

DOI: 10.20103/j.stxb.202504210946

古斌斌, 徐国保, 王子昂, 李群, 张 扬, 陈安安. 秦岭陕西段植被净初级生产力时空分异格局及多元驱动力定量分析. 生态学报, 2025, 45(22):

Gu B B, Xu G B, Wang Z A, Li Q, Zhang Y, Chen A A. Quantifying the spatial and temporal patterns of vegetation net primary productivity and the multiple driving forces in the Shaanxi section of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - - .

秦岭陕西段植被净初级生产力时空分异格局及多元驱动力定量分析

古斌斌¹, 徐国保^{1,2}, 王子昂¹, 李 群¹, 张 扬¹, 陈安安^{1,2,*}

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

摘要: 陆地生态系统净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 是衡量植被固碳能力的重要指标。秦岭陕西段作为陕西省及周边地区的重要生态屏障, 其 NPP 时空格局变化及驱动机制对区域碳循环研究具有重要意义。基于 GEE 获取秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 并分析其时空变化规律, 结合最优参数的地理探测器和偏最小二乘法结构方程模型, 量化了多元驱动力对 NPP 时空分异格局的影响。结果表明: 研究时段内秦岭陕西段 NPP 多年均值为 $602.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年际变化速率为 $5.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$), 93.11% 的区域 NPP 呈极显著与显著增加趋势; 蒸散、降水和核归一化植被指数是影响 NPP 空间格局的主要因素, 其中蒸散和降水交互作用对 NPP 的影响最强, 其次是蒸散与气温; 气候、地形和人类活动可以直接影响 NPP, 也可以通过植被指数间接影响 NPP (例如海拔 → 人类足迹 → 蒸散 → 核归一化植被指数 → NPP)。本研究揭示了多元驱动力耦合对秦岭陕西段山地生态系统 NPP 时空分异格局的作用机制与影响路径, 不仅为秦岭陕西段碳循环研究提供了科学依据, 还将为其他山地陆地生态系统 NPP 时空分异格局复杂机制探索提供有益参考。

关键词: 净初级生产力; GEE; 基于最优参数的地理探测器; 偏最小二乘法结构方程模型; 时空分异

Quantifying the spatial and temporal patterns of vegetation net primary productivity and the multiple driving forces in the Shaanxi section of the Qinling Mountains

GU Binbin¹, XU Guobao^{1,2}, WANG Ziang¹, LI Qun¹, ZHANG Yang¹, CHEN Anan^{1,2,*}

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) of terrestrial ecosystems served as a key indicator of vegetation carbon sequestration capacity. The Shaanxi section of the Qinling Mountains as a vital ecological barrier in Shaanxi Province and its surrounding areas, investigating the spatiotemporal patterns of NPP and their driving mechanisms was crucial for understanding regional carbon cycling. This study utilized Google Earth Engine (GEE) to derive NPP data (2001—2023) for the Shaanxi section of the Qinling Mountains and analyzed its spatiotemporal patterns. The Theil-Sen median trend analysis along with the Mann-Kendall significance test revealed the trend features of NPP changes in the Shaanxi section of the Qinling Mountains from 2001 to 2023. By integrating the optimal parameters-based geodetector (OPGD) and partial

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2023-JC-QN-0300, 2025JC-JCQN-008); 陕西省秦创原项目 (QCYRCXM-2023-091); 国家级大学生创新训练项目 (202410697033)

收稿日期: 2025-04-21; **网络出版日期:** 2025-00-00

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

least squares structural equation modeling (PLS-SEM), we quantified the impacts of multiple drivers on NPP spatiotemporal divergence patterns. The results showed that during the study period, the mean annual NPP in the Shaanxi section of the Qinling Mountains was $602.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the spatial distribution pattern was characterised by a high in the north-west versus a low in the south-east, and the rate of change of the interannual variation was $5.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$), of which 81.62% of the area exhibits a highly significant increasing trend, 11.48% of the area shows a significant increase trend and the area of insignificant change is mainly located in the southeastern part of the study area as well as in the gully areas. The primary factors influencing the spatial pattern of NPP are evapotranspiration, precipitation, and the kernel normalized difference vegetation index, with a total explanatory power of over 0.67. The strongest influence on NPP is the interaction between evapotranspiration and precipitation, following by the interaction between evapotranspiration and temperature, which had an explanatory power of 0.502 and 0.460, respectively. Climate, topography, and human activities directly affected NPP and indirectly influenced NPP through vegetation indices (e.g., altitude $\rightarrow$ human footprint $\rightarrow$ evapotranspiration $\rightarrow$ kernel normalized difference vegetation index $\rightarrow$ NPP). This research revealed the mechanisms and impact pathways of multiple driving forces coupling on the temporal and spatial NPP divergence patterns within the mountain ecosystems of the Shaanxi section of the Qinling Mountains. This study provided a scientific basis for the ecological protection and management of the Shaanxi section of the Qinling Mountains and offered valuable insights for understanding the complex mechanisms driving spatial and temporal divergence patterns of NPP in other mountainous terrestrial ecosystems.

Key Words: Net primary productivity (NPP); Google Earth Engine (GEE); optimal parameters-based geographical detector; partial least squares structural equation modeling; spatiotemporal variation

净初级生产力 (Net Primary Productivity; NPP) 是指植物在单位时间单位面积上通过光合作用固定有机物质总量减去植物自养呼吸后的剩余部分。NPP 对气候变化和人类活动反应灵敏^[1], 是评估陆地生态系统碳循环的重要参数^[2], 也是衡量生态系统服务功能的重要指标^[3]。因此, 探究驱动 NPP 时空分异格局变化的潜在影响机制对于理解多元驱动力影响下典型山地生态系统可持续发展具有重要意义。

随着遥感和大数据技术的快速发展, Google Earth Engine (GEE) 平台内免费提供的海量多源遥感资料, 为大规模及时监测 NPP 时空变化及其驱动机制研究提供了便利条件。国内外学者通过 GEE 监测发现云南省^[4]、祁连山^[5]等地形复杂的中小尺度区域, 乃至中亚^[6]、中国^[7]等大尺度区域, NPP 在近年来均呈现出增加趋势。陆地生态系统 NPP 变化受到多元驱动力的综合影响, 其中气候变化和人类活动是导致 NPP 变化的两大主要因素^[8-9]。气温、降水等气候因素通过作用植被生长进而影响 NPP 变化^[10]; 人类活动以及地形、土壤、植被类型等因素直接或间接影响 NPP^[4, 11-12]。NPP 不仅受到单因子的驱动, 还受到因子间的相互作用及共同作用影响^[9, 13]。

