

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王江涛,杨永崇,杨梅焕. 基于地理探测器的黄土高原 NPP 时空变化及驱动力研究[J]. 西安理工大学学报,2023,39(1):12-20.

WANG Jiangtao, YANG Yongchong, YANG Meihuan. Spatial and temporal variation and driving forces of NPP on the Loess Plateau based on Geodetector[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1):12-20.

基于地理探测器的黄土高原 NPP 时空变化及驱动力研究

王江涛, 杨永崇, 杨梅焕

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安, 710054)

摘要: 探究黄土高原人为扰动和自然条件作用对植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 的影响, 基于遥感数据、气象数据和改进 CASA 模型定量估算黄土高原植被 NPP; 采用趋势分析、地理探测器等方法, 研究自退耕还林还草等一系列生态工程后, 黄土高原植被 NPP 时空变化特征及驱动因素。结果表明: 黄土高原植被 NPP 空间异质性显著, 总体呈现东南高西北低的特点, 黄土高原 20 年植被 NPP 均值为 $204.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 呈波动增长趋势, 平均上升速率为 $3.194 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同土地利用类型 NPP 存在较大差异, 草地 NPP 总量最高, 其次是耕地和林地。其中耕地面积 2019 年较 2000 年减少 $17\,943 \text{ km}^2$, 但 NPP 总量却同比增长 $9 \times 10^6 \text{ gC}$ 。降水是黄土高原的 NPP 变化的主导因子, 其次是土地利用类型, 且两者交互作用呈非线性增强。2000 年后黄土高原 NPP 解释力最高的交互因子由降水和高程转为降水和土地利用类型, 说明人为因子对黄土高原 NPP 的影响在逐年增强。

关键词: 地理探测器; CASA 模型; 地表水分指数; 趋势分析; 驱动力分析

中图分类号: G948.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)01-0012-09

Spatial and temporal variation and driving forces of NPP on the Loess Plateau based on Geodetector

WANG Jiangtao, YANG Yongchong, YANG Meihuan

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To explore the effects of human disturbance and natural conditioning on the net primary productivity (NPP) of vegetation on the Yellow Plateau, and quantitatively estimate NPP of vegetation on the Loess Plateau based on remote sensing data, meteorological data and improved CASA model. Using the methods for trend analysis and geographic detector, we study the spatio-temporal variation characteristics and driving factors of NPP on the Loess Plateau after a series of ecological projects such as returning farmland to forest and grassland. The results shows that the spatial heterogeneity of NPP on the Loess Plateau is significant, with the overall characteristics of high NPP in southeast and low NPP in northwest. The average NPP of the Loess Plateau in 20 years is $204.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The average rate of increase is $3.194 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. There are large differences in NPP between land use types, with grassland having the highest total NPP, followed by cropland and woodland. The cultivated land area is decreased by $17\,943 \text{ km}^2$ compared

收稿日期: 2022-09-27; **网络首发日期:** 2022-12-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.N.20221213.0940.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501571)

第一作者: 王江涛, 男, 硕士生, 研究方向为地理空间信息技术与应用。E-mail: 814752154@qq.com

通信作者: 杨永崇, 男, 博士, 教授, 研究方向为地理空间数据可视化。E-mail: yang_yongch@163.com

with 2000 in 2019, but the total NPP is increased by 9×10^6 gC year-on-year. Precipitation is the dominant factor for NPP change on the Loess Plateau, followed by land use type, with the interaction non-linearly enhanced. The interaction factor with the highest explanatory power for NPP on the Loess Plateau shifts from precipitation and elevation to precipitation and land use type after 2000, indicating that the influence of anthropogenic factors on NPP on the Loess Plateau increases year by year.

Key words: geodetector; CASA model; land surface water index; driving force analysis; trend analysis

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP),是指植物在单位时间和面积内产生积累的有机干物质总量^[1]。也是陆地植被固碳能力的重要指标之一^[2]。NPP 的估算方法有通过建立气候因子与 NPP 之间的回归分析模型,该模型仅考虑到温度、降水对 NPP 的影响,常用来计算自然植被气候生产量,但一些学者认为其缺乏理论基础^[3]。有以生态循环模型为基础,通过多源遥感数据建立的遥感过程模型,其理论体系相对完整,结构更加严谨,但模型较为复杂,需要调整模型状态变量来提高估算精度,不适用于大尺度估算^[4]。光能利用率模型是基于植被通过光合作用将吸收的能量转化为有机碳的效率来估算植被 NPP,适用于区域场景 NPP 的估算。精度受光合有效辐射和光能转换率两个因子的影响,其中的水分胁迫指标的确定是光能利用率模型精度估算的重点^[5]。光能利用率模型中的 CASA 模型充分考虑植被生长的环境条件和植被自身特征,在国内外得到广泛应用^[6-8]。同时也有相当多的学者基于 MODIS NPP 产品数据运用诸如趋势分析法、Hurst 指数、变异系数法等方法研究不同尺度下 NPP 的时空变化及与气温、降水等自然因子的相关性^[9-10]。

