

# 干旱胁迫下植被生产力与冠层结构易损性的非一致性评估

张璐，畅建霞<sup>\*</sup>，杨贵斌，郭爱军，王义民

(西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 频繁的干旱事件已对植被正常生长与生态系统稳定构成威胁。为解析干旱对植被影响的复杂性, 该研究基于Copula模型, 利用归一化植被指数、总初级生产力和标准化降水蒸散发指数, 构建了气象干旱胁迫下植被生产力与冠层结构损失的条件概率模型, 并运用偏最小二乘路径模型, 探讨了植被对干旱响应的驱动因子。结果表明, 1982—2018年长江流域植被生产力、冠层结构对气象干旱的滞后响应在时间维和空间维呈现出非一致性特征。时间上, 植被生产力对气象干旱的响应时间较冠层结构更长; 空间上, 汉江流域和长江中下游干流区植被生产力易损性高, 而金沙江流域和长江干流区间冠层结构易损性高。不同类型植被的易损性不同, 水田和常绿阔叶林的生产力损失概率较高, 分别为21.05%、17.26%, 草地和常绿针叶林的冠层结构损失概率更大, 分别为36.35%、35.73%。此外, 植被生产力与冠层结构的关键环境影响因子不同, 前者主要受控于冠层结构和土壤水分, 后者则对海拔和气候因子更为敏感。研究成果有助于深入了解干旱对植被的影响, 进而为生态系统管理与保护提供重要的科学依据。

**关键词:** 植被生产力; 冠层结构; 植被响应; 触发阈值; 长江流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408193

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-06-0145-09

张璐, 畅建霞, 杨贵斌, 等. 干旱胁迫下植被生产力与冠层结构易损性的非一致性评估[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 145-153. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408193 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Lu, CHANG Jianxia, YANG Guibin, et al. Assessing the non-uniform vulnerability of vegetation productivity and canopy structure under drought stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(6): 145-153. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408193 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

干旱灾害是中国最主要的自然灾害之一, 对植被生长具有重要影响, 极端干旱可能会造成植被大面积死亡<sup>[1-2]</sup>。干旱对植被的影响可分为直接影响和间接影响。直接影响包括水分减少限制植物生长、光合作用和养分吸收, 导致初级生产力降低、冠层结构、营养循环改变和群落组成变化<sup>[3-4]</sup>。间接影响表现为植物生产力下降, 破坏食物网和营养相互作用, 引发连锁效应<sup>[5]</sup>。同时, 反复且严重的干旱会导致生态系统碳吸收和植被生产力下降, 并削弱植被的恢复能力<sup>[6]</sup>。因此, 了解植被对干旱的响应有助于预测和评估干旱对生态系统的影响, 对实现中国生态文明建设具有重要科学价值。

现代遥感技术为大尺度科学研究提供了丰富的植被监测指标和多样化的解决途径, 多类型植被指标可实现对植被生长特征的准确刻画, 如表征冠层结构的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、叶面积指数(leaf area index, LAI), 表征植被生产力的总初级生产力(gross primary productivity, GPP)、净初

级生产力(net primary productivity, NPP)和净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)等。其中, NDVI和GPP被认为是对干旱最敏感的植被指标<sup>[4]</sup>。

以往研究基于大尺度卫星遥感监测数据, 探讨了植被与干旱的响应关系, 结果显示干旱对植被生产力和冠层结构产生了显著影响, 同时, 不同植被指标在量化植被与干旱响应关系时表现出非一致性<sup>[7]</sup>。ZHENG等<sup>[8]</sup>利用1982—2018年NDVI和GPP探究了干旱条件下中国植被的动态变化特征, 研究结果显示, 尽管中国植被整体呈现出显著的变绿, 但其生产力并未同步提升。在特定生态系统中, 植被生产力与冠层结构也表现出对干旱响应关系的非一致性, 如中国华南地区LAI与GPP在干旱敏感性上存在差异, 其原因仍有待分析<sup>[9]</sup>。此外, 不同气候及地理条件下, 区域水文循环过程的差异也会影响植被对水分胁迫的响应, 进一步增加了植被与干旱响应关系的不确定性<sup>[10]</sup>。目前, 不同植被生长特征与干旱响应关系的差异及其主要影响因素尚不明确, 亟待深入研究。在此背景下, 偏最小二乘路径模型(partial least squares path modeling, PLS-PM)作为一种结构方程建模方法, 能够有效识别关键影响因子, 并解析各因子间的作用关系, 已被广泛应用于探究多变量间的相互作用、因果关系。与传统的结构方程模型相比, PLS-PM更加灵活, 对数据的分布假设要求较低, 可用于计算不同潜在变量对响应变量的直接效应和间接效应, 近年来被逐渐应用于干旱与植被关系研究等领域<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2024-08-27 修订日期: 2025-02-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2243233)

作者简介: 张璐, 博士生, 研究方向为干旱半干旱地区水文生态。

Email: zl0043@126.com

※通信作者: 畅建霞, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文水资源系统工程。Email: chxiang@xaut.edu.cn

长江流域受气候变化和人类活动干扰，干旱发生频率和强度均表现为显著增加趋势，导致了巨大的社会经济损失，严重威胁到水资源利用和生态环境健康<sup>[1]</sup>，如 2022 年夏季长江流域大旱，流域来水偏少，农作物受旱面积大，洞庭湖和鄱阳湖水位较常年同期偏低 4.5~6.0 m<sup>[2]</sup>，水生态系统功能下降，严重威胁粮食生产安全和生态环境健康。因此，针对干旱引发的长江流域生态问题，本研究基于 Copula 模型，采用去趋势、去季节性后的标准化总初级生产力 (standardized gross primary production, SGPP)、标准化归一化植被指数 (standardized normalized difference vegetation index, SNDVI) 分别表征植被生产力和冠层结构，构建气象干旱胁迫下植被生产力与冠层结构损失的条件概率模型，评估植被不同生长特征与气象干旱的响应关系，并定量解析其关键影响因素，以期为生态系统健康维护与可持续发展提供重要的科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

长江流域全长约 6 380 km，是中国第一长河，位于

24.30°N~35.45°N, 90.33°E~122.25°E，横跨多个省份，占中国陆地面积的 18.8%。长江流域大部分地区属于亚热带季风气候，夏季炎热、冬季温和，是中国重要的生态安全屏障、粮食生产基地，以及生物多样性保护的重点区域（图 1）。地形复杂多样，包括高山、丘陵、平原和盆地等地貌类型。流域内土地覆盖类型多样，森林与草地占长江流域植被区域的 69.59%，农田为 30.41%。其中，森林包括常绿针叶林 (evergreen needleleaf forest, ENF)、落叶阔叶林 (deciduous broadleaf forest, DBF) 和常绿阔叶林 (evergreen broadleaf forest, EBF) 等。长江流域是中国最重要的水资源集中区之一，蕴藏着丰富的水能资源，但降水时空分布不均匀。源区多年平均降水量不足 400 mm，而东部地区多年平均降水量大于 2 000 mm，一年中超过 60% 的降水集中于夏季，这使得其部分区域或季节极易发生干旱事件<sup>[3]</sup>。1982~2018 年长江流域源头降雨量呈显著增加趋势，而流域中部，如四川盆地、重庆部分区域，以及长江流域东部区域的降雨量呈下降趋势。此外，基于长江流域的水文特征，并参考其二级流域片划分方案，本研究将整个流域划分为 12 个子流域（图 1）。

