

DOI: 10.20103/j.stxb.202403290669

曹云,陈紫璇,莫建飞,孙应龙,延昊.西南地区森林 NEP 时空演变特征及其驱动因素.生态学报,2025,45(7):3252-3266.

Cao Y, Chen Z X, Mo J F, Sun Y L, Yan H. Study on the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of forest NEP in Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3252-3266.

西南地区森林 NEP 时空演变特征及其驱动因素

曹 云^{1,*}, 陈紫璇¹, 莫建飞², 孙应龙¹, 延 昊¹

1 国家气象中心、中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081

2 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022

摘要:作为我国第二大林区,西南林区生态环境脆弱、气候变化敏感,特别是近年来受气候、环境等因素影响,林区固碳功能已出现变化,引起了广泛关注。因此,在气候变化背景下开展西南林区固碳能力的时空动态演变及其驱动影响研究具有重要意义。采用陆地生态系统碳通量模型和土壤呼吸模型,结合气象和遥感资料,对 2001—2021 年西南林区净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)进行评估。采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 趋势检验和 Hurst 指数,分析西南林区 NEP 变化的趋势特征与可持续性特征;基于偏相关性分析和地理探测器模型等方法,定量评估气温、降水、坡向坡度等气候环境因子对森林 NEP 的影响程度。结果表明:(1)西南林区多年平均 NEP 为 $333.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($3.338 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),总体表现为碳汇,且 2001—2021 年林区 NEP 呈现波动增长趋势,平均每年增加 $3.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.039 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。其中,NEP 达到显著增加趋势的面积,占林区总面积的 33.2%,主要分布在四川北部、云南西南部等地。落叶阔叶林和贵州林区 NEP 增加趋势最大,平均每年分别增加 $4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.045 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和 $5.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.059 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。(2)从变化持续性看,大部林区 NEP 的 Hurst 指数小于 0.5,表明 NEP 未来变化趋势与过去相反,林区 NEP 未来可能呈下降趋势,其中 NEP 由增加趋势变为减少趋势的林区面积占比达到 64.6%。但是依然有 30.5% 林区 NEP 未来变化呈增加趋势,其中云南林区分布最多(57.1%)、四川次之(36.2%)。(3)从时间尺度的影响分析来看,近 20 年西南大部林区 NEP 与降水具有负相关性、与蒸散和气温具有正相关性,其中蒸散是影响林区 NEP 的第一关键气候因子,影响面积占比 67.2%,降水影响范围次之(21.3%),气温影响范围第三(6.1%)。但是关键气候因子在不同森林类型间存在一定差异,其中降水是影响贵州灌丛和常绿阔叶林 NEP 的第一关键气候因子,而气温是影响贵州针叶林 NEP 的第一关键气候因子。(4)从空间分布的影响分析来看,气候环境因素对固碳功能的影响较为复杂,其中气温、辐射、高程是对西南林区 NEP 空间分异解释力最强的前三个因子。但是在贵州和重庆林区,各因子对 NEP 解释力均明显偏弱(q 值 <0.1),表明气候环境因素对林区 NEP 空间分布驱动机制更为复杂。此外,各因子间对林区 NEP 空间分布变化存在交互作用,分别属于双因子增强或非线性增强作用。其中最大交互影响力分别为,气温 $\cap$ 日照(q 值=0.33)、辐射 $\cap$ 蒸散(q 值=0.31),气温 $\cap$ 辐射(q 值=0.29),表明这些因子交互作用对西南林区 NEP 空间分布的影响占主导地位。本研究结果将有助于揭示森林 NEP 对气候环境变化的响应机制,为西南林区碳中和研究提供基础数据支持。

关键词:净生态系统生产力;气候变化;时空变化;变化趋势;驱动因素;西南林区

Study on the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of forest NEP in Southwest China

CAO Yun^{1,*}, CHEN Zixuan¹, MO Jianfei², SUN Yinglong¹, YAN Hao¹

1 National Meteorological Center, China Meteorological Administration Hydro-Meteorology key Laboratory, Beijing 100081, China

2 Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China

Abstract: As the second largest forest region in China, the ecological environment of the southwest forest area is fragile and

基金项目:中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(23SWQXZ015);中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J052);广西重点研发计划(桂科 AB23026052)

收稿日期:2024-03-29; **网络出版日期:**2025-01-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyuncy@sohu.com

highly sensitive to climate change. In recent years, forest carbon sequestration has undergone changes and has attracted significant attention due to the impact of climate and environmental factors. Thus, studying the spatiotemporal dynamics and influencing factors of carbon sequestration capacity in southwest China's forests against the backdrop of climate change is significant. By using the soil respiration model and the Terrestrial Ecosystem Carbon flux (TEC) model, combined with meteorological and remote sensing data, we estimated the net ecosystem productivity (NEP) in the forest of southwest China from 2001 to 2021. And trends in NEP variation and its sustainability were analyzed using Theil-Sen slope estimation, Mann-Kendall mutation test, and Hurst index. Furthermore, methods including partial correlation analysis, geographical detectors, etc. were employed to quantitatively evaluate the influence of climate and environmental factors such as temperature, precipitation, aspect, and slope on forest NEP. The results indicated that: (1) The average annual NEP in the forest of southwest China was $333.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($3.338 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), indicating an overall carbon sink. From 2001 to 2021, forest NEP in southwest China showed a fluctuating growth trend, increasing by an average of $3.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.039 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) annually. Areas with a significantly increasing NEP trend accounted for 33.2% of the total forest area, predominantly in northern Sichuan and southwest Yunnan. Deciduous broad-leaved forest and forest areas in Guizhou province showed the highest NEP increases, averaging $4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.045 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and $5.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.059 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) per year, respectively. (2) From the perspective of change persistence, the Hurst index of NEP in most forest areas was less than 0.5, indicating that future NEP trends might reverse the past patterns. Forest NEP in southwest China is projected to show a decreasing trend in the future. The proportion of forest areas where NEP shifts from an increasing trend to a decreasing trend accounted for 64.6% of the southwest forest area. However, 30.5% of the forest areas showed an increasing trend in NEP for the future, with the largest distribution in Yunnan (57.1%), followed by Sichuan (36.2%). (3) From a temporal scale impact analysis perspective, analysis of temporal impacts revealed a negative correlation between NEP and precipitation and a positive correlation with evapotranspiration and temperature over the past 20 years in most forest areas of southwest China. Evapotranspiration was identified as the primary climatic factor influencing NEP in forest areas, accounting for 67.2% of the total area, followed by precipitation (21.3%) and temperature (6.1%). Differences in key climatic factors affecting NEP were noted among different forest types. Precipitation primarily affected the NEP of shrub and evergreen broad-leaved forests, while temperature primarily affected coniferous forests in Guizhou province. (4) From a spatial distribution impact analysis, the influence of climatic and environmental factors on carbon sequestration function appears quite complex. Temperature, radiation and elevation are identified as the top three factors with the strongest explanatory power for the spatial variations in NEP in the southwest forest region. However, in the forest regions of Guizhou and Chongqing, each factor shows significantly weaker explanatory power ($q < 0.1$), indicating a more intricate driving mechanism of climatic and environmental factors on NEP spatial distribution in these forest areas. Additionally, there are interactions among various factors influencing the spatial distribution of forest NEP in southwest China, characterized by dual-factor enhancement and nonlinear enhancement effects. The most significant interaction factors were observed in temperature $\cap$ sunshine ($q = 0.33$), radiation $\cap$ evapotranspiration ($q = 0.31$), and temperature $\cap$ radiation ($q = 0.29$), indicating that these interaction factors play a dominant role in influencing the spatial distribution of NEP in the southwest forest region. The findings of this study will help reveal the response mechanism of forest NEP to climate and environmental changes, providing fundamental data support for ecological protection and carbon neutrality research in southwest China.