近年来国内外诸多学者用不同的分析方法例如地理探测器、相关分析法等探讨自然因素、人为因素对区域 NPP 的影响。王娟等^[11]研究认为自然驱动因子中的气温、降水、海拔高程对黄河流域均有影响且驱动力影响差异明显。邵嘉豪等^[12]研究表明近年来人为活动对山西省 NPP 变化产生了较大的扰动。孙治娟等^[13]研究认为自然因素对云南省 NPP 影响强于人为因素,但人为活动对 NPP 的影响在逐年增强。史晓亮等^[14]研究认为降水是黄土高原植被 NPP 主要自然影响因素。穆少杰等^[15]研究认为,不同植被类型 NPP 对气候敏感存在差异性,林地 NPP 主要受到温度限制,耕地和草地 NPP 主要受到降水限制。张佑铭等^[16]研究认为高度、土地利用变化的交互作用对黄土高原植被 NPP 空间异质性分布有着重要作用。杨丹等^[17]研究表明人类活

动在黄土高原生态改善方面发挥着重要作用。Qi 等^[18]研究表明降水对 NPP 影响相对复杂,温度对 NPP 起到抑制作用,并且气候变化和人类活动对 NPP 的影响均表现出较大的空间异质性。Yang 等^[19]研究表明与气候变化相比,人类活动对植被 NPP 总量增加具有积极作用。上述学者的研究内容和成果揭示了不同自然因子和人为因子对黄土高原 NPP 的影响情况,将为后续研究黄土高原生态变化和陆地碳循环等方面提供一定的理论依据。但是,此前关于植被 NPP 时空动态的研究往往存在时间尺度短、空间分辨率低且 NPP 数据采用传统 CASA 模型或 MODIS MOD17A3HGF 数据产品,存在数据精度不足等问题。并且关于人为扰动与自然条件的具体耦合因素对区域 NPP 的影响研究还比较少^[20]。深入探讨黄土高原植被 NPP 时空演变背后的驱动因子,对区域碳循环以及生态恢复和管理仍具有重要意义。本研究采用空间分辨率 500 m 并且在像元尺度表现更佳的改进 CASA 模型解决了此前表达不力的问题,探究黄土高原植被 NPP 近 20 年时空分布变化及自然因子和人文因子耦合对其变化的影响

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原($33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54' \sim 114^{\circ}33'E$)地处我国西北部,总面积约为 62×10^4 km²,地势西高东低(见图 1)。属温带大陆性季风气候,雨热同期。地形破碎,千沟万壑。储藏有丰富的煤、天然气等自然资源。该区域生态环境脆弱,对全球气候变化响应十分敏感。程晓鑫等^[21]的研究结果表明黄土高原气候受全球气候变化的影响,表现为降水增加、气温不再升高、风速降低和湿度减小等特点。自 1999 年实行退耕还林等一系列生态工程以来,黄土高原的植被覆盖度得到了一定程度的恢复,多位学者研究表明黄土高原 NPP 总体呈增加趋势,逐渐成为我国植被固碳的重要区域。

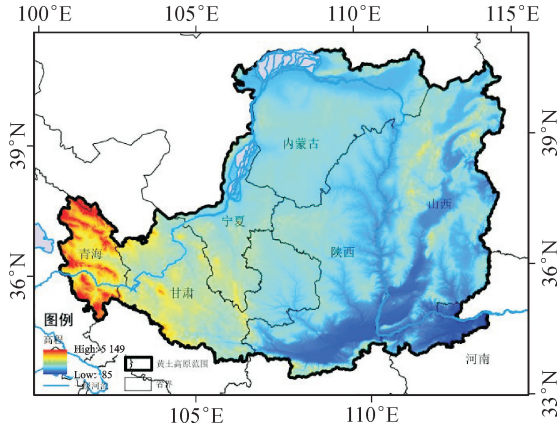


图 1 黄土高原高程水系图

Fig. 1 Elevation drainage system of the Loess Plateau
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

1.2 数据来源与预处理

MODIS 遥感数据产品包括 MOD13Q1、MOD09A1、MCD12Q1 和 MOD17A3HGF,数据均来自于美国 NASA 数据服务中心(<https://lpdaac.usgs.gov>),MOD13Q1 和 MOD09A1 采用最大值合成法(maximum value composite MVC)得到逐月栅格数据。气温、降水和日照时长数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),基于反距离权重插值法,得到气象栅格数据。太阳辐射数据根据日照时长数据,利用联合国粮农组织推荐使用的 Angstrom 公式计算得到逐日太阳辐射。运用简单 Kriging 插值^[22],逐日加和得到月总太阳辐射数据。社会经济数据采用中科院资源环境与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的人口密度数据和 GDP 数据集。黄土高原矢量数据来源于国家地球系统分中心黄土高原中心(<http://loess.geodata.cn>)。土地利用数据采用武汉大学杨杰等^[23]发布的空间分辨率 30 m 逐年中国土地覆盖数据集(CLCD),利用众数聚合法重采样为 1 km,这种方法能够更好地保留优势类别^[24]。

