

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.024.

赵雪瑞, 韩玲, 刘明, 等. 基于改进 CASA 模型的陕西省植被 NPP 遥感估算[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 247-256.

Zhao Xuerui, Han Ling, Liu Ming, et al. Remote Sensing Estimation of Vegetation NPP in Shaanxi Province Based on Improved CASA Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 247-256.

# 基于改进 CASA 模型的陕西省植被 NPP 遥感估算

赵雪瑞<sup>1</sup>, 韩玲<sup>2,3,4</sup>, 刘明<sup>2,4</sup>, 宋敏琪<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054;  
3. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054; 4. 西安市国土空间信息重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** [目的] 探究陕西省陆地生态系统植被群落生产状况, 分析陕西省植被 NPP 时空格局变化及影响因素, 为准确评估陕西省陆地生态系统碳源/汇, 实现区域生态可持续发展, 达成碳中和目标提供参考依据。[方法] 基于温度—植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 对 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型水分胁迫因子进行改进, 从而估算陕西省 2010—2020 年植被 NPP, 并利用热点分析法、趋势分析法以及地理探测器对陕西省植被 NPP 进行空间分布格局、年际变化趋势和驱动因子研究。[结果] (1) 陕西省 NPP 空间分布呈现南高北低、冷热点区域差异明显的特征; (2) 陕西省 2010—2020 年 NPP 平均值介于  $331.02 \sim 416.34 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , NPP 均值在  $100 \sim 600 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  占比最大, 最低值和最高值区间占比不足 20%; (3) 全省 2010—2020 年 83.3% 的面积植被 NPP 值无显著变化, 4.2% 的面积呈增加状态, 12.5% 的面积 NPP 值呈下降趋势; (4) 降水是陕西省植被 NPP 变化的单因子主导驱动力, 太阳辐射量及土地利用类型交互作用下对 NPP 变化解释力更强。[结论] 基于 TVDI 改进的 CASA 模型能够有效量化区域植被 NPP, 且陕西省植被 NPP 南北分布差异明显, 降水、土地利用类型及太阳辐射量是其主要影响因子。

**关键词:** 净初级生产力; CASA 模型; TVDI; 陕西省

**中图分类号:** Q948; P966.1; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)03-0247-10

## Remote Sensing Estimation of Vegetation NPP in Shaanxi Province Based on Improved CASA Model

Zhao Xuerui<sup>1</sup>, Han Ling<sup>2,3,4</sup>, Liu Ming<sup>2,4</sup>, Song Minqi<sup>1</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
2. College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Remediation, Xi'an 710054, China; 4. Xi'an Key Laboratory of Land Spatial Information, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the production status of vegetation communities in Shaanxi Province terrestrial ecosystems, to analyze the changes in spatial and temporal patterns of vegetation NPP and the factors affecting them, and to provide a reference basis for accurately assessing the carbon sources/sinks of the terrestrial ecosystems in Shaanxi Province, realizing the sustainable development of the region's ecology, and reaching the goal of carbon neutrality. [Methods] Based on the CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model water stress factor improved by the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), the improved CASA model was used to estimate the vegetation NPP in Shaanxi Province from 2010 to 2020, and then the spatial distribution pattern, inter-annual change trend and

收稿日期: 2023-07-19

修回日期: 2023-08-15

资助项目: 陕西省重点研发项目 (2022ZDLSF07-05); 中央高校基本科研业务费项目 (300102352901); 中央高校基本科研业务费资助项目 (300102352203)

第一作者: 赵雪瑞 (1999—), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统碳收支估算。E-mail: zxr13201400382@163.com

通信作者: 韩玲 (1964—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 主要从事遥感信息提取、资源环境遥感和遥感影像智能识别研究。E-mail: hanling@chd.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

driving factors were analyzed by hotspot analysis, trend analysis, and GeoDetector. [Results] (1) The spatial distribution of NPP in Shaanxi Province showed the characteristics of high level in the south and low level in the north, with obvious differences in cold and hot spot areas. (2) The average value of NPP in Shaanxi Province from 2010 to 2020 ranged from 331.02 to 416.34  $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , with the largest proportion of average NPP values between 100 and 600  $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , and less than 20 percent of the lowest and highest value intervals. (3) 83.3 percent of the province's area had no significant change in vegetation NPP values from 2010 to 2020, 4.2 percent showed an increase, and 12.5 percent showed a decreasing trend in NPP values. (4) Precipitation was the single factor dominant driver of vegetation NPP change in Shaanxi Province, with solar radiation and land use type interacting to explain NPP change more strongly. [Conclusion] The CASA model improved by TVDI can effectively quantify the regional vegetation NPP, and there are obvious differences in the distribution of vegetation NPP between north and south in Shaanxi Province, with precipitation, land use type and solar radiation as the main influencing factors.

**Keywords:** net primary productivity; CASA Model; TVDI; Shaanxi Province

陆地生态系统能够将大气中的自由碳转化为有机化合物,是全球碳循环系统中至关重要的一个环节,它不仅提供了人类赖以生存的基础,而且承载着全球最多、最剧烈的气候变化<sup>[1]</sup>。植被是生态系统的关键组成部分,对维持生态平衡和促进陆地生态系统碳循环具有重要作用,植被净初级生产力(NPP)是绿色植被在单位时间和单位面积内通过光合作用所固定的有机物的总量,是植被扣除自身呼吸作用消耗后的有机碳的剩余部分<sup>[2]</sup>。NPP 是生态系统稳定和平衡的基本指标,能够反映植被群落的生产状况,在全球和区域碳循环中发挥着重要作用。

常见的 NPP 估算方法主要包括实地测量法和模型估算法。实地测量法依靠实测站点 NPP 数据,具有较强的可靠性,但实测法只能在一定范围内对植被 NPP 进行测算,有一定的区域限制<sup>[3]</sup>。模型估算法主要分为生理生态过程模型、气候生产力模型和光能利用率模型<sup>[4]</sup>。生理生态过程模型基于气象、土壤数据以及植被的生理生态参数来估算植被 NPP,模型过程复杂且参数较多;气候生产力模型又称为统计模型,通过建立气候因子(降水、温度、蒸散量等)与植被干物质的相关性来估算植被 NPP;随着遥感和 GIS 技术的不断发展,出现了以 CASA 模型、GLO-PEM 模型和 VPM 模型为代表的光能利用率模型,这类模型以遥感数据为基础,实现了对于不同尺度、不同区域的 NPP 估算<sup>[4-5]</sup>。

