

DOI: 10.20103/j.stxb.202405101054

周娜芳, 贡恩军, 白天豪, 赵婷, 白红英, 王俊. 基于 CASA 模型的秦巴山区 NPP 时空动态及影响因素分析. 生态学报, 2025, 45(4): 1829-1843.

Zhou N F, Gong E J, Bai T H, Zhao T, Bai H Y, Wang J. Analysis of temporal and spatial dynamics and its influencing factors of NPP in Qinba Mountain Area based on the CASA model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1829-1843.

基于 CASA 模型的秦巴山区 NPP 时空动态及影响因素分析

周娜芳¹, 贡恩军², 白天豪², 赵婷³, 白红英², 王俊^{1,2,*}

1 西北大学碳中和学院 陕西省碳中和技术重点实验室, 西安 710127

2 西北大学城市与环境学院 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

3 西安外国语大学旅游学院, 西安 710127

摘要: 植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是反映陆地生态系统碳封存能力和环境变化的直接指标, 受气候变化与人类活动的共同影响, 且在不同地形上有分异性。然而, 人类活动及地形对秦巴山区植被 NPP 变化的影响研究尚且不足。采用 CASA 模型, 综合利用线性趋势分析、转移矩阵和残差分析等方法研究了秦巴山区 2001—2022 年长时序 NPP 时空动态和地形效应, 并进一步探讨了气候变化和人类活动对 NPP 变化的相对贡献率, 主要结论如下: ① 秦巴山区 2001—2022 年的 NPP 空间分布表现为中间高, 四周低, 均值为 585.11 g C/m^2 , 并以 $4.30 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速度增加。② 林地有最高的年 NPP 均值, 而退耕还林区域具有最高的 NPP 增长速率 ($8.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 表明退耕还林是秦巴山区 NPP 增长的有效措施; ③ NPP 随海拔和坡度变化具有明显的分异性。在海拔 3400m 以下, 植被 NPP 随着高程的增加而增加, 而当高程超过 3400m 时, 植被 NPP 显著减少, 坡度在 10° — 40° 范围内植被 NPP 的多年均值和变化趋势较高; ④ 秦巴山区 NPP 变化是气候变化和人类活动共同作用的结果, 二者对 NPP 变化的相对贡献率分别为 37.81% 和 62.19%, 其中人类活动导致陇南等生态脆弱区 NPP 显著提高。

关键词: 基于过程的遥感模型 (CASA 模型); NPP; 趋势分析; 地形效应; 土地利用变化; 秦巴山区

Analysis of temporal and spatial dynamics and its influencing factors of NPP in Qinba Mountain Area based on the CASA model

ZHOU Nafang¹, GONG Enjun², BAI Tianhao², ZHAO Ting³, BAI Hongying², WANG Jun^{1,2,*}

1 College of Carbon Neutrality, Northwestern University, Shaanxi Provincial Key Laboratory of Carbon Neutrality Technology, Xi'an 710127, China

2 College of Urban and Environmental Sciences, Northwestern University, Shaanxi Key Lab Earth Surface Syst & Environm Carr, Xi'an 710127, China

3 Tourism College, Xi'an International Studies University, Xi'an 710127, China

Abstract: Net Primary Productivity (NPP) of vegetation has been widely used to directly reflect the carbon sequestration capacity and environmental changes of terrestrial ecosystems. However, research on the impact of human activities across terrains on vegetation NPP changes in the Qinba Mountains is still insufficient. Based on the CASA model, the long-term spatial distribution of NPP in the Qinba Mountains from 2001 to 2022 and its topographic effects were comprehensively analyzed using linear trend analysis, transition matrix, and residual analysis. Furthermore, the relative contribution rates of climate change and human activities to NPP changes were explored. The main findings are as follows: ① The spatial distribution of NPP in the Qinba Mountains exhibited a pattern of the middle height around the bottom, with a mean of 585.11 g C/m^2 , and an annual increase rate of 4.30 g C/m^2 from 2001 to 2022. ② The highest annual mean NPP was found

基金项目: 秦岭山水林田湖草沙一体化保护与修复工程子项目 (XCJ-2023-76)

收稿日期: 2024-05-10; 网络出版日期: 2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangj@nwu.edu.cn

in forestland among land use types. The highest increasing rate of NPP ($8.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) was found in the area of conversion of farmland to forest, indicating an effective land transfer type for NPP growth in the Qinba Mountains; ③The NPP varies significantly with altitude and slope. The vegetation NPP increased with increasing elevation below 3400 m and decreased significantly above it. The annual mean and trend of vegetation NPP are relatively high within the slope range of 10° — 40° ; ④The change in NPP in the Qinba Mountains was driven by the combined impact from climate change and human activities, with the relative contribution rates of 37.81% and 62.19%, respectively. Human activities significantly increased the vegetation NPP especially in ecologically fragile areas such as Longnan region.

Key Words: CASA; NPP; trend analysis; topographic effects; land use change; Qinba mountains

大规模燃烧化石燃料导致大气中二氧化碳等温室气体浓度上升,由此触发了全球气温上升、干旱加剧以及植被地理分布的重大变化等一系列环境问题^[1]。面对这一挑战,自 1992 年《联合国气候变化框架公约》签署以来,中国对生态系统碳排放和碳固存的关注度不断提高^[2]。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是植物通过光合作用固定的能量中,扣除植物呼吸作用消耗掉的部分后,剩余的、可用于植物的生长和生殖的能量^[3],是衡量生态系统健康和生产力的关键指标,评估碳封存能力和生态环境变化的直接工具^[4]。通过对不同地区和不同生态系统的 NPP 进行测量和估算,可以进一步了解生态系统的生产力水平、碳储量和能量流动等关键生态学特征^[5]。因此,估算和分析区域植被 NPP 的时空分布特征对于区域生态环境保护、资源可持续利用以及生态系统的恢复和保护具有重要的理论和实践价值。

随着空间探测技术的快速发展,结合植被生产力估算模型,利用遥感观测数据进行 NPP 估算已经成为一种有效的研究方法^[6],如 Thornthwaite Memorial 模型^[7]、Chikugo 模型^[8]、BIOME · BGC 模型^[9]、BEPS 模型^[10]、CASA 模型^[11]和 GLO-PEM 模型^[12]。其中,CASA 模型作为一种基于森林植被光合作用机理构建的遥感参数模型,能够准确模拟大范围森林植被的初级生产力^[13]。鉴于归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)在植被茂密区域的 NPP 模拟中的饱和度问题,研究提出利用核归一化差值植被指数(Kernel Normalized Difference Vegetation Index, kNDVI)来替代驱动 CASA 模型,以提高 NPP 的估算精度^[14]。因此,本研究在 CASA 模型的基础上引入 kNDVI,为模型的进一步改进提供了新方向。

陆地生态系统 NPP 的变化受多种因素的综合影响,其中自然因子和人类活动尤为显著^[15–16]。降水、温度、辐射和地形等自然因子会影响植被的固碳能力,而不同植被类型的碳吸收能力也有所差异^[17]。此外,人类活动可以通过改变土地利用方式间接影响植被生产力变化^[18]。偏相关分析^[19]和地理探测器^[20]等方法常被用于探究气候因素对植被变化的影响,但容易忽略人类活动所导致的差异。而残差趋势法能够较准确地分析气候变化和人类活动在植被 NPP 变化中所起的作用,可以揭示植被变化的驱动机制,并在许多区域研究中取得较好的应用^[21–22]。

秦巴山区作为我国南北地理分界线,对于水资源涵养、土壤保护、碳储存和气候调节等方面具有重要意义。目前已有学者探究了植被 NPP 对秦巴山区干旱的响应^[23],以及气候变化、土壤类型、地形因子、植被类型及人类活动等对植被 NPP 的影响^[24]。但当前有关秦巴山区长时序 NPP 的研究较为缺乏,且对于气候变化与人为活动的相对贡献率尚未厘清,这限制了对秦巴山区的全面理解。基于此,本文采用 CASA 模型模拟秦巴山区 2001—2022 年长时序 NPP,旨在:(1)揭示近二十年秦巴山区 NPP 时空变化特征;(2)探究不同土地利用变化和地形效应对 NPP 变化的影响;(3)量化气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对贡献度。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

秦巴山区(102° — 114°E , 30° — 33.5°N)地处中国中部,总面积约 29.36 万 km^2 ,横跨陕西、河南、湖北、重

庆、四川、甘肃六个省市,是中国的南北过渡带。研究区海拔呈西高东低的空间分布特征,地势复杂多样,从北到南分别是秦岭山脉、汉中河谷和大巴山山脉(图 1)。秦巴山区属于亚热带季风气候和温带季风气候的过渡区域,有显著的垂直气候带划分,年平均气温和年降水量差异较大,其年平均气温在 10—20℃ 之间,年平均降水量在 500—1500mm 之间,被广泛认为是中国的水源涵养区和生态屏障。由于地形陡峭,山川纵横,秦巴山区形成了具有过度性质的植被体系和气候类型,从而导致植被对气候响应的复杂性^[25—26]。