1.3 CASA 模型

CASA 模型主要受光合有效辐射 PAR 和光能利用率 ϵ 两者的影响,本文采取优化水分胁迫系数后的 CASA 模型实现 NPP 估算。计算公式为:

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

1.3.1 光合有效辐射估算

光合有效辐射由太阳辐射和植被吸收光合有效辐射 ϵ 的比例共同决定,公式为:

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

式中: $SOL(x, t)$ 表示月总太阳辐射量, $MJ \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$ 。通过计算日太阳辐射 $SOL(x, t)$,逐日加

和可得。

1.3.2 光能利用率估算

光能利用率是指植物吸收光合有效辐射转换为有机碳的效率,公式为:

$$\epsilon(x, t) = \epsilon_{\max} \times T_1(x, t) \times T_2(x, t) \times W_t(x, t) \quad (3)$$

式中: $T_1(x, t)$ 、 $T_2(x, t)$ 表示温度胁迫系数; $\epsilon_{\max}$ 表示植被在温度、水分和光照条件都充分的状态下,植被通过光合作用吸收太阳辐射转换有机碳的最大效率; $W_t(x, t)$ 表示水分条件对植被光能转换率的影响。传统 CASA 模型采用土壤水分蒸散发模型,需要众多复杂土壤参数,朱文泉等^[25]的改进 CASA 模型通过计算气温降水得到的区域实际和潜在蒸散发数据作为水分胁迫系数,被众多学者采用。一些学者将地表水分指数(land surface water index, LSWI)引入 CASA 模型中。相关研究显示使用 LSWI 作为水分胁迫系数,更加适用于区域尺度的 NPP 监测^[26]。在像元尺度的全国 NPP 监测中,优化后的 CASA 模型像元尺度上表现明显好于传统模型^[27]。

$$W_{\epsilon} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\max}} \quad (4)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (5)$$

式中: $LSWI_{\max}$ 表示单个像元在一年内的最大值,通过最大值合成得到; ρ_{nir} 与 ρ_{swir} 分别代表 MODIS 产品数据的近红外与短波红外波段。本研究采用 Bao 等^[28]提出的改进算法,计算公式如下:

$$W_t(x, t) = \left(1 - \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\max}}\right) + 0.5 \quad (6)$$

1.4 统计与分析

1.4.1 植被 NPP 的变化趋势

本文利用一元线性回归性检验(趋势分析法)逐像元研究黄土高原年植被初级生产力时序变化是否存在单调性变化趋势,计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (iNPP_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n (iNPP_i)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (7)$$

式中; θ_{slope} 表示变化趋势; $n=20$ 为研究时间区间; NPP_i 为第 i 年植被 NPP。 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 表示 NPP 减少, $\theta_{\text{slope}} > 0$ 表示 NPP 增加。显著性检验使用 F 检验。

1.4.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其因变量空间异质性驱动力的方法^[29]。计算公式为:

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

式中 q 为分异性因子 ($0 < q < 1$)。 q 越大表示数据的分异性在空间上更明显,对 NPP 空间异质性的解释力越强,在多因子相关性分析问题的研究中,地理探测器具有更好的解释力,分析精度和结果也较传统的 Person 相关系数法更为全面^[30]。

气温和降水是气候因子中两个非常重要的因素,它们的变化直接影响到区域 NPP 的积累。地形因子考虑海拔是因为海拔因素直接影响植被垂直分布的水热组合,从而造成植 NPP 垂向分布格局的差异。人类活动和气候变化对植被 NPP 的影响复杂多样,可能会产生相互抵消等作用^[31],因此细化人类活动对研究人为扰动对 NPP 的影响至关重要。土地利用类型受人类干扰强烈,是影响区域 NPP 变化的重要原因。人口密度和 GDP 可以在一定程度反映城市扩张水平和经济发展水平,可以反映区域受人类活动影响的程度。故选取气温、降水、高程、人口密度、GDP、土地利用类型作为自变量因子。

2 结果与分析

2.1 估算结果验证

采用 MOD17A3HGF NPP 产品数据集对估算结果进行验证,大量国内外研究学者已经证明这种间接验证法具有一定的可靠性^[32-34]。将优化 CASA 模型估算的 NPP 数据和 MOD17A3HGF NPP 数据分别合成 2000—2019 多年均值栅格数据,创建 10 km×10 km 渔网,获取渔网中心点对应的 MOD17A3HGF NPP 数据和 CASA 模型估算 NPP 数据的像元值,由于 MOD17A3HGF NPP 数据集水体 NPP 估算存在异常值,需剔除水体异常值。剩余 65 378 组数据进行相关性分析。