地理探测器具有揭示单个驱动因子及其相互作用对 NPP 空间格局影响的能力, 但离散不佳可能会低估驱动因子对因变量的解释能力^[14-15]。基于最优参数的地理探测器通过寻找最优参数对驱动因子进行离散来更加科学合理地揭示其解释能力^[4], 但基于最优参数的地理探测器无法对多因素之间的耦合作用 (即影响途径) 进行定量解析。近期, 在我国华北地区有学者利用结构方程模型解析了多因素对 NPP 变化的耦合作用^[13]。然而, 相较于结构方程模型, 偏最小二乘法结构方程模型, 对数据分布的灵活性更高^[16], 可以更好揭示 NPP 变化的驱动机制, 并在其他陆地生态系统中植被变化^[17-18]和土壤水分^[19]研究中取得较好应用。

山地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 目前系统研究山地系统 NPP 时空分异格局及其驱动机制的研究相对较少^[4-5]。秦岭作为我国中部生态屏障, 有学者利用线性回归、地理探测器和相关性分析等方法研究秦岭地区 NPP 时空格局变化, 探讨不同时间尺度^[20]、不同方向 (纬向、经向以及坡向)^[21]下气温和降水与 NPP 的相关性, 及其他自然因子和土地利用变化对 NPP 的影响^[22]。然而, 秦岭地区 NPP 有关研究

中,茂密森林导致的归一化植被指数过饱和使得植被光合能力被低估、多种人类活动对生态环境的综合压力及定量解析多元驱动力对 NPP 的影响途径等问题尚不明晰。因此,本研究通过 GEE 高效获取秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP,以监测其时空变化状况,解决茂密森林地区内对植被光合能力低估的问题,考虑更加全面的驱动因素,并加强量化秦岭地区人类活动对生态环境造成的压力。研究利用 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 等方法揭示近二十年秦岭陕西段的 NPP 时空变化规律;在此基础上利用基于最优参数的地理探测器和偏最小二乘法结构方程模型定量 NPP 空间分异的驱动因素及其相互作用,解析多元驱动力对 NPP 的影响及途径,探索多元驱动力下秦岭陕西段 NPP 时空格局驱动机制,为秦岭陕西段固碳能力提升和生态文明建设提供基础数据和科学决策支持。

1 数据与方法

1.1 研究区域

秦岭作为亚热带与暖温带的过渡区域,是我国 1 月 0℃ 等温线与 800 mm 年等降水量穿过区域,四季分明,雨热同期。年均气温 12—17℃^[23],多年平均降水量在 500—1000 mm 以上^[22]。秦岭陕西段位于陕西省南部(图 1),东西长约 500 km(105°30'E—110°05'E),南北宽约 200 km(32°40'N—34°35'N),西起嘉陵江,东接伏牛山,北临渭河,南靠汉江,平均海拔超过 1000 m,包含陕西省六市 32 区县。植被以常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林、草丛以及栽培植被为主,其中栽培植物主要分布在海拔较低的沟谷地带,草丛集中分布在东南部,灌丛则广泛分布。

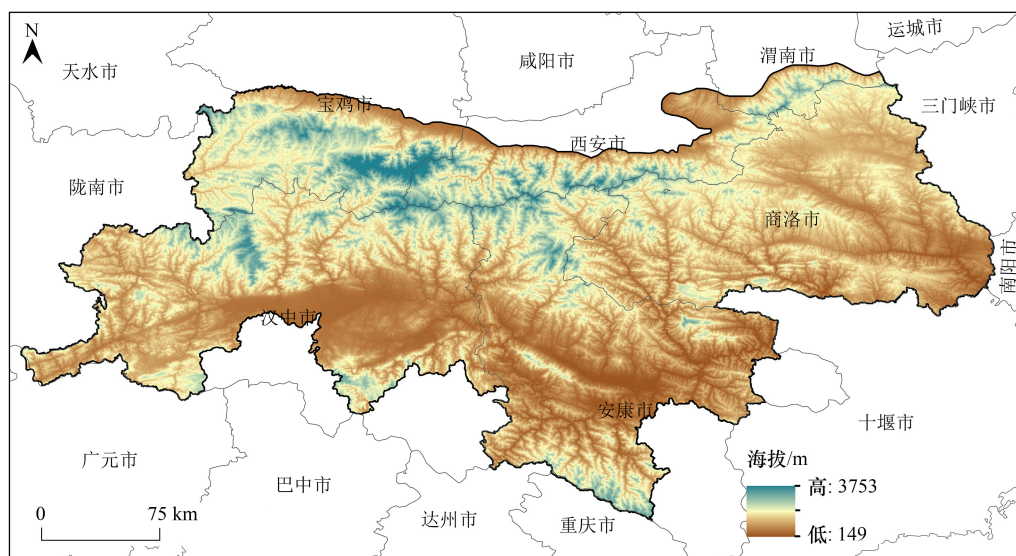


图 1 秦岭陕西段高程及地理区位图

Fig.1 Elevation and geographical map of the Qinling Mountains in Shaanxi

1.2 数据来源

1.2.1 NPP 数据

NNP 数据为 MODIS 数据集(“MODIS/061/MOD17A3HGF”数据集),通过 GEE 平台检索并获取,时间范围 2001—2023 年,空间分辨率为 1 km,坐标系为 WGS1984。MOD17A3HGF 数据产品已经被广泛应用于生态环境等领域^[4-5],数据质量得到了广泛检验。

1.2.2 驱动因子数据

秦岭及其周边地区植被 NPP 受多种因素的综合影响,包括气候(蒸散^[22]、温度以及降水)、植被(植被指数^[24]、植被类型^[22])、地形^[21]等自然要素,以及土地利用变化^[22]等人类活动的影响。本研究考虑了更加全面

的驱动因素,其中气候因素包括年均降水量、地表温度、蒸散,植被因素包括核归一化植被指数和植被类型,地形因素包含高程、坡度以及坡向,土壤类型,人类活动因素包括土地利用类型和人类足迹指数(表1)。

核归一化植被指数(Kernel normalized difference vegetation index, KNDVI)是基于机器学习径向核函数而提出的,KNDVI可以很好地解决NDVI(Normalized difference vegetation index)在植被茂密地区可能会饱和从而降低其灵敏度的问题,成为代表森林茂密地区植被生长状况的指数^[25]。KNDVI在GEE平台基于MODIS/061/MOD09GA数据集计算得到,公式如下:

$$KNDVI = \tanh \left[\left(\frac{NIR - Red}{2\sigma} \right)^2 \right] \tag{1}$$

式中,NIR表示近红外波段,Red表示红外波段, σ 表示长度尺度参数,该参数控制在密集或稀疏植被像素/区域之间的敏感性。使用给定图像集合计算NIR-RED的绝对值中位数作为长度尺度参数。如果该值为NULL或未定义,则将其设置为默认值0.15。