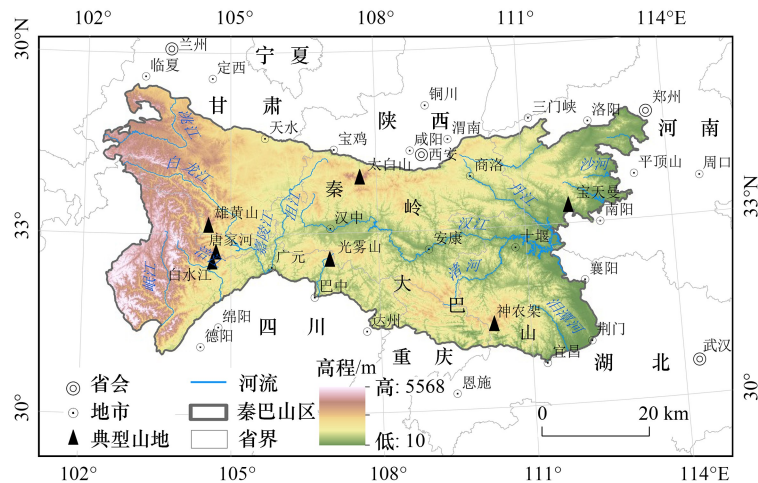


图 1 秦巴山区高程及地理区位图

Fig.1 Elevation and Geographical Map of Qinba Mountain Area

1.2 数据来源与处理

本研究采用从哥白尼气候变化服务(<https://cds.climate.copernicus.eu>)提供的降水、气温和辐射数据以及来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)MOD13Q1 数据产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov>)的 NDVI 数据来模拟研究区的 NPP 值,时间跨度均为 2001—2022 年。根据前人方法,MOD17A3 的 NPP 数据被用来评价本文模拟结果的可靠性^[27—28]。

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来自美国国家航空航天局发布的 30m 空间分辨率 ASTER GDEM 数据^[29],并从地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)下载得到,经镶嵌、坐标转换和裁剪的预处理操作后得到秦巴山区研究范围的 DEM 数据。土地利用数据来自 CLCD(China Land Cover Dataset)数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu>),该数据基于 Landsat 数据制作的中国年度土地利用覆盖数据集,总体准确率可达 80%,且相较于 Globaland 30 等产品具有更高的时间分辨率,其包括了 1985—2022 逐年的 30m 土地利用数据^[30]。该数据包括农田、森林、灌木、草原、水域、冰川与永久积雪、裸地、人造地表、湿地 9 种地表覆盖类型。在本研究中,选取 2001 年和 2022 年两期数据,并将湿地、水体合并成一个新地类。为便于叠加分析,本研究使用 ArcGIS 10.5 软件将所有数据的空间分辨率重采样为 250m。

1.3 研究方法

1.3.1 CASA 模型改进及 NPP 计算

本研究使用 2001—2022 年的降水、气温、辐射、NDVI 数据,基于 CASA 模型来模拟研究区的 NPP。CASA 模型主要使用 NDVI 数据,基于光能利用原理,来估算陆地生态系的 NPP^[31]。其表达式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

其中, $APAR(g C m^{-2}月^{-1})$ 代表像元 x 在第 t 月吸收的光合有效辐射量,主要取决于光合有效辐射(PAR)和植被对光合有效辐射的吸收比例(FPAR),而 FPAR 本身又受 NDVI 和植被类型两个因子影响; ε 反映像元 x 在第 t 月植被的最大潜在光能利用效率($g C MJ^{-1}$),根据前人的研究,该模型通常使用的最大潜在光能利用效率为 0.389^[32]。相关参数计算方式如下:

$$\text{APAR}(x, t) = \text{PAR}(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \quad (2)$$

$$\text{FPAR}(x, t) = (\text{FPAR}(x, t)_{\text{NDVI}} + \text{FPAR}(x, t)_{\text{RVI}}) / 2 \quad (3)$$

$$\text{FPAR}(x, t)_{\text{NDVI}} = \frac{(\text{NDVI}(x, t) - \text{NDVI}_{i, \min}) \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min})}{\text{NDVI}_{i, \max} - \text{NDVI}_{i, \min}} + \text{FPAR}_{\min} \quad (4)$$

$$\text{FPAR}(x, t)_{\text{RVI}} = \frac{(\text{RVI}(x, t) - \text{RVI}_{i, \min}) \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min})}{\text{RVI}_{i, \max} - \text{RVI}_{i, \min}} + \text{FPAR}_{\min} \quad (5)$$

$$\text{RVI}(x, t) = \frac{1 + \text{NDVI}(x, t)}{1 - \text{NDVI}(x, t)} \quad (6)$$

其中, $\text{PAR}(\text{g C m}^{-2} \text{月}^{-1})$ 为向下短波辐射总量的 50%^[33], $\text{NDVI}(x, t)$ 、 $\text{RVI}(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的归一化植被指数与简单比值植被指数 (RVI); $\text{FPAR}(x, t)_{\text{NDVI}}$ 、 $\text{FPAR}(x, t)_{\text{RVI}}$ 是通过 NDVI 与 RVI 计算出来像元 x 在 t 月的植被层对光合有效辐射吸收比例, $\text{FPAR}_{\max} = 0.95$ 与 $\text{FPAR}_{\min} = 0.001$ 作为独立参数, $\text{NDVI}_{i, \max}$ 和 $\text{NDVI}_{i, \min}$ 分别为应第 i 种植被类型的 NDVI 最大值和最小值, $\text{RVI}_{i, \min}$ 和 $\text{RVI}_{i, \max}$ 取所有 RVI 值的 5% 和 95% 百分位。

考虑到 NDVI 数据使用了非线性变换, 可能导致数值容易饱和, 进而对高植被密度区的表征敏感度下降, 而相较于传统的 NDVI , kNDVI 对饱和度、偏差和复杂物候循环具有更强的抵抗力, 能更为准确地测量植物 NPP , 更好地表征植被绿度^[34–35]。 kNDVI 是基于机器学习径向基核函数 (RBF), 并在前人研究的基础上, 引入的一个非线性地简化。计算公式如下:

$$\text{kNDVI} = \tanh(\text{NDVI}^2) \quad (7)$$

1.3.2 线性趋势分析

根据 2001—2022 年期间的 NPP 像元数值变化, 建立基于像元的一元线性回归方程, 以分析 NPP 的年际变化趋势, 其斜率表示 2001—2022 年 NPP 的年变化率:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{NPP}_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (8)$$

式中, slope 为 NPP 的年变化速率; i 表示第 i 年, NPP_i 表示第 i 年的 NPP 值; n 为研究期年数, 本研究中 $n = 22$ 。当 $\text{slope} > 0$ 时, NPP 增加; 当 $\text{slope} < 0$ 时, NPP 减少。

1.3.3 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计检验方法^[36], 由 Mann 和 Kendall 提出。它能够很好地揭示时间序列的趋势变化, 通常用于检验趋势的显著性, 因而能够很好地用于植被 NPP 趋势检验研究中。其统计检验方法如下:

$$S = \sum_{i=n}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NPP}_j - \text{NPP}_i) \quad (9)$$

$$\text{sign}(\text{NPP}_j - \text{NPP}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i > 0 \\ 0, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i = 0 \\ -1, & \text{NPP}_j - \text{NPP}_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S > 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, NPP_i 和 NPP_j 分别为第 i 年和第 j 年的 NPP 数据, 且 $i < j$; n 为数据集长度, 本研究中 $n = 22$ 。 Z 为一个正态分布的统计量; $\text{var}(S)$ 为方差。在显著性水平 α 下进行显著性检验, 如果 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$, 则拒绝原假设。当 $|Z|$ 大于 1.96 和 2.58 时, 表示趋势分别通过了置信度 95% 和 99% 的显著性检验。本研究根据变化趋势显著性分析结果将秦巴山区 2001—2022 年 NPP 变化趋势显著性划分为 5 类, 具体标准如表 1 所示。

表 1 趋势显著性分级表
Table 1 Trend significance classification table

NPP 变化趋势显著性 Significance of NPP change trend	趋势 Trend	Z 统计量 Statistic
极显著减少 Extremely significant reduction	<0	$Z < -2.58$
显著减少 Significant reduction	<0	$-2.58 < Z < -1.96$
变化不显著 Non significant changes	—	$-1.96 \leq Z \leq 1.96$
显著增长 significant increases	>0	$1.96 < Z < 2.58$
极显著增长 Extremely significant increases	>0	$Z > 2.58$