Key Words: net ecosystem productivity; climate change; spatiotemporal dynamics; change trend; driving factors; southwest forest region

陆地植被生态系统对碳吸收、碳调节具有重要影响,然而其碳汇稳定性偏弱^[1-2],特别是在气候变化背景下,区域碳循环波动显著增强,加之生态系统类型复杂多样、区域地形地貌多变,进一步导致生态系统固碳功

能的复杂化^[3-4]。因此,开展区域生态系统碳汇的定量监测评估研究,及其气候环境影响机制,对于深入理解区域碳收支状况至关重要。区域陆地生态系统碳汇能力估算方法,从途径上可划分为两种类型—从样点的地面观测或网格模拟结果推广到区域尺度的“自下而上”类型,和基于大气 CO₂ 浓度来反演区域碳汇的“自上而下”类型^[5-6]。目前多采用样地清查法^[7-8]、涡度相关法^[9-10]、以及生态系统碳收支模型^[11-13]进行陆地生态系统碳汇监测及其影响分析研究,并利用固碳量、总碳库量、平均碳密度、以及净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)等指标,从多个评估维度来衡量区域碳汇功能的强弱。在不同固碳评估技术方法中,碳循环模型优势在于可探索生态系统碳汇与气候环境因子间的交互作用,实现不同因子对碳汇贡献的定量化评估^[5-6]。对于植被生态系统碳汇研究,特别是基于模型模拟研究,多采用 NEP 来表示生态系统的固碳能力^[3,13-15],NEP>0 说明碳吸收大于碳排放,表现为碳汇;反之为碳源。

尽管中国陆地生态系统整体表现为一个重要碳汇^[5],但是我国地域辽阔,气候类型多样,生态环境条件复杂,区域间碳汇能力随气候环境条件变化而波动,呈现出明显的时空异质性^[6,9,13-14]。在空间分布上,我国陆地碳汇呈现北方高南方低、中部和西南地区高、东南地区低的格局^[11],且区域间气候响应机制存在一定差异性,如华北平原和东北平原碳汇对降水波动敏感,而云贵高原西部碳汇对温度波动敏感^[14]。特别是作为我国重要的生态安全屏障区,西南林区不仅是我国第二大林区,具有更强的碳吸收能力、最大的碳汇量,而且区域气候变化影响也更为显著^[15-16],林区固碳功能异质性、敏感性和脆弱性尤为突出^[7,10,17-18]。在以往的研究中,多从植被指数、生产力以及产水服务、土壤保持服务等方面,对西南地区生态系统结构和功能及其影响机制进行研究^[16,19-20],均已取得了有意义的进展。但是作为陆地植被碳汇的主体,西南林区固碳功能的时空分异特征研究相对较少,特别是基于长时间尺度的气候环境影响分析更为缺乏,主导驱动因素识别仍存在较大的不确定性。

本研究基于气象和遥感资料,利用碳循环模型,定量估算西南林区植被固碳能力,明晰 2001—2021 年林区固碳功能的分布格局特征;借助地理探测器模型和关键气候因子分析法,定量评估气温、降水、坡度坡向等因子对林区固碳能力的影响差异,剖析影响林区固碳功能变化的主要驱动因子,有助于深化对西南林区碳循环及其影响机制的研究与理解。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西南地区位于中国西南部,包括四川、云南、重庆、贵州四省(图 1),属于长江和珠江上游的生态屏障地带,地形地貌类型复杂多样,为喀斯特地貌集中分布区,总面积约 136 万 km²,以亚热带、温带季风气候为主^[16,20-21]。大部地区多年平均年降水为 500—1500mm,年均温为 5—25℃。在气候变化背景下,2000 年以来西南林区气温总体呈增加趋势、降水和日照呈减少趋势^[22]。作为中国第二大天然林区,西南林区生态环境脆弱、区域气候变化敏感,在我国长江经济带的发展、区域生态保护与修复等国家生态安全战略中具有特殊的生态地位^[15-16]。

1.2 数据来源及处理

气象数据,来自中国气象局国家气象信息中心,使用了西南地区所有的 390 个气象观测站点,以及周边临近 197 个气象观测站点,总共达到了 587 个气象站点,

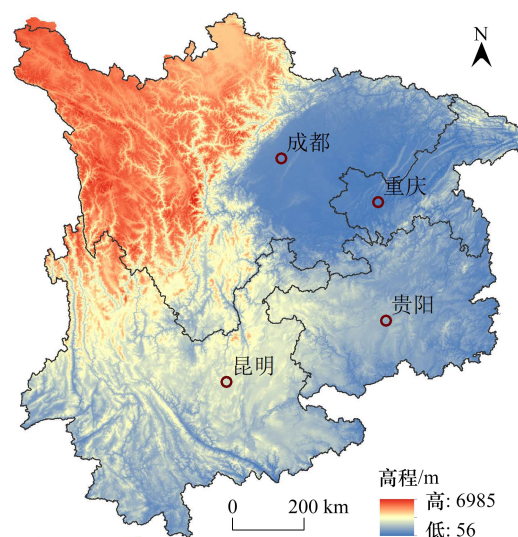


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

分布于不同海拔地区。利用气象站点 2001—2021 年的逐日平均气温、日最高(低)气温、日降水量等整编气象数据,基于 ArcGIS 中 IDW 空间插值方法,获得研究区逐年气候数据。遥感数据、植被类型和海拔数据,为美国航空航天局(<http://landsat.nascom.nasa.gov>)提供植被指数产品(MOD13A3)、土地覆盖类型产品(MCD12Q1)和高程数据产品(SRTM)。土壤数据为中山大学开发的土壤数据集^[23]。所有空间数据在 ArcGIS 中统一为 WGS_1984 坐标系,分辨率 1 km。数据信息如表 1 所示。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据 Data	类型 Type	来源 Source
气象数据 Meteorological Data	站点	中国气象局国家气象信息中心
遥感数据 Remote Sensing Data	栅格	NASA 的 MOD13A3 级植被指数产品
地表覆盖产品 Land Cover	栅格	NASA 的 MCD12Q1 土地覆盖类型产品
海拔 Altitude	栅格	NASA 的 SRTM 高程数据
土壤数据 Soil Data	栅格	中山大学的土壤数据集

1.3 研究方法

1.3.1 NEP 估算方法

NEP 由植被净初级生产力(NPP)与土壤异养呼吸(R_h)差值来计算,公式如下:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

式中,NEP 为净生态系统生产力,NPP 为净初级生产力, R_h 为土壤异养呼吸,单位为 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

植被净初级生产力(NPP),采用陆地生态系统碳通量(Terrestrial Ecosystem Carbon flux model,TEC)模型进行估算,计算公式如下:

$$NPP = GPP - R_g - R_m \quad (2)$$

$$R_g = 0.2 \times (GPP - R_m) \quad (3)$$

$$R_m = GPP \times (7.825 + 1.145 \times T_a) / 100 \quad (4)$$

式中,NPP、GPP、 R_g 、 R_m 和 T_a 分别表示植被净初级生产力、总初级生产力、生长和维持呼吸消耗量,以及月平均气温,详细计算方法见参考文献^[24—27]。

土壤异养呼吸(R_h),采用 Bond-Lamberty 等^[28]和 Chen 等^[29]建立的土壤呼吸模型进行估算,主要公式如下:

$$\ln(R_h) = 1.22 + 0.73 \times \ln(R_s) \quad (5)$$

$$R_s = R_0 e^{Q/t} \left(\frac{P}{P+K} \right) \left(\frac{A_{\text{soc}}}{A_{\text{soc}} + \psi} \right) \quad (6)$$

式中, R_h 为土壤异养呼吸, R_s 为土壤呼吸, t 为年平均气温, P 为年降水量, A_{soc} 为土壤表层有机碳, R_0 、 Q 、 K 、 ψ 为模型参数,具体计算方法见参考文献^[28—30]。

1.3.2 趋势分析

Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 趋势检验相结合的方法,多用于处理和分析长时间序列的 NDVI、NPP 等生态指标变化趋势特征^[31—32],因此本研究也运用该方法来分析 NEP 变化趋势及其显著性。

Theil-Sen 斜率是通过计算时间序列中两两数据对之间的斜率,并将所有数据对斜率的中值作为时间序列的总体变化趋势,斜率计算公式如下:

$$\text{Sen} = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (7)$$

式中,Sen 为变化趋势;Median 表示所求时间序列的中位数; x_i 、 x_j 分别为第 i 年和第 j 年 NEP; i 、 j 为时间序列 ($2001 \leq i < j \leq 2021$)。

Mann-Kendall 趋势检验法来判断 Theil-Sen 趋势的显著性,主要公式如下:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S<0 \end{cases} \quad (8)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), i < j \quad (9)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (11)$$

式中, Z_s 为标准正态统计量, S 为检验统计量, $\text{Var}(S)$ 为方差。采用双侧检验, 给定显著性水平 $\alpha = 0.01$ 、 $\alpha = 0.05$, 当 $|Z_s| > Z$ 时, NEP 变化趋势具有极显著性 ($P < 0.01$) 或显著性 ($P < 0.05$), 反之则为不显著。结合变化趋势及其显著性的检验结果, 可划分为六种趋势特征, 极显著减少 ($\text{Sen} < 0, P < 0.01$)、显著减少 ($\text{Sen} < 0, P < 0.05$)、不显著减少 ($\text{Sen} < 0, P > 0.05$)、不显著增加 ($\text{Sen} > 0, P > 0.05$)、显著增加 ($\text{Sen} > 0, P < 0.05$)、极显著增加 ($\text{Sen} > 0, P < 0.01$)。具体计算方法参考有关文献^[31,33]。