人类足迹数据来自中国农业大学土地科学与技术学院城市环境监测及建模数据集,其由建筑环境、人口密度、夜间照明、农田、牧场、公路、铁路和通航水道八个变量计算得到,相比于其他单一变量,该指数能更好地反映人类活动对生态环境的压力^[26]。

因不同驱动因子数据时间范围的差异,本研究在探究2001—2023年秦岭陕西段NPP时空演变规律后,通过基于最优参数的地理探测器研究2001—2020年各驱动因子指标对NPP空间分异的影响。为确保数据空间分辨率一致性,上述所有驱动因子数据均与NPP数据使用相同投影以及重采样至1 km空间分辨率。

表1 驱动因子指标及详细
Table 1 Driver indicators and details

类型 Types	因素 Factor	指数 Index	单位 Unit	分辨率 Resolution	变量类型 Types of variables	时间范围 Time ranges	数据来源 Data source
气候 Climate	Pre	年均降水量	mm	1 km	连续变量	2001—2020	https://www.geodata.cn/
	ET	蒸散	mm	1 km	连续变量	2001—2020	MODIS/061/MOD16A2GF
	LSTd	年均地表温度	℃	1 km	连续变量	2001—2020	MODIS/061/MOD11A2
植被 Vegetation	KNDVI	核归一化植被指数	/	1 km	连续变量	2001—2020	MODIS/061/MOD09GA
	Vge	植被类型	Class	1 km	分类变量	—	http://www.ncdc.ac.cn/
地形 Topography	DEM	高程	m	1 km	连续变量	—	USGS/SRTMGL1_003
	Slope	坡度	°	1 km	连续变量	—	USGS/SRTMGL1_003
	Aspect	坡向	°	1 km	连续变量	—	USGS/SRTMGL1_003
土壤 Soil	Soil	土壤类型	Class	1 km	分类变量	—	https://www.resdc.cn/
人类活动 Human activity	HF	人类足迹	/	1 km	连续变量	2001—2020	https://www.x-mol.com/
	CLCD	土地覆盖	Class	1 km	分类变量	2001—2020	https://doi.org/10.5281/zenodo.8176941

/:表示无量纲单位;Pre:年均降水量 Average annual precipitation;ET:蒸散 Evapotranspiration;LSTd:年均地表温度 Average annual land surface temperature;KNDVI:核归一化植被指数 Kernel Normalized Difference Vegetation Index;Vge:植被类型 Vegetation type;DEM:高程 Elevation;Slope:坡度 Slope;Aspect:坡向 Aspect;Soil:土壤类型 Soil type;HF:人类足迹 Human Footprint;CLCD:土地覆盖 Annual China Land Cover Dataset

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

采用线性回归方法分析秦岭陕西段年均NPP在2001—2023年年际变化趋势。为了解NPP年际变化趋势的空间特征,利用Matlab软件逐像元计算NPP线性回归方程的斜率,用于表征年际变化速率。计算公式为:

$$S_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n i y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \tag{2}$$

式中, S_1 表示斜率; n 表示时间序列的长度, 从 2001 年至 2023 年共 23 年; i 表示第 i 年; y_i 表示第 i 年的 NPP 值。

Theil-Sen Median 趋势分析结合 Mann-Kendall (M-K) 显著性检验已广泛被应用于植被长时间序列趋势分析^[27]。Sen 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势检验方法, 能够减少极值和噪声对研究结果的影响, 不受数据分布的影响。Sen 趋势分析方法计算公式为:

$$S_2 = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (3)$$

式中, S_2 为趋势斜率; x_i 和 x_j 分别为第 i 和 j 年时间序列取值。 $S_2 > 0$ 表示序列呈增长趋势, 反之则呈减少趋势。

M-K 显著性检验不要求数据分布遵循特定分布类型, 且分析结果不受样本异常值的干扰, 用于确定时间序列数据中是否存在单调趋势^[28]。M-K 检验计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

式中, S 为检验统计量, x_i 和 x_j 分别为第 i 和 j 年的值; n 为数据个数; Z 为标准化检验统计量。

当给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 当 Z 绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时, 表示趋势分别通过了 90%、95% 和 99% 的显著性检验^[29], 共划分为 8 个等级(表 2)。

表 2 Mann-Kendall 检验的趋势类别

Table 2 Mann-Kendall test of trend categories

趋势特征 Trend features	趋势类别 Trend type	S_2 趋势斜率 Trend slope	Z 统计量 Statistic
极显著增加 Extremely significant increases	4	$S_2 > 0$	$2.58 < Z$
显著增加 Significant increases	3	$S_2 > 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$
微显著增加 Slightly significant increase	2	$S_2 > 0$	$1.65 < Z \leq 1.96$
不显著增加 Insignificant increases	1	$S_2 > 0$	$Z \leq 1.65$
不显著减少 Insignificant reduction	-1	$S_2 < 0$	$Z \leq 1.65$
微显著减少 Slightly significant reduction	-2	$S_2 < 0$	$1.65 < Z \leq 1.96$
显著减少 Significant reduction	-3	$S_2 < 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$
极显著减少 Extremely significant reduction	-4	$S_2 < 0$	$2.58 < Z$

1.3.2 基于最优参数的地理探测器

基于最优参数的地理探测先对表 1 中所有连续变量按照等距离间隔法、分位数法、几何间隔法离散化方法、离散等级为 3—10 类进行参数离散化。离散化分类效果可通过地理探测器的 Q 统计量来评价, Q 值越大分区效果越好^[30], 而分类变量无需进行离散化。因子探测探究表 1 中所有变量对因变量 NPP 空间分异的解释程度。其解释程度用 q 值表示, q 值的取值范围为 $0 \leq q \leq 1$, q 值越大, 因子 X 对因变量 Y 空间分异的解释

程度越大^[31]。 q 值因无须满足线性假设且具有明确的物理含义,能够客观地揭示自变量解释了 $100 \times q\%$ 的因变量,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中, q 为分异性因子; L 为变量类别数; h 为某一具体类型; N_h 和 N 分别为 h 类别的单元数和全区单元数; σ_h 和 σ 分别为 h 类别的方差和全区方差。

交互探测器通过比较单一因子的 q 值和双因子交互的 $q(X_i \cap X_j)$ 值来判断双变量间交互作用的强弱及其作用类型,交互作用类型共划分为 5 个等级^[31]。不同交互作用类型有助于揭示 NPP 多元驱动力间的联系。

1.3.3 偏最小二乘法结构方程模型

本研究利用偏最小二乘法结构方程模型解析多元驱动力对秦岭陕西段 NPP 影响及途径。偏最小二乘法结构方程模型作为一种多元统计模型,其整合了因子分析、回归分析以及路径分析,不要求数据服从正态分布,对样本量限制小,分析准确,在地理学以及生态学等领域中已被广泛使用^[17-19, 32-33]。