1.3.4 转移矩阵

土地利用转移矩阵一般用来表示某段时间区间内,初期与末期各土地利用类型之间的转换关系^[37],采用定量描述的方法,直观地反映该时期内各土地利用类型的时空演化过程。本研究利用土地利用转移矩阵分析秦巴山区 2001—2022 年土地利用类型转移的情况和空间结构分布特征。计算公式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, S_{ij} (km^2)表示第 i 种土地利用类型转向第 j 种土地利用类型的面积; i 为某时段内初期的土地利用类型, j 表示末期的土地利用类型; n 表示研究区域内土地利用类型的总数。本研究将由其他土地利用类型转为耕地的转移类型划分为耕地开垦地类;将由耕地转化为林地、草地、灌木地的转移类型划分为退耕还林还草;将由其他地类转化为人造地表的转移类型划分为城镇化地类;将由林地、草地、灌木地三者间的相互转化以及由人造地表和其他两种地类转化为植被,共 12 种土地利用转移类型划分为植被人工修复。

1.3.5 多元回归残差分析和相对贡献率

残差分析^[22, 38]可以定量分离气候变化和人类活动对 NDVI 变化的影响。通过 2001—2022 年 NPP 均值与降水、气温和辐射数据构建多元回归分析模型,获取 NPP 预测值(NPP_{CC}),CASA 模型模拟得到的 NPP 值为实际值(NPP_{abs}),NPP 残差(NPP_{HA})即实际值与预测值之间的差值,借此表征人类活动对植被 NPP 变化的影响,表达式为:

$$\text{NPP}_{\text{CC}} = a \times P + b \times T + c \times SR + d \quad (13)$$

$$\text{NPP}_{\text{HA}} = \text{NPP}_{\text{abs}} - \text{NPP}_{\text{CC}} \quad (14)$$

式中, a 、 b 、 c 为回归系数, d 为回归常数; P 、 T 、 SR 分别为研究区 22 逐年的累计降水量(mm)、年均气温($^{\circ}\text{C}$)和太阳辐射总量(MJ/m^2)。

根据秦巴山区 2001—2022 年的 NPP_{CC} 和 NPP_{HA} 的线性趋势率,分别代表在气候变化和人类活动影响下的植被 NPP 变化趋势。并结合相对贡献分析方法^[39—40]对研究区植被 NPP 变化的主要驱动因素进行区分(表 2),计算气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对贡献率。

2 结果分析

2.1 模型精度评价

通过 MODIS-NPP 产品的逐年均值验证模拟结果的精度(图 2),可以得出使用 kNDVI 进行 CASA 模型模拟得到的 RMSE 为 $27.01 \text{ g C}/\text{m}^2$,MAE 为 $30.71 \text{ g C}/\text{m}^2$,相比之下使用 NDVI 模拟得到的 RMSE 为 $34.36 \text{ g C}/\text{m}^2$,MAE 为 $52.41 \text{ g C}/\text{m}^2$,表明改进后的 CASA 模型精度更高,因此后文研究基于 kNDVI 的模拟结果。

2.2 秦巴山区 NPP 时空动态分析

秦巴山区 2001—2022 年的 NPP 年均值介于 $467.75\text{—}649.72 \text{ g C}/\text{m}^2$,2001 年值最低,2022 年最高。总体

趋势呈波动式增加,年均增加 4.30g C/m²($P<0.05$),多年平均值为 585.11g C/m²。由图 3 可以看出秦巴山区 NPP 整体空间格局呈中间高四周低的分布特征,NPP 高值区出现在秦岭山脉和大巴山脉区域,低值区域主要分布在四川境内的松潘县、黑水县和金川县。秦巴山区 NPP 均值为 0—200g C/m²、200—400g C/m²、400—600g C/m²、>600g C/m²时,分别占总面积的 2.82%、14.16%、28.27%、54.75%,表明秦巴山区 NPP 积累整体较好。

表 2 植被 NPP 变化驱动因素判别及贡献率计算

Table 2 Identification of driving factors for vegetation NPP change and calculation of contribution rate					
θ_{abs}	θ_{HA}	θ_{CC}	驱动机制 Driving mechanism	相对贡献率 Relative contribution rate/%	
				气候变化	人类活动
>0	>0	>0	双重因子驱动改善	$\frac{ \theta_{CC} }{ \theta_{HA} + \theta_{CC} } \times 100$	$\frac{ \theta_{HA} }{ \theta_{HA} + \theta_{CC} } \times 100$
	>0	<0	人类活动驱动改善	0	100
	<0	>0	气候变化驱动改善	100	0
<0	<0	<0	双重因子驱动退化	$\frac{ \theta_{CC} }{ \theta_{HA} + \theta_{CC} } \times 100$	$\frac{ \theta_{HA} }{ \theta_{HA} + \theta_{CC} } \times 100$
	<0	>0	人类活动驱动退化	0	100
	>0	<0	气候变化驱动退化	100	0

θ_{abs} : NPP 实际值的线性趋势率; θ_{HA} : NPP 残差的线性趋势率; θ_{CC} :NPP 预测值的线性趋势率

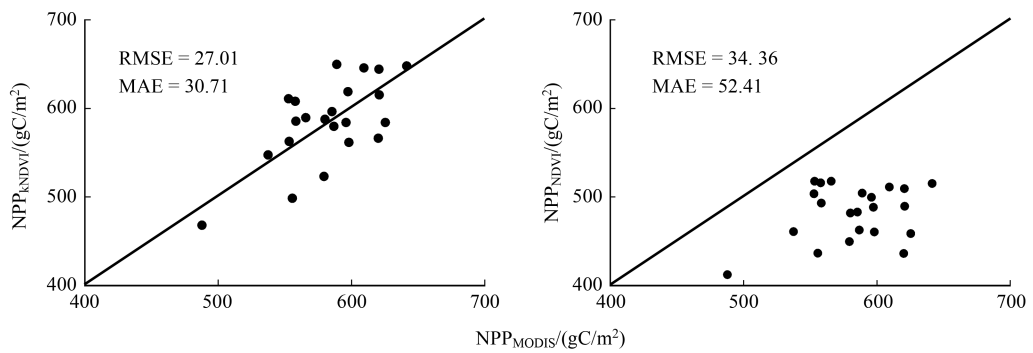


图 2 CASA 模型精度验证结果

Fig.2 CASA model accuracy verification results

RMSE 为均方根误差,MAE 为平均绝对误差; NPP_{KNDVI} 和 NPP_{NDVI} 分别为表示在 kNDVI 和 NDVI 驱动下的 NPP 值; NPP_{MODIS} 为 MOD17A3 的 NPP 数据值

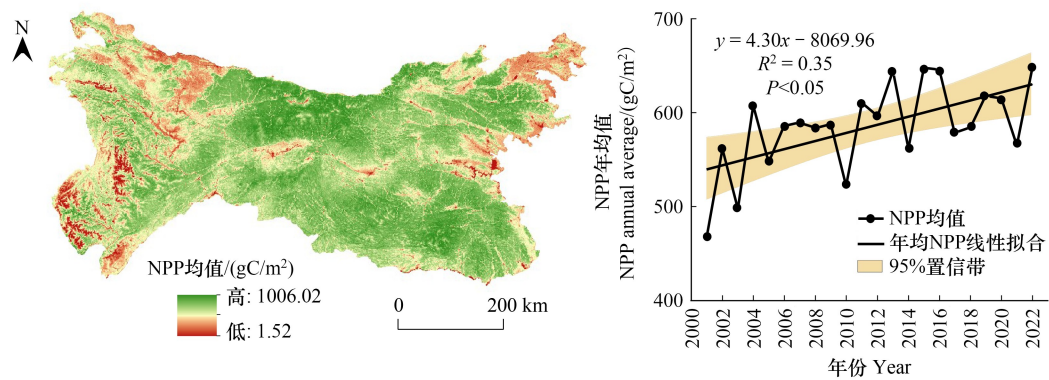


图 3 秦巴山区 2001—2022 年 NPP 均值及年际变化

Fig.3 The mean NPP, temporal trend of Qinba Mountain Area from 2001 to 2022

图中阴影部分表示 95%置信区间

秦巴山区 2001—2022 年 NPP 变化趋势以增加不显著 ($0\text{g C m}^{-2}\text{ a}^{-1} < \text{slope} < 5\text{g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) 为主 (图 4), 占比达 42.95%, 主要发生在秦岭南侧以及大巴山西部。其次减少 ($\text{slope} < 0\text{g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) 的区域占 17.52%, 主要位于秦巴山区西部的松潘县、黑水县、迭部县、东南部的神农架区和夷陵区以及秦岭山脉和大巴山脉海拔较高的山区以及人类活动明显的汉中、安康等地。秦巴山区的陇南市和东北部区域增加趋势较大 ($\text{slope} > 5\text{g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)。从秦巴山区 2001—2022 年的变化趋势显著性来看 (图 4), 秦巴山区 NPP 总体呈增长趋势, 与研究区 NPP 的变化格局一致, 其中大部分区域为变化不显著, 占研究区面积的 58.15%, 主要分布在秦岭山脉和大巴山脉适宜植被生长的低海拔地区以及西部高寒地区, 显著减少区域出现在汉中河谷的城市建设区域, 城市化不免会带来植被砍伐从而导致 NPP 减少。