在众多 NPP 遥感估算模型中,CASA 模型凭借其结构简单、输入数据较少且易于获取等优势,已在区域、全球尺度的 NPP 估算及碳循环研究中得到广泛应用。Monteith 发现了植被 NPP 与植被所吸收的光合有效辐射(APAR)之间的线性关系<sup>[6]</sup>,基于此,1993 年 Potter<sup>[7]</sup> 正式提出基于光合有效辐射和

实际光能利用率建立的 CASA 模型。此后,众多学者利用 CASA 模型来估算区域或全球植被 NPP,且对模型的各项参数进行优化,Xiao 等<sup>[8]</sup> 根据不同植被类型确定的最大光能利用率估算了黄河流域 2001—2020 年植被 NPP。对于模型输入中 NDVI 数据在植被覆盖度较高地区容易出现饱和问题等现象,Fang 等人利用哨兵影像红边波段对其进行改进,估算了石津灌地区地上生物量,在一定程度上提高了 CASA 模型估算精度<sup>[9]</sup>。

在 CASA 模型中,植被 NPP 由植被吸收的光合有效辐射和实际光能利用率估算得到,土壤水分、气温、太阳辐射量等环境因子通过影响植被的实际光能利用率大小而调节植被的 NPP,植被只有在理想条件下对光能的利用率才能达到最大值,而实际情况中,环境中温度和水分是影响植被最大光能利用率的主要因素<sup>[10]</sup>。土壤水分是连接土壤、植被与大气之间的重要纽带,也是影响植被生长发育的最主要因素之一,温度—植被干旱指数(TVDI)能够反演土壤水分含量,表征区域地表的干湿程度,影响植被的实际光能利用率,进而对植被 NPP 产生影响<sup>[11-12]</sup>。原 CASA 模型中水分胁迫因子主要由经验模型计算得到,未考虑区域地表植被类型差异,且地面站点插值数据带来的不确定性,对 NPP 估算结果产生较大影响。因此,本文基于归一化差值植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)和陆地表面温度 LST(Land Surface Temperature)数据构建 NDVI-LST 特征空间,得到陕西省像素尺度 TVDI,改进原 CASA 模型水分胁迫系数,以期提高 CASA 模型估算精度,利用改进后 CASA 模型估算陕西省 2010—2020 年逐月 1 km 分辨率植被 NPP 值,分析其时空演变特征,并对陕西省植被 NPP 变化的驱动力进行探究。

## 1 研究区概况

陕西省(105°29′—110°15′E, 31°42′—39°35′N)位于中国内陆腹地、黄河中游,东邻山西、河南,南抵四川、重庆、湖北,西连宁夏、甘肃,北接内蒙古,总面积 20.56 万 km<sup>2</sup>。陕西省总体呈现南北方向狭长地域分布,北山和秦岭将陕西省划分为:陕南秦巴山区、关中平原以及北部的黄土高原丘陵沟壑区和长城沿线风沙区 4 种特殊的地貌类型。

陕西省处于湿润气候区向干旱气候区的过渡地带,地跨黄河、长江两大水系,年平均气温 8~16℃,年平均降雨量 340~1 240 mm。全省纵跨 3 个气候带,南北气候差异特征明显,陕北北部及长城沿线属中温带季风气候、关中及陕北大部分地区属暖温带季风气候、陕南地区属北亚热带季风气候<sup>[13]</sup>。陕西省自然环境复杂、生态系统多样、植被资源丰富,自实施退耕还林、水土保持工程等系列生态建设工程以来,全省植被覆盖状况有明显改善,森林覆盖量高达 46.4%。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据来源及预处理

2.1.1 遥感数据 遥感数据主要包括:NDVI 数据、LST 数据、土地利用数据及 MODIS NPP 数据,均由美国国家航空航天局(<https://search.earthdata.nasa.gov>)提供。其中 NDVI 数据来源于 MOD13A3 月尺度数据集,其空间分辨率为 1 km;LST 数据采用空间分辨率为 1 km,8 日合成的 MOD11A2 数据集;土地利用数据采用 500 m 空间分辨率的 MCD12Q1 年度合成数据产品;MODIS NPP 数据为 500 m 空间分辨率的 MOD17A3 HGF 年度数据集。对以上遥感数据在 MRT(MODIS Reprojection Tools)批处理工具和 ArcGIS 软件中进行拼接、裁剪、重投影、重采样等预处理,得到 WGS1984 坐标系下,陕西省 2010—2020 年逐月 1 km 分辨率遥感数据集。

2.1.2 气象数据 气象数据主要包括:月平均气温、月总降水量和太阳总辐射量数据。月总降水量和太阳总辐射量数据来源于 ERA5-Land Monthly Averaged 再分析数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu>),其空间分辨率为 9 km;月平均气温数据来源于 GPRChina Temp1 km(Gaussian Process Regression China Temperature1 km)月尺度数据集(<https://zenodo.org>)。对气象数据进行裁剪、重投影、重采样等预处理,使其坐标系、分辨率与遥感数据保持一致。

2.1.3 其他数据 坡度数据提取自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)下载的 ASTER GDEM

30 m 分辨率数字高程数据;2010 年、2015 年、2020 年三期的人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的中国人口空间分布 km 网格数据集,由于网站未更新 2020 年人口密度数据,因此本文采用 2019 年人口密度数据代替。

### 2.2 研究方法

2.2.1 CASA 模型 CASA 模型是基于植物的光合作用和光能利用率建立的一种“生态—遥感耦合模型”<sup>[1]</sup>,其估算的 NPP 主要由植物所吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率( $\epsilon$ )组成<sup>[7]</sup>,公式如下:

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

式中:APAR( $x, t$ )表示像元吸收的光合有效辐射量[MJ/(m<sup>2</sup> · month)]; $\epsilon(x, t)$ 表示像元的实际光能利用率(gC/MJ)<sup>[10]</sup>。

(1) 光合有效辐射吸收量估算。光合有效辐射是植被进行光合作用的主要驱动力,植被吸收的光合有效辐射主要由太阳总辐射量和植被冠层对入射光合有效辐射的吸收系数决定<sup>[10]</sup>,其计算公式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中:SOL( $x, t$ )表示像元接收的总太阳辐射量(MJ/(m<sup>2</sup> · month));FPAR( $x, t$ )为植被光合有效辐射吸收比例<sup>[10]</sup>。

(2) 光能利用率估算。植被的光能利用率是指在一定时间内,单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比,只有在无任何限制的情况下,植被的光能利用率才能达到最大值,在现实条件下的最大光能利用率主要受到植被生长环境中温度和水分的影响<sup>[10]</sup>,其计算公式如下:

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon 1}(x, t) \times T_{\epsilon 2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $T_{\epsilon 1}(x, t)$ 和  $T_{\epsilon 2}(x, t)$ 代表温度对植被光能利用率的限制作用; $W_{\epsilon}(x, t)$ 表示水分胁迫系数; $\epsilon_{\max}$ 表示理想条件下植被的最大光能利用率(gC/MJ)<sup>[10]</sup>。

2.2.2 基于 TVDI 的改进 CASA 模型 Sandholt 在研究 NDVI-LST 的特征空间时,提出了一种基于 NDVI 与 LST 构建的温度—植被干旱指数(TVDI),来表征地表的湿润程度<sup>[14]</sup>,其中,特征空间的上边界定义为干边,下边界定义为湿边,TVDI 计算公式如下:

$$\begin{aligned} TVDI &= \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \\ LST_{\max} &= a_{\text{dry}} + b_{\text{dry}} NDVI \\ LST_{\min} &= a_{\text{wet}} + b_{\text{wet}} NDVI \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $LST_{\max}$  和  $LST_{\min}$  代表 NDVI 值所对应的最高(干边)和最低(湿边)地表温度;  $a_{\text{dry}}$ ,  $a_{\text{wet}}$  和  $b_{\text{dry}}$ ,  $b_{\text{wet}}$  分别代表干边和湿边方程的拟合系数。

CASA 模型中的水分胁迫系数  $W_e(x, t)$  由经验模型计算得到, 且由于气象站点插值得到的数据在时空连续性上存在一定的局限性, 本文利用基于遥感数据 NDVI-LST 构建的温度-植被干旱指数 (TVDI) 对原 CASA 模型中的水分胁迫系数进行校正, 以期提高模型估算精度。

### 2.2.3 分析方法

(1) 热点分析法。热点分析法是一种常见的局部空间聚集特征分析方法<sup>[15]</sup>, 通过统计学中  $Z$  得分值, 可以分析出研究区内冷热点空间分布, 冷点 ( $Z$  值  $< 0$  且越低, 代表低值聚类愈紧密) 为低值聚集区; 热点 ( $Z$  值  $> 0$  且越高, 代表高值聚类愈紧密) 为高值聚集区, 计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2}{n-1}}} \quad (7)$$

式中:  $\bar{X}$  为均值;  $S$  为标准差;  $n$  为空间单元的数量;  $X_j$  为空间单元  $j$  的属性值;  $W_{ij}$  为  $i$  和  $j$  间的空间权重。

(2) 趋势分析。趋势分析是基于最小二乘理论, 描述变量随时间变化趋势的一种方法<sup>[16]</sup>, 计算公式如下:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NPP_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (8)$$

式中:  $n$  为年份总数;  $i$  为年序数;  $NPP_i$  为第  $i$  年的 NPP 值; 趋势斜率  $k > 0$  时, 表示 NPP 值呈增加趋势, 反之代表 NPP 值呈减少趋势, 并利用 F 检验法对其显著性水平进行检验。

(3) 地理探测器。地理探测器是检测空间分异

性的一种方法<sup>[17]</sup>, 本文利用地理探测器对陕西省植被 NPP 变化驱动力进行因子探测和交互作用探测。影响因子的解释力 ( $q$ ) 值计算如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (9)$$

式中:  $h=1, 2, \dots, L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  为层  $h$  和全区单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  为层  $h$  和全区  $Y$  值方差;  $SSW$  和  $SST$  为层内方差之和和全区总方差,  $q$  值范围为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越高, 说明该因素对 NPP 的影响越大。

交互探测能够量化两个因子间的交互效应, 确定交互作用是否会增强或减弱对 NPP 的贡献, 或者因子间是否独立, 交互作用探测结果分类如下:

$$\begin{aligned} q(X_1) &> [q(X_1) + q(X_2)] \text{ 非线性增强} \\ q(X_1) &= [q(X_1) + q(X_2)] \text{ 相互独立} \\ q(X_1) &> \max[q(X_1), q(X_2)] \text{ 双因子增强} \\ \min[q(X_1), q(X_2)] &< q(X_1) < \max[q(X_1), q(X_2)] \text{ 单因子非线性减弱} \\ q(X_1) &< \min[q(X_1), q(X_2)] \text{ 非线性减弱} \end{aligned}$$

## 3 结果与分析

### 3.1 模型精度评价

本文利用 MOD17A3HGF 数据产品对改进前后 CASA 模型精度进行验证, 该数据集采用 MOD17 算法估算得到陆地生态系统年总 NPP 值, 已广泛应用于区域和全球 NPP 估算研究中<sup>[18-19]</sup>。本文对 2010—2020 年陕西省基于 TVDI 改进前后 CASA 模型估算的植被 NPP 以及 MODIS NPP 数据进行随机抽样, 验证其相关性, 结果如图 1 所示。基于 TVDI 改进后的 CASA 模型估算精度有所提升, 且模型估算得到的 NPP 值与 MODIS NPP 数据产品的相关性较强, 改进后  $R^2$  为 0.78, 相较改进前提升了 0.02。