使用 SmartPLS4.0 软件并选取因子探测中 q 值大于 0.05 的因子,模型潜变量包括 NPP、蒸散、年均降水量、KNDVI、植被类型、高程、年均地表温度和人类足迹。模型检验采用非参数检验指标,包括共性、所有潜在变量的判定系数(R^2)、标准化均方根残差值(SRMR)和规范拟合指(NFI)用于评估模型的可用性^[34]。通常认为, $R^2 > 0.33$ 、NFI > 0.95 、SRMR < 0.05 ,表明模型是可以接受的,其结果是可靠的^[19, 35]。

2 结果

2.1 植被 NPP 时空变化规律

秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 呈现出西北高、东南低的空间格局(图 2):高值主要分布于研究区域中偏西部以及西北部地区,NPP 多年平均值为 $602.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,局部可超过 $1000 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;低值区主要位于研究区域的东北部和东南部地区,NPP 值多低于 $500 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,部分地区仅为 $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右。2001—2023 年秦岭陕西段 NPP 呈波动增加趋势(图 2),年均 NPP 以 $5.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率显著增加($P < 0.01$)。NPP 在 2015 年达到最大值,为 $682.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2001 年最低,仅为 $464.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

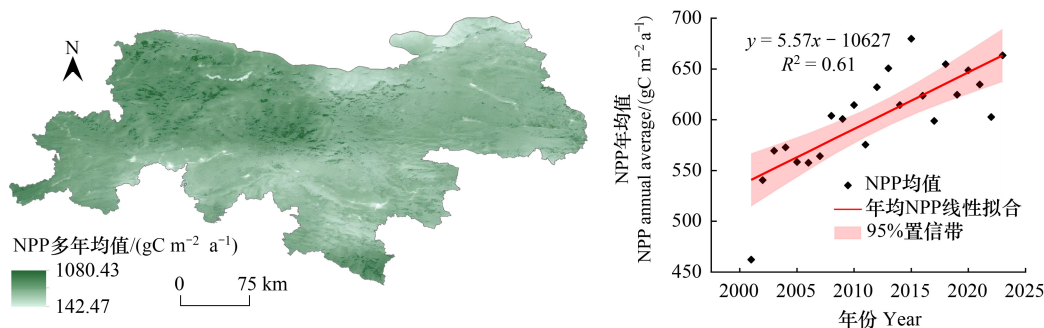


图 2 秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 均值及年际变化

Fig.2 Mean NPP and interannual variation in the Shaanxi section of the Qinling Mountains from 2001 to 2023

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity; 右图中阴影部分表示 95% 置信区间

空间分析表明,秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 变化速率范围为 -13.80 — $17.40 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,仅有 0.92% 区域 NPP 变化速率为负(图 3)。NPP 变化速率呈现出西部地区大于东部,北部大于南部的空间特征,变化速率最大的地区位于研究区域西部。同时,结果显示秦岭陕西段 81.62% 区域的 NPP 呈极显著增加趋势,11.48%

区域呈显著增加趋势(图3),增加速率为 $5.85 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

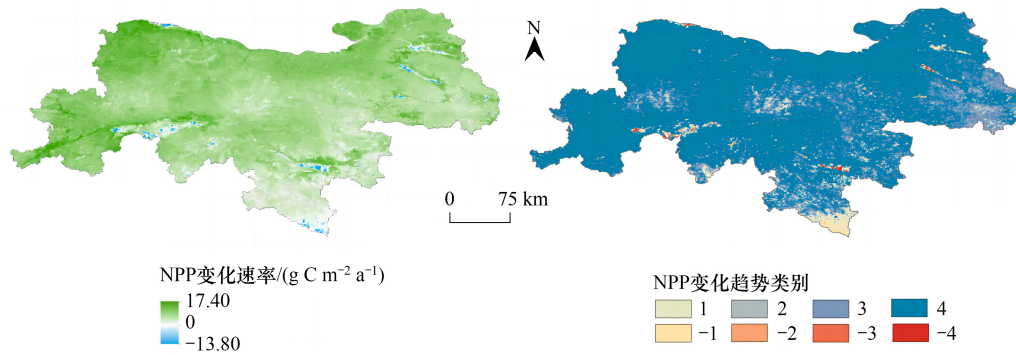


图3 2001—2023年NPP年际变率及变化特征

Fig.3 The change slope and features of change of NPP from 2001 to 2023

2.2 秦岭陕西段 NPP 空间分异影响机制分析

2.2.1 因子探测

不同驱动因子对 2001—2020 年多年平均 NPP 空间格局的解释($P<0.01$)存在显著差异(图4):气候、植被、地形以及人类活动分别解释了约 65%、23%、13% 和 13%。气候相关的驱动因子中蒸散解释力最强,其次是年均降水量和年均地表温度;与植被有关的驱动因子 KNDVI 以及植被类型对 NPP 格局具有较大影响;与人类活动相关的驱动因子,人类足迹对 NPP 空间格局的影响比土地覆盖强;与地形相关的驱动因子中高程对 NPP 影响相对较大,坡度和坡向表现出微弱的影响,土壤类型对 NPP 空间格局的影响几乎可以忽略不计。

2.2.2 交互探测

交互检测结果(图5)表明:所有成对的驱动因子中,蒸散与各因子的交互作用均明显增强,坡度、坡向、土壤类型和土地覆盖单因子解释力不足 0.05,但与蒸散交互后呈双因子增强,解释力均超过 0.36;其中蒸散和年均降水量的交互作用最强($q=0.502$),其次是蒸散和年均地表温度($q=0.46$)。此外,KNDVI、年均降水量与其他因子的交互作用对 NPP 也有较强影响。KNDVI 与高程、坡度、年均地表温度、年均降水量、人类足迹和植被类型等驱动因子交互后,呈非线性增强。综上,不同驱动因子间的交互作用类型和大小表明影响 NPP 变化驱动机制是复杂的,需要进一步对不同驱动因子间的耦合作用进行解析。

2.3 基于偏最小二乘法结构方程模型对 NPP 驱动因素关系解析

偏最小二乘法结构方程模型路径分析是可以接受的($R^2>0.33$ 、 $\text{NFI}>0.95$ 和 $\text{SRMR}<0.05$),模型结果表明(图6):蒸散和 KNDVI 是 NPP 的主要驱动因素,路径系数分别为 0.513 和 0.306($P<0.01$),其次是高程、年均地表温度、人类足迹和年均降水量(路径系数依次为 0.291、0.089、0.076、 -0.226 , $P<0.01$),年均降水量则表现出较强负影响。年均降水量对蒸散表现出较强正影响(路径系数为 0.218, $P<0.01$),而高程、人类足迹和年均地表温度则对蒸散呈现出明显的负影响(路径系数分别为 -0.251 、 -0.355 和 -0.370 , $P<0.01$)。KNDVI 受年均地表温度、高程和蒸散因子显著驱动(路径系数分别为 0.936、0.520 和 0.424, $P<0.01$),而人类足迹对 KNDVI 表现出微弱的负向影响(路径系数 -0.076 , $P<0.01$)。高程对人类足迹、年均地表温度、年均降水量以及植被类型因子均表现出负向影响(路径系数依次为 -0.596 、 -0.790 、 -0.220 以及 -0.114 , $P<0.01$)。蒸