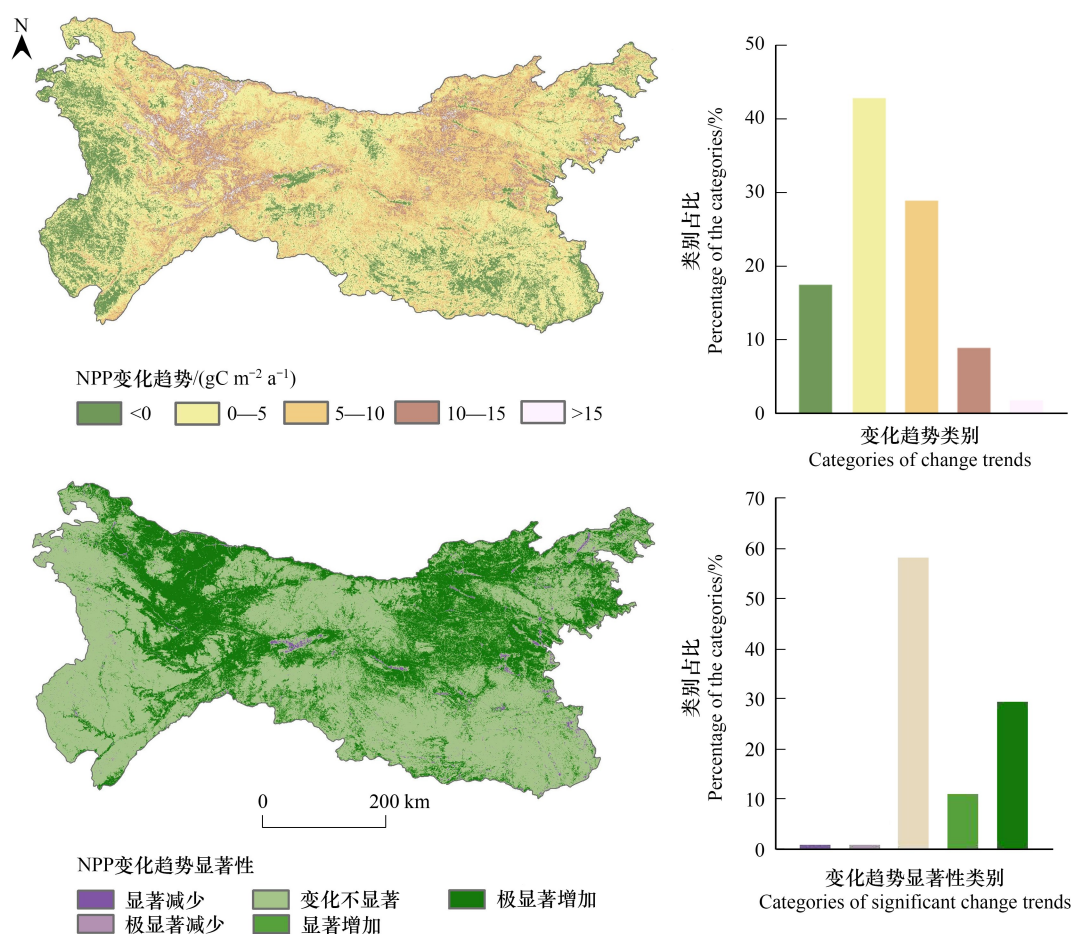


图 4 秦巴山区 2001—2022 年 NPP 空间变化趋势和显著性

Fig.4 The spatial trend, and significance of Qinba Mountain Area from 2001 to 2022

2.3 不同土地利用类型的 NPP 变化差异分析

基于 2001 年和 2022 年 (图 5) 两期的土地利用分类图, 通过转移矩阵计算得到秦巴山区 2001—2022 年的土地利用变化情况 (表 3)。可以得出秦巴山区 2001—2022 年土地利用格局发生显著变化。研究区的主要土地利用类型为林地, 其次是耕地和草地, 这三者得面积占比超过全域的 95%。研究期间持续增长的地类是林地、人造地表和其他地类, 其中人造地表的生长最为显著, 净增幅达 69.08%, 表明在研究期间城市发展迅速, 而城市扩张将占用其他土地利用类型。过去 22 年, 林地的比例从 2001 年的 64.77% 上升到了 2022 年的 70.65%, 面积增长了 17599.8km²。耕地面积从 2001 年的 62536.5km² 减少到 2022 年的 48743.38km², 比例由 20.57% 下降至 16.03%。草地和灌木地面积在 22 年期间分别减少了 4592.93km² 和 1373.62km²。

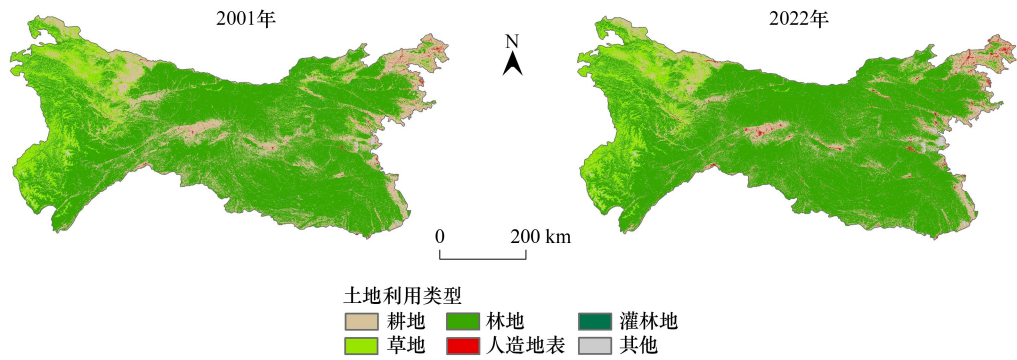


图 5 秦巴山区 2001(内环)、2022 年(外环)土地利用情况

Fig.5 Land use situation in Qinba Mountain area in 2001 (inner ring) and 2022 (outer ring)

从土地利用转移来看,在 2001—2022 年期间,耕地的变化是最活跃的,转出面积达到了 21032.76km²,耕地大部分流向了林地,占转出面积的 73.07%。同时,耕地面积补充了 7239.62km²,主要来自林地和草地。退耕还林和毁林开垦等不同现象使得林地既是耕地流入的最大贡献者也是转出面积的最大地类;林地的转入量是转出量的 4.79 倍,表明退耕还林措施达到一定效果。值得注意的是,耕地、林地和草地之间仍存在高频转化,耕地开垦现象主要分布在城市集群周围,人造地表的扩张特征以地级市为中心向四周的县区发展。

表 3 秦巴山区 2001—2022 年土地利用转移情况/km²

Table 3 Land use transfer situation in Qinba Mountain area from 2001 to 2022

年份 Year	土地利用类型 Land use type	2001						转入 Transferring in
		耕地 Crop	林地 Forest	灌木地 Shrub	草地 Grass	人造地表 Built	其他 Other	
2022	耕地		3895.56	106.81	3144.94	20.25	72.06	7239.62
	林地	15367.63		1571.56	5286.28	0.13	10.63	22236.23
	灌木地	31.25	368.19		193.44	0	0.19	593.07
	草地	3732.69	270.88	287.88		0.13	25.56	4317.14
	人造地表	1462.25	89.88	0.31	70.69		33.38	1656.51
	其他	438.94	12.00	0.13	308.88	180.19		940.14
	转出	21032.76	4636.51	1966.69	9004.23	200.7	141.82	