结果表明优化后 CASA 模型估算与 MOD17A3HGF 具有紧密的正相关关系 ($R^2 = 0.61$, $P < 0.01$),见图 2。

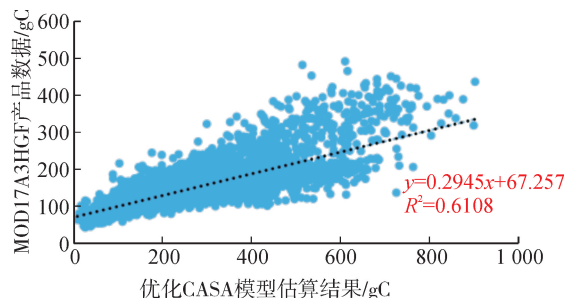


图2 CASA 模型 NPP 与 MOD17A3 产品精度验证

Fig. 2 Accuracy verification of CASA model NPP and MOD17A3 products

本研究通过优化 CASA 模型估算的植被类型 NPP 均值均在实测 NPP 数据范围内,且在空间分布具有相似的分布特征,表明本研究使用的优化后 CASA 模型估算结果较为可靠。

2.2 黄土高原 NPP 时空变化特征分析

2.2.1 黄土高原 NPP 空间分布特征

黄土高原年 NPP 均值(见图 3)总体呈现西北低,东南高的分布特点。根据前人研究结果^[35],本研究根据单元格网 NPP 产量进行等级划分, $[0, 200]$, $(200, 500]$, $(500, \infty)$, 单位 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 分别为低值区、中值区、高值区。高值区主要分布在山西省的吕梁山脉和太行山脉两侧、陕西省甘泉县、宝塔区以南地区以及黄土高原青海省南部的区域。低值区域主要分布在甘肃省的景泰县、靖远县以及宁夏的中卫县和中宁县以及内蒙古的鄂托克旗西北部和杭锦旗的北部地区。经统计分析,NPP 低值区域面积仅占全黄土高原总面积的 23.9%,高值区域面积占全域 38.7%。

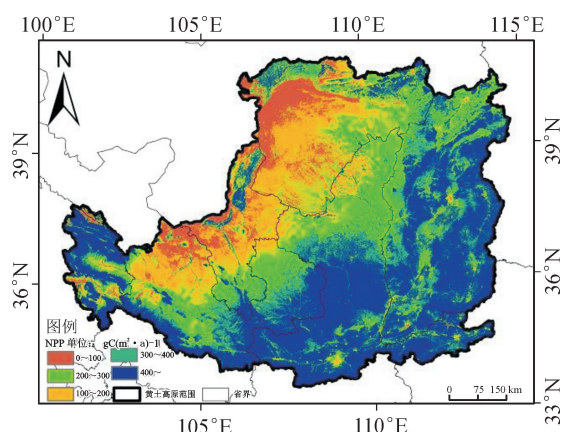


图3 2000—2019 年黄土高原 NPP 均值分布图

Fig. 3 Mean distribution of NPP in the Loess Plateau from 2000 to 2019

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

NPP 低值区主要分布在平均海拔 1 041 m 的区域,高于其他区域且地势起伏大。多年平均降水 304.265 mm,低于其他区域。多年平均气温为 8.11℃,多年平均气温低于其他区域。植被覆盖类型主要为戈壁荒漠和牧草地,植被覆盖低。在一定程度上说明了 NPP 低值区海拔较高,植被生长的水热条件不充分,有机物积累能力比较弱。而 NPP 高值区植被类型主要为针叶林、灌丛和耕地,降水充沛、温度适宜有利于植物有机物积累。

2.2.2 黄土高原 NPP 空间变化特征

根据 NPP 变化率及变化趋势检验可知,像元尺度上变化率呈现出由四周向中部地区逐渐增加的趋势(见图 4),增长率高的区域出现在陕北地区和宁夏南部

地区,负增长区域主要在青海海北地区、山西晋中区域、陕西关中区域以及内蒙鄂尔多斯地区。显著增长区域(见图 5)主要分布在陕北地区、甘肃南部地区、青海南部山区、宁夏南部山区。近 20 年显著增长区域面积约占 86.7%,山西晋中、青海海北和海西部分地区以及内蒙鄂尔多斯地区呈现显著减少,这些地区属于煤炭资源富集区域。这些区域的土地利用类型由耕地、荒地逐渐转变为建设用地。可能与城镇化发展或煤炭开采导致土地植被破坏有关。