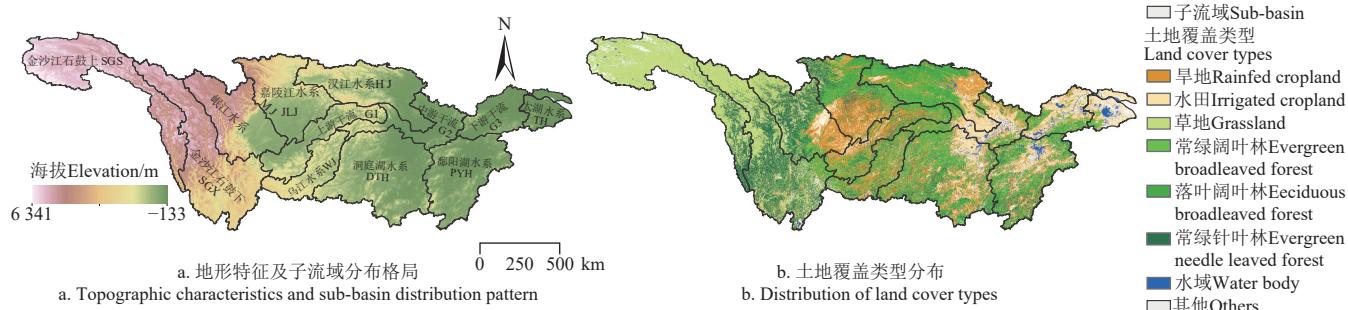


图 1 长江流域海拔、子流域分区及土地覆盖类型图

Fig.1 Elevation, sub-basin, and land cover type map of the Yangtze River Basin

### 1.2 数据来源与预处理

为了更好地探究植被对干旱的响应，及其与环境因子的交互作用，本研究对多源数据进行了预处理，采用双线性插值法将所有数据集的空间分辨率重采样到 0.1° 网格，以确保数据的空间一致性。

土壤水分数据来自全球陆地数据同化系统 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)，饱和水汽压差 (vapor pressure deficit, VPD) 来源于 TerraClimate 数据集 (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>)；潜在蒸散发数据来自 GLEAM (<https://www.gleam.eu/>)，该数据集估算了裸地蒸腾、植物蒸腾、冠层截流蒸腾、水面蒸发和雪升华等陆地蒸散发的不同组分，可以很好地再现长江流域蒸散发<sup>[4]</sup>；气温、降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心中国区域地面气象要素驱动数据集 (<http://poles.tpdc.ac.cn/>)。该数据集的可获取时段截至 2018 年，尽管未涵盖最新年份，但其时间跨度和数据质量已充分满足本文的研究需求。地面高程与土壤质地数据来源于资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/>)；土地覆盖数

据 (1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2018) 来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统 1985—2022 全球 30 m 精细土地覆盖动态监测数据集 ([https://data.casearth.cn/thematic/glc\\_fcs30?lang=zh\\_CN](https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30?lang=zh_CN))。

GPP 数据来自马里兰大学 GLASS 产品 (<http://glass.umd.edu/>)。1982~2015 年 GIMMS NDVI 数据来源于美国国家航空航天局 (<https://daac.ornl.gov/VEGETATION/>)，并利用 Google Earth Engine 云计算平台处理 MOD13A2 V006 数据集 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/>)，采用最大值合成法，经裁剪、重采样和重投影等预处理，得到 2015~2018 年 NDVI 序列。2 个 NDVI 数据集在趋势分析和单个 NDVI 测量中均具有突出性能，可以结合使用。由于不同地区和时间的植被数据可能受到植被类型、气候条件和人类活动等的干扰，导致数据之间难以直接比较。为消除这些影响，更好地观察和分析短期或季节性变化，需去除 NDVI 与 GPP 的长期趋势。参考张更喜等<sup>[4]</sup>对植被指数数据标准化的方法，首先将每月 NDVI 与 GPP 减去最佳线性拟合线，进

行去趋势处理, 通过 MATLAB 的 detrend 函数实现。将去趋势后的 NDVI 与 GPP 数据进行标准化处理, 得到的 NDVI 与 GPP 序列分别记为 SNDVI 与 SGPP。据统计, 长江流域约 90% 的干旱事件都发生在 5—9 月的植被生长季, 显著影响植被生长和农业生产<sup>[13]</sup>。因此, 本文选择 1982—2018 年的 5—9 月为研究期, 分析植被对干旱的响应关系及其影响因素。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水蒸散发指数

标准化降水蒸散发指数 (standardized precipitation and evapotranspiration index, SPEI) 是一种常用的干旱指标, 用于评估特定地区的气象干旱状况。SPEI 具有计算方法灵活、应用范围广泛和综合评估干旱情况等优势, 是深入理解和应对干旱的有力工具<sup>[15]</sup>。SPEI 的主要计算步骤为: 建立逐月降水量与潜在蒸发量的差值序列  $D$ , 利用多种备选概率分布函数 (如 Gamma 分布、正态分布或 Log-logistic 分布) 拟合  $D$  序列, 并优选最佳边缘分布函数  $F(x)$ 。将  $F(x)$  进行标准化处理, 以消除季节和地区之间的差异, 最终求得 SPEI 值, 并参照 GB/T 20481-2017《气象干旱等级》标准对 SPEI 进行干旱分级<sup>[16-17]</sup>。

#### 1.3.2 相关分析

由于植被对降水和土壤水分的滞后响应, 导致植被生长状态通常在气象干旱发生后的一段时间内才逐渐显现出来。因此, 本文利用 1982—2018 年长时间序列植被指数 (SNDVI 和 SGPP) 和不同时间尺度 (1—12 个月) SPEI, 计算植被特征与不同时间尺度干旱指标的皮尔逊相关系数。通过最大相关系数所对应的干旱指数时间尺度, 确定长江流域植被的滞后响应时间, 并进行相关系数的显著性检验 (显著性水平设定为  $P < 0.05$ )。

#### 1.3.3 气象干旱触发植被损失的阈值计算

基于二维联合分布和贝叶斯理论在栅格尺度上构建植被损失的条件概率模型, 可用于评估和预测植被损失<sup>[17]</sup>。该模型结合了植被指数和干旱强度的信息, 并利用贝叶斯理论进行概率推断, 以确定长江流域植被损失的可能性。首先, 利用 SNDVI 或 SGPP 及其相应滞后时间尺度的 SPEI 指数构建二维联合分布模型。其次, 采用最大似然估计或贝叶斯推断方法构建不同干旱等级下植被损失的条件概率模型。本研究主要考虑轻度干旱、中度干旱和重度及以上干旱条件下, SGPP 和 SNDVI 小于 -1 的概率 (当 SGPP 和 SNDVI 小于 -1 时, 认为植被发生了损失), 并将 95% 条件概率所对应的 SPEI 值作为植被损失的触发阈值 (下文统称为干旱触发阈值)。例如, 在发生轻度气象干旱 ( $-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$ ) 条件下, SNDVI 损失的条件概率为

$$P(\text{SNDVI} \leq -1 | -1 < \text{SPEI} \leq -0.5) = \frac{C(F_{spei}(-0.5), F_{sndvi}(-1)) - C(F_{spei}(-1.0), F_{sndvi}(-1))}{F_{spei}(-0.5) - F_{spei}(-1.0)}$$