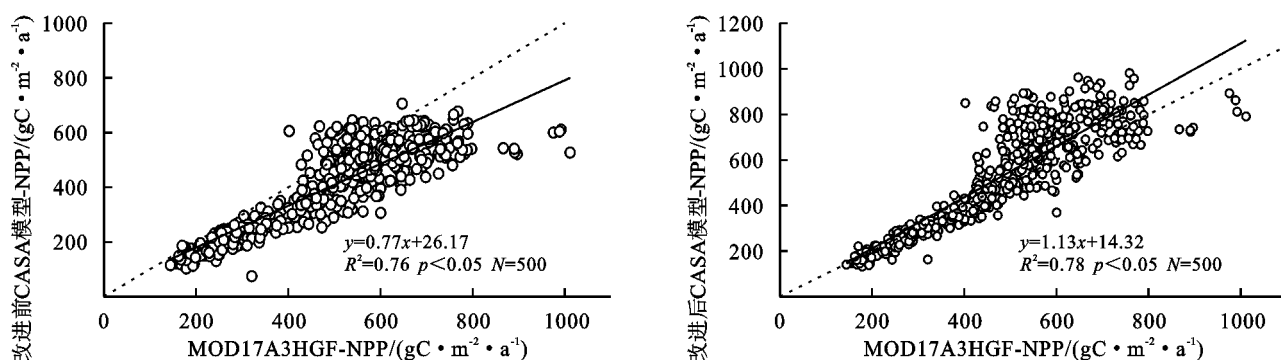


图1 改进前后 NPP 值与 MOD17A3HGF-NPP 的比较

Fig. 1 Comparison of NPP values with MOD17A3HGF-NPP before and after improvement



本文也与其他学者的相关研究进行了对比,如表 1 所示。

石志华等基于 CASA 模型,估算陕西省 2003—2012 年多年 NPP 均值为  $418.59\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})^{[20]}$ ;李萌萌以 CASA 模型为基础,模拟得到陕西省 2000—2013 年植被 NPP 年平均值为  $633.15\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})^{[21]}$ ;本文利用改进

后 CASA 模型模拟得到的陕西省植被 NPP 多年均值为  $392.46\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,与石志华等<sup>[20]</sup>估算得到的陕西省 NPP 值( $418.59\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )基本一致,并且处于其他各模型模拟结果 $[202.57\sim 474.8\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 范围内,因此本文模拟得到的陕西省 NPP 值具有较高的可靠性。

表 1 本文模拟 NPP 值与其他研究的比较  
Table 1 Comparison of simulated NPP values in this paper with other studies

数据/模型	研究时间	研究区域	NPP 均值/ $(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	文献
改进后 CASA 模型	2010—2020	陕西省	392.46	本文
CASA 模型	2000—2014	陕北风沙过渡带	202.57	倪向南等 <sup>[22]</sup>
CASA 模型	2000,2010,2020	陕西省黄河流域	267.53	Zhu 等 <sup>[23]</sup>
MOD17A3HGF	2000—2019	黄河流域	281.39	王娟等 <sup>[24]</sup>
MOD17A3	2000—2015	陕西省	344	王钊等 <sup>[25]</sup>
MOD17A3HGF	2000—2019	关中城市群	474.8	梁程等 <sup>[26]</sup>
CASA 模型	2003—2012	陕西省	418.59	石志华等 <sup>[20]</sup>

3.2 NPP 空间分布特征

基于改进后 CASA 模型得到陕西省 2010—2020 年植被 NPP 空间分布,受气候、植被、地形等多因素影响,陕西省植被 NPP 呈现出由陕南向陕北逐渐降低的分布格局,纬度地带性特征明显。陕西省多年 NPP 平均值介于  $9.2\sim 768.75\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,如图 2A 所示。NPP 低值主要集中在陕北长城沿线风沙地区,NPP 值介于  $9.2\sim 309.76\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,该地区自然环境恶劣,植被覆盖度低,且多为荒漠、草地等植被类型;黄土丘陵沟壑区植被 NPP 值较高,介于  $72.35\sim 579.31\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,少数 NPP 高值集中分布在延安市黄陵县、富县和黄龙县等南部周边区县;关中地区地势平坦、土壤肥沃,植被 NPP 值介于  $33.12\sim 716.04\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,高值主要集中在关中部和南部,而中部地区由于城市群密集导致 NPP 值较低;陕南秦巴地区雨热充沛,适宜植被生长,植被覆盖率较高,是陕西省 NPP 高值集中区域,NPP 值介于  $111.95\sim 768.75\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

利用热点分析法,进一步对陕西省各区县 2010—2020 年植被 NPP 空间分布情况进行分析,冷热点区域如图 2B 所示。陕西省植被 NPP 分布主要有 1 个热点区域和 2 个冷点区域,热点区域主要集中在宝鸡市的凤县、太白县、汉中的勉县、汉台区、城固县、留坝县、洋县、佛坪县和商洛市的镇安县,以及安康市的宁陕县、石泉县、汉滨区等各区县,该地区位于秦巴山区,植被类型较为丰富、森林覆盖度高,各区县植被 NPP 值均超过  $500\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。陕北榆林市的榆阳区、吴堡县、横山区、佳县、子洲县、绥德县、米脂县、清涧县以及子长市为全省植被 NPP 的冷点区域之一,各区县

植被 NPP 值普遍在  $175\sim 253.87\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,该区域自然环境恶劣,水土流失严重,植被覆盖度低,是全省植被 NPP 低值集中区域;另一冷点区域集中在西安市周边区县,主要为咸阳市的礼泉县、泾阳县、三原县、兴平市、渭城区和西安市雁塔区、灞桥区、临潼区、高陵区、阎良区和渭南市的临渭区,年平均植被 NPP 值在  $263\sim 374.19\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,该区域城市聚集度高,植被稀少,导致区域植被 NPP 值较低。