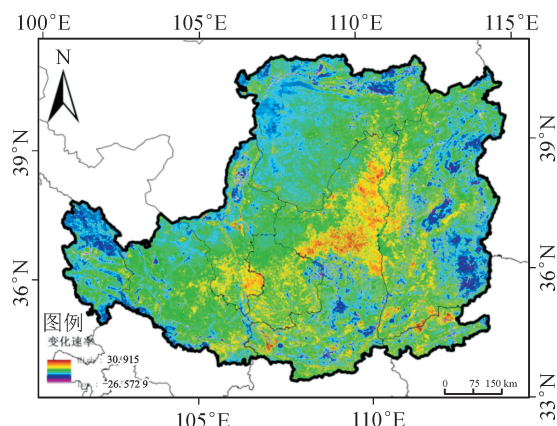


图 4 2000—2019 黄土高原 NPP 变化率

Fig. 4 Change rate of NPP in the Loess Plateau from 2000 to 2019

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

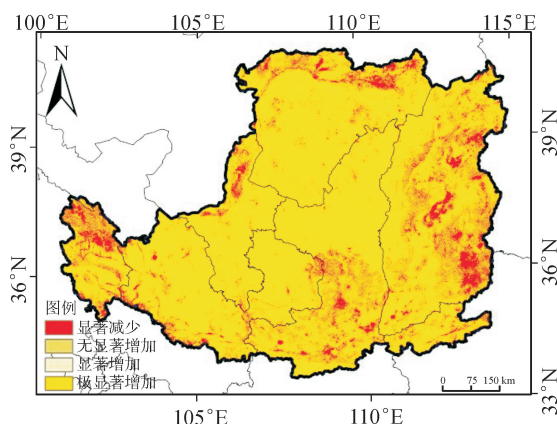


图 5 黄土高原 2000—2019 年变化趋势显著性(F 检验)

Fig. 5 Significance of change trend in Loess Plateau from 2000 to 2019 (F-test)

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

2.2.3 黄土高原 NPP 时间变化特征

黄土高原 NPP 均值从 2000 年的 $160.94 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 波动上升至 2019 年的 $225.1523 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (见图 6);平均值为 $204.04 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年平均增加速率为 $3.1947 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ($R^2 = 0.754, P < 0.01$);黄土高原及区域内各省的均值增加趋势基本一致。从

2001 年出现低值后呈现稳步增长趋势。

在不同 NPP 区域变化当中,低值区面积以每年 778 km^2 的速率持续缩减($R^2 = 0.798, P < 0.01$),中值区($200 \sim 400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)。每年 663 km^2 的速率持续增加,在高值区部分以每年 115 km^2 的速率增加(见图 6)。

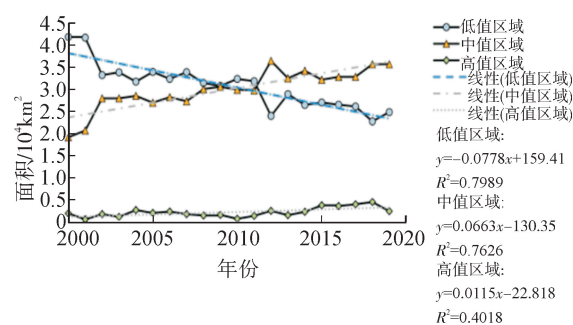


图 6 2000—2019 年不同区域 NPP 变化趋势

Fig. 6 Trends of NPP in different regions from 2000 to 2019

主体面积也由低值区逐步过渡到中值区,NPP 主要集中在 $200 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 到 $400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 区间。表示黄土高原植被 NPP 总量逐年增加,且低值区 NPP 增加显著。

2.3 NPP 变化与各因素相关性分析

2.3.1 土地利用因素

不同土地利用类型年际 NPP 差异明显(见表 1),从 2000 到 2019 年黄土高原土地利用类型发生较大变化。其中耕地、灌木、戈壁荒漠面积均有不同程度的减少,除耕地外,灌木和戈壁荒漠的 NPP 均值和总量均有损失,耕地的 NPP 均值和总量比 2000 年有所增加。林地、水域、建设用地面积增长显著,与此同时林地、水域、建设用地对应的 NPP 均值和总量也均有增长。在不同的土地利用类型中,NPP 均值最高是林地在 $330 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上,其次是灌木和耕地。其中林地的光照条件好,光能利用率高,植被光合作用较活跃,生物量累计较高,因此使得林地 NPP 均值变高。同时草地、耕地和林地这三大用地类型也是黄土高原主要 NPP 来源,三者 NPP 总量在 2000 年和 2019 年分别占 NPP 总量的 97.6% 和 98.2%。

2.3.2 气象因素

从 2000 年起,黄土高原降水均值随植被覆盖提高逐年稳步增加,而气温变化不明显(见图 7)。可能是由于降水增多对局部气候的调节功能使得温度没有显著变化。年均降水和 NPP 有显著相关性($R^2 = 0.526, P < 0.05$),因此降水可能是黄土高原植被 NPP 增加的主要原因之一。稳定的温度也给植被生长提供了适宜的环境温度,良好的水热条件也使得黄土高原 NPP 逐年增加。

表1 2000 年和 2019 年黄土高原各用地类型面积与对应 NPP 统计

Tab.1 Area and corresponding NPP statistics of land use types on the Loess Plateau in 2000 and 2019

类型	NPP 均值/ $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$		面积/ km^2		NPP 总量/ 10^5g C	
	2000 年	2019 年	2000 年	2019 年	2000 年	2019 年
耕地	176.179	243.440 3	198 374	180 431	349.494	439.241 8
林地	306.456	333.599 0	77 126	89 312	236.357	297.944 0
灌木	321.453	329.376 6	3 798	1 949	12.208	6.419 5
草地	124.567	194.471 6	303 096	310 621	377.558	604.069 8
水域	99.634	171.514 5	2 247	3 031	2.238 7	5.198 6
冰/雪	22.642 3	17.568 7	163	78	0.036 1	0.013 7
戈壁荒漠	33.012	63.076 4	28 582	19 343	9.435 6	12.200
建设用地	158.015	206.796 9	10 125	18 757	15.999 1	38.788