式中 SNDVI 的损失阈值为 -1,  $F_{sndvi}$  与  $F_{spei}$  分别为 SNDVI 和 SPEI 的边缘分布,  $C$  为 Copula 函数。

#### 1.3.4 偏最小二乘路径模型

PLS-PM 是一种非参数方法, 对样本大小、预测变量数目没有严格的要求, 适用于多个潜在变量之间相互影响的情况<sup>[18]</sup>。模型中路径系数反映了变量之间关系的方向和强度, 拟合优度指数 (goodness of fit, GOF) 用于评估模型的预测性能, 数值越大, 模型预测效果越好<sup>[19]</sup>。本研究利用 R 语言中的 plspm 包, 构建偏最小二乘路径模型识别长江流域环境因子 (如气象、植被生长特征、土壤质地、土壤水分和海拔梯度等) 对干旱触发阈值的作用路径。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被生产力与冠层结构对干旱响应的滞后时间

本文首先分析 1982 年至 2018 年植被生长季 (5—9 月) SNDVI 和 SGPP 与不同时间尺度 SPEI 的相关关系, 随后利用最大相关系数法, 确定每个格点的最优 SPEI 时间尺度。植被生产力、冠层结构与 SPEI 的皮尔逊最大相关系数及其滞后时间如图 2 所示。长江流域 50.61% (70.43% 相关系数显著,  $P < 0.05$ ) 的区域, 植被生产力与 SPEI 呈正相关; 63.04% (77.28% 相关系数显著,  $P < 0.05$ ) 的区域, 植被冠层结构与 SPEI 呈正相关, 其余格点呈负相关。植被生产力、冠层结构与 SPEI 的相关系数及响应关系的空间分布具有明显差别。植被生产力与 SPEI 呈正相关的区域主要集中于长江流域干流以北, 而冠层结构与 SPEI 呈正相关的区域主要集中于金沙江流域以及岷江水系东南部。此外, 在金沙江干热河谷区以及嘉陵江流域、汉江流域和上游干流交汇区, 植被生产力对干旱的滞后响应时间比冠层结构更长 (图 2c、图 2d)。这可能是由于不同水文气候条件、不同植被类型生理结构不同, 导致植被不同生长特征对干旱的响应存在差异<sup>[20]</sup>。因此, 需要从不同角度量化植被对干旱的响应关系。

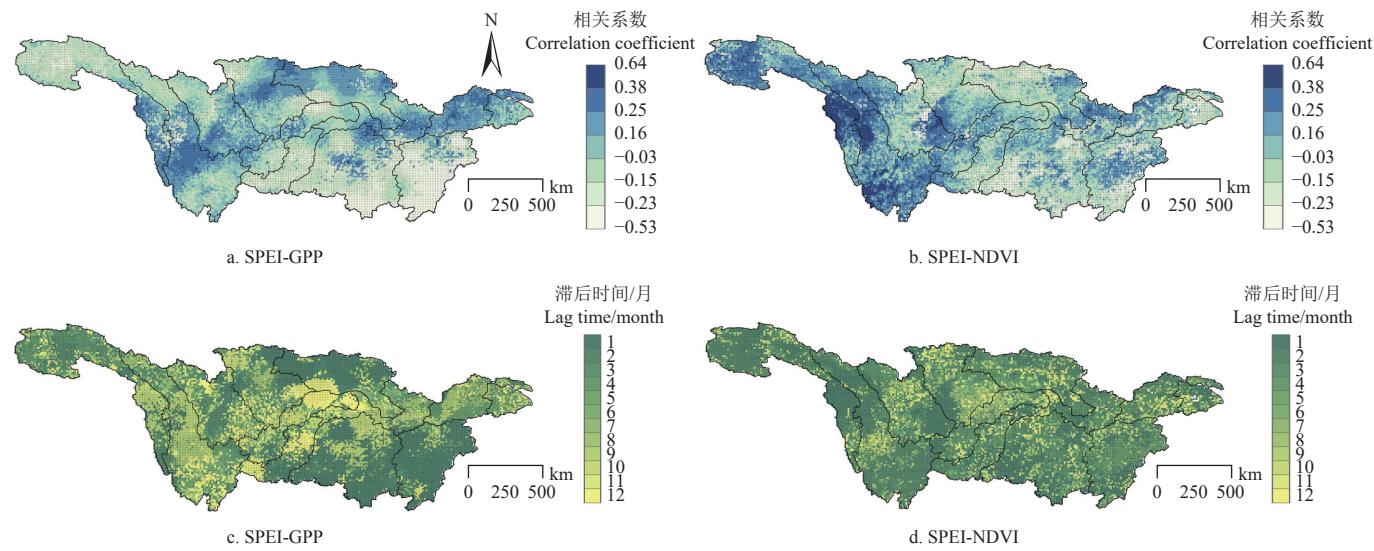
### 2.2 不同干旱强度下引发植被损失的概率

#### 2.2.1 流域尺度植被损失概率与干旱触发阈值分析

基于 Copula 模型, 计算 3 种不同等级 (轻旱、中旱以及重旱以上) 气象干旱胁迫下 SGPP 与 SNDVI 的损失概率, 及其对应的干旱触发阈值 (图 3、图 4)。总体上, 气象干旱造成植被生产力损失的平均概率为 24%, 小于冠层结构的平均损失概率。由图 3 可知, 长江流域轻度、中度和重度干旱胁迫下植被生产力的平均损失概率分别为 20.04%、23.63% 和 28.99%。嘉陵江上游东北部和汉江流域丹江口以上, 是植被生产力损失概率最大、干旱触发阈值最低的区域。该区域被认为是嘉陵江流域骤发性干旱事件重心迁移的主要方向, 干旱频率增加趋势显著<sup>[21-22]</sup>, 且植被覆盖度较差, 生物群落的抗旱能力不足, 导致该地区植被损失概率较大。与嘉陵江流域相邻的汉江流域丹江口以上区域, 1961—2018 年气象干旱表现为强度大、频率高的特征, 尤其轻度、中度干旱事件频发<sup>[22]</sup>, 该区域植被生产力与气象干旱关系密切, 气象干旱引发的植被生产力损失概率大、干旱触发阈值低。随着区域经济发展、工程项目实施以及人类活动的持续干

扰, 部分区域土壤侵蚀问题日益严重, 这将进一步限制植被生长, 加剧气象干旱对植被的影响, 对区域可持续

发展构成重大威胁。因此, 有必要加大对该地区生态环境的保护力度, 提升其应对自然灾害的能力。



注: + 显著性  $P < 0.05$ 。Note: + indicates significant  $P < 0.05$ .