不同土地利用方式之间植被生产力有显著的差异,即使是同一土地类型,在不同的地理区域碳吸收能力也有所不同。根据 2001—2022 年的土地利用转移情况统计了主要土地转移类型的 NPP 均值以及变化量(图 6)。在这段时期内,林地的 NPP 均值最为突出,高达 672.38g C/m²,且对于 NPP 总变化量的贡献最为显著,为 37.84Tg C。值得注意的是,林地的 NPP 变化速率(4.01g C m⁻² a⁻¹)并非最高,这主要归因于其庞大的面积基数,使得其即便在相对较低的增长率下也能产生巨大的变化量。秦巴山区除了城镇化外,其余土地利用类型的 NPP 均符合整体增长趋势。城镇化进程导致 NPP 呈负增长,增长速率为-2.89g C m⁻² a⁻¹,这可归因于人造地表的 NPP 相较于其他土地利用类型较低,当具有高 NPP 值的土地类型被转变为 NPP 值较低的区域时,NPP 总量自然会下降,反之亦然。退耕还林措施在秦巴山区取得了显著成效,其 NPP 的变化幅度最为显著,增长速率高达 8.17g C m⁻² a⁻¹,在 22 年间实现了 4.68Tg C 的净增长量,贡献占比仅次于林地和耕地,这彰显了退耕还林还草措施的有效性,同时为提升生态系统 NPP 提供了有力的实践案例。

2.4 地形因子对 NPP 影响分析

不同的地形特征会对植被生长、土壤肥力和水资源分布等方面产生影响,进而影响生态系统的 NPP^[41]。结合高程数据,根据 2001—2022 年的 NPP 多年均值和年际变化趋势绘制了 NPP 随海拔变化的关系图(图 7)。过去 22 年,秦巴山区植被 NPP 随海拔变化明显。其中,在海拔 50—250m 的低海拔区域,耕地和人

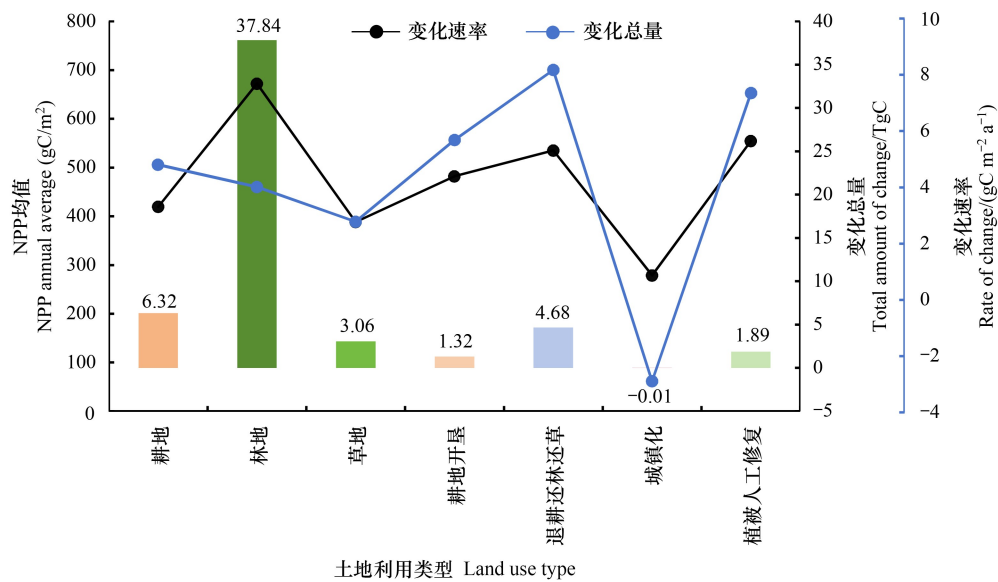


图 6 2001—2022 年不同土地类型 NPP 多年均值、变化速率和变化总量

Fig.6 Annual mean, rate of change, and total amount of NPP for different land types from 2001 to 2022

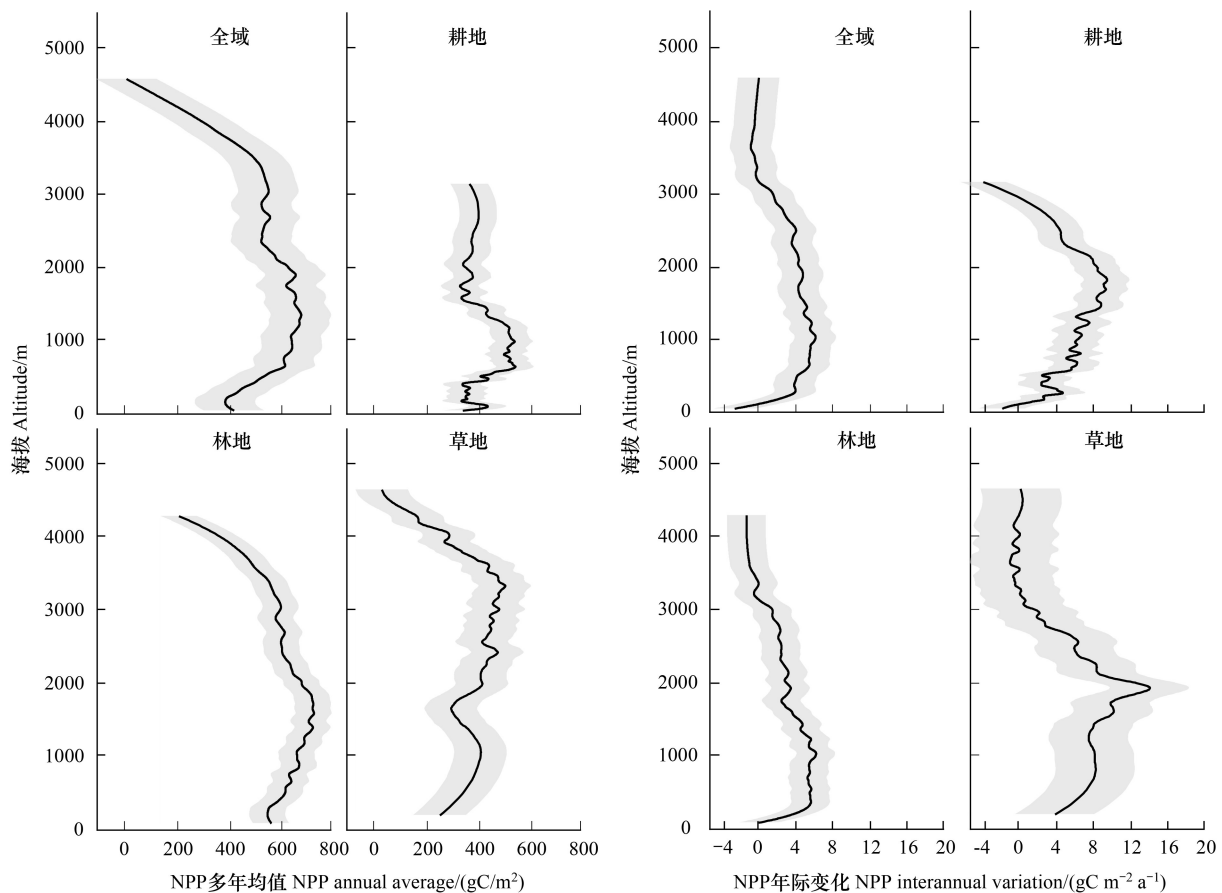


图 7 NPP 多年均值和年际变化随海拔变化趋势

Fig.7 The trend of annual mean and interannual variation of NPP with altitude variation

图中灰色阴影区域为一倍标准差范围

造地表占据主导地位,此时植被 NPP 值达到最低点。随着海拔上升到 250—1500m 其他植被类型的覆盖面积逐渐增多,NPP 也随之显著提升,并在这一范围内保持稳定,平均值约 670 g C/m^2 左右,这是 NPP 增长速度最为显著的海拔区间。当海拔继续攀升至 1500—3400m 时,植被类型以林地为主。然而,在这一海拔范围内,耕地和林地的 NPP 值均出现一定程度的下降,导致整体 NPP 值有所降低。在海拔 $>3400\text{ m}$ 的高海拔区域,随着环境条件的恶化,植被生长受到极大限制,NPP 随海拔升高而逐渐减少。林地随海拔的变化趋势与秦巴山区整体 NPP 随海拔变化的趋势高度一致。然而,耕地在海拔 1000—1900m 区域时,由于土壤质量、气候条件和水资源的限制,这一区域的耕地质量显著下降,导致 NPP 急剧减少,但耕地和草地的 NPP 变化趋势达到了峰值,表明该海拔区域是推进退耕还林还草的重点范围。