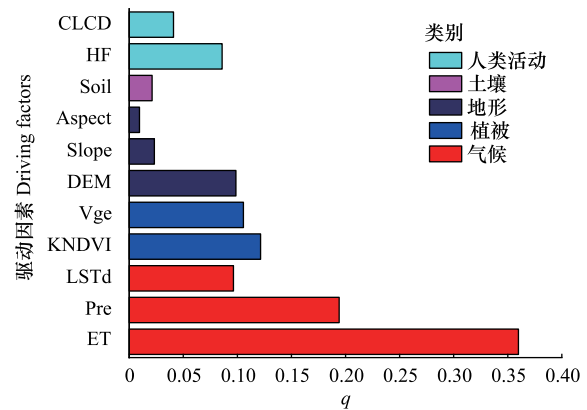


图4 驱动因子对 NPP 的解释力

Fig.4 The explanatory power of drivers for NPP

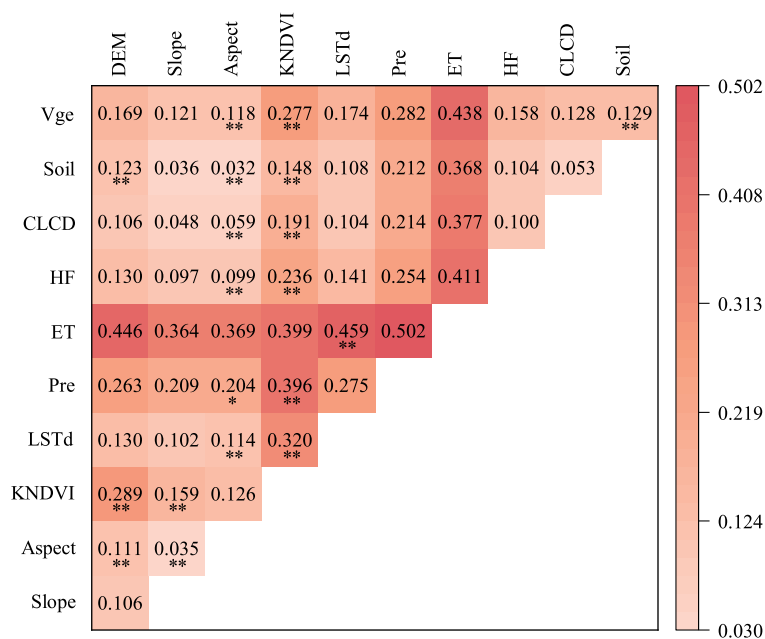


图 5 成对驱动因子对 2001—2020 年 NPP 多年平均空间格局的解释力

Fig.5 The explanatory power of pairwise drivers for the spatial pattern of the multiyear averaged NPP from 2001 to 2020

其中“*”表示独立性, “**”表示非线性增强, 无标记则表示双因子增强

散、KNDVI、高程、年均地表温度以及人类足迹直接影响 NPP 的变化。同时年均地表温度、蒸散和年均降水量通过直接影响 KNDVI, 继而间接作用 NPP 的变化。

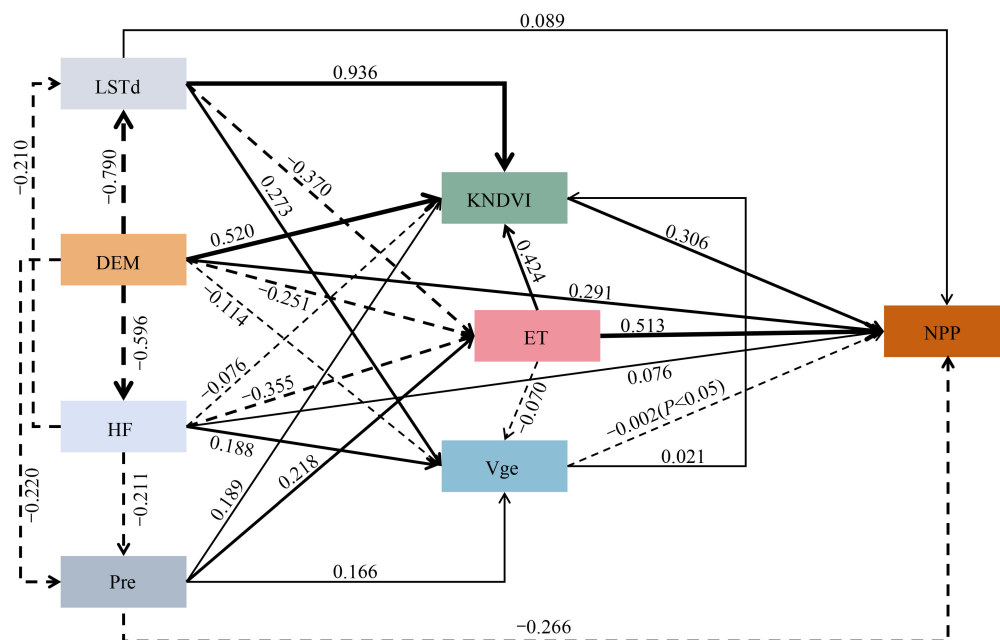


图 6 2001—2020 年各驱动因子与 NPP 的关系

Fig.6 The PLS-SEM model represents the relationship between drivers and NPP during 2001—2020

实线表示路径系数为正, 虚线表示路径系数为负; 如果未指定 P , 则为 $P < 0.01$; 线附近的数字是 PLS-SEM 模型中的路径系数

3 讨论

3.1 秦岭陕西段 NPP 时空变化规律

秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 空间分布呈现西北高、东南低的特征,93.11%的区域呈极显著与显著上升趋势(图 2,3)。从空间格局上看,本研究结果得到了前人^[20–21]在秦岭陕西段研究结果的支持。变化速率上,秦岭陕西段 2001—2023 年 NPP 年际变化速率为 $5.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,明显高于中国 2001—2020 年 NPP 的年际变化速率 $2.86 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[36],但远低于前人利用 SPOT VGT 数据集基于 CASA 模型模拟得到的秦岭陕西段 1999—2009 年 NPP 年际增长速率 $19.98 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[20]。且相较于利用 MOD17A3-NPP 数据集发现的 2000—2015 年秦岭南北坡 NPP 年际变化速率(南坡: $3.45 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和北坡: $2.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)较高^[21]。此外,NPP 正向变化地区主要为秦岭陕西段北麓及高山地区,这可能与近年来陕西省生态环境保护与退耕还林政策有关,而在汉中、安康等主要城市周边地区 NPP 呈现出减少特征。