图 2 1982–2018 年植被指数与 SPEI 的最大相关系数及其响应滞后时间分布

Fig.2 Maximum correlation coefficient and response lag time between vegetation indices and SPEI from 1982 to 2018

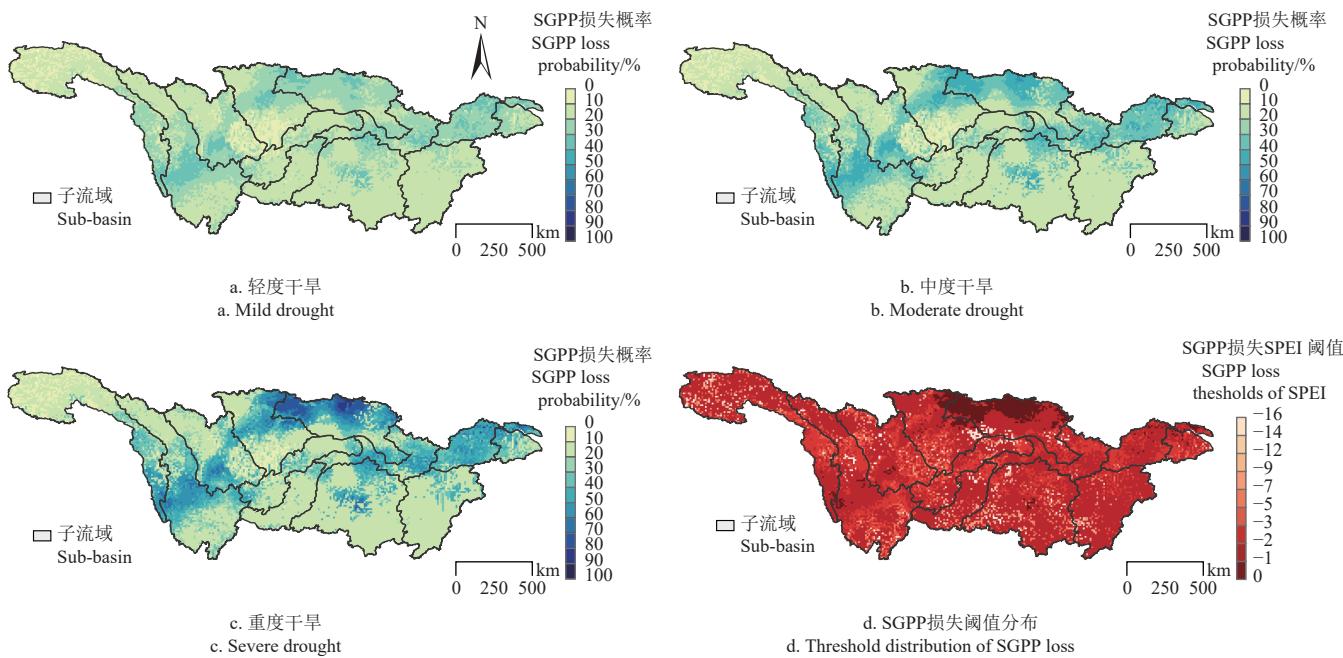


图 3 长江流域不同干旱强度下标准化总初级生产力损失概率及干旱触发阈值分布

Fig.3 Probability of standardized gross primary production(SGPP) loss under different drought intensities and distribution of drought trigger thresholds in the Yangtze River Basin

由图 4 可知, 长江流域轻度、中度和重度干旱胁迫下冠层结构平均损失概率分别为 23.26%、24.77% 和 26.86%。植被冠层结构易损性高的区域主要分布于金沙江流域和长江流域中下游干流的部分区域, 受到干旱胁迫的平均损失概率为 32.28% 和 25.40%。其中, 金沙江石鼓以上区域, 干旱触发阈值明显较小, 这表明轻度的干旱就有可能对该区域植被冠层结构造成干扰。尤其金沙江流域源头地处青藏高原腹地, 是长江流域生态环境最为脆弱的地区之一, 自然条件较差、气温较低, 干旱

胁迫下的植被易损性高, 但该区域干旱强度表现出逐年增加的趋势<sup>[23]</sup>。因此, 金沙江流域源头保护与治理对于全流域可持续发展具有重要意义。

由图 5 可知, 随着干旱强度增加, 植被生长受到其影响的概率越大。不同等级干旱胁迫下, 鄱阳湖流域 (PYH)、乌江流域 (WJ) 和洞庭湖流域 (DTH) 植被生产力与冠层结构损失概率差异较小, 且分布集中。其中, 洞庭湖、鄱阳湖被称为长江流域的“双肾”, 调蓄能力强、水资源量较大。

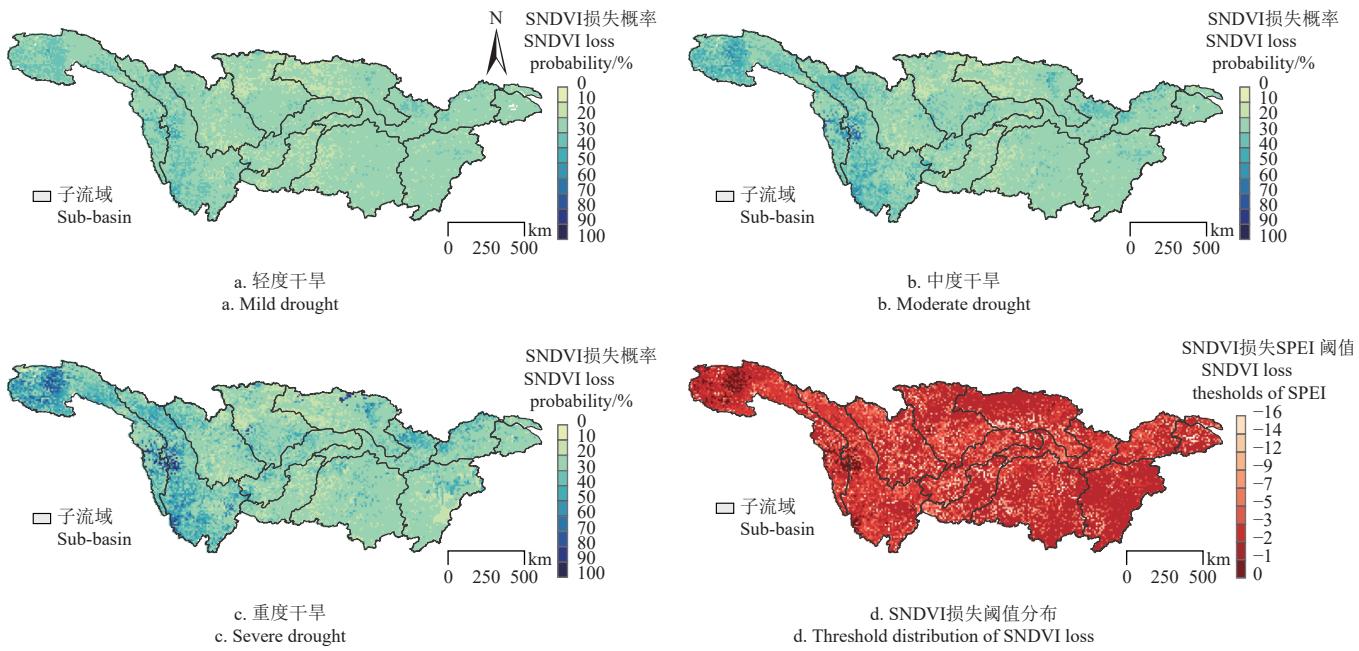


图4 长江流域不同干旱强度下标准化归一化植被指数损失概率及干旱触发阈值分布

Fig.4 Probability of standardized normalized difference vegetation index(SNDVI) loss under different drought intensities and distribution of drought trigger thresholds in the Yangtze River Basin