1.3.3 Hurst 指数分析

Hurst 指数被广泛用于预测时间序列的未来变化趋势^[32,34]。本研究利用 R/S 分析法计算 NEP 的 Hurst 指数, 反映 NEP 变化趋势的可持续性特征。Hurst 指数值 (H) 在 0—1 之间, 其中当 $0 \leq H < 0.5$ 时, 表示变化趋势具有一定程度的反持续性, 将来的变化趋势与过去的相反; 当 $0.5 < H \leq 1$ 时, 表示变化趋势具有持续性, 未来的变化趋势与过去的一致; 当 $H = 0.5$ 时, 表示变化时间序列为随机序列, 未来的变化趋势不受过去影响^[32,35]。结合趋势分析结果, 可划分为五种趋势特征, 持续增加 ($\text{Sen} > 0, 0.5 < H < 1$)、增加变为减少 ($\text{Sen} > 0, 0.5 < H < 1$)、持续减少 ($\text{Sen} < 0, 0.5 < H < 1$)、减少变为增加 ($\text{Sen} < 0, 0 < H < 0.5$)、无法预测 ($H = 0.5$)。

1.3.4 驱动影响分析

时间变化影响分析, 采用关键气候因子分析法。基于像元尺度, 在控制其他影响因子的情况下, 分别计算 2001—2021 年逐年 NEP 与气温、降水等气象因子之间的偏相关系数, 并采用 t 检验, 开展相关显著性 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 检验。为了定量评估不同气候因子对 NEP 的影响程度, 选取像元上偏相关系数平方 (即决定系数 R^2) 最大的气象因子, 作为该像元上影响植被的关键气候因子^[36—37]。

空间分布影响分析, 采用地理探测器模型^[38—39], 选择气温、降水、日照、蒸散、辐射、坡向、坡度、高程、森林类型等 9 个指标作为自变量, 提取林区像元数据, 分析各气候环境因子与林区 NEP 的关系。其中, 利用因子探测器方法揭示不同自变量对 NEP 变化的影响力 (即影响程度); 利用交互探测器方法来探索两个自变量的联合效应是否会增强或削弱对 NEP 影响力、或影响是相互独立的^[34,40]。影响力通过 q 值定量化评估, q 值越大, 影响力越强^[41]。自变量离散化处理采用自然断点法^[42—43]。

2 结果与分析

2.1 西南林区 NEP 演变特征

2.1.1 NEP 空间分布特征

西南林区多年平均 NEP 为 $333.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($3.338 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 数值多分布在 $300—500 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$

($3\text{--}5\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)间,面积占比达到 40.5%,集中分布于西南地区南部(图 2)。西北部林区 NEP 相对偏低,部分林区出现负值,但面积占比不高(仅为 5.5%)。在不同森林类型中,西南常绿阔叶林年均 NEP 最高,达到 $515.2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($5.152\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),分布面积占比(16.3%)也较高;落叶针叶林固碳能力最低,NEP 为 $217.1\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($2.171\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),分布面积最少(不足 1%)。混交林和灌丛在西南林区分布面积最广,年均 NEP 为 $253.3\text{--}360.9\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($2.533\text{--}3.609\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)。

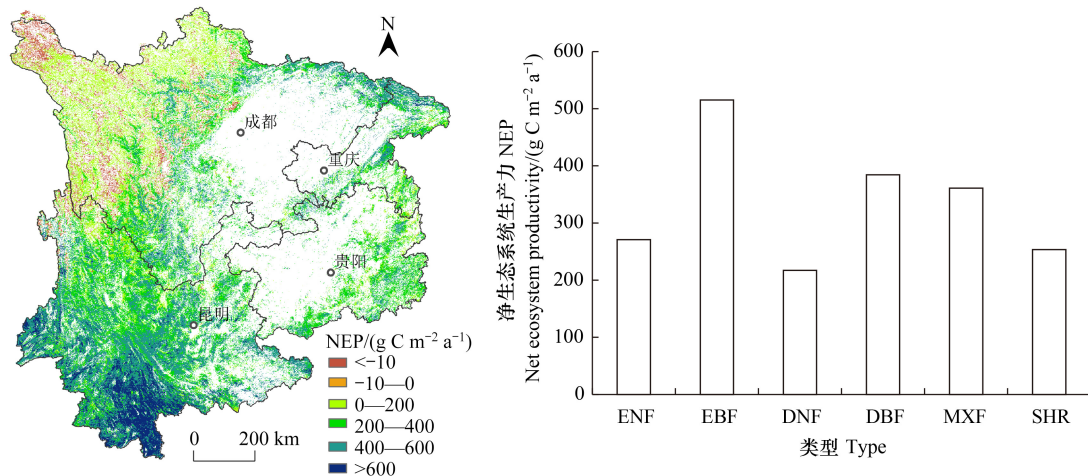


图 2 西南林区 NEP 年均值空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of average annual NEP in the forest of Southwest China

ENF:常绿针叶树 Evergreen needleleaf forest;EBF:常绿阔叶树 Evergreen broadleaf forest;DNF:落叶针叶树 Deciduous needleleaf forest;DBF:落叶阔叶树 Deciduous broadleaf forest;MXF:混交林 Mixed forest;SHR:灌丛 Shrublands

2.1.2 NEP 空间变化特征

2001 年以来西南大部林区 NEP 呈增加趋势,面积占比达到 78.6%,其中 NEP 增加速率较快的林区主要分布四川北部、云南西南部等地(图 3)。从显著性来看,有 19.5%的林区 NEP 达到极显著增加趋势,13.7%林区达到显著增加趋势,表明近 20 年西南大部林区固碳功能呈增加态势,发挥重要固碳功能。但仍有五分之一的林区 NEP 呈下降趋势,其中灌丛分布面积占比最高,达到了 40.6%,然而达到显著下降的面积较少(仅有 1.8%)。

对于不同类型,落叶阔叶林 NEP 增加趋势最为明显,平均每年增加 $4.5\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($0.045\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),有 81.6%林区 NEP 呈增加趋势;常绿针叶林增加趋势最小,平均每年增加 $3.4\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($0.034\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)(图 4)。对于不同林区,贵州林区 NEP 增加趋势最为明显,平均每年增加 $5.9\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($0.059\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$);四川 NEP 增加趋势率最低,平均每年增加 $3.3\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($0.033\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),有 81.2%林区 NEP 呈增加趋势。

2.2 西南林区 NEP 持续特征

尽管西南大部林区 NEP 呈增加趋势,但是从持续性来看,大部林区 NEP 持续指数(H)小于 0.5,且变化趋势由增加到减少的林区面积占比达到 64.6%,表明西南林区 NEP 未来变化具有较强的反持续性,大部林区 NEP 将会从增加趋势转变为减少趋势,其中重庆林区 NEP 呈减少趋势的面积占比最高,达到 86.8%(图 5)。值得关注的是,西南林区 NEP 呈持续增加趋势的面积占比有 14.0%,由减少到增加的林区面积占比有 16.5%,因而西南林区 NEP 未来呈增加趋势的面积占比也达到了 30.5%,主要分布在云南林区(57.1%)和四川林区(36.2%),表明这两个省在西南林区未来固碳功能中仍将发挥重要作用。在不同类型间,落叶林 NEP 由增加变为减少的面积占比最高(70%),表明西南大部落叶林固碳能力未来呈下降趋势;常绿林固碳功能保持增加趋势的面积占比达到 35%,明显要高于其他森林类型,是西南林区未来重要固碳森林类型。

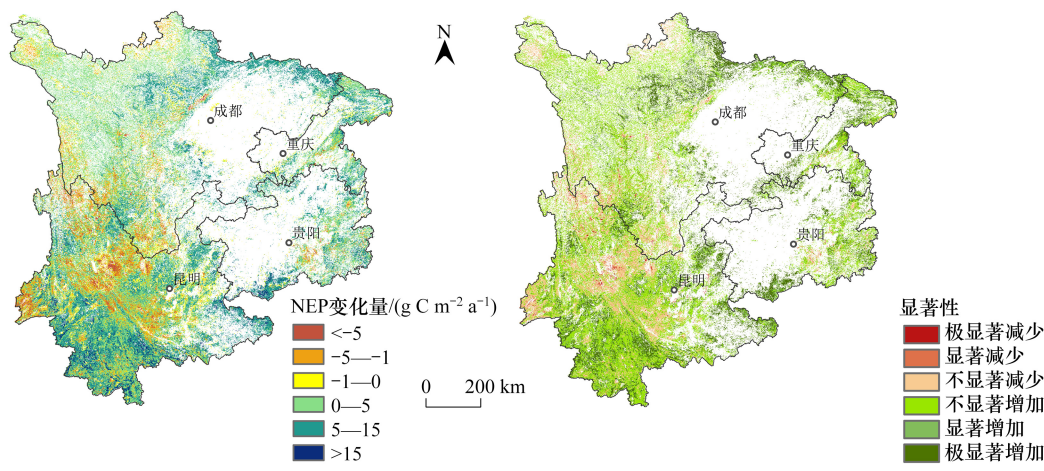


图 3 2001—2021 年西南林区 NEP 空间变化趋势

Fig.3 Spatial variation trend of NEP in the forest of Southwest China from 2001 to 2021