3.3 NPP 时序变化特征

陕西省 2010—2020 年植被 NPP 最小值、最大值以及平均值如表 2 所示。陕西省植被 NPP 平均值由  $331.02\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 逐步增加到  $405.74\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。本文按照等间距法,将陕西省单位面积内 NPP 均值以  $150\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区间长度,划分为 5 个等级并统计各等级面积占比,如图 3 所示。可以看出,2010 年 NPP 均值最低,为  $331.02\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,2014 年 NPP 均值最高为  $416.34\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,其他年份 NPP 均值均位于  $300\sim 410\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 范围内。NPP 均值在  $150\sim 600\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间的区域占全省总面积的  $62\%\sim 93\%$ ,最低值 $[\leq 150\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 和最高值 $[\geq 600\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 区间的 NPP 占比较少,且全省植被  $\text{NPP}\leq 150\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区间占比逐步缩小,表明低植被覆盖区域正在向中高植被覆盖区域过渡,植被生长环境得到有效治理,植被 NPP 值正在稳步提高。

陕西省月均 NPP 值整体呈现出先升高后降低的单峰型变化规律以及具有明显的季节性变化特征(图 4),春季(3 月、4 月、5 月)气温回暖,植被开始生长,NPP 值逐渐增大,介于  $17.37\sim 34.19\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;夏

季(6月、7月、8月)太阳辐射总量大,气温高降雨多,植被生长迅速,NPP值明显高于其他季节,介于 $59.03 \sim 78.63 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;秋季(9月、10月、11月)气温降低,日照时长减少,太阳总辐射量降低,植被生

长进入衰落和死亡期,NPP值位于春季和冬季之间,在 $18.10 \sim 27.39 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 范围;冬季(12月、1月、2月)寒冷干燥,雨雪稀少,植被NPP值在一年四季中最低,介于 $6.01 \sim 7.87 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

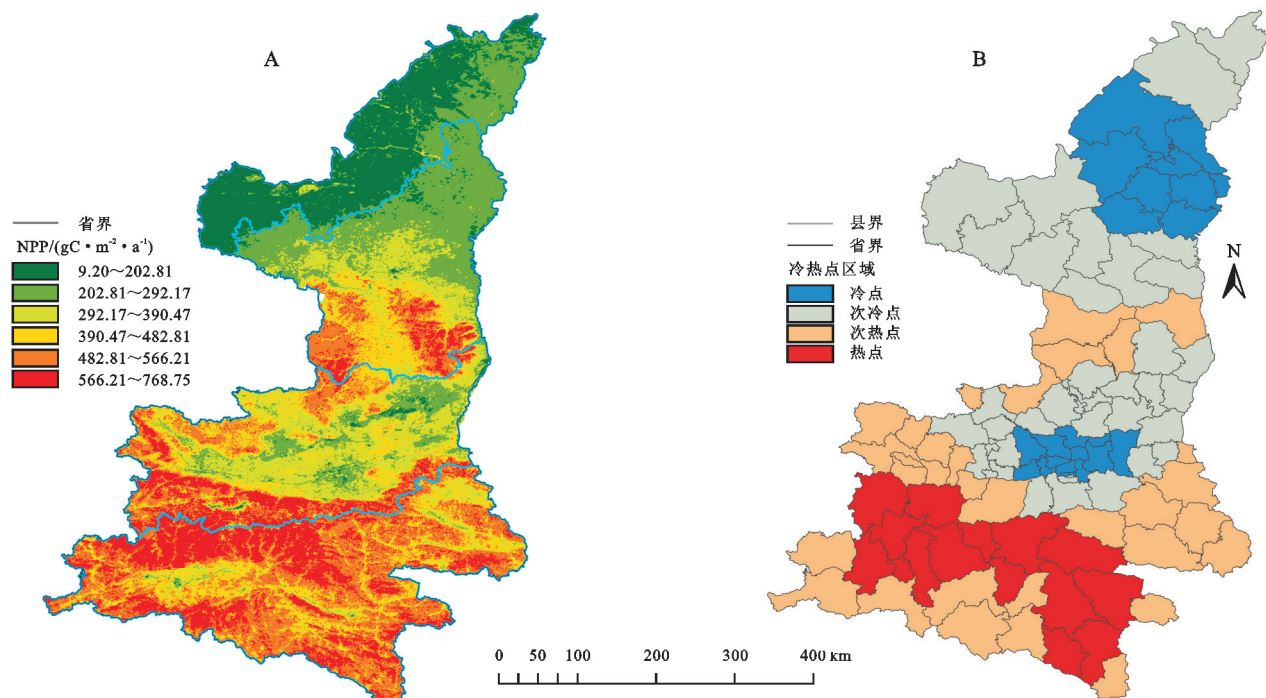


图 2 陕西省多年 NPP 均值空间分布及冷热点区域

Fig. 2 Map of the spatial distribution of multi-year NPP averages and cold hotspot areas in Shaanxi Province

表 2 陕西省 2010—2020 年 NPP 值

Table 2 NPP values for Shaanxi Province 2010—2020

年份	最小值/ ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
2010	13.95	909.93	331.02
2011	64.93	730.31	359.00
2012	14.16	873.79	403.07
2013	22.93	909.14	405.75
2014	64.43	893.99	416.34
2015	43.90	893.26	401.75
2016	66.19	865.40	407.71
2017	70.42	878.68	403.87
2018	63.65	843.79	384.64
2019	49.16	930.43	398.13
2020	3.03	962.47	405.74

利用线性回归分析方法对陕西省 2010—2020 年 NPP 变化趋势进行探究,并依据显著性水平将其划分为 5 个等级:显著增加( $\text{Slope} > 0, F \geq 10.56$ )、轻度增加( $\text{Slope} > 0, 5.117 < F < 10.56$ )、基本不变( $F \leq 5.117$ )、轻度减少( $\text{Slope} < 0, 5.117 < F < 10.56$ )、显著减少( $\text{Slope} < 0, F \geq 10.56$ )(图 5)。2010—2020 年,总体上呈稳定趋势,陕西省 83.3%的地区植被生长保持稳定趋势,NPP 值无显著变化;4.2%的地区呈增长态势,主要分布于陕北地区的榆林市西北部以