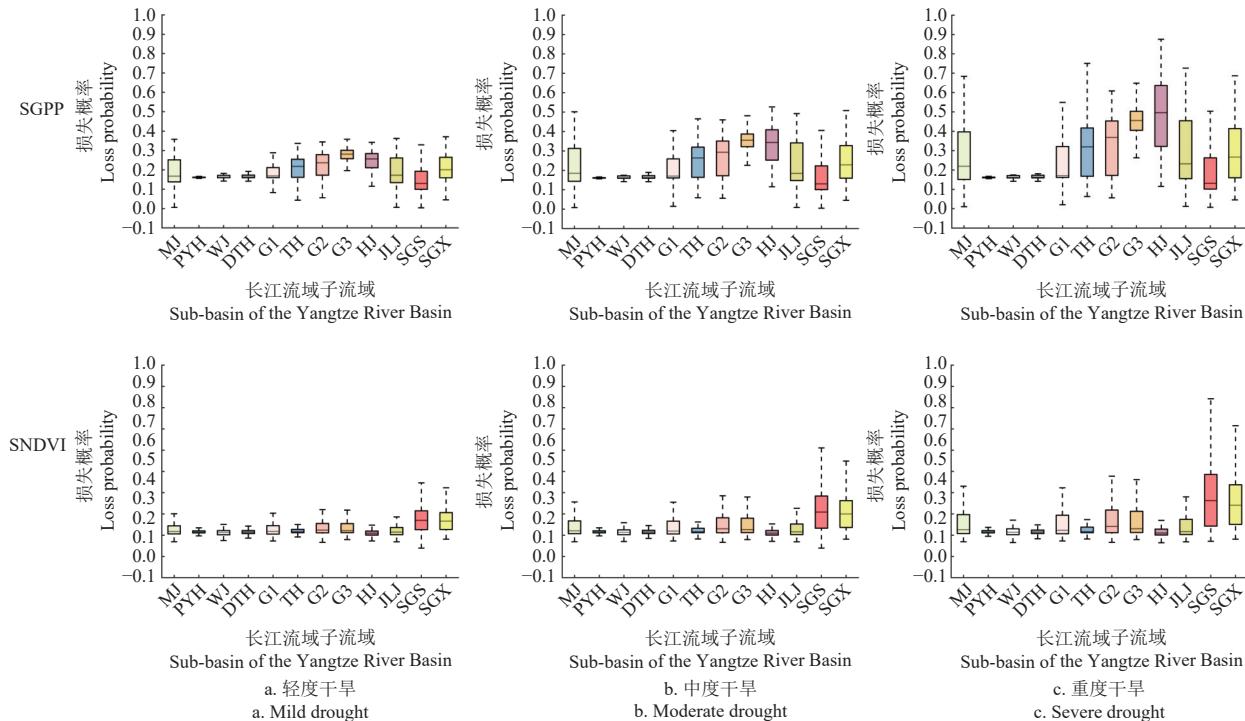


图5 不同流域分区、不同干旱强度下的 SGPP 与 SNDVI 损失概率分布

Fig.5 Probability of SGPP and SNDVI loss under different watershed delineations and varying drought intensity

湖区地表大部分由森林覆盖,水分调节能力强、物种丰富度高,可能是导致植被不同生长特征对气象干旱响应关系差异较小的重要原因。不同的是,植被生产力在长江流域干流及其以北的子流域损失概率较大,如下游干流区间(G3)、汉江流域(HJ)、中游干流区间(G2)、太湖水系(TH)、金沙江石鼓下(SGX)、嘉陵江流域(JLJ)、岷江流域(MJ)。冠层结构的损失概率在各个流域的分布较植被生产力更集中,金沙江流域(SGS和SGX)、长江干流区间(G1、G2和G3)及

岷江流域的冠层结构损失概率较高。值得注意的是,长江流域干流区间植被生产力和冠层结构的平均损失概率均高于流域平均水平,这可能是由于人类活动对长江干流区间的影响明显高于其他二级子流域<sup>[1]</sup>。此外,长江干流区间是北亚热带与中亚热带交错分布区域,植被类型复杂,是造成该区域植被生产力和冠层结构的平均损失概率均高于流域平均水平的另一个原因。

## 2.2.2 不同类型植被易损性评估

研究统计了1985、1990、1995、2000、2005、2010、

2015 和 2018 年 8 期土地覆盖类型未变化格点植被生产力与冠层结构的平均损失概率, 如表 1 所示。气象干旱胁迫下, 不同类型植被生产力平均损失概率由大到小依次为水田 (21.05%)、常绿阔叶林 (17.26%)、旱地 (13.67%)、落叶阔叶林 (13.32%)、常绿针叶林 (11.75%) 和草地 (10.91%)。长江流域大部分水田、常绿阔叶林、旱地和落叶阔叶林分布于湿润区, 如汉江流域、嘉陵江流域和长江中下游平原, 均为中国水资源丰富且植被茂盛的地区<sup>[24]</sup>。由表 1 可知, 在干旱胁迫下, 湿润区农田和森林植被生产力的损失概率较非湿润区大, 这表明人类干扰虽然在一定程度上被认为可以缓解干旱造成的农作物缺水, 但有研究发现, 在干旱胁迫下即使采取了灌溉措施, 作物生产力仍会呈现下降趋势<sup>[25]</sup>。湿润地区植被生长主要受到能量的限制, 长江流域常绿阔叶林与落叶阔叶林具有较复杂的冠层结构, 这会引发林下树木之间的不对称光竞争, 可能会抑制林下植物生长, 导致整体森林生态系统生产力、个体的资源可用性降低, 增加森林对干扰的敏感性<sup>[26-27]</sup>。另一方面, 也可能是湿润区占主导地位的树种无法忍受缺水条件所致<sup>[28]</sup>。

表 1 不同干旱强度胁迫下的植被损失概率及干旱触发阈值  
Table 1 Probability of vegetation loss under different drought intensity stresses and drought index threshold

指数 Index	植被类型 Vegetation types	触发阈值 Drought trigger thresholds	植被损失概率 Vegetation loss probability/%		
			轻度干旱 Mild drought	中度干旱 Moderate drought	重度干旱 Severe drought
SGPP	RCA	-3.44	12.87	13.58	14.55
	ICA	-3.39	18.38	20.77	23.98
	EBF	-3.34	15.56	17.09	19.12
	DBF	-4.32	12.64	13.23	14.09
	ENF	-4.04	11.46	11.74	12.06
	GL	-4.21	10.69	10.85	11.19
SNDVI	RCA	-4.12	25.47	28.38	32.61
	ICA	-5.11	25.68	28.83	32.55
	EBF	-4.93	25.92	28.98	32.62
	DBF	-4.24	25.86	28.78	32.67
	ENF	-3.38	28.81	34.71	43.66
	GL	-3.17	29.08	35.10	44.88

注: RCA, 旱地; ICA, 水田; DBF, 落叶阔叶林; EBF, 常绿阔叶林; ENF, 常绿针叶林; GL, 草地。

Note: RCA, Rainfed cropland; ICA, Irrigated cropland; DBF, Deciduous broadleaved forest; EBF, Evergreen broadleaved forest; ENF, Evergreen needle-leaved forest; GL, Grassland.