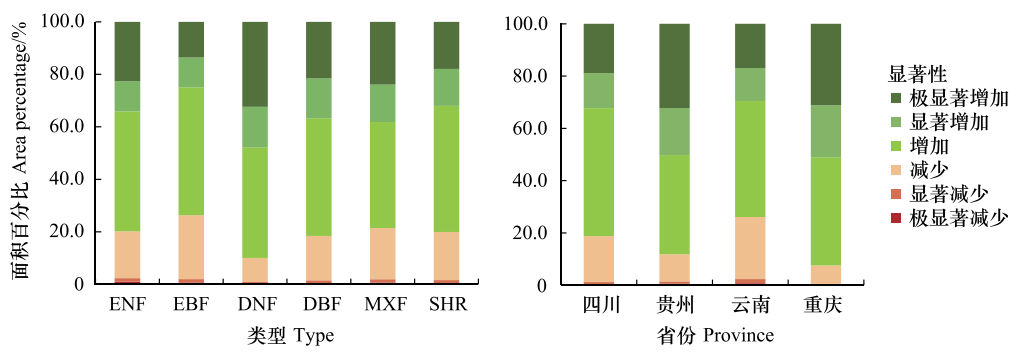


图 4 2001—2021 年西南不同森林类型和不同林区 NEP 变化特征

Fig.4 Variation characteristics of NEP among different forest types and forest regions in Southwest China from 2001 to 2021

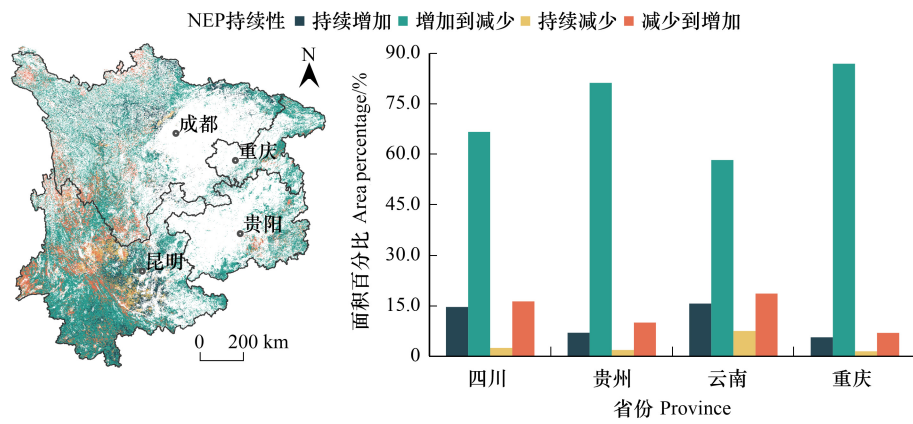


图 5 2001—2021 年西南林区 NEP 变化可持续性的空间分布及其面积统计

Fig.5 Spatial distribution and area proportion statistics of the sustainability of NEP changes in the forest of Southwest China from 2001 to 2021

2.3 西南林区 NEP 时间变化影响分析

从偏相关分析来看(图 6),近 20 年林区 NEP 变化,与蒸散具有正相关性,74.6%林区达到了显著水平($P<0.05$),其中有 59.1%林区达到极显著水平($P<0.01$);与降水具有负相关性,50%区域达到了显著水平,其中有 30.3%林区达到极显著水平;与气温多呈正相关性,面积占比达到 72.4%,其中有 13.2%林区达到显著相关水平。但是大部分林区 NEP 与辐射、日照的相关性并不显著,仅有 3.0%林区与辐射具有显著正相关性,3.2%林区与日照具有显著负相关性。

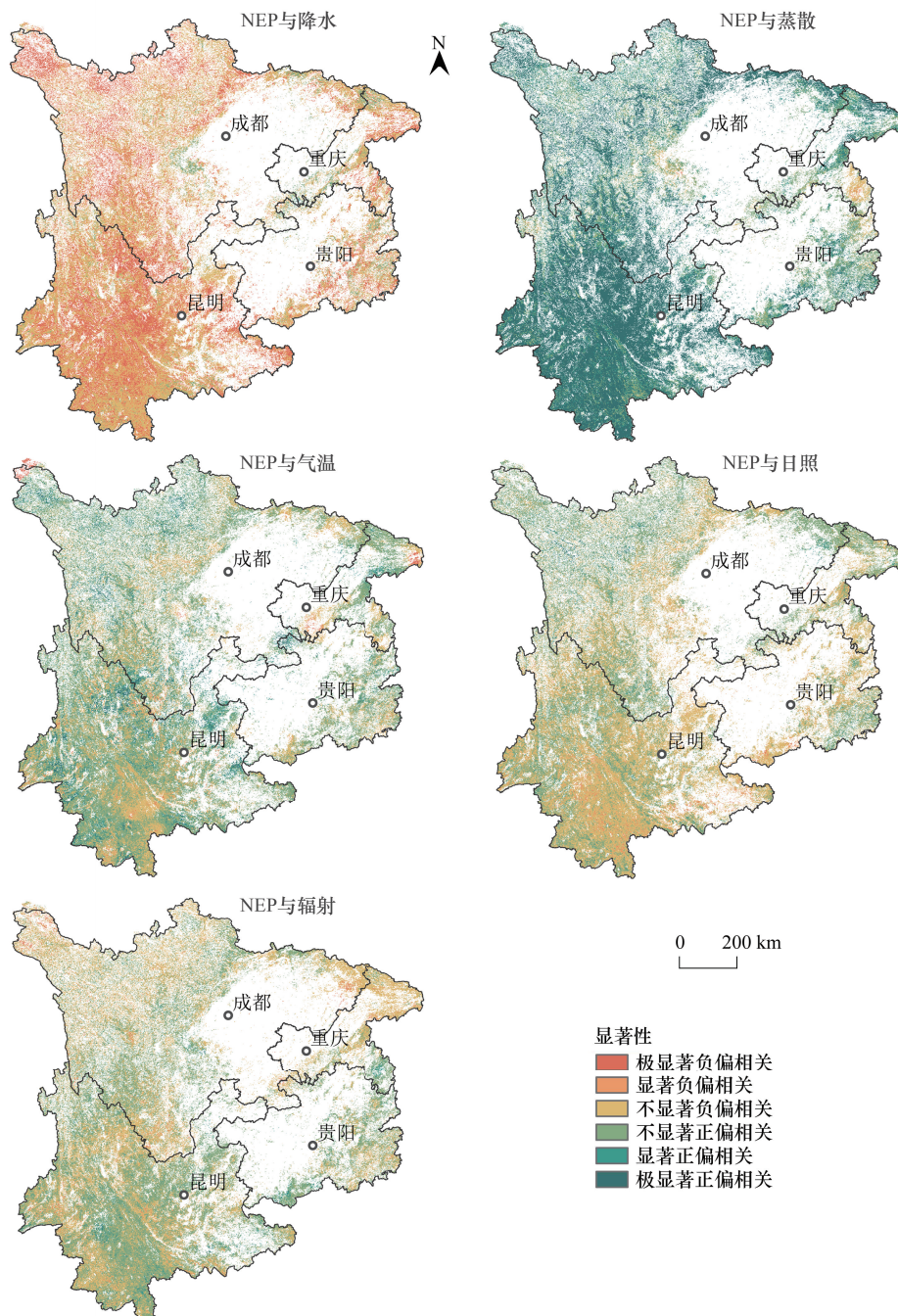


图 6 西南林区 NEP 与各气象因子的偏相关分析

Fig.6 Partial correlation analysis between NEP and various meteorological factors in the forest of Southwest China

从关键气候因子分析来看(图 7),蒸散是影响西南林区 NEP 变化的第一关键气候因子,影响范围占到总

林地面积的 67.2%, 降水影响范围次之 (21.3%), 气温影响范围第三 (6.1%), 而辐射和日照影响的区域面积占比最低, 分别为 2.8% 和 2.6%。对于各省林区, 影响 NEP 的主导关键气候因子略有差异, 其中蒸散在云南的影响面积占比最高 (81.1%), 而降水在贵州的影响范围最广 (36.6%)。总体来看, 蒸散和降水对西南林区 NEP 影响明显高于其他气象因子, 是西南林区近 21 年来 NEP 年际变化的主要气候影响因素。