坡度通过影响地表径流、土壤入渗、土壤厚度等影响土壤生长的自然条件,从而对植被 NPP 产生影响^[43]。随着坡度增加,秦巴山区的 NPP 呈先增高,后减少的趋势(图 8)。在低坡度区域(坡度 $<10^\circ$),由于人类活动强度较高,城镇化进程多在此类坡度区域进行,这些人为干扰导致了该区域内 NPP 值相对较低,且 NPP 的增长趋势也较为缓慢。此外,耕地大多集中分布在坡度小于 15° 的区域内,在这一坡度范围内,耕地的 NPP 变化趋势随着坡度的升高呈现出波动式增长的趋势。随着坡度升高,林地面积逐渐增加,在这一坡度范围内,土壤厚度和水分条件更为适宜,为植被生长提供了良好的环境,因此 NPP 的多年均值和变化趋势均随着坡度的升高而上升。当坡度超过 25° 时,情况则发生了逆转。坡度过高会导致土壤侵蚀加剧、水分流失严重、光照不足以及植物可利用的土壤层厚度减少^[42]等,导致在该坡度区间内植被的 NPP 变化趋势随着坡度的升高而逐渐降低。

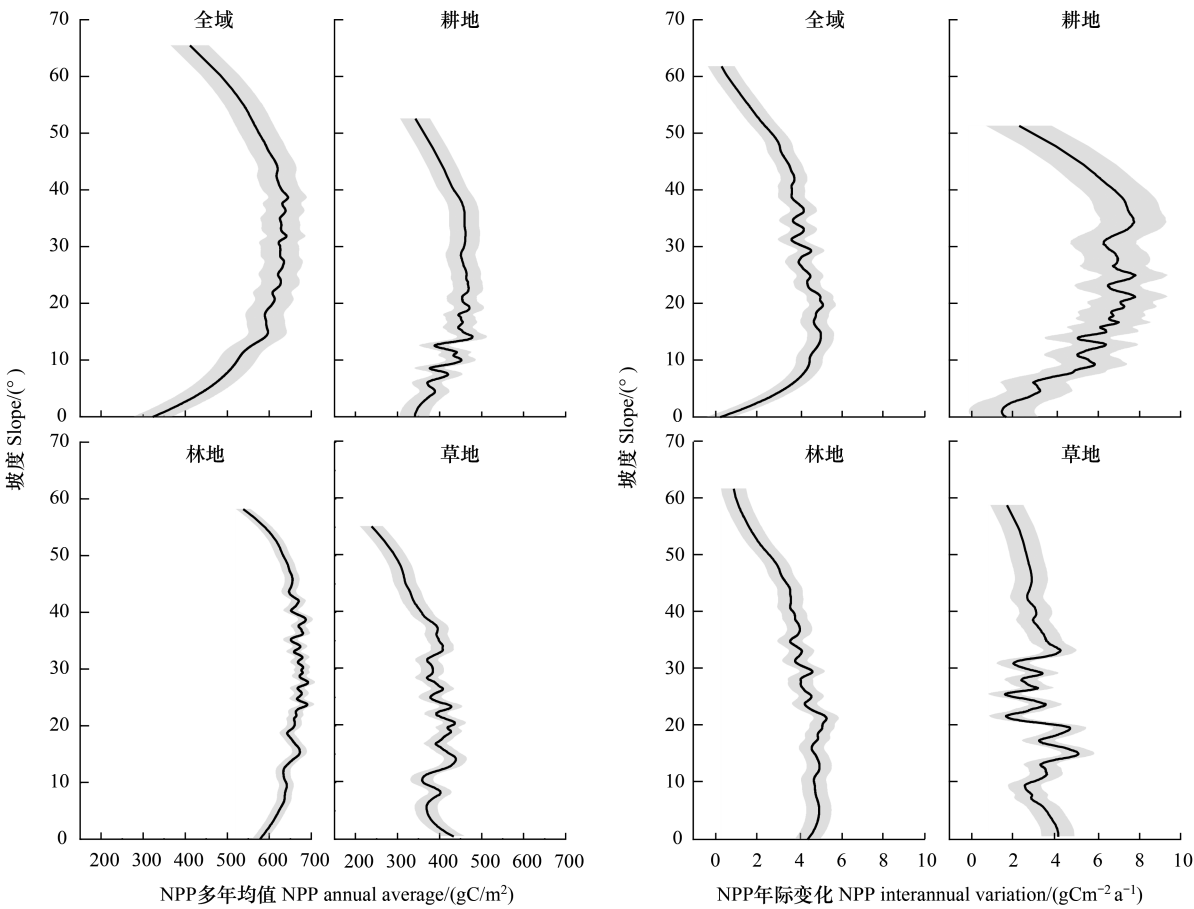


图 8 NPP 多年平均值和年际变化随坡度变化趋势

Fig.8 The trend of NPP annual average and interannual variation with slope variation

图中灰色阴影区域为一倍标准差范围

研究区在平面方向的 NPP 均值和变化趋势呈现最小值(图 9),为 323.87 g C/m^2 和 $2.39\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,大多数人造地表与耕地都位于平缓地势处,平面坡向区域的植被面积较少,导致该区域内 NPP 呈现最低值。其他坡向的 NPP 均值和变化趋势没有很大的差异,均在 580 g C/m^2 和 $4.30\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 左右,由于北坡的降水量较多,土壤含水量高,导致北坡的植被 NPP 比南坡高,但南坡的 NPP 年际变化趋势较北坡高。

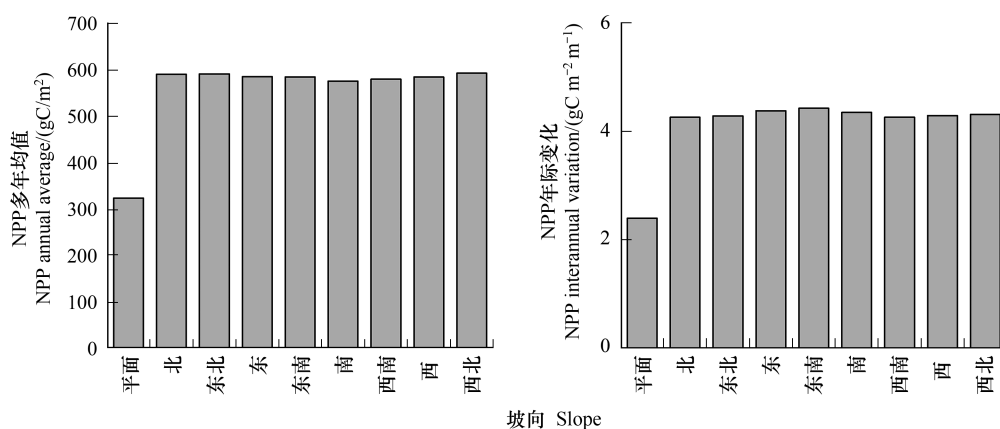


图 9 不同坡向上 NPP 均值及年际变化情况

Fig.9 Mean NPP and interannual variation on different slope orientations

2.5 NPP 变化的驱动因子及相对贡献分析

图 10 定量分离了人类活动和气象要素对秦巴山区 NPP 的相对影响。两者共同主导植被 NPP 增加的区域占比为 63.29%,主要分布在甘肃省和陕西省的东南部以及河南省西部。气候变化驱动改善的区域面积占比为 2.76%,主要分布在丹江、渚河、岷江等流域附近。由人类活动导致的植被 NPP 增加和减少的区域面积分别约占 17.33%和 1.90%,主要分布于秦岭北部、大巴山东部和秦巴山区西部等海拔和坡度较低的适宜耕作和人类活动的区域。气候变化和人类活动共同作用的负面影响也不容忽视。约有 8.12%的区域在这两种因素的共同作用下,出现了植被 NPP 的退化现象,这些区域主要集中在秦巴山区西部、陕南以及人类活动较为频繁的其他地区。此外,在秦巴山区的西南部,观察到由气候变化单一驱动的 NPP 退化,当地特殊的气候条件可能是导致这一现象的重要原因。总之,气候变化和人类活动的共同作用是 22 年来秦巴山区植被 NPP 变化的主要原因,双重因子驱动变化的区域共占 71.31%。

在秦巴山区的植被改善区中,由气候变化和人类活动驱动相对贡献率分别为 29.91%和 70.09%。其中,气候变化相对贡献率超过 50%的区域占植被改善区面积的 18.19%,主要分布在陕西省和河南省的交界地带;人类活动的相对贡献率超过 50%的区域占 81.81%,主要分布在秦巴山区中部。在植被 NPP 退化区域,由气候变化和人类活动驱动相对贡献率分别为占 67.03%和 32.97%,表明秦巴山区植被 NPP 减少主要是由气候变化引起的,其中气候变化主导的区域占 48.82%,主要分布在川西的高寒地区和神农架区;人类活动主导的区域占 51.18%,分布在大巴山脉东侧。整体上气候变化对植被 NPP 变化的相对贡献率为 37.81%,而人类活动的相对贡献率为 62.19%。人类活动是这 22 年来导致植被 NPP 增加的主要原因,得益于秦巴山区有条不紊的生态恢复工程。