及延安市东北部的志丹县,该区域自实施退耕还林还草政策、防护林建设、封沙禁牧等系列生态文明建设工程以来,植被生长环境得到明显改善,植被覆盖率提高,NPP 值显著增加;12.5%的地区 NPP 呈下降趋势,主要分布在西安市周边区域以及秦巴山区的汉中市和安康市。城市扩张占用大量农田和草地,城市化发展破坏周边地区植被生长环境,导致区域植被覆盖度降低,因此西安市周边区域植被 NPP 降低趋势明显;汉中市、安康市地处巴山山脉附近,森林覆盖度高,植被 NPP 值受气温、降水等气候因素影响较大。

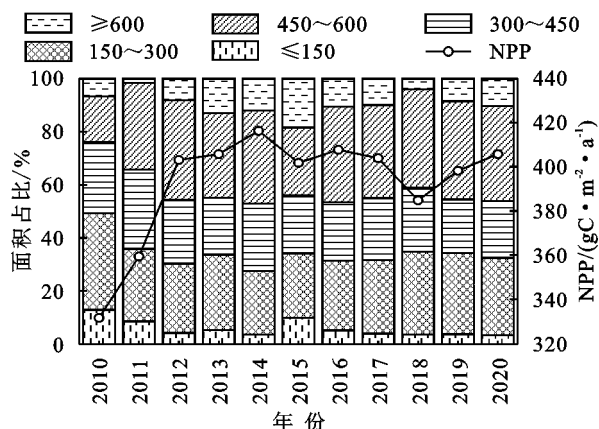


图 3 陕西省 NPP 各等级占比

Fig. 3 Percentage of NPP by grade in Shaanxi Province

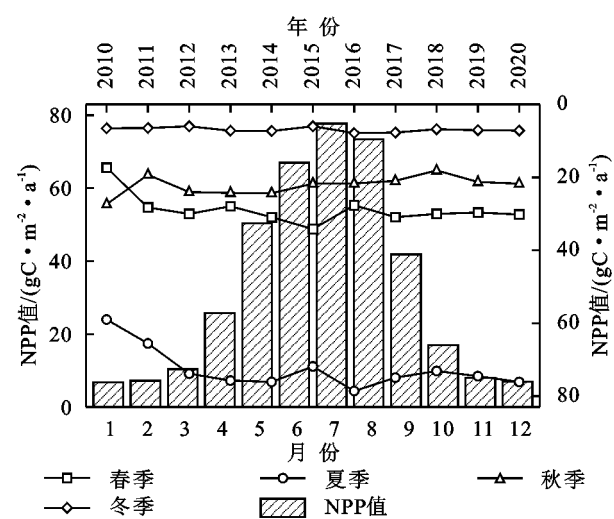


图 4 陕西省各季节 NPP 值、年均值  
Fig. 4 Shaanxi Province NPP values by season, annual average

3.4 NPP 驱动因子分析

本文从自然因素和人类活动两方面共选取降水、太阳辐射量、气温、坡度、土地利用类型、海拔、人口密度 7 个因子,利用地理探测器对陕西省 2010 年、2015 年和 2020 年植被 NPP 变化驱动力进行探究。因子探测结果如图 6 所示,比较 2010—2020 年各影响因子对植被 NPP 变化的  $q$  均值大小排序为:降水(0.68)>太阳辐射量(0.62)>土地利用类型(0.46)>坡度(0.35)>气温(0.17)>海拔(0.09)>人口密度(0.04)。2010 年、2020 年降水是 NPP 变化的主导因子,对陕西省植被 NPP 空间异质性的解释力最强, $q$  值分别为:0.72,0.66。2015 年陕西省植被 NPP 受太阳辐射量的影响力最强, $q$  值为 0.68。在地形因子中,坡度对于植被 NPP 变化的贡献率明显大于海拔因子。人类活动通过作用于改变土地利用类型,进而对植被 NPP 产生影响,土地利用类型对陕西省植被 NPP 变化的贡献率正在逐渐增强,2010—2020 年  $q$  值由 0.23 增长到 0.61。

本文利用交互探测研究各因子交互作用下对植被 NPP 变化的影响,交互探测结果(表 3)表明,驱动因子对陕西省植被 NPP 变化的影响不是独立的,任意两因子对 NPP 变化的贡献率均大于单一因子,说明与单因子相比,因子交互作用下对陕西省植被 NPP 变化的解释力进一步增强,主要表现为非线性增强或双因子增强。其中,降水与其他因子的交互作用在 2010 年、2015 年和 2020 年对植被 NPP 变化的解释力均大于 0.65,人口密度与其他所有因子的交互作用  $q$  值明显大于其作为独立因子时的  $q$  值。在 2010 年降水与太阳辐射量之间的交互作用对陕西省

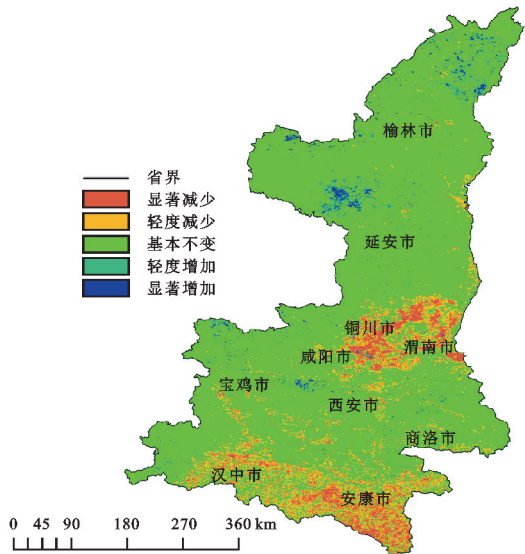


图 5 陕西省 2010—2020 年 NPP 变化趋势  
Fig. 5 Shaanxi Province, 2010—2020 NPP trend

植被 NPP 变化的影响大于其他因子之间的交互作用,土地利用类型与太阳辐射量间的交互作用在 2015 年和 2020 年是影响植被 NPP 变化的主要因素, $q$  值分别为:0.87,0.80,结合因子探测中,降水是陕西省植被 NPP 变化的主导因子,太阳辐射量单因子  $q$  值仅次于降水,土地利用类型  $q$  值也正在不断提升,更加说明降水、太阳辐射量和土地利用类型之间的交互作用对陕西省植被 NPP 变化的影响更大。