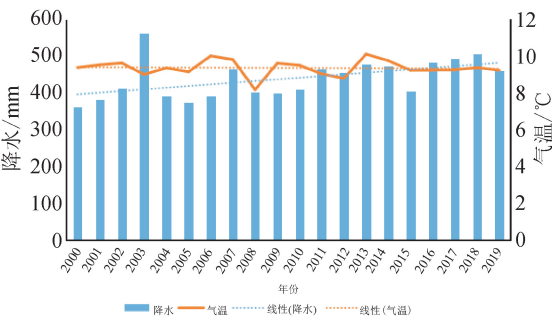


图7 2000—2019 年均气温降水变化图

Fig.7 Variation of average annual temperature and precipitation from 2000 to 2019

2.3.3 地理探测器

从因子探测器的结果来看,各年份的主导因子均为降水,代表年份解释力分别为 0.458、0.400、0.405、0.442 5 和 0.310(见图 8)。而从不同年份各因子的 q 均值大小来看:降水(0.401 4)>土地利用(0.324 5)>气温(0.146 8)>高程(0.076)>人口密度(0.064)>生产总值(0.021),表明降雨和土地利用变化是 NPP 变化的最主要驱动力。

交互作用探测器结果显示(见表 2),双因子交互后的影响力明显高于单因子,且任意两个因子交互结果呈现出双因子或非线性增强的特点,这说明黄土高原 2000—2019 年植被 NPP 的变化受到多个

因子的协同影响,并非受单一因子控制。将各代表年份的交互因子影响值进行排列,可以看到 2000 年降水和高程在交互后有最高的解释力,达到了 0.604。2005 年、2010 年、2015 和 2019 年降水和土地利用因子在交互后的影响值最高,分别为 0.556、0.560、0.584 和 0.457。从最终结果来看,虽然降水仍为 NPP 变化的主导因子且强于人为扰动因素,而随着时间的变化,降水因子加上土地利用的交互解释力在不断上升,说明人为扰动对 NPP 值变化的影响力在逐渐增强。

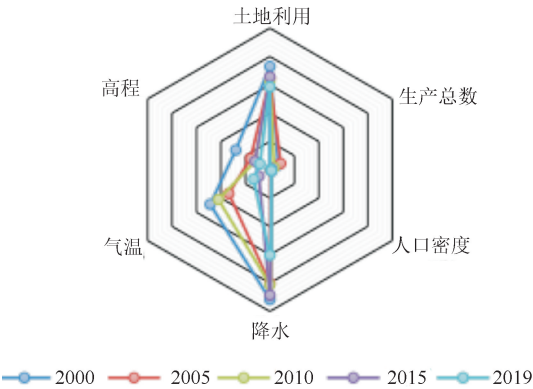


图8 不同因子解释力分布

Fig.8 Distribution of explanatory power of different factors

表2 各年份主导交互因子情况

Tab.2 Dominant interaction factors in each year

年份	主导交互因子 1		主导交互因子 2		主导交互因子 3	
	因子名	影响值	因子名	影响值	因子名	影响值
2000	降水∩高程	0.604	降水∩土地利用	0.587	降水∩气温	0.544
2005	降水∩土地利用	0.556	降水∩高程	0.499	降水∩气温	0.461
2010	降水∩土地利用	0.560	降水∩高程	0.503	降水∩气温	0.473
2015	降水∩土地利用	0.584	降水∩高程	0.545	降水∩气温	0.478
2019	降水∩土地利用	0.457	降水∩高程	0.391	降水∩气温	0.358

本文引用的数据采用优化 CASA 模型计算得到,可用于区域场景定量分析研究。若对小尺度区域或者更高时间分辨率进行研究分析,则需要更换 NPP 估算模型。地理探测器能够解释多因子交互作用对因变量地理空间分布的异质性。但对于因变量的解释比较依赖于自变量的选取,本文参考前人研究基础上选取 6 个自然条件和人为扰动因子。在后续的研究中应积极探索土壤侵蚀、坡度、城市建设水平、景观格局指数等多种自然、人为因子对 NPP 的影响,继续深入探讨多因子对生态脆弱区植被 NPP 的驱动影响。