在不同林地类型间, 蒸散影响也明显高于其他气象因子, 其中蒸散在常绿阔叶林中影响范围最广, 面积占比达到 81.8%; 对灌丛影响范围最小 (面积占比 56%)。降水影响范围略少于蒸散影响, 面积占比在不同林地类型中达到 11.5%—29.3%, 其中在灌丛中影响面积占比最大。从分省林区来看 (图 8), 四川和云南不同森林类型的关键气候因子基本相同, 蒸散和降水是影响 NEP 的第一、第二关键气候因子。然而贵州和重庆不同林地类型的第一关键气候因子出现一定变化, 其中降水是影响贵州常绿阔叶林和灌丛 NEP 的第一关键气候因子, 影响面积占比分别为 55.6% 和 38.9%; 气温是影响贵州针叶林 NEP (面积占比 52.5%—67.8%)、以及重庆落叶针叶林 NEP (面积占比 41.7%) 的第一关键气候因子。

2.4 西南林区 NEP 空间变化影响分析

为了分析 NEP 空间分布的驱动影响, 采用地理探测器模型, 以解释力 q 值为指标, 定量评估了 9 种气候环境因子对林区 NEP 的影响程度 (图 9)。对于西南林区, 解释力前五因子依次为气温、辐射、高程、蒸散、降水 ($P < 0.01$), 其中气温 q 值达到 0.23, 是影响西南林区固碳功能空间分布的重要因子。而太阳辐射、森林类型、坡度、坡向等其他因子, 对西南林区 NEP 的解释力明显偏弱, q 值均小于 0.1, 说明这些因子对西南林区固碳空间异质性影响相对偏小。

从分省变化来看 (图 9), 不同因子对各省林区 NEP 空间分布影响程度存在明显差异, 影响力前三的因子, 云南为蒸散 (q 值 0.32)、降水 (q 值 0.31)、气温 (q 值 0.30); 四川为高程 (q 值 0.51)、气温 (q 值 0.43)、蒸散 (q 值 0.39), 但是贵州和重庆各气候环境因子解释力均明显偏弱, q 值多小于 0.1, 对 NEP 空间分布影响偏小。从不同林地类型来看, 对灌丛 NEP 影响最为显著的因子为高程 (q 值 0.54) 和气温 (q 值 0.53), 解释力 (q 值) 也明显高于其他林地类型; 常绿阔叶林和落叶针叶林 NEP 空间分布, 主要受到蒸散影响 (q 值 0.29); 落叶阔叶林和混交林, 主要受到高程的影响 (q 值 0.32)。但是各因子对常绿针叶林 NEP 空间分异的影响普遍偏小, q 值多低于 0.1, 表明常绿针叶林 NEP 空间分异的主导驱动因子不突出, 影响因素机制更为复杂。

因子交互作用探测分析显示 (图 10), 气温、辐射等 9 种因子之间的交互作用均属于双因子增强 (占比 47%) 或非线性增强 (占比 53%), 没有出现减弱的交互影响, 表明各因子的联合效应会增强气候环境因素对西南林区 NEP 空间分异性的影响。交互影响力排前三的组合为, 气温 $\cap$ 日照 (q 值 0.33)、辐射 $\cap$ 蒸散 (q 值 0.31)、气温 $\cap$ 辐射 (q 值 0.29), 交互作用多呈现非线性增强, 并且对 NEP 的空间分布影响均具有显著差异 ($P < 0.05$)。

各因子交互影响在不同省份间也存在较大差异 (图 11)。在四川林区, 高程作为影响 NEP 空间分布的主导因子, 与其他因子的交互影响力— q 值均达到了 0.5 以上, 对 NEP 影响明显高于其他因子间交互作用, 其中高程 $\cap$ 蒸散 (q 值 0.58) 解释力最大。在云南林区, 各因子交互作用的影响力略偏低, 其中蒸散、降水与其他因子交互作用下对 NEP 影响最大, q 值平均为 0.37。但是对于贵州和重庆林区, 尽管各因子交互作用对 NEP 影

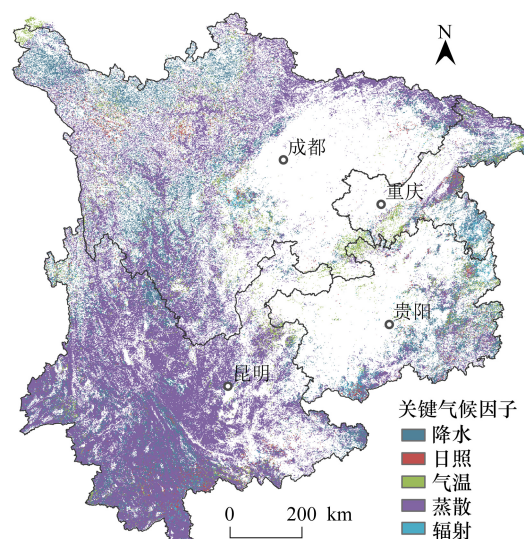


图 7 西南林区 NEP 的关键气候因子空间分布
Fig.7 Spatial distribution of the primary climatic factors influencing NEP in the forest of Southwest China

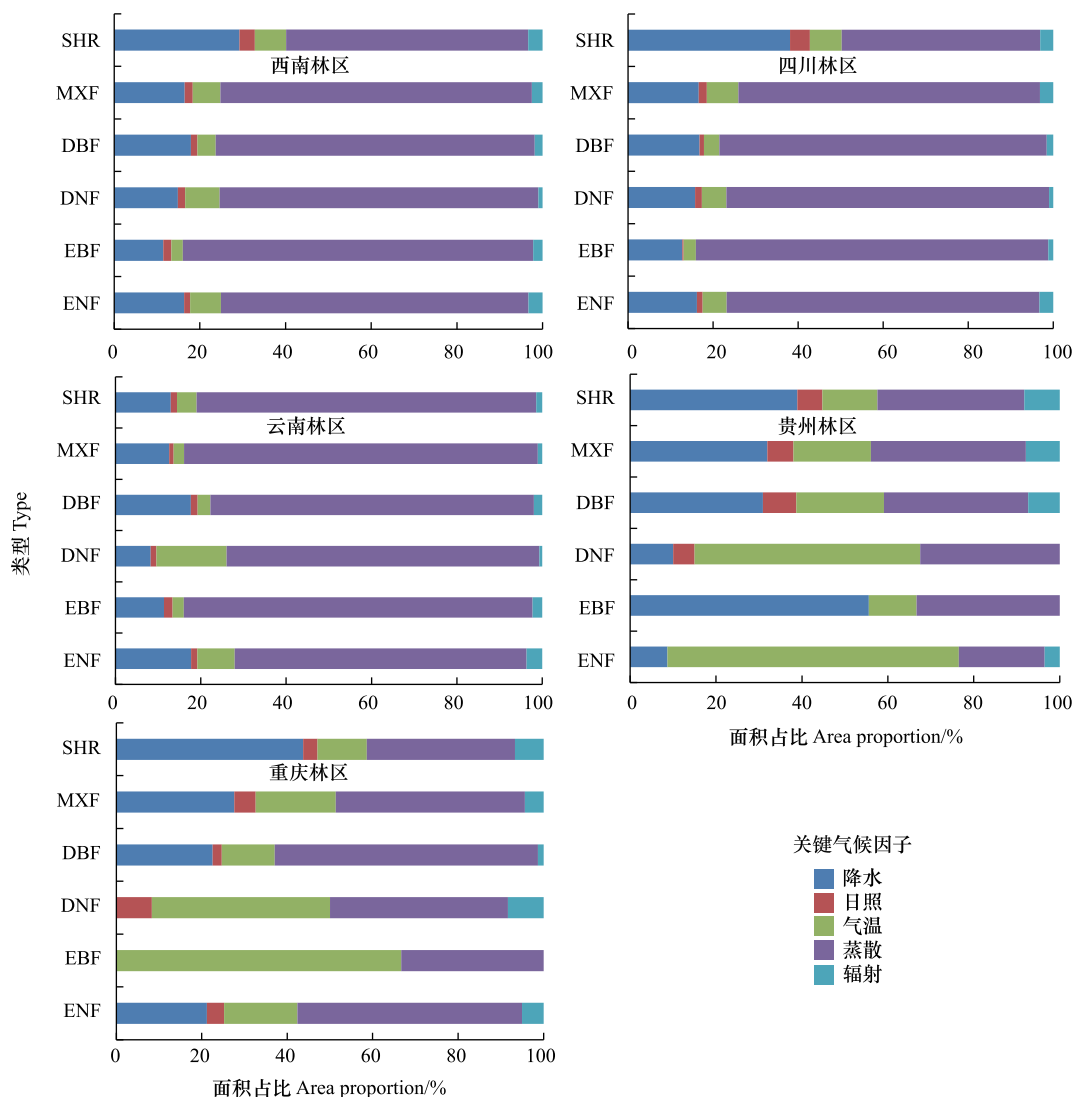


图 8 西南不同森林类型 NEP 的关键气候因子面积占比

Fig.8 The area proportion of the primary climatic factors influencing NEP for different forest types in the southwest provinces