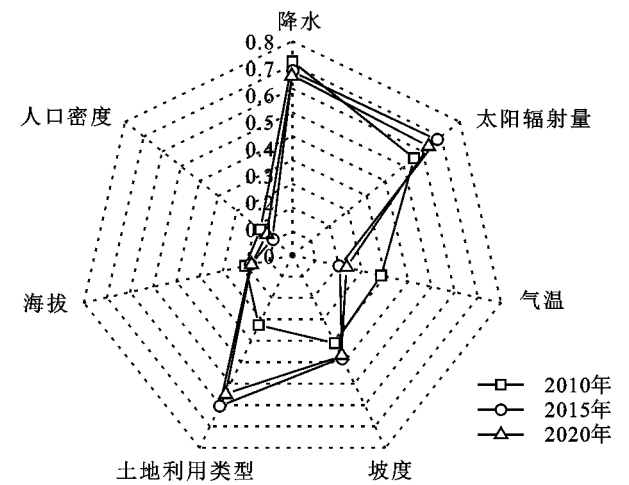


图 6 因子探测结果  
Fig. 6 Factor detection result

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文在朱文泉教授改进 CASA 模型的基础上,提出的基于 TVDI 改进 CASA 模型估算得到的植被 NPP 值与 MODIS NPP 值有较强的相关性,精度略高于原 CASA 模型,且陕西省植被 NPP 南高北低的



分布特征及年内单峰型变化趋势也与其他学者的研究结果相一致。但由于研究区域范围较大,植被覆盖类型复杂,在短时间内难以获取实测 NPP 值,因此本文缺少 CASA 模型改进前后估算得到的 NPP 值与实测数据的直接验证,这将影响模型精度评价结果。同时,陕西省地形地貌特征复杂、南北跨度较大、悬殊

的海拔差异对地表温度产生一定影响,进而对 TVDI 计算带来误差<sup>[22-28]</sup>。而本文在 TVDI 计算过程中,未考虑到研究区 4 种特殊的地貌类型,忽略了由于地形起伏差异对地表温度带来的影响,这将在一定程度上决定 TVDI 计算结果,从而对改进 CASA 模型的估算精度产生影响。

表 3 NPP 影响因子交互探测  $q$  值

Table3 NPP influence factor interaction detection  $q$ -value

因子	2010 年							2015 年							2020 年						
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$X_1$	0.07							0.01							0.04						
$X_2$	0.59	0.55						0.72	0.68						0.71	0.63					
$X_3$	0.19	0.59	0.10					0.13	0.81	0.08					0.16	0.80	0.08				
$X_4$	0.73	0.76	0.75	0.71				0.71	0.71	0.80	0.67				0.72	0.69	0.79	0.66			
$X_5$	0.34	0.65	0.42	0.74	0.23			0.63	0.87	0.69	0.85	0.61			0.59	0.80	0.63	0.80	0.55		
$X_6$	0.39	0.60	0.44	0.72	0.43	0.31		0.40	0.73	0.45	0.71	0.72	0.38		0.39	0.69	0.43	0.70	0.66	0.37	
$X_7$	0.33	0.62	0.51	0.75	0.60	0.52	0.28	0.20	0.81	0.46	0.78	0.78	0.46	0.11	0.27	0.78	0.52	0.76	0.72	0.46	0.13

注: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$  分别代表人口密度、太阳辐射量、海拔、降水、土地利用类型、坡度、气温。

此外,植被 NPP 与自然因素、人为因素间的关系是复杂多样的,气象、地形、人类活动等因素都会对植被 NPP 产生影响。气候变化通过作用于植被的光合作用、呼吸作用以及蒸腾作用等多个生理生态过程,调节植物代谢、群落生物量和生长季节长度直接或间接地影响区域植被 NPP 的生产,已有研究表明,当区域温度升高时,会促进植被的光合作用,提高植被 NPP 产量,但是温度过高又会使植被呼吸作用、蒸腾作用增强,从而加速土壤水分的散失以及干物质量的消耗,降低植被 NPP 生产;降水及光照等气候因子也会影响植被 NPP 变化,尤其是在干旱及半干旱地区,降水的增加对植被 NPP 积累有一定的促进作用,但当降水量超过植被生长所需时,又会对植被的生长发育产生不利影响,光照因子直接影响植被吸收的光合有效辐射量,进而对植被光合作用强弱产生影响<sup>[29]</sup>。气候因子对植被 NPP 变化的影响过程是复杂的,任何单一气候因子的变化会对 NPP 产量有促进或抑制作用,本文的交互探测结果也表明降水、光照、地形等多因子交互作用下,会对区域植被 NPP 变化产生一定影响。

人类活动对植被 NPP 的影响是双面的,植树造林、退耕还林以及三北防护林等生态保护工程对植被 NPP 增长具有促进作用,这些工程直接影响了区域土地利用类型的转变,将荒地、耕地等 NPP 产量较低的土地利用类型,改造成为草地、林地等高密度型植被覆盖区域,提高了植被覆盖度,进而促进区域植被 NPP 的提升。已有研究证实,通过退耕还林政策,我

国黄土高原地区的植被覆盖度正在逐渐提高,区域植被 NPP 产量较政策实施前显著增加,而城市扩张、过度放牧等人类活动占用了大量草地、农田等其他土地利用类型,降低植被覆盖度,进而会导致区域植被 NPP 量减少<sup>[30]</sup>。

本文在分析陕西省 2010—2020 年植被 NPP 年际变化趋势时发现,省内大部分面积植被 NPP 值无显著变化,秦巴山区的汉中市和安康市植被 NPP 呈降低趋势,这与其他研究中陕西省全省植被 NPP 呈增加趋势相违背<sup>[31]</sup>,产生这种结果的原因可能是因为本文的时间尺度与其他研究不完全一致,数据的输入、模型的选取也会为植被 NPP 估算带来不确定性,且气象因子、人类活动与植被 NPP 变化之间的复杂响应关系,也会对 NPP 变化趋势产生影响,因此对于本文中 2010—2020 年陕西省秦巴山区安康市和汉中市植被 NPP 值出现降低趋势的真实原因,还有待进一步研究。