秦岭及其周边山区由于复杂的地形和严格的生态保护政策,导致植被有关参数以及 NPP 实测数据较难获取,学者们常直接使用 MODIS 等遥感资料或利用模型反演进行研究。最近研究发现改进 CASA 模型反演的秦岭地区植被 NPP 与 MODIS-NPP 数据表现出良好的一致性^[20],其表明利用 MODIS-NPP 数据监测秦岭地区植被 NPP 时空分异及其驱动机制是可靠合理的。综上,由于遥感资料的不同、研究时段差异、自然条件和人类活动的变化等因素都导致了增长速率的不一致,但 NPP 总体呈增长趋势。

3.2 NPP 变化的主要驱动因素

蒸散、KNDVI 与 NPP 从不同维度反映植被活动,但蒸散和 KNDVI 可从环境约束(水分可利用性)和植被生理状态(光合能力)维度反映其对 NPP 的影响,此驱动因子的选择也得到前人研究的支持^[22, 24]。蒸散、年均降水量和 KNDVI 是秦岭陕西段 2001—2020 年 NPP 空间分异的三个主要因素,主导($\approx 60\%$)NPP 空间格局。其中,具有水热综合效应的蒸散对秦岭陕西段 NPP 的解释力最强,这与前人发现蒸散是秦巴山区 2000—2014 年自然因子中相对贡献率最大的结果一致^[22]。蒸散与植物的蒸腾速率和光合作用直接相关,在温度和水分适宜时,植物光合作用不受水分限制,植被生长状况好,生产力和 NPP 较高^[13, 37]。反之,当区域蒸腾作用较强时,植被可利用水分会降低,这对植物光合作用和生长产生一定胁迫^[38–39],导致植被生产力下降,NPP 降低。近年来秦岭地区暖湿化趋势明显,水热充沛^[40],利于植被生长^[18],使得蒸散成为 NPP 的主要动力。而在相邻的四川省,因其特殊的地形组合(盆地、高原和山区)及其城市化、农业开发等人类活动影响了蒸散^[41],降低了蒸散对 NPP 的作用。相反,秦岭陕西段地形主要以山地为主且城市较少,人类活动对自然环境的影响有限,使得蒸散的作用最强。

年均降水量和年均地表温度是驱动秦岭陕西段 NPP 空间分异的重要因素,且年均降水量的影响相对更大,得到前人在秦岭地区研究的支持^[22]。不同植被类型和植被状况决定了 NPP 的差异,KNDVI 和植被类型共同解释了 NPP 空间分异的 20%以上。将研究区内植被类型重分类并统计其 NPP 多年平均值,秦岭陕西段植被类型以温带落叶阔叶林为主(约占 30%),其 NPP 多年平均值超过 $630 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,与全国实测值较为接近^[42]。温带落叶阔叶林的 NPP 远大于温带落叶灌丛、亚热带常绿和落叶阔叶混交林($\approx 580 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)以及温带针叶林、高寒嵩草、草甸的 NPP($540 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。秦岭陕西段 NPP 高值区主要为落叶阔叶林带,集中在西部。本研究将 NPP 与驱动因子在空间上叠置后发现,NPP 空间格局与蒸散空间分布较为一致,与因子探测结果一致。值得注意的是,NPP 变化速率高值区主要集中在研究区的西北部,与年均地表温度的低值区重叠较高。而变化速率低值区主要位于东部与南部,与低海拔、人类足迹与年均地表温度高值区域,这可能暗示了气候变暖是促进年均地表温度较低的高海拔地区 NPP 增长的重要动力,也是导致年均地表温度较高的低海拔地区 NPP 衰退的因素。

地形、土壤和人类活动类别驱动因素对 NPP 的影响较小,解释力均不足 10%(图 4)。土地覆被的变化作为反映人类活动的重要指标,2001—2020 年期间,土地覆被以森林和耕地为主且变化面积较小(图 7),而微

弱的城市不透水面积扩张(如汉中地区),长期来看却是 NPP 减少的主要地区。秦岭北麓地区是耕地向森林转变的主要地区,NPP 呈显著增加趋势。土地覆被变化的面积微弱,使得其对 NPP 的影响较小。从因子探测结果来看,人类活动对生态环境压力的综合指标人类足迹对 NPP 的解释力明显高于土地覆被。人类足迹是由建筑环境、人口密度、夜间照明、农田、牧场、公路、铁路和通航水道八个变量综合计算得到,相比于单独考量其中一种或几种人类活动以及土地利用类型对 NPP 的影响,该指数能更全面反映人类活动对生态环境带来的影响。从地形和土壤方面来看,土壤空间分异不大,高程对 NPP 空间格局的解释也较弱,与前人的研究结果^[22]较为一致,这可能与秦岭地区存在大量原始森林以及生态环境保护政策有关。在海拔分异(50 m 分级)下,地形引起的 NPP 均值变化表现出较弱规律(图 7),与因子探测中 DEM 解释力较低相符。在海拔 250—2500 m 区间内,NPP 均值与最大值相对较高且稳定,3000 m 后 NPP 均值与最大值相对快速下降,而研究区内 NPP 最小值波动并不明显。考虑到坡向和坡度在因子探测中 q 值不足 0.03,且前人也发现不同坡向下秦岭及其周边地区 NPP 分异并不明显^[11],因此本研究暂未考虑坡向对 NPP 的分异。

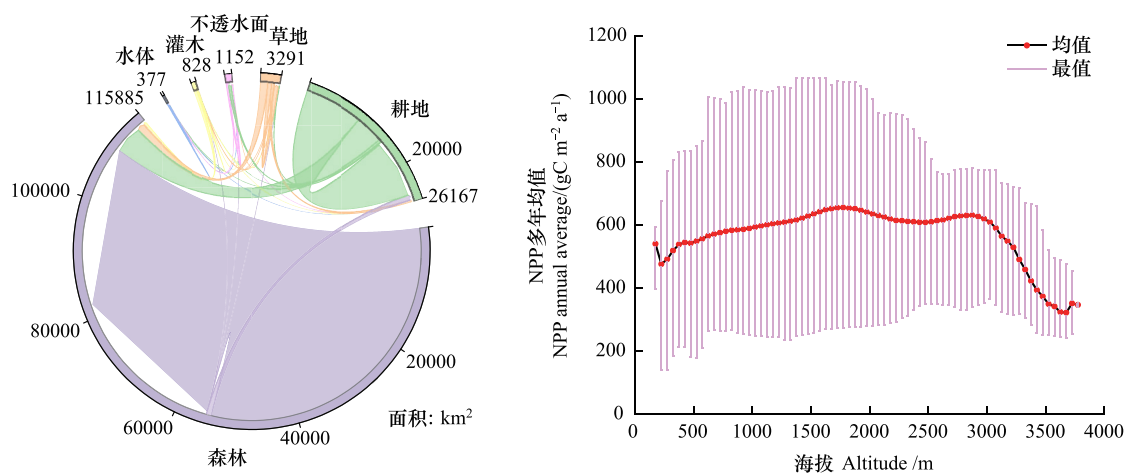


图 7 2001—2020 年土地转移状况及海拔分异下 NPP 变化状况

Fig.7 Land transfer status and NPP changes under elevation differentiation, 2001—2020