3 讨论与结论

3.1 讨论

不同模型估算的 NPP 存在较大差异,其主要原因是模型机理的不同,这使得模型的输入参数,适用范围都有很大的差异。本文采用的改进 CASA 模型,引入 LSWI 作为水分胁迫系数取代原模型中的蒸散量。前人研究表示^[28],LSWI 作为水分胁迫系数可以有效提高传统 CASA 模型估算精度。本文模拟的 2000—2019 年黄土高原 NPP 均值为 $204.04 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中耕地、混交林、落叶阔叶林的 NPP 分别为 $423 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $490 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $519 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。以往的研究分别在 $252.50 \sim 606 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $423 \sim 582 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $284.3 \sim 679 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间。MOD17A3 数据由于存在空值和异常值所以各类型值均低于其余模型模拟的结果。说明本研究估算的不同植被类型 NPP 均在以往研究结果和实测 NPP 范围内,且 NPP 分布规律相同即常绿阔叶林最高其次是落叶阔叶林、混交林、耕地等。

从时间上来看,黄土高原自 1999 年实行退耕还林还草等一些生态恢复工程后,植被恢复,生态环境改善,NPP 整体呈现出稳步增长。这也与前人的研究结果相一致。从空间上来看,多年均值 NPP 呈现出西北低东南高的特点,且在陕北地区和山西吕梁地区这些生态恢复工程重点区域呈现显著增加。在内蒙鄂尔多斯地区、陕西关中地区、山西晋中地区、青海的海西海北地区呈现减少趋势,这些区域大部分是煤炭资源富集地区或畜牧业发达区,可能是由于人为活动和畜牧活动导致植被破坏。其余地区为满足城市发展的需要,大规模的耕地等被转换为建设用地,导致生态环境遭到破坏,NPP 显著减少。

气候决定了区域植被分布的种类和生长状况,黄土高原近 20 年的气候变化表现为降水显著增多,气温变化不明显。在 NPP 低值区,平均降水量和气

温均低于其余区域,NPP 高值区的平均降水量高于其余区域。这是由于黄土高原处于干旱和半干旱地区,水分是限制植物生长的重要气候因子。随着降水量逐年增多,植被生长所需要的水热条件得以改善,表现出 NPP 逐年增多。在主导因子分析中也表现出降水是黄土高原 NPP 变化的主导因子。在实行生态恢复工程后,多年土地利用变化中林地、水域、建设用地面积增长显著。降水和土地利用交互作用影响值最高,说明黄土高原 NPP 变化由原来主要由自然因子单一影响转由自然因子和人为因子耦合影响,且人为因子影响的程度逐年提高,充分说明外界人为扰动对黄土高原 NPP 影响显著。

3.2 结论

1) 黄土高原多年均值 NPP 空间异质性明显,表现出东南高西北低的特点。

2) 不同用地类型的 NPP 总量差异明显,具体表现为:草地>耕地>林地>建设用地>未利用土地>灌木>水域>冰雪。

3) 不同年份驱动力因子表明降雨和土地利用变化是 NPP 变化的主要驱动力,区域经济发展水平对区域 NPP 影响较小。

4) 双因子交互作用说明以 2000 年为界,黄土高原 NPP 的主导交互因子由自然因子转为自然和人为因子耦合协同影响,人为扰动因素对 NPP 的影响力在逐步增强。

参考文献:

- [1] 张珺,任鸿瑞. 人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1125-1133.
ZHANG Jun, REN Hongrui. Effects of human activities on net primary productivity in the Xilingol Grassland[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1125-1133.
- [2] 於琰,朴世龙. IPCC 第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 33-36.
YU Li, PIAO Shilong. Key scientific points on carbon and other biogeochemical cycles from the IPCC fifth assessment report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 33-36.
- [3] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. A natural vegetation NPP model[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1995, 19(3): 193-200.
- [4] 胡波,孙睿,陈永俊,等. 遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2061-2071.