## 4.2 结论

(1) 陕西省 2010—2020 年 NPP 空间分布格局具有一定的纬度地带性特征,南北分布差异明显,陕南地区植被 NPP 值明显高于陕北黄土高原丘陵沟壑区以及风沙区;

(2) 陕西省植被 NPP 冷热点区域分布较为明显,陕北榆林市和西安市周边为两个冷点区;陕南秦巴山区的安康市、汉中市等各区县为热点区域;

(3) 陕西省年内植被 NPP 表现出明显的单峰型



曲线变化趋势以及季节性变化特征;

(4) 陕西省植被 NPP 变化是受到降水、太阳辐射量及土地利用类型多因子交互作用驱动力的共同影响。

#### 参考文献 (References):

- [1] 朴世龙,方精云,郭庆华.1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(4):563-569.
- Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982—1999 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001,37(4):563-569.
- [2] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 46(4):84-93.
- [3] 陆逸.基于 MODIS 数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
- Lu Y. Estimation of vegetation net primary production in the Three Gorges Reservoir Region based on the MODIS data [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [4] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):296-300.
- Zhu W Q, Chen Y H, Xu D, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005,24(3):296-300.
- [5] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach [J]. Ecological Modelling, 1999,122(3):239-255.
- [6] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. Journal of Applied Ecology, 1972,9(3): 747-766.
- [7] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993,7(4):811-841.
- [8] Xiao F J, Liu Q F, Xu Y Q. Estimation of terrestrial net primary productivity in the Yellow River Basin of China using light use efficiency model [J]. Sustainability, 2022,14(12):7399.
- [9] Fang P, Yan N N, Wei P P, et al. Aboveground biomass mapping of crops supported by improved CASA model and Sentinel-2 multispectral imagery [J]. Remote Sensing, 2021,13(14):2755.
- [10] 朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D].北京:北京师范大学,2005.
- Zhu W Q. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing and its relationship with global climate change [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005.
- [11] 郭艳菊,马晓静,许爱云,等.宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征[J].生态学报,2022,42(4):1571-1581.
- Guo Y J, Ma X J, Xu A Y, et al. Spatial characteristics of soil moisture and vegetation in desertification grassland in eastern Ningxia sand-wind area, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1571-1581.
- [12] Jin C, Qin Q M, Zhu L, et al. TVDI based crop yield prediction model for stressed surfaces [C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007:4656-4658.
- [13] 王涛,崔晓临,杨强.陕西省气温降水变化特征的区域差异[J].云南地理环境研究,2013,25(6):27-34,57.
- Wang T, Cui X L, Yang Q. Regional difference of temperature and precipitation characteristic in Shaanxi province [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013,25(6):27-34,57.
- [14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2/3):213-224.
- [15] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Perspectives on Spatial Data Analysis, 2008:127-145.
- [16] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.
- Xu J H. Mathematical methods in modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [18] 刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.
- Liu W R, Li X T, Li T, et al. Spatiotemporal variations of forest NPP and related driving factors based on MODIS and CASA models in Yichun [J]. Chinese

- Journal of Ecology, 2022, 41(1):150-158.
- [19] Tishkov A A, Krenke A N, Titova S V, et al. Variations in the aboveground phytomass in northern Eurasia in the 21 st century[J]. Doklady Earth Science, 2021, 497(2):348-353.
- [20] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 等. 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):206-211, 345.
- Shi Z H, Liu M Y, Wu J L, et al. Spatial-temporal analysis of vegetation net primary productivity in Shaanxi province based on CASA model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1):206-211, 345.
- [21] 李萌萌. 基于 CASA 模型的陕西省 NPP 反演及其与气象因子的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- Li M M. NPP retrieval based on CASA model and their correlation with climatic factors in Shaanxi province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.
- [22] 倪向南, 郭伟, 乔凯. 陕北风沙过渡带植被净初级生产力变化特征及原因[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4):889-898.
- Ni X N, Guo W, Qiao K. Spatial and temporal patterns of net primary productivity and their attribution in wind drift sand region in northern Shaanxi[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4):889-898.
- [23] Zhu Z Y, Mei Z K, Li S L, et al. Evaluation of ecological carrying capacity and identification of its influencing factors based on remote sensing and geographic information system: A case study of the Yellow River Basin in Shaanxi[J]. Land, 2022, 11(7):1080.
- [24] 王娟, 何慧娟, 董金芳, 等. 黄河流域植被净初级生产力时空特征及自然驱动因子[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6):213-222.
- Wang J, He H J, Dong J F, et al. Spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in the Yellow River Basin in 2000-2019 and its natural driving factors[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6):213-222.
- [25] 王钊, 李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6):1876-1884.
- Wang Z, Li D K. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6):1876-1884.
- [26] 梁程, 苏惠敏, 张伊琳, 等. 2000—2019 年关中平原城市群植被 NPP 时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4):293-300.
- Liang C, Su H M, Zhang Y L, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of net primary productivity of Guanzhong plain city cluster from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):293-300.
- [27] 董庆栋, 陈超男, 殷浩然, 等. 秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(3):1090-1101.
- Dong Q D, Chen C N, Yin H R, et al. Vegetation greenness characteristics in Qinling-Daba Mountains and its response to surface hydrothermal[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3):1090-1101.
- [28] 冉琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):32-36.
- Ran Q, Zhang Z X, Zhang G P, et al. DEM correction using TVDI to evaluate soil moisture status in China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2):32-36.
- [29] Michaletz S T, Cheng D L, Kerkhoff A J, et al. Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients[J]. Nature, 2014, 512:39-43.
- [30] Wei X D, Yang J, Luo P P, et al. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions [J]. Ecological Indicators, 2022, 138:108834.
- [31] 王娟, 何慧娟, 卓静, 等. 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):264-269.
- Wang J, He H J, Zhuo J, et al. Analysis on relationship between net primary productivity and evapotranspiration based on MODIS data in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):264-269.