响均要大于单一因子,但是由于单因子影响力偏小,交互影响依然偏弱, q 值在重庆林区为 0.1—0.2,以双因子增强为主,而 q 值在贵州多低于 0.1,以非线性增强为主,这也显示出地理气候环境对重庆和贵州林区 NEP 空间异质性的复杂影响。

3 讨论

3.1 西南林区固碳变化特征

我国森林固碳能力要明显高于其他生态系统类型,其中阔叶林 NEP 为 $400\text{--}700\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($4\text{--}7\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),针叶林 NEP 为 $297\text{--}405\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($2.97\text{--}4.05\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)^[9,10,44]。西南林区固碳功能突出,具有不可忽视的作用^[16,45—47]。本研究模拟的 NEP 接近上述研究结果,西南林区 NEP 多分布在 $300\text{--}500\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($3\text{--}5\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$) 间(面积占比 40.5%),其中常绿阔叶林 NEP 高于其他森林类型,年均 NEP 最高 $515.2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ($5.152\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),具有最强的碳汇能力,其他研究也有类似发现^[10],这可能与南方常绿林在月尺度上也多表现为碳汇功能,且具有较高的生物量特征相关联^[48]。

陆地生态系统固碳功能受到气候因子、环境条件、以及土地利用变化等人为和自然条件扰动^[1,49],普遍存

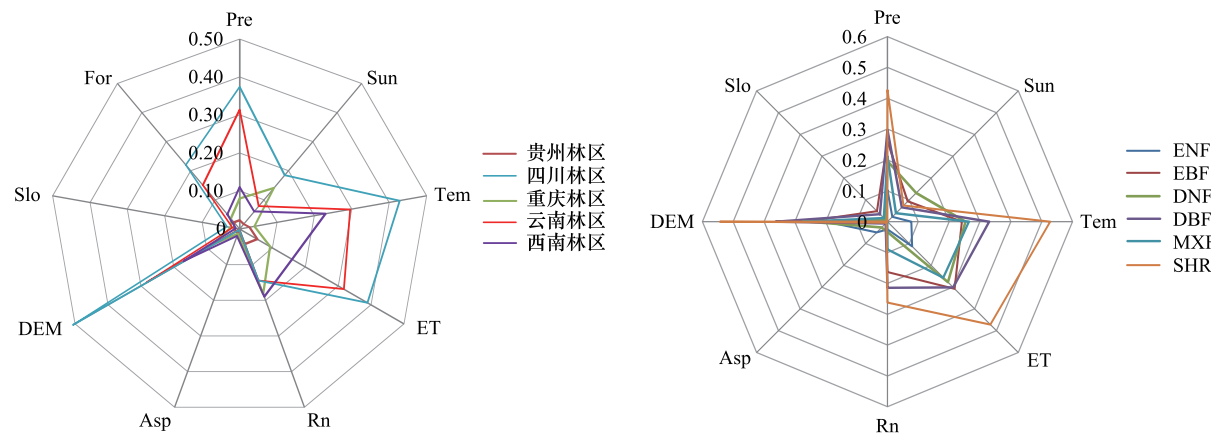


图9 环境因子对西南林区 NEP 空间分布的解释力

Fig.9 The explanatory power of environmental factors on the spatial distribution of NEP in the forest of Southwest China

Pre: 年降水 Annual total precipitation; Sun: 年日照时数 Annual sunshine duration; Tem: 年均温 Annual mean temperature; ET: 蒸散 Evapotranspiration; Rn: 辐射 Radiation; Asp: 坡向 Slope aspect; DEM: 高程 Elevation; Slo: 坡度 Slope gradient; For: 森林类型 Forest type

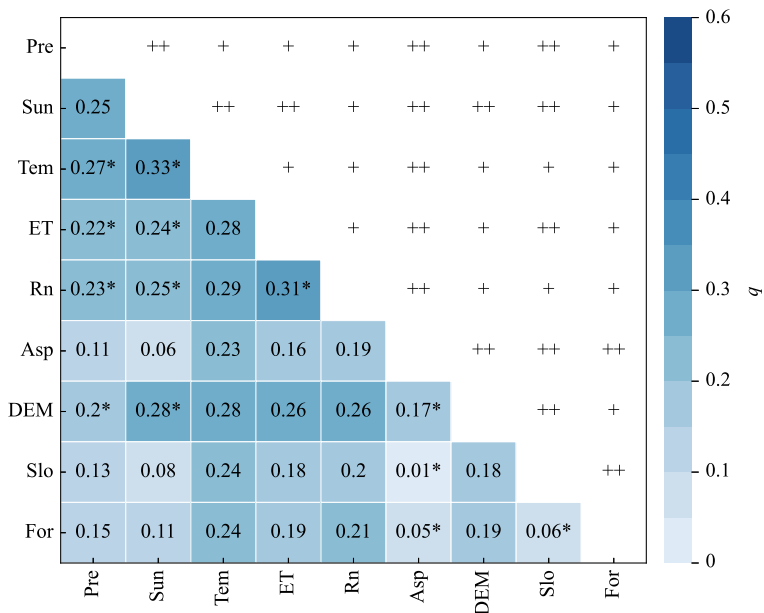


图10 各因子交互作用对西南林区 NEP 的影响

Fig.10 Influence of the interactions among different factors on forest NEP in Southwest China

+和++表示每两个驱动因素交互作用后的解释力的变化,分别代表双因子增强和非线性增强;*,表示两个自变量对因变量的空间分布影响具有显著差异

在时间尺度演变特征^[12,46]、以及空间尺度分异特征^[3,10,17]。在时间尺度上,中国陆地 NEP 总体呈现增加趋势,年际间的波动也较大^[12-13]。在空间变化上,中国陆地生态系统碳汇总体呈现纬度格局,随纬度增加而出现下降趋势^[9],其中内蒙古东北部、华北及黄淮等北方地区呈现为弱的碳汇区,而广东、广西等南方地区碳汇效应较强^[12]。西南林区 NEP 空间分异特征明显,北部林区 NEP 要明显低于南部,特别是云南大部 NEP 及其变化速率要明显高于四川和重庆林区。然而四川碳汇波动小、稳定性高,云南变化与之相反^[14]。从变化趋势来看,2000 年以来西南林区 NEP 总体呈现增加趋势,与我国陆地生态系统固碳总体变化类似^[12-13]。21 世纪以来我国森林等四种陆地生态系统碳汇能力显著增加^[47],这可能是 20 世纪 90 年代末以来,南方大部地区实