本研究发现,绝大多数因子在与其他因子发生交互作用后,对 NPP 的空间分异有更高的解释力。蒸散与其他因子交互后,对 NPP 空间分异表现出更强的解释力,且以非线性增强为主。这表明蒸散和其他因子间的相互作用并非简单的线性叠加,而是以更复杂的方式相互影响,共同推动 NPP 的空间分异,这一结论也得到了前人研究^[22]的支持。此外,KNDVI 与其他因子交互后,解释力增强明显且双因子增强为主,这表明 KNDVI 与其他因子存在协同效应,共同推动 NPP 空间分异。

3.3 驱动 NPP 空间分异的机制

利用偏最小二乘法结构方程模型,本研究强调了主要驱动力对 NPP 的详细影响以及影响途径。前人在利用偏最小二乘法结构方程模型以及结构方程模型建模时,二者均将每个因子定义为潜在变量来建模^[13, 19],但对因子间因果联系的考量不够充分。因此,本研究把因子探测结果中 q 值大于 0.05 的因子作为偏最小二乘法结构方程模型建模所使用的潜在变量,并考虑所有潜在变量间的耦合关系,捕捉多元驱动力间因果联系,厘清多元驱动力对秦岭陕西段 NPP 的影响及途径。

海拔对自然和人类活动存在限制作用^[43]。海拔通过直接和间接影响其他因子,尤其是对蒸散与 KNDVI 的影响,致使其对 NPP 的总影响减弱。人类活动对 NPP 的影响较为复杂^[44],人类足迹对 NPP 有微弱的直接正向作用,但它对蒸散、KNDVI 以及年均降水量的抑制和年均地表温度的促进,使人类足迹对 NPP 的间接和总影响转变为强烈的抑制(图 8)。温度对山地植被生长绿化起促进作用,而降水的影响较为复杂^[45]。年均地表温度对秦岭陕西段 NPP 有较弱的直接促进作用,不过,它通过对 KDNVI 显著促进,放大了对 NPP 的促进

作用;年均降水量对 NPP 有显著的直接抑制作用,但通过对 KNDVI 与蒸散的显著促进,年均降水量对 NPP 总影响表现出更弱的抑制(图 8)。

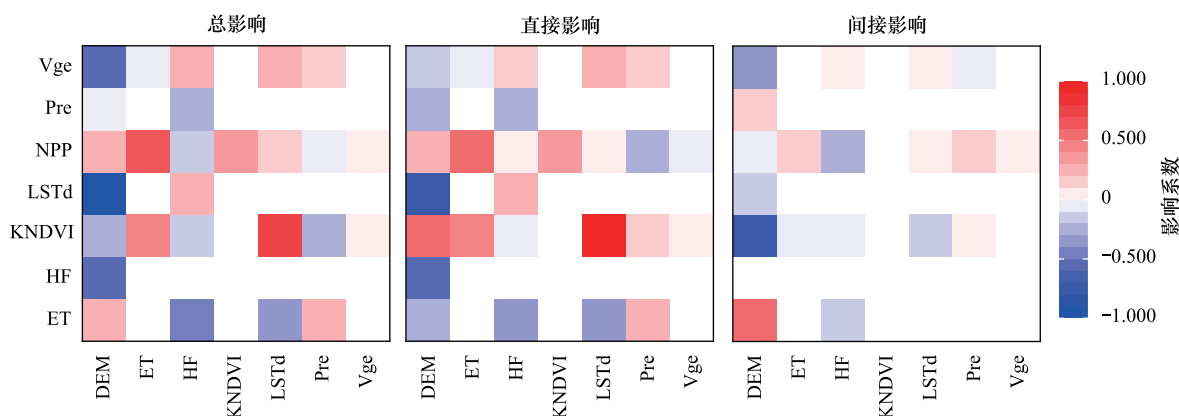


图 8 主要驱动因素之间的总、直接和间接影响

Fig.8 Total, direct and indirect influences between the main drivers

本研究在数据方面还存在一些局限性:结果是基于年际变化的 NPP,这主要由于使用的数据决定的。(1)MODIS 产品中 NPP 数据观测时间短、时空分辨率低(1 km),导致研究中无法完全捕捉短期内(数天内)生态系统 NPP 对气候的快速响应。因此,未来研究应整合多源遥感数据和森林实地林调数据,并基于可靠模型实现长时间序列、高时空分辨率 NPP 等数据获取。(2)秦岭长期以来的生态修复和环境保护等工作可能已经对区域内植被产生影响,但是由于缺乏相应的数据,本研究尚未考虑这些影响。

4 结论

本研究基于 GEE 分析秦岭陕西段山地生态系统 2001—2023 年 NPP 变化及其时空分异格局,基于最优参数的地理探测器以及偏最小二乘法结构方程模型,定量评估多元驱动力对秦岭陕西段 NPP 空间分异的复杂耦合机制。主要发现:

(1)2001—2023 年,秦岭陕西段 NPP 多年均值为 $602.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年际变化速率为 $5.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$),其中 93.11% 的区域 NPP 呈极显著与显著增加趋势。

(2)基于最优参数的地理探测器揭示蒸散、年均降水量、KNDVI 和植被类型是 NPP 空间分异主要驱动力。蒸散、年均降水量和 KNDVI 解释了约 60% 区域,蒸散和年降水的交互作用对 NPP 空间分异的影响最大。

(3)偏最小二乘法结构方程模型定量解析了主要驱动力间的耦合关系,发现多元驱动力主要通过对蒸散和 KNDVI 的作用从而间接影响 NPP,海拔和人类足迹通过直接作用和约束其他因子从而间接影响 NPP。

参考文献(References):

- [1] Xu Y, Lu Y G, Zou B, Xu M, Feng Y X. Unraveling the *Enigma* of NPP variation in Chinese vegetation ecosystems: The interplay of climate change and land use change. *Science of The Total Environment*, 2024, 912: 169023.
- [2] Jones M O, Running S W, Kimball J S, Robinson N P, Allred B W. Terrestrial primary productivity indicators for inclusion in the National Climate Indicators System. *Climatic Change*, 2020, 163(4): 1855-1868.
- [3] Crabtree R, Potter C, Mullen R, Sheldon J, Huang S L, Harmsen J, Rodman A, Jean C. A modeling and spatio-temporal analysis framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1486-1496.
- [4] Wang G J, Peng W F, Zhang L D, Zhang J. Quantifying the impacts of natural and human factors on changes in NPP using an optimal parameters-based geographical detector. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111018.
- [5] Wang C, Wang L S, Zhao W Z, Zhang Y Y, Liu Y Y. Analysis of spatiotemporal change and driving factors of NPP in Qilian Mountains from 2000 to 2020. *Rangeland Ecology & Management*, 2024, 96: 56-66.

