
- [52] Qiu B W, Chen G, Tang Z H, Lu D F, Wang Z Z, Chen C C. Assessing the Three-North Shelter Forest Program in China by a novel framework for characterizing vegetation changes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 133: 75-88.
- [53] Wang X M, Zhang C X, Hasi E, Dong Z B. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? Journal of Arid Environments, 2010, 74(1): 13-22.
- [54] Overpeck J T, Breshears D D. The growing challenge of vegetation change. Science, 2021, 372(6544): 786-787.