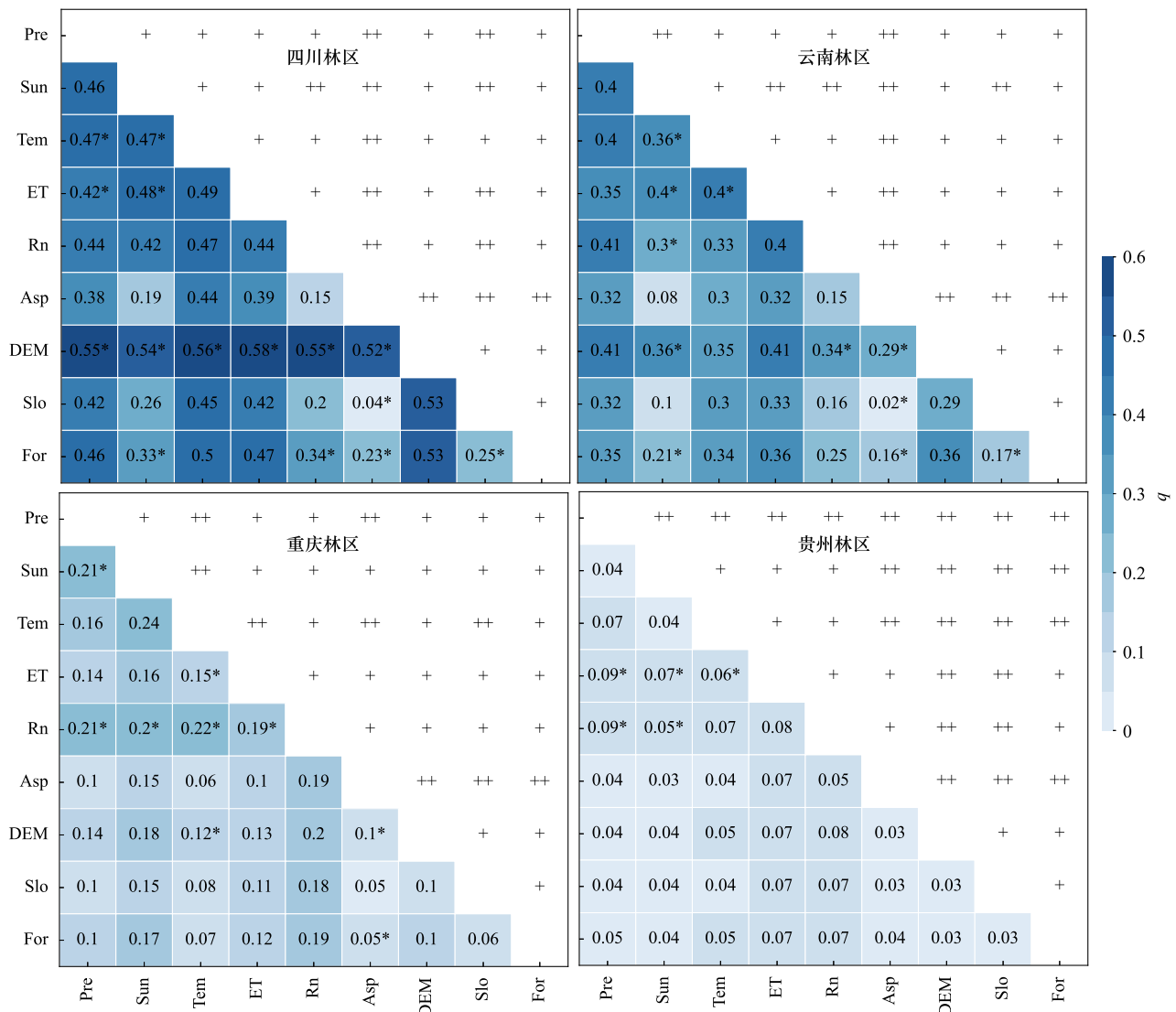


图 11 各因子交互作用对西南各省林区 NEP 的影响

Fig.11 Influence of the interactions among different factors on forest NEP in Southwest provinces

施了植树造林、生态保护与修复等生态工程^[17,50],特别是西南地区 NDVI、EVI 等植被生态指标总体向好^[19,22],植被生产力也多呈明显上升趋势^[16,20],促进了区域固碳能力的提升^[51—52]。

3.2 西南林区固碳影响机制

气候变化背景下,陆地生态系统碳汇能力的时空格局特征出现较大差异^[14],这主要归因于气温和降水等气候年际波动、以及碳交换过程对气候环境变化响应的不同步性^[10,18,46]。受东亚季风气候调节影响,中国大陆生态系统碳汇能力对气候变化更为敏感,影响程度也要高于其他因素^[1,6,13]。1982—2000 年期间中国大陆生态系统 NEP 呈下降趋势,而 2000—2010 年期间呈上升趋势,这种转变主要受到气候变化影响,其贡献达到了 56.3%^[13]。在气候影响方面,温度和降雨等因子是通过光合作用和呼吸作用等过程变化,来影响生态系统碳循环组分^[9,46],但是由于光合作用和呼吸作用不对称响应^[13],各气候因子的影响程度存在一定差异,其中年均温影响大于年降水量影响^[46],但是也有研究显示,降水对陆地生态系统固碳能力影响更为显著^[1,13,53],特别是在南方亚热带季风区域降水对 NEP 变化的贡献最大(23%),可能归因于生态系统碳吸收对降水具有较高的敏感性^[1]。从西南林区研究结果来看,蒸散是影响 NEP 的关键气候因子(面积占比 67.2%),降水影响范围次之(21.3%),气温影响范围第三(6.1%)。东南亚地区研究也发现,降水、蒸散是影响林区 NEP 变化的

重要因素^[54]。因此要针对降水和蒸散变化显著的林区,加强探索分析,以应对未来气候变化对区域碳汇影响。然而也有研究发现,气温与阔叶林和针叶林固碳能力具有正相关性,对 NEP 影响大于降水^[14,10]。这种研究结果差异,甚至相反结论的出现,可能由于研究区域和时段的变化所引起的,Mao 等^[51]研究发现影响浙江森林 NEP 的主导气候因素,2000 年之前是气温,之后是降水。

在固碳空间格局方面,除了气象条件影响以外,地形坡度等环境因素差异也会导致不一样生态气候环境特征,从而造成生态系统固碳分布差异^[55-56]。在西南林区,各因子间联合效应会增强气候环境因素对西南林区 NEP 空间分异特征的影响,其中气温是影响 NEP 空间分布的重要因子。其他研究也发现西南植被生长状况主要受到气温等因素影响,各因子交互效应也多表现为增强型^[20,57-58]。在不同林区和森林类型间,主导影响因子也存在异质性,其中蒸散、高程分别是影响云南和四川森林 NEP 空间分布的主导因子;高程和气温对灌丛影响最为显著。然而各气候环境因子对常绿针叶林 NEP 空间分布影响均偏小,没有显示出主导影响因子。这可能由于常绿针叶林多分布在水热条件较好的地区,水热平衡综合影响对于植被生长更为重要^[58],这也进一步说明森林固碳功能分布特征与气候环境因子间关系的复杂性。生态系统结构和功能对气候环境的响应与调节机制,是一种复杂而动态的关系,特别在气候变暖、极端天气频发的背景下,高温干旱、林火等影响因素逐步成为陆地生态系统碳汇的重要扰动因子^[4,52,59-60],加之区域碳汇不稳定性及其影响因素的空间分异特征^[11],从而进一步提高了区域碳汇评估及其影响机制的不确定性。因此,我们需更加深入且细致地探究区域生态系统固碳功能在时间与空间上的演变,并剖析其背后多元驱动机制的复杂性。

4 结论

(1) 西南林区多年平均 NEP 多分布在 $300-500 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($3-5 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 间,面积占比达到 40.5%,其中高固碳能力 ($> 6 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 林区集中分布于云南西南部;云南林区和常绿阔叶林的固碳能力最高,多年平均 NEP 分别为 $422.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($4.229 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和 $515.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($5.152 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

(2) 西南林区有 78.6% 林区 NEP 呈增加趋势,达到显著增加 ($P < 0.05$) 的林区面积占比为 42.2%;贵州林区和落叶针叶林的固碳能力增加趋势最为明显,平均每年分别增加 $5.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.059 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和 $4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($0.045 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

(3) 西南大部林区 NEP 变化持续指数 (H) 小于 0.5, NEP 由增加变为减少趋势的林区面积占比达到 64.6%,固碳功能未来可能呈下降趋势;但是云南林区和常绿针叶林 NEP 呈持续增加趋势的面积占比最高,分别为 15.7% 和 19.1%,林区固碳能力仍将持续提高。

(4) 在气候变化的影响方面,近 20 年西南大部林区 NEP 与降水具有负相关性、与蒸散和气温具有正相关性,其中蒸散影响范围最大,面积占比达到 67.2%,降水影响范围次之 (21.3%),气温影响范围第三 (6.1%)。

(5) 在空间分布的影响方面,林区固碳功能解释力前五的因子,依次为气温、辐射、高程、蒸散、降水;且这些因子联合效应—气温 $\cap$ 日照 (q 值 0.33)、辐射 $\cap$ 蒸散 (q 值 0.31)、气温 $\cap$ 辐射 (q 值 0.29),对 NEP 的空间分异影响最为显著。

参考文献 (References):

- [1] Zhang L, Ren X L, Wang J B, He H L, Wang S Q, Wang M M, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Zhou L, Niu Z E, Ge R, Li Y Y, Lv Y, Yan H M, Huang M, Yu G R. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003.
- [2] Piao S L, Wang X H, Wang K, Li X Y, Bastos A, Canadell J G, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: issues and perspectives. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 300-318.
- [3] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [4] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1321-1334.