- [6] Li S B, He S Y. The variation of net primary productivity and underlying mechanisms vary under different drought stress in Central Asia from 1990 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 314: 108767.
- [7] Chen Y Z, Chen L Y, Cheng Y, Ju W M, Chen H Y H, Ruan H H. Afforestation promotes the enhancement of forest LAI and NPP in China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462: 117990.
- [8] 徐雪, 罗娅, 杨胜天, 陆晓辉, 周秋文, 刘茂, 石春茂, 廖梦焱. 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.
- [9] Gong H B, Cao L, Duan Y F, Jiao F S, Xu X J, Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y. Multiple effects of climate changes and human activities on NPP increase in the Three-north Shelter Forest Program area. *Forest Ecology and Management*, 2023, 529: 120732.
- [10] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Han Y, Lu H F, Qiao D M. Integrated effects of meteorological factors, edaphic moisture, evapotranspiration, and leaf area index on the net primary productivity of Winter wheat-Summer maize rotation system. *Field Crops Research*, 2023, 302: 109080.
- [14] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 王仁儒, 陶倩, 邹永偲, 徐晶妹. 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.
- [15] 任利敏, 王琳, 李娜, 曹瑞峰. 河南省植被 NPP 时空变化特征及其驱动因素. *测绘科学*, 2024, 49(8): 69-80.
- [16] Dash G, Paul J. CB-SEM vs PLS-SEM methods for research in social sciences and technology forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 173: 121092.
- [17] 袁泽申, 程瑶, 武金坤, 连曦. 定量评估气候变化和人类活动对澜沧江流域植被动态的影响. *水利水电技术: 中英文*, 2025, 56(1): 85-99.
- [18] Gu Z P, Chen X W, Ruan W F, Zheng M L, Gen K L, Li X C, Deng H J, Chen Y, Liu M B. Quantifying the direct and indirect effects of terrain, climate and human activity on the spatial pattern of kNDVI-based vegetation growth: a case study from the Minjiang River Basin, Southeast China. *Ecological Informatics*, 2024, 80: 102493.
- [19] Xu L, Gao G Y, Wang X F, Fu B J. Distinguishing the effects of climate change and vegetation greening on soil moisture variability along aridity gradient in the drylands of northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 343: 109786.
- [20] 袁博, 白红英, 章杰, 马新萍. 秦岭山地植被净初级生产力及对气候变化的响应. *植物研究*, 2013, 33(2): 225-231.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [24] 李雪, 于坤霞, 徐国策, 李鹏, 李占斌, 时鹏. 黄河上中游流域植被净初级生产力空间特征及驱动因素分析. *环境科学*, 2024, 45(11): 6448-6457.
- [25] 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, Güanter 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.
- [26] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 2022, 9: 176.
- [27] Qi S Y, Chen S D, Long X R, An X X, Zhang M. Quantitative contribution of climate change and anthropological activities to vegetation carbon storage in the Dongting Lake basin in the last two decades. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 845-868.
- [28] 贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 付强, 刘东. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制. *南水北调与水利科技: 中英文*, 2024, 22(1): 131-147.
- [29] 廖洪圣, 卫伟, 陈乐, 石宇. 典型黄土丘陵沟壑区生境质量时空变化及驱动力: 以祖厉河流域为例. *环境科学*, 2024, 45(9): 5361-5371.
- [30] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [31] 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.
- [32] Cao Y F, Hua L, Peng D Y, Liu Y H, Jiang L, Tang Q, Cai C F. Decoupling the effects of air temperature change on soil erosion in Northeast

- China. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119626.
- [33] 廖李仁, 孟岑, 李裕元, 余少波, 宫殿林, 张苗苗, 吴金水. 亚热带典型农林流域河流氮磷比时空变化及影响因素. *环境科学学报*, 2025, 45(4): 219-230.
- [34] Henseler J, Sarstedt M. Goodness-of-fit indices for partial least squares path modeling. *Computational Statistics*, 2013, 28(2): 565-580.
- [35] Chin W W, Marcolin B L, Newsted P R. A partial least squares latent variable modeling approach for measuring interaction effects: results from a Monte Carlo simulation study and an electronic-mail emotion/adoption study. *Information Systems Research*, 2003, 14(2): 189-217.
- [36] 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.
- [37] 申双和, 张雪松, 邓爱娟, 李永秀, 谢轶嵩. 不同高度层冬小麦叶片水分利用效率对 CO₂ 浓度变化的响应. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 547-552.
- [38] 崔兴国. 植物蒸腾作用与光合作用的关系. *衡水师专学报*, 2002, 4(3): 55-56.
- [39] 于强, 任保华, 王天铎, 孙菽芬. C₃ 植物光合作用日变化的模拟. *大气科学*, 1998, 22(6): 867-880.
- [40] 汲玉河, 周广胜, 王树东, 王丽霞, 周梦子. 2000 - 2019 年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 617-625.
- [41] 王永锋, 靖娟利, 刘海红. 2000—2020 年西南地区蒸散发时空变化及驱动因素探测. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(12): 2568-2580.
- [42] 刘世荣, 徐德应, 王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 I. 中国森林现实生产力的特征及地理分布格局. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 633-642.
- [43] Kang Y J, Wang Z Q, Xu B N, Shen W J, Chen Y, Zhou X H, Liu Y G, Zhang T B, Wang G Y, Jia Y L, Li J J. Disentangling the response of vegetation dynamics to natural and anthropogenic drivers over the Minjiang river basin using dimensionality reduction and a structural equation model. *Forests*, 2024, 15(8): 1438.
- [44] He Y L, Lin C, Wu C Y, Pu N, Zhang X H. The urban hierarchy and agglomeration effects influence the response of NPP to climate change and human activities. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 51: e02904.
- [45] Feng H P, Kang P, Deng Z C, Zhao W, Hua M, Zhu X Y, Wang Z. The impact of climate change and human activities to vegetation carbon sequestration variation in Sichuan and Chongqing. *Environmental Research*, 2023, 238: 117138.