- HU Bo, SUN Rui, CHEN Yongjun, et al. Estimation of the net ecosystem productivity in Huang-Huai Hai region combining with Biome-BGC model and remote sensing data[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2061-2071.
- [5] 高德新, 王帅, 李琰, 等. 植被光能利用率:模型及其不确定性[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5507-5516.
- GAO Dexin, WANG Shuai, LI Yan, et al. Light use efficiency of vegetation: model and uncertainty[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5507-5516.
- [6] 周夏飞, 於方, 曹国志, 等. 2001-2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 76-81.
- ZHOU Xiafei, YU Fang, CAO Guozhi, et al. Spatio-temporal features of carbon source-sink and its relationship with Climate factors in Qinhai-Tibet Plateau grassland ecosystem during 2001-2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 76-81.
- [7] 陈正华, 麻清源, 王建, 等. 利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 263-273.
- CHEN Zhenghua, MA Qingyuan, WANG Jian, et al. Estimation of Heihe of basin net primary productivity using the CASA model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 263-273.
- [8] 殷丽婷, 郑伟, 高猛, 等. 庙岛群岛北五岛生态系统净初级生产力与景观格局时空分布异质性研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2020, 42(6): 110-118.
- YIN Liting, ZHENG Wei, GAO Meng, et al. Spatial and temporal heterogeneity of net primary productivity and landscape patterns on five northern islands of Miaodao Archipelago[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(6): 110-118.
- [9] 张新中, 李育, 张成琦, 等. 2000-2014 年石羊河流域净生态系统生产力变化分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(4): 486-492.
- ZHANG Xinzhong, LI Yu, ZHANG Chengqi, et al. Analysis of the net ecosystem production changes in the Shiyang River basin from 2000 to 2014[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(4): 486-492.
- [10] 成方妍, 刘世梁, 张月秋, 等. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 5924-5934.
- CHENG Fangyan, LIU Shiliang, ZHANG Yueqiu, et al. Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [11] 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 Juan, HE Huijuan, DONG Jinfang, 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.
- [12] 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 等. 基于地理探测器的山西省 2000~2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 312-322.
- SHAO Jiahao, LI Jin, YAN Xingguang, et al. Analysis of spatiotemporal variation characteristics and driving forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 based on geodetector[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 312-322.
- [13] 孙治娟, 谢世友. 基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3836-3848.
- SUN Zhijuan, XIE Shiyou. Spatiotemporal variation in net primary productivity and factor detection in Yunan Province based on Geodetector[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 3836-3848.
- [14] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等. 黄土高原植被净初级生产力的时空变化及其与气候因子的关系[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(4): 445-453.
- SHI Xiaoliang, YANG Ziyong, WANG Xinshuang, et al. Spatial and temporal variation of net primary productivity and its relationship with climate factors in the Chinese Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(4): 445-453.
- [15] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [16] 张佑铭, 郎梦凡, 刘梦云, 等. 土地利用转变与海拔高度协同作用黄土高原植被固碳变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3897-3908.
- ZHANG Youming, LANG Mengfan, LIU Mengyun, et al. Vegetation carbon sequestration in the Loess Plateau under the synergistic effects of land cover change and elevations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3897-3908.
- [17] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 584-593.
- YANG Dan, WANG Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 584-593.
- [18] QI Shuaiyang, CHEN Shudan, LONG Xiangren, et al. Quantitative contribution of climate change and anthropological activities to vegetation carbon storage in the Dongting Lake basin in the last two decades[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 845-868.
- [19] YANG Hongfei, MU Shaojie, LI Jianlong. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China[J]. *CATENA*, 2014, 115: 84-95.

- [20] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2776-2782.
LI Dengke, Fan Jianzhong, WANG Juan. Variation characteristics of vegetation net primary productivity in Shaanxi Province based on MO17A3[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [21] 程晓鑫, 何远梅, 张岩. 黄土高原植被恢复与局地气候变化的关系[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 25-33.
CHENG Xiaoxin, HE Yuanmei, ZHANG Yan. Correlations between vegetation restoration and regional climate change in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 25-33.
- [22] XIAO Xiangming, HOLLINGER D, ABER J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 519-534.
- [23] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] 陈施施, 谢涛, 王超. IGBP 土地覆盖升尺度及精度评价方法研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5): 1-12.
CHEN Shishi, XIE Tao, WANG Chao. Research on IGBP land cover upscaling and accuracy evaluation method [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5): 1-12
- [25] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.
- [26] 苏胜涛, 曾源, 赵旦, 等. 中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析——基于中国生态系统研究网络数据[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1276-1289.
SU Shengtao, ZENG Yuan, ZHAO Dan, et al. Optimization of net primary productivity estimation model for terrestrial vegetation in China based on CERN data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1276-1289.
- [27] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626.
LI Chuanhua, CAO Hongjuan, FAN Yeping, et al. Remote sensing estimation and analysis of net primary productivity (NPP) based on corrected CASA model: a case study of Hexi Corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [28] BAO Gang, BAO Yuhai, QIN Zhihao, 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 Observations and Geoinformation, 2016, 46(4): 84-93.
- [29] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 等. 基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202205206>.
GONG Cang, WANG Shunxiang, LU Haichuan, et al. Research progress on spatial differentiation and influencing factors of soil heavy metals based on Geographical Detector[J/OL]. Environmental Science. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202205206>.
- [31] YAN Wenchao, WANG Yuanyun, CHAUDHARY P, et al. Effects of climate change and human activities on net primary production of wetlands on the Zoige Plateau from 1990 to 2015[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 35: e02052.
- [32] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 等. 2001-2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2401-2412.
CHENG Chunxiao, XU Zongxue, WANG Zhihui, et al. Temporal-spatial change simulation and analysis of net primary productivity in Northeast China from 2001 to 2010 [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2401-2412.
- [33] 闫妍, 覃金华, 房磊, 等. 湖南省植被净初级生产力时空动态及其与气候因素的关系[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1535-1544.
YAN Yan, QIN Jinhua, FANG Lei, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its relationships with climatic factors in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1535-1544.
- [34] ZHOU Zijun, QIN Dahui, CHEN Lunchao, et al. Novel model for NPP prediction based on temperature and land use changes: a case in Sichuan and Chongqing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109724
- [35] 李贝, 于莉, 郭硕, 等. 县域尺度植被净初级生产力遥感估算及时空变化特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 246-249.
LI Bei, YU Li, GUO Shuo. Remote sensing estimation and spatial-temporal variation of net primary productivity of vegetation at county scale[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 246-249.

(责任编辑 王绪迪)