- [5] 朴世龙,何悦,王旭辉,陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望. 中国科学:地球科学,2022,52(6):1010-1020.
- [6] 刘坤,张慧,孔令辉,乔亚军,胡梦甜. 陆地生态系统碳汇评估方法研究进展. 生态学报,2023,43(10):4294-4307.
- [7] 薛龙飞,罗小锋,吴贤荣. 中国四大林区固碳效率:测算、驱动因素及收敛性. 自然资源学报,2016,31(8):1351-1363.
- [8] 方精云,郭兆迪,朴世龙,陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑,2007,37(6):804-812.
- [9] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, He H L, Wang Q F, Wen X F, Li X R, Zhang L M, Zhang L, Su W, Li S G, Sun X M, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Wang Y Y, Tong C L. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798-810.
- [10] Fei X H, Song Q H, Zhang Y P, Liu Y T, Sha L Q, Yu G R, Zhang L M, Duan C Q, Deng Y, Wu C S, Lu Z Y, Luo K, Chen A G, Xu K, Liu W W, Huang H, Jin Y Q, Zhou R W, Li J, Lin Y X, Zhou L G, Fu Y E, Bai X L, Tang X H, Gao J B, Zhou W J, Grace J. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 824-840.
- [11] 陶波,曹明奎,李克让,顾峰雪,季劲钧,黄玫,张雷明. 1981—2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. 中国科学 D 辑, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [12] 杨延征,马元丹,江洪,朱求安,刘金勋,彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. 生态学报, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [13] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [14] 王锴,朴世龙,何悦,刘永稳,何洪林. 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制. 中国科学:地球科学,2023,53(2): 216-226.
- [15] 刘兴良,刘杉,包维楷,李旭华,李贵祥,朱万泽,喻理飞,蔡蕾,潘红丽,冯秋红,李慧超,徐峥静茹,胡宗达,张利,刘千里. 西南地区森林生态安全屏障构建途径与对策. 陆地生态系统与保护学报,2022,2(5): 84-94.
- [16] 陈田田,王钰茜,曾兴兰,王强. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应. 生态学报,2023,43(6): 2253-2270.
- [17] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [18] Mao F J, Du H Q, Li X J, Ge H L, Cui L, Zhou G M. Spatiotemporal dynamics of bamboo forest net primary productivity with climate variations in Southeast China. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106505.
- [19] 吕妍,张黎,闫慧敏,任小丽,王军邦,牛忠恩,顾峰雪,何洪林. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因. 生态学报, 2018, 38(24): 8774-8786.
- [20] 何宏昌,马炳鑫,靖娟利,徐勇,窦世卿,刘兵. 近 20 年西南喀斯特地区植被 NPP 时空变化及自然因素地理探测. 水土保持研究, 2022, 29(3): 172-178, 188.
- [21] Zhou Q W, Luo Y, Zhou X, Cai M Y, Zhao C W. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the Karst area of southwestern China—a remote sensing approach. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 460-470.
- [22] 曹云,钱永兰,孙应龙,钱拴,张晔萍,延昊. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析. 生态环境学报, 2020, 29(5): 857-865.
- [23] Shanguan W, Dai Y J, Duan Q Y, Liu B Y, Yuan H. A global soil data set for earth system modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6(1): 249-263.
- [24] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, Oechel W, Bohrer G, Meyers T, Martin T A, Matamala R, Phillips R P, Rahman F, Yu Q, Shugart H H. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants. *Ecological Modelling*, 2015, 297: 42-59.
- [25] Yan H, Wang S Q, Wang J B, Cao Y, Xu L L, Wu M X, Cheng L, Mao L X, Zhao F H, Zhang X Z, Liu Y F, Wang Y F, Chen S P, Li Y N, Han S J, Zhou G Y, Zhang Y P, Shugart H H. Multi-model analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000-2015. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(15): 5539-5555.
- [26] Goward S N, Dye D G. Evaluating North American net primary productivity with satellite observations. *Advances in Space Research*, 1987, 7(11): 165-174.
- [27] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [28] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [29] Chen S T, Huang Y, Zou J W, Shen Q R, Hu Z H, Qin Y M, Chen H S, Pan G X. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 590-605.
- [30] 谢薇,陈书涛,胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素. 环境科学, 2014, 35(1): 334-340.
- [31] 何国兴,柳小妮,张德罡,杜月红,李强,刘志刚,关文昊,杨军银,韩天虎,孙斌,潘冬荣. 甘肃省草地 NPP 时空变化及对气候因子的响应.

- 草地学报, 2021, 29(4): 788-797.
- [32] 徐雪, 罗娅, 杨胜天, 陆晓辉, 周秋文, 刘茂, 石春茂, 廖梦垚. 全球不同气候带陆地植被净初级生产力变化趋势与可持续性. 生态学报, 2023, 43(9): 3729-3743.
- [33] Elmeddahi Y, Mahmoudi H, Issaadi A, Goosen M F A, Ragab R. Evaluating the effects of climate change and variability on water resources: a case study of the chelif basin in Algeria. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, 9(4): 835-845.
- [34] 李小宇, 信忠保, 杨俊柳, 柳金昊. 2000—2020 年青海河湟谷地植被 NDVI 时空变化及影响因素. 水土保持学报, 2024, 38(1): 79-90.
- [35] 曹云, 张称意, 孙应龙, 刘昌义, 胡琦, 赵子健, 王晓晨, 潘学标, 王世坤. 2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析. 生态学报, 2023, 43(9): 3488-3499.
- [36] 袁沫汐, 邹玲, 林爱文, 朱弘纪. 湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(17): 5315-5323.
- [37] 曹云, 孙应龙, 姜月清, 万君. 黄河流域净生态系统生产力的时空分异特征及其驱动因子分析. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2101-2110.
- [38] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [39] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [40] Zuo Y F, Li Y H, He K N, Wen Y S. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000—2020. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109429.
- [41] 王川, 王丽莎, 张勇勇, 赵文智, 冯相艳. 2000—2020 年祁连山植被净初级生产力时空变化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(23): 9710-9720.
- [42] Nie T, Dong G T, Jiang X H, Lei Y X. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of northern Shaanxi. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 613.
- [43] 高思琦, 董国涛, 蒋晓辉, 聂桐, 郭欣伟, 党素珍, 李心宇, 李昊洋. 黄河源植被覆盖度变化及空间分布自然驱动力分析. 生态环境学报, 2022, 31(3): 429-439.
- [44] 李轩然. 中国典型陆地生态系统碳收支的时空分布规律及其影响因素分析. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
- [45] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世苹, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学: 生命科学, 2022, 52: 534-574.
- [46] 王兴昌, 王传宽, 于贵瑞. 基于全球尺度相关的森林碳交换的时空格局. 中国科学 D 辑, 2008, 38(9): 1092-1102.
- [47] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键浠, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [48] Nizami S M, Zhang Y P, Zheng Z, Lu Z Y, Yang G P, Sha L Q. Evaluation of forest structure, biomass and carbon sequestration in subtropical pristine forests of SW China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(9): 8137-8146.
- [49] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 姜月清. 基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1585-1592.
- [50] Yu Z, Ciais P, Piao S L, Houghton R A, Lu C Q, Tian H Q, Agathokleous E, Kattal G R, Sitch S, Goll D, Yue X, Walker A, Friedlingstein P, Jain A K, Liu S R, Zhou G Y. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5374.
- [51] Mao F J, Du H Q, Zhou G M, Zheng J L, Li X J, Xu Y X, Huang Z H, Yin S Y. Simulated net ecosystem productivity of subtropical forests and its response to climate change in Zhejiang Province, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155993.
- [52] Yin S Y, Du H Q, Mao F J, Li X J, Zhou G M, Xu C H, Sun J Q. Spatiotemporal patterns of net primary productivity of subtropical forests in China and its response to drought. *Science of the Total Environment*, 2024, 913: 169439.
- [53] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw R M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [54] Huang C Q, Sun C Z, Nguyen M, Wu Q, He C, Yang H, Tu P Y, Hong S. Spatio-temporal dynamics of terrestrial Net ecosystem productivity in the ASEAN from 2001 to 2020 based on remote sensing and improved CASA model. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110920.
- [55] Sundqvist M K, Sanders N J, Wardle D A. Community and ecosystem responses to elevational gradients: processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 261-280.
- [56] 巩杰, 张影, 钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化. 生态学报, 2017, 37(15): 5121-5128.
- [57] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因. 生态环境学报, 2020, 29(4): 686-694.
- [58] 孙美荣, 孙鹏森. 西南高山亚高山区植被活动变化的气候驱动效应与可持续性. 水土保持研究, 2023, 30(3): 240-250.
- [59] 张彬, 朱建军, 刘华民, 潘庆民. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [60] Yuan Z, Jiang Q Q, Yin J. Impact of climate change and land use change on ecosystem net primary productivity in the Yangtze River and Yellow River Source Region, China. *Watershed Ecology and the Environment*, 2023, 5: 125-133.