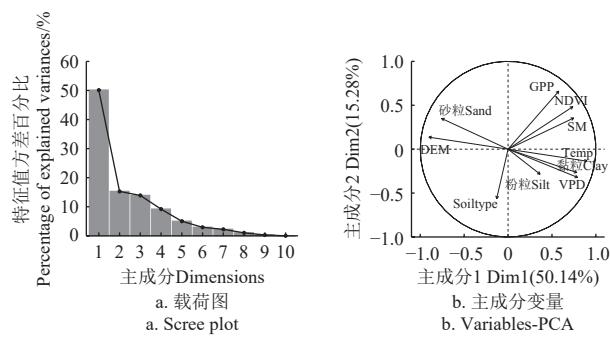
不同植被冠层结构平均损失概率由大到小依次为草地 (36.35%)、常绿针叶林 (35.73%)、常绿阔叶林 (29.18%)、落叶阔叶林 (29.10%)、水田 (29.02%) 和旱地 (28.82%)。长江流域 87.80% 的草地和 51.73% 的常绿针叶林分布于金沙江流域与岷江流域西北部, 属高寒区。该区域植被长期处于少雨、寒冷环境, 受到水分与热量的共同控制, 对干旱条件敏感, 且具有一定的抵抗和调节能力<sup>[29]</sup>。通过减少水分损失, 呼吸消耗、光合作用和生长速率的功能策略来适应缺水<sup>[30]</sup>。金沙江流域与岷江流域西北部主要位于半干旱区, 该区域冠层结构损失概率较湿润区大, 这与张更喜等<sup>[4]</sup>的研究结论相似。不同的是, 其研究认为草地和农田植被损失概率较林地大, 而本研究则认为非湿润区的草地和森林植被在干旱胁迫下损失概率更大。主要原因可能是区域气候条件, 以及主要分布的植被类型不同。长江流域大部分地

区属于亚热带季风气候, 而黄土高原则属于典型的大陆性季风气候, 季节性变化明显, 耕地多为旱坡地, 水土流失、干旱缺水严重, 导致干旱胁迫下农田植被损失概率较大。此外, 黄土高原的林地多为灌木林, 自 1950 年以来, 该地区逐步实施了一系列水土保持措施, 如退耕还林还草、水土保持林建设以及梯田工程等, 这些政策的实施有助于改善当地的生态环境, 减轻水土流失问题, 在一定程度上减轻了植被损失的风险。而长江流域草地和常绿针叶林大部分分布于高寒区, 气候条件特殊, 生态系统脆弱, 导致干旱胁迫下的植被损失概率较高。

## 2.3 植被特征与干旱触发阈值的影响因素分析

### 2.3.1 环境因子主成分分析

不同环境孕育了植被的多样性, 及其适应缺水条件的独特生理机制。植被生产力与冠层结构损失概率的空间分布不同, 这与区域水文气候条件、干湿状况及植被类型关系密切。因此, 本研究基于近 40 年植被覆盖类型未改变的格点, 选取具有区域代表性的环境因子, 将其划分为水 (土壤水分)、土 (土壤质地)、气 (VPD、气温)、生 (NDVI、GPP) 和海拔梯度 5 个潜在变量, 探究环境因子间的交互作用及其与干旱触发阈值的作用路径。首先, 对环境因子进行主成分分析, 以降低因子维度。结果如图 6 所示, 前 3 个主成分解释了环境变量近 80% 的信息, 表明选择的因子具有代表性。第一主成分解释了 50% 的信息, 其贡献度大于 10% 的因子分别为海拔梯度、气温、VPD、土壤黏粒含量、土壤砂粒含量、土壤水分和 NDVI。



注: DEM, 海拔; Temp, 气温; VPD, 饱和水汽压差; SM, 土壤水分; Soiltype, 土壤类型。

Note: DEM, elevation; Temp, temperature; VPD, vapor pressure deficit; SM, soil moisture; Soiltype, soil type.

图 6 环境因子主成分分析图

Fig.6 Principal component analysis (PCA) plot of environmental factors

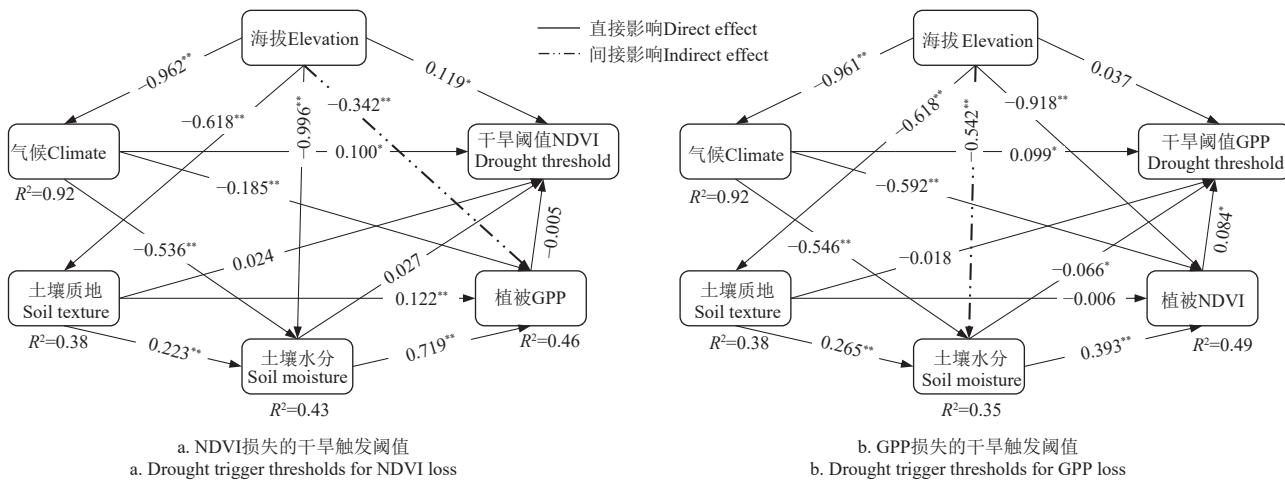
海拔梯度和气象条件在一定程度上反映了植被的垂直分异结构, 不同海拔高度土壤、光照等环境因子的差异影响着植物的适应策略和生长特征。同时, 土壤质地、土壤水分和植被冠层结构等因素在影响和表征植被水平分异方面发挥着重要作用。这些因素在地理空间上的变化会引起植被类型和物种组成的差异。从构成第二主成分贡献度大于 10% 的 3 个因子 GPP、NDVI 和土壤类型来看, 植被生长特征是影响植被对干旱响应关系的关键因素。按照因子的贡献度排序, 土壤粉砂含量与土壤类型的贡献率最低。因此, 剔除土壤粉砂含量与土壤类型 2 个因子, 选择贡献度相对较高的 8 个因子, 进行下一步分析。

### 2.3.2 植被生长特征与干旱触发阈值的驱动因子识别

进一步利用筛选后的因子, 建立偏最小二乘法路径分析模型, 分析各环境因子对植被生长特征及其干旱触发阈值的影响。图7中2个模型的GOF分别为0.642(图7a)和0.635(图7b), 均大于0.60, 表明模型构建合理、结果可信。植被生产力、冠层结构与环境因子的作用机制差异显著。由图7a可知, 植被生产力主要受到土壤水分的直接影响和海拔梯度的间接影响, 路径系数分别为0.719和-0.342。值得注意的是, 海拔梯度、气候因子对土壤水分的影响为极显著( $P<0.01$ ), 路径系数分别为-0.996和-0.536。干旱胁迫下, 干旱触发阈值(干旱触发冠层结构损失的阈值)主要受到海拔梯度与气候因子的影响( $P<0.05$ )。由图7b可知, 冠层结构主要受到海拔梯度、气候因子及土壤水分的直接影响, 影响系数分别为-0.918、-0.592和0.393。干旱胁迫下, 冠层结构、土壤水分和气候因子的变化会共同影响干旱触