3 讨论

3.1 NPP 时空变化特征

秦巴山区 2001—2022 年植被 NPP 均值为 585.11 g C/m^2 ,整体呈波动式上升趋势,年均增加 4.30 g C/m^2 ,空间上呈现出呈中间高四周低的分布格局,这与前人^[43]的研究结论一致。NPP 的波动趋势与同期的气候条件紧密相关。例如,在 2001 年,由于降雨量偏少、气温偏高,导致了多数地区出现干旱现象,进而使得 NPP 值

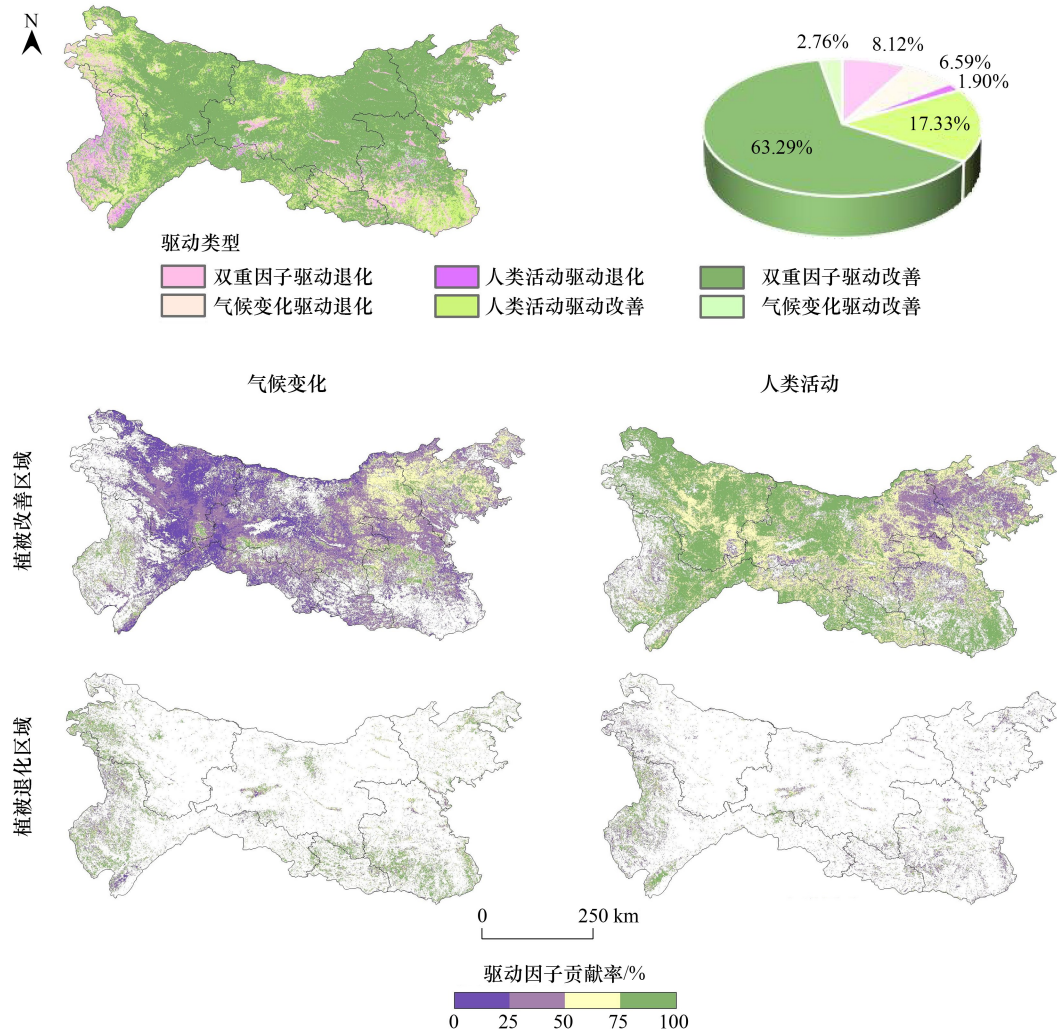


图 10 2001—2022 年秦巴山区植被变化驱动因子空间分布及气候变化和人类活动在植被改善和退化区域的相对贡献率

Fig.10 Spatial distribution of driving factors for vegetation change in the Qinba Mountains from 2001 to 2022, relative contribution rates of climate change and human activities to vegetation improvement and degraded areas

处于较低水平^[17]。秦巴山区 NPP 的增长主要得益于人为干预,例如建立保护区和推进生态修复工程。正如预期的那样,林地显示出最高的 NPP,其净变化量也是最大的,但退耕还林区域的 NPP 增长尤为显著,成为土地转移类别中净变化量贡献率最高的部分。然而,城镇化进程对 NPP 的影响则呈现相反趋势,西安、重庆等中心城市的“虹吸效应”日益明显,城市扩张导致土地利用向 NPP 较低的方向转变,进而减少了这些区域的 NPP。因此,秦巴山区还需要继续实施退耕还林等生态保护工程,优化树龄结构,促进植被 NPP 建设可持续发展。

3.2 地形因子对植被 NPP 的影响

地形因素通过影响水、热量和养分,影响了植被的空间分布特征。地形对 NDVI 分布的影响具有复杂性,影响植被 NPP 的地形因素在不同地区是不同的^[44]。高程是影响秦巴山区 NPP 分布的重要因素,植被 NPP 随海拔变化的趋势整体上呈先增加再趋于平稳最后降低的态势,在海拔 600—1500m 时,NPP 均值最高,并在高于 3400m 的地方大幅度降低,这表明在一定范围内,高程的增加有利于植被生长,但过高的海拔可能导致环境恶劣,不利于植被生长。在海拔低于 500m,坡度<10°时,自然条件更有利于植被生长,但该海拔范围是人类活动和城市扩张的主要区域,常伴随着植被破坏,是造成该区域植被 NPP 变化趋势较低的主要原因。随着

坡度升高,林地和草地面积增多,研究区 NPP 均值和变化趋势随之增加。然而,当坡度超过 40° 时,严重的水分流失导致土壤侵蚀加剧,养分流失^[45],使得植被 NPP 出现降低趋势。通常来说南坡的日照时间较长,这种环境条件有利于森林植被的生长和光合作用^[46],因此南坡植被 NPP 年际变化趋势比北坡高,但由于秦巴山区为温带大陆性气候,降水较少,热量充足的南坡反而会导致土壤含水量减少,可能是使得研究区中南坡 NPP 多年均值低于北坡的原因。

3.3 气候变化和人类活动对 NPP 的影响

秦巴山区植被 NPP 整体上受气候变化和人类活动双重因子的共同驱动,其中人类活动的相对贡献率是 62.19%,是秦巴山区植被 NPP 变化的主要驱动因子,这与金凯等^[39]的结论陕西省植被变化受人类活动影响的相对贡献率超过 65% 的结论相似。人类活动驱动增加的区域主要分布在陇南市,该地区存在人类不合理的开荒、毁林、开矿等现象,是退耕还林、石漠化治理的重点区域^[47],且秦巴山区本身也属于生态敏感区^[48]表明秦巴山区生态恢复措施对植被 NPP 增加有明显成效。另一方面城市扩张、耕地开垦等人类活动会对植被 NPP 起到负面影响^[49]。但总体来说,人类活动对秦巴山区植被 NPP 增长起到了促进作用。气候变化相对贡献率超过 50% 的区域主要分布在陕西与河南的交接处,并显示出与降水和温度有较强的相关性^[24]。残差分析虽能较好的分离气候变化和人类活动,但并不能对城镇化、耕地开垦、退耕还林等人类活动进行细分。因此,为了更好地理解秦巴山区植被变化的驱动机制,应加入生物物理过程模型,以研究人类活动的定量化方法。

3.4 不足与展望

本文使用 MODIS—NPP 产品来验证的 CASA 模型的可靠性,能够在一定程度上证明 kNDVI 替换 NDVI 驱动模型对结果精度有一定的提高。但缺乏实测数据,无法进一步证明 NPP 模拟的可信度。因此,未来研究中有必要开展广泛的地面调查获取 NPP 实测真值开展直接验证。为了方便叠加分析,我们将数据集的分辨率统一重采样为 250m,这可能会改变某些像素的值。采用一致分辨率的数据集或更有效的重采样方法是解决这一问题的有效途径。此外,相比于当前的方法,使用更精细的时空分辨率(如月或日)研究秦巴山区的植被动态可能会揭示更多有价值的结论,值得进一步探索。

4 结论

(1) 秦巴山区植被 NPP 表现出“中间高,四周低”的空间分布格局,2001—2022 年的 NPP 均值为 585.11 g C/m^2 ,并以 $4.30 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速度呈波动式增加。

(2) 秦巴山区不同土地利用类型植被 NPP 差异显著,其中林地 NPP 均值最高,而退耕还林区域 NPP 增幅最大。

(3) 秦巴山区植被 NPP 随海拔和坡度变化具有明显的分异性。NPP 随着高程的增加而增加,但当高程超过 3400m 时,植被 NPP 显著减少;坡度在 10° — 40° 范围内植被 NPP 的多年均值和变化趋势较高。

(4) 秦巴山区植被 NPP 变化受到气候变化和人类活动的共同作用,二者对植被 NPP 变化的相对贡献率分别为 37.81% 和 62.19%。人类活动对植被 NPP 起促进作用的区域主要分布在陇南等生态脆弱区。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所张百平研究员提供秦巴山区矢量边界基础数据,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Li G D, Fang C L, Li Y J, Wang Z B, Sun S A, He S W, Qi W, Bao C, Ma H T, Fan Y P, Feng Y X, Liu X P. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, 2022, 13: 1628.
- [2] Cao M K, Prince S D, Li K R, Tao B, Small J, Shao X M. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components.

- Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [4] Gang C, Zhou W, Wang Z, Chen Y, Li J, Chen J, Qi J, Odeh I, Groisman P Y. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, 201(1): 57-68.
- [5] 刘芳, 迟耀斌, 王智勇, 王艳艳. NPP 列入生态统计指标体系的潜力分析——以北京地区 NPP 测算与空间分析为例. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 960-966.
- [6] 陈晓杰, 张长城, 张金亭, 王静. 基于 CASA 模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素——以湖北省为例. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 253-261.
- [7] 涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 李旭, 陈柏建. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素. *生态学报*, 2023, 43(3): 1219-1233.
- [8] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1985, 40(4): 343-352.
- [9] 李登科, 王钊. 气候变化和人类活动对陕西省植被 NPP 影响的定量分析. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1071-1079.
- [10] 鲁韦坤, 李蒙, 程晋昕, 窦小东. 基于 BEPS 模型的云南省碳源/汇时空特征及其适用性分析. *生态学报*, 2024, 44(4): 1441-1455.
- [11] Wu C Y, Chen K L, Chongyi E, You X N, He D C, Hu L B, Liu B K, Wang R K, Shi Y Y, Li C X, Liu F M. Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake Basin alpine grassland. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(17): 6919-6933.
- [12] Chen Z Q, Shao Q Q, Liu J Y, Wang J B. Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau, based on MODIS remote sensing data. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(8): 1306-1312.
- [13] 朱文泉, 陈浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.
- [14] Qi S Y, Zhang H Q, Zhang M. Net Primary Productivity Estimation of Terrestrial Ecosystems in China with Regard to Saturation Effects and Its Spatiotemporal Evolutionary Impact Factors. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2871.
- [15] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Peng S S, Ahlström A, Canadell J G, Cong N, Levis S, Levy P E, Liu L L, Lomas M R, Mao J F, Myneni R B, Peylin P, Poulter B, Shi X Y, Yin G D, Viovy N, Wang T, Wang X H, Zaehle S, Zeng N, Zeng Z Z, Chen A P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, 5: 5018.
- [16] 徐勇, 卢云贵, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷, 陈天伟, 张炎. 气候变化和土地利用变化对长江中下游地区植被 NPP 变化相对贡献分析. *环境科学*, 2023, 43(9): 4988-5000.
- [17] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. *生态学报*, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [18] Liu J Y, Yan Q Q, Zhang M H. Ecosystem carbon storage considering combined environmental and land-use changes in the future and pathways to carbon neutrality in developed regions. *The Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166204.
- [19] Du Z Q, Liu X J, Wu Z T, Zhang H, Zhao J. Responses of forest net primary productivity to climatic factors in China during 1982—2015. *Plants*, 2022, 11(21): 2932.
- [20] 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.
- [21] 石智宇, 王雅婷, 赵清, 张连蓬, 朱长明. 2001—2020 年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析. *生态环境学报*, 2022, 31(11): 2111-2123.
- [22] 杨安乐, 张小平, 李宗省, 李玉辰, 南富森. 气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响. *生态学报*, 2023, 43(5): 1784-1792.
- [23] He T, Dai X A, Li W Y, Zhou J Y, Zhang J J, Li C, Dai T R, Li W L, Lu H, Ye Y K, Xu L, Jiang X L. Response of net primary productivity of vegetation to drought: a case study of Qinba Mountainous area, China (2001—2018). *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110148.
- [24] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 奥勇. 2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其驱动因子. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2373-2381.
- [25] 香薇, 程志刚, 周波涛, 宾昕, 冯冬蕾. 1975—2016 年秦巴山区极端气温事件的空间差异性分析. *气候变化研究进展*, 2018, 14(4): 362-370.
- [26] Zhang X H, Zhang B P, Yao Y H, Wang J, Yu F Q, Liu J J, Li J Y. Dynamics and climatic drivers of evergreen vegetation in the Qinling-Daba Mountains of China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108625.
- [27] 施亚林, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制. *生态学报*, 2023, 43(2): 731-743.

- [28] 赵雪瑞, 韩玲, 刘明, 宋敏琪. 基于改进 CASA 模型的陕西省植被 NPP 遥感估算. 水土保持研究, 2024, 31(3): 247-256.
- [29] Farr T G, Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2000, 81(48): 583-585.
- [30] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [31] Potter C S, Alexander S E, Coughlan J C, Klooster S A. Modeling biogenic emissions of isoprene: exploration of model drivers, climate control algorithms, and use of global satellite observations. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(35): 6151-6165.
- [32] Liu S N, Zhou T, Wei L Y, Shu Y. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(14): 1699-1707.
- [33] You N S, Meng J J, Zhu L J, Jiang S, Zhu L K, Li F, Kuo L J. Isolating the impacts of land use/cover change and climate change on the GPP in the Heihe River Basin of China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(10): 005734.
- [34] Wang Q, Moreno-Martínez Á, Muñoz-Marí J, Campos-Taberner M, Camps-Valls G. Estimation of vegetation traits with kernel NDVI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 195: 408-417.
- [35] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martínez Á, Walther S, Duveiller G, Cescatti A, Mahecha M D, Muñoz-Marí J, García-Haro F J, Guanter L, Jung M, Gamon J A, Reichstein M, Running S W. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances*, 2021, 7(9): eabc7447.
- [36] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 王仁儒, 陶倩, 邹永偲, 徐晶姝. 贵州省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及影响因素. 水土保持研究, 2023, 30(5): 408-416, 426.
- [37] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 王福海. 基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268-277.
- [38] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [39] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [40] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 崔冉冉, 李鹏, 唐颖. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应. 农业工程学报, 2023, 39(14): 155-163.
- [41] 高倩倩, 陈灿, 刘贺娜, 罗倩, 李霞, 林勇明, 吴承祯. 闽江流域植被覆盖度时空变化及地形分异特征. 林业资源管理, 2022(2): 91-99.
- [42] Xiong Y L, Wang H L. Spatial relationships between NDVI and topographic factors at multiple scales in a watershed of the Minjiang River, China. *Ecological Informatics*, 2022, 69: 101617.
- [43] 赵芳, 张久阳, 刘思远, 王增艳, 王黎欢, 顾浩婷, 李万隆. 秦巴山地 NPP 及对气候变化响应的多维地带性与暖温带-亚热带界线. 生态学报, 2021, 41(1): 57-68.
- [44] Walsh S J, Crawford T W, Welsh W F, Crews-Meyer K A. A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, northeast Thailand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1/2/3): 47-64.
- [45] Li Z Y, Lu Y F, Wang Y K, Liu J. The spatio-temporal evolution of the soil conservation function of ecosystems in the north-south transition zone in China: a case study of the qinling-daba mountains. *Sustainability*, 2022, 14(10): 5829.
- [46] Qi G Z, Bai H Y, Zhao T, Meng Q, Zhang S H. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the northern and southern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(6): 785-801.
- [47] 党国锋, 纪树志. 基于 GIS 的秦巴山区土地生态敏感性评价——以陇南山区为例. 中国农学通报, 2017, 33(7): 118-127.
- [48] 余玉洋, 李晶. 秦巴山区典型生态系统固碳服务域外效应及其生态补偿研究. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2022, 50(4): 13-20.
- [49] Wu X C, Liu H Y, Li X Y, Piao S L, Ciais P, Guo W C, Yin Y, Poulter B, Peng C H, Viovy N, Vuichard N, Wang P, Huang Y M. Higher temperature variability reduces temperature sensitivity of vegetation growth in Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(12): 6173-6181.