发阈值(干旱触发植被生产力损失的阈值), 而其它因子的影响均未达到显著水平( $P>0.05$ )。

气候变化和人类活动是影响植被健康生长的关键因子, 本研究剔除了研究期内土地利用变化的格点, 有效减少了人类活动对植被生长的潜在影响。不同海拔梯度、气候条件以及土壤水分状况共同决定了植被的水平与垂直分异, 成为影响植被群落类型及其冠层结构形态的重要因素。长江流域气候条件复杂、阶梯型地形及多样的地貌特征, 可能是造成海拔梯度、气候因子与冠层结构路径关系显著的主要原因。与之不同的是, 在干旱胁迫下, 植被生产力的主要限制因素为土壤水分, 二者的路径系数远高于植被冠层与土壤水分的路径系数。植被生产力与土壤水分之间的紧密联系不仅体现在地上部分, 更重要的是植被根系分布及对应的水力条件, 但大尺度上二者与植被生长关系的量化研究尚显不足, 未来值得进一步深入探索。



注: 箭头上的数据为标准化路径系数; \*和\*\*分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ ;  $R^2$ 表示因变量解释的方差比例。

Note: The data on the arrow is the standardized path coefficient; \* and \*\* mean  $P<0.05$  and  $P<0.01$  level, respectively;  $R^2$  indicates the proportion of variance explained by each dependent variable.

图7 干旱触发阈值与环境因子的交互作用路径  
Fig.7 Interaction pathways of the environmental factors and drought index thresholds

干旱对植被不同生长特征的影响机制不同, 且复杂多样。植物会采取一系列适应性策略来应对缺水条件, 如调节生理形态过程、增加细根数量以扩大吸水面积或调节气孔开闭等。值得注意的是, 当冠层结构受到辐射限制而植被根系仍有可利用水资源的情况下, 太阳辐射仍能促进植被的光合作用, 这是造成干旱胁迫下冠层结构与植被生产力响应机制差异的一个重要原因<sup>[9]</sup>。另一方面, 在缺水条件下, 植被可能会通过减少冠层来降低蒸腾作用引起的水分损失, 从而帮助其保存水分<sup>[20]</sup>。总体而言, 在不考虑土地利用变化的前提下, 气候因子和海拔梯度主要通过影响土壤水分与植被冠层, 进而调控植被生产力。而气候因子和海拔梯度对冠层结构的直接响应更为显著, 间接验证了冠层结构对干旱胁迫的高敏感性。未来研究需更深入地探讨这些因子之间的相互作用机制, 以进一步揭示气候变化及人类活动对植被健康生长的影响机制。

本文从流域、子流域、植被类型等不同角度, 定量

分析了长江流域植被生产力与冠层结构对气象干旱的响应关系, 进一步研究了植被生产力和冠层结构与环境因子的交互作用, 揭示了不同植被特征对干旱响应关系的差异, 降低了利用单个植被指标而导致研究结果的不确定性。此外, 考虑到遥感监测产品在特定的气候、土地覆盖或地形条件下表现出不同的行为, 研究选用了GLEAM、GLDAS以及中国区域地面气象要素驱动等数据集, 这些数据集可以很好地反映长江流域气候水文条件<sup>[14]</sup>。由于研究没有考虑更全面的潜在影响因素(如土壤生物化学特征、大气辐射和CO<sub>2</sub>浓度等), 使结果存在一定的不确定性。同时, 植被应对干湿条件的生理机制较为复杂, 本文应用统计方法计算植被滞后时间及其易损性, 忽略了植被的生理状态以及陆-气反馈过程。可通过选用更多、更高时间分辨率的遥感监测指标, 综合考虑植被生长环境特征, 构建具有物理机制的大气-陆面响应模型, 对不同区域、不同类型植被的干旱响应机制做出更合理全面的解释。

### 3 结 论

本研究基于 Copula 模型, 采用去趋势、去季节性趋勢并标准化总初级生产力和标准化归一化植被指数分别表征植被生产力和冠层结构的动态变化; 采用标准化降水蒸散发指数表征气象干旱; 通过构建气象干旱胁迫下植被生产力与冠层结构损失的条件概率模型, 评估了长江流域植被生产力与冠层结构对干旱的响应, 并探究了影响因素, 主要结论为:

1) 长江流域 50.61% (70.43% 相关关系显著,  $P<0.05$ ) 的区域, 植被生产力与 SPEI 呈正相关; 63.04% (77.28% 相关关系显著,  $P<0.05$ ) 的区域, 植被冠层结构与 SPEI 呈正相关。冠层结构与 SPEI 的相关关系较植被生产力更密切, 与植被生产力相比, 其对气象干旱的响应时间更短。

2) 干旱胁迫下, 长江流域冠层结构比植被生产力的平均损失概率更高。轻度、中度和重度干旱胁迫下植被生产力平均损失概率分别为 20.04%、23.63% 和 28.99%, 易损性高的区域主要位于汉江流域和长江中下游干流区; 冠层结构平均损失概率分别为 23.26%、24.77% 和 26.86%, 易损性高的区域主要位于金沙江流域。

3) 不同等级干旱胁迫下, 湿润区植被生产力的平均损失概率大于非湿润区, 而非湿润区植被冠层结构平均损失概率高于湿润区。

4) 不同植被生长状态与环境因子间的交互作用差异明显, 标准化归一化植被指数和标准化总初级生产力损失的干旱触发阈值受不同关键驱动因子调控。冠层结构容易受到海拔梯度、气候因素的干扰, 而生产力则显著地受到土壤水分和自身冠层结构的影响。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨肖丽, 崔周宇, 任立良, 等. 1966—2015 年长江流域水文干旱时空演变归因[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 349-359. YANG Xiaoli, CUI Zhouyu, REN Liliang, et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River basin from 1966 to 2015[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349-359. (in Chinese with English abstract)
- [2] YANG G B, CHANG J X, WANG Y M, et al. Understanding drought propagation through coupling spatiotemporal features using vine copulas: A compound drought perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171080.
- [3] VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(1): 52-57.
- [4] 张更喜, 王慧敏, 粟晓玲, 等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估[J]. *农业工程学报*, 2022, 40(6): 1-8. ZHANG Gengxi, WANG Huimin, SU Xiaoling, et al. Assessing the vegetation vulnerability of Loess Plateau under compound dry and hot climates[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 40(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [5] LI L F, ZHENG Z Z, BIEDERMAN J A, et al. Drought and heat wave impacts on grassland carbon cycling across hierarchical levels[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(7): 2402-2413.
- [6] LLORET F, SISCART D, DALMASES C. Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain)[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 2092-2099.
- [7] DING Z H, PENG J, QIU S J, et al. Nearly half of global vegetated area experienced inconsistent vegetation growth in terms of greenness, cover, and productivity[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(10): e2020EF001618.
- [8] ZHENG L, LU J Z, CHEN X L. Drought offsets the vegetation greenness-induced gross primary productivity from 1982 to 2018 in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130881.
- [9] DENG Y, WANG X H, WANG K, et al. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298/299: 108307.
- [10] PIAO S L, WANG X H, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [11] 乐荣武, 李巍, 周思杨, 等. 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应[J]. *生态学报*, 2023, 43(23): 9967-9980. YUE Rongwu, LI Wei, ZHOU Siyang, et al. Driving factors and their interaction effects of ecosystem service value in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9967-9980. (in Chinese with English abstract)
- [12] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1143-1153. XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese with English abstract)
- [13] 熊立华, 李姝仪, 查悉妮. 基于多源数据的长江流域 1982—2022 年骤旱事件时空演变[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 24-37. XIONG Lihua, LI Shuyi, ZHA Xini. Temporal and spatial evolution of flash drought events in the Yangtze River basin from 1982 to 2022 based on multi-source data[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1): 24-37. (in Chinese with English abstract)
- [14] LIU H Y, XIN X Z, SU Z B, et al. Intercomparison and evaluation of ten global ET products at site and basin scales[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128887.
- [15] LIU C H, YANG C P, YANG Q, et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1280.
- [16] 张更喜, 粟晓玲, 刘文斐. 考虑  $\text{CO}_2$  浓度影响的中国未来干旱趋势变化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 84-91. ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, LIU Wenfei. Future drought trend in China considering  $\text{CO}_2$  concentration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(1): 84-91. (in Chinese with English abstract)
- [17] 龚郑洁, 雷勇, 钟露露, 等. 干旱胁迫下珠江流域植被响应的滞后效应及损失概率评估[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 1083-1091. GONG Zhengjie, LEI Yong, ZHONG Lulu, et al. Assessment of the lagging effect of vegetation response and loss probability in the Pearl River basin under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(4): 1083-1091. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孔德莉, 张海涛, 何迅, 等. 基于 PLSPM 模型的鄂西南部分区域耕地土壤 pH 影响因素研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 809-816. KONG Deli, ZHANG Haitao, HE Xun, et al. Influencing factors of farmland soil pH in southwest Hubei based on PLSPM model[J]. *Soils*, 2021, 53(4): 809-816. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈钦威, 王鹏, 丁明军, 等. 中国地表水环境微塑料赋存特征及驱动因素[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(8): 1-14. CHEN Qinwin, WANG Peng, DING Mingjun, et al. Characteristics and driving factors of microplastics in surface water environment of China[J]. *China Environmental Science*,

- 2024, 44(8): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [20] LI W T, PACHECO-LABRADOR J, MIGLIAVACCA M, et al. Widespread and complex drought effects on vegetation physiology inferred from space[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4640.
- [21] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 1-14. MENG Changqing, DONG Zijiao, LIU Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [22] 汪琳, 舒章康, 王国庆, 等. 汉江流域 1961–2018 年多尺度气象干旱时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1649-1658. WANG Lin, SHU Zhangkang, WANG Guoqing, et al. Spatial and temporal evolution of multi-scale meteorological drought in Hanjiang River Basin from 1961 to 2018[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1649-1658. (in Chinese with English abstract)
- [23] SUN F Y, MEJIA A, ZENG P, et al. Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134076.
- [24] ZHANG L, CHANG J X, GUO A J, et al. Ecological drought evolution characteristics under different climatic regions in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 629: 130573.
- [25] GAMPE D, ZSCHEISCHLER J, REICHSTEIN M, et al. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 772-779.
- [26] YI X X, WANG N N, REN H B, et al. From canopy complementarity to asymmetric competition: The negative relationship between structural diversity and productivity during succession[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(2): 457-465.
- [27] YOUNG D J N, STEVENS J T, EARLES J M, et al. Long-term climate and competition explain forest mortality patterns under extreme drought[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(1): 78-86.
- [28] ANDEREGG W R L, BERRY J A, SMITH D D, et al. The roles of hydraulic and carbon stress in a widespread climate-induced forest die-off[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(1): 233-237.
- [29] YIN J, YUAN Z, LI T. The spatial-temporal variation characteristics of natural vegetation drought in the Yangtze River source region, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): 1613.
- [30] 涂又, 姜亮亮, 刘睿, 等. 1982-2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 75-84. TU You, JANG Liangliang, LIU Rui, et al. Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982-2015[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 75-84. (in Chinese with English abstract)

## Assessing the non-uniform vulnerability of vegetation productivity and canopy structure under drought stress

ZHANG Lu , CHANG Jianxia<sup>✉</sup> , YANG Guibin , GUO Aijun , WANG Yimin

(State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Frequent and severe drought events have posed the serious threat to vegetation growth and ecosystem stability. The underlying dynamics of vegetation response to droughts can be expected to predict and mitigate the impacts of these environmental stresses on ecosystems. However, a single ecological index cannot fully meet the requirements of the vegetation responses to droughts. In this study, a robust conditional probability model was constructed to combine the normalized difference vegetation index (NDVI), gross primary productivity (GPP), and the standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). The Copula framework was designed to clarify the relationships between meteorological drought stress and the probabilities of vegetation productivity and canopy structure loss. Additionally, a systematic investigation was also made to explore the interactions between different vegetation growth statuses and environmental factors, as well as the driving forces behind drought trigger thresholds using partial least squares path modeling (PLS-PM). A case study was also carried out in the Yangtze River Basin (YRB) from 1982 to 2018. The temporal and spatial disparities were observed in the vegetation productivity and canopy structure response to the meteorological droughts. The results indicate that: 1) The proportion of areas where vegetation productivity and canopy structure in the YRB are positively correlated with SPEI is 50.61% and 63.04%, respectively. Notably, the canopy structure exhibited a closer association with the SPEI, compared with the vegetation productivity. There was a shorter response time to the meteorological drought stress. The canopy structure shared the higher vulnerability under drought stress, compared with the vegetation productivity. 2) Spatially, the high vulnerability was found in regions, such as the Hanjiang Basin and the middle and lower reaches of the Yangtze River, in terms of vegetation productivity. While the increasing susceptibility of canopy structure was displayed in the Jinsha River Basin and the mainstream of the Yangtze River. 3) The average probabilities of loss were 20.04%, 23.63%, and 28.99%, respectively, for vegetation productivity under mild, moderate, and severe drought stress. The heightened vulnerability was predominantly concentrated in the Hanjiang Basin and the middle and lower reaches of the Yangtze River. Canopy structures shared the average probabilities of loss of 23.26%, 24.77%, and 26.86% under similar drought stress levels. Among them, the regions of elevated vulnerability were located primarily in the Jinsha River Basin. 4) There were starkly pronounced disparities of vulnerability among various vegetation types over the basin. Irrigated cropland and evergreen broadleaf forests showed higher-than-average probabilities of productivity loss (21.05% and 17.26%, respectively). While the grasslands and evergreen needleleaf forests demonstrated elevated probabilities of canopy structure loss (36.35% and 35.73%, respectively). Furthermore, the wetter regions exhibited higher average probabilities of vegetation productivity loss under varying intensities of drought stress. While the drier regions showed the heightened average probabilities of canopy structure loss. 5) Canopy structure was more susceptible to external disturbances. While the vegetation productivity was dominated by the soil moisture and its own canopy structure. There was a complex interplay between vegetation responses to drought and environmental factors in the YRB. The findings can provide invaluable insights for the effective management and conservation of ecosystems against droughts.

**Keywords:** vegetation productivity; canopy structure; vegetation response; trigger threshold; Yangtze River Basin