

冯筱,屈建军,丁新辉,等.沙漠化逆转过程中榆林市植被净初级生产力时空格局及其影响因素[J].中国沙漠,2024,44(1):22-32.

沙漠化逆转过程中榆林市植被净初级生产力 时空格局及其影响因素

冯筱¹,屈建军²,丁新辉¹,田琴¹,范庆斌³

(1.咸阳师范学院 地理与环境学院,陕西 咸阳 712000; 2.西北大学 城市与环境学院,陕西 西安 710100; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 深入认识沙漠化逆转过程中植被净初级生产力(NPP)的时空格局及其影响因素,对沙漠化逆转区碳循环的调控及生态工程的实施具有重要的科学意义。基于光能利用率模型(CASA)对2000—2020年榆林市植被NPP进行估算,通过差值分析、趋势分析、相关性分析等方法定量分析了气候变化和人类活动对NPP变化的影响。结果表明:(1)沙漠化逆转过程中榆林市植被NPP呈波动增加趋势,增加速率为 $12.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以C计量),并表现出西低东高的空间分布格局,呈增加趋势的区域占榆林市总面积的98.4%,呈减小趋势的仅为1.6%。(2)植被NPP与气温的相关性不显著,与降水量呈正相关关系。人类活动对植被NPP的影响以正效应为主。(3)榆林西部毛乌素沙地植被NPP的变化以气候变化为主导,对降水量变化的响应更敏感,中东部以人类活动为主导,气候变化和人类活动主导区域分别占榆林市总面积的43.1%和56.9%。榆林西部沙区植被的恢复受制于水资源的供给,中东部退耕还林等人类活动对植被的恢复表现出更为积极的作用。

关键词: 沙漠化逆转; 植被NPP; 气候变化; 人类活动

文章编号: 1000-694X(2024)01-022-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00066

中图分类号: Q948

文献标志码: A

0 引言

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指在自然环境下绿色植物在单位时间、单位面积上积累的有机物数量。NPP作为陆地生态过程的关键参数,不仅反映了植被在自然条件下的生产能力,也是衡量陆地碳循环与生态系统质量的重要指标,在调节全球碳平衡中起着重要的作用^[1]。

近年来,许多学者从不同空间和时间尺度研究了中国不同地区植被NPP的时空格局及其驱动因素等科学问题,如对青藏高原、黄土高原、北方农牧交错带等脆弱生态系统植被NPP的相关研究,研究集中在基于模型对植被NPP的模拟、NPP的时空变化格局及其与气候变化和人类活动等因素的关系等领域^[2-9]。随着遥感技术的发展,通过遥感模型估算长时间序列植被NPP的方法被广泛采用^[4],目前国内外学者主要基于生态过程模型(BIOME-BGC

模型)、光能利用率模型(CASA模型)以及气候统计模型等对植被NPP进行估算^[10-12]。李登科等^[3]基于生态过程模型估算了2000—2019年陕西省实际净初级生产力以及基于气候模型估算了潜在净初级生产力,定量分析了气候变化和人类活动对陕西省植被生态系统的影响,结果表明人类活动是陕西省植被NPP变化的主要驱动力。杨丹等^[4]基于CASA模型对黄土高原2000—2018年植被NPP进行估算,并定量分析了气候变化及人类活动对植被NPP变化的影响,发现经济欠发达且人口密度小的地区植被NPP的变化以气候变化为主导,经济发展较好且人口密度大的地区植被NPP的变化以人类活动为主导。朱莹莹等^[13]基于MOD17A3-NPP数据,构建BP神经网络模型估算了2000—2014年西北地区的植被NPP,并对其时空格局进行了分析,发现植被NPP具有较强的空间差异性,并与降水关系密切。气候变化对植被NPP的影响一直是研究热点^[14-17]。

收稿日期:2023-02-10; 改回日期:2023-05-17

资助项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-176);国家自然科学基金青年科学基金项目(42201080)

作者简介:冯筱(1990—),女,陕西渭南人,理学博士,讲师,主要从事沙漠化与沙漠化防治研究。E-mail: feng_xiaohappy@163.com

在生态脆弱区,一系列生态环境工程的建设等人类活动也是影响植被变化的重要因素^[18-19]。因此探究植被 *NPP* 的时空格局以及气候变化和人类活动的定量影响,对应对未来气候变化以及生态恢复政策的制定等方面具有积极意义^[4]。

沙漠生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,然而,目前对沙漠生态系统,尤其是对沙漠化逆转过程中植被 *NPP* 的相关研究相对较少。毛乌素沙地是中国典型的四大沙地之一,位于鄂尔多斯高原的南部和黄土高原的北部区域,跨内蒙古(伊金霍洛旗南部、乌审旗及鄂托克旗的东南部)、陕西(神木、榆林、横山、靖边以及定边)、宁夏(盐池的东北部)三省区,约占中国沙漠总面积的4.7%。毛乌素沙地曾是中国沙漠化发展的典型区,也是目前沙漠化逆转最明显的区域之一。随着政府组织开展的三北防护林工程、全国性退耕还林、陕西省天然林保护工程等一系列生态保护措施的实施,毛乌素沙地生态环境明显好转^[20],沙区植被覆盖度呈增加趋势的面积可达97.9%^[21],沙漠化地区出现了明显的逆转趋势。进行毛乌素沙地沙漠化逆转区植被 *NPP* 的时空变化格局及其影响因素分析,对深刻认识典型沙漠化逆转区植被生态系统碳固定状况及对全球变化的响应具有重要的科学意义,对沙漠化逆转区植被生态系统碳循环的合理调控和生态保护工程的实施具有重要的参考价值^[22]。但到目前为止,毛乌素沙地沙漠化逆转区植被 *NPP* 的时空分布格局及其影响因素尚不明确。

基于此,本文以毛乌素沙地沙漠化逆转的典型区域——陕西省榆林市作为研究区,基于CASA模型,结合遥感数据、气象数据以及植被类型数据等,估算2000—2020年榆林市植被 *NPP*,阐明其时空格

局,并定量分析气候变化及人类活动对 *NPP* 时空变化的影响。研究结果对深入认识陕西省榆林市沙漠化逆转区的固碳状况及对区域气候变化和人类活动的响应具有重要的理论意义,对碳循环的合理调控及生态保护工程的实施具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省榆林市(36°57'—39°35'N, 107°28'—111°15'E)位于黄土高原与毛乌素沙地交界处,是全国生态环境建设和国家退耕还林重点地区,土地面积42 920.2 km²,2020年常住人口362.5万人。地势西高东低,平均海拔1 218 m(图1A),地形复杂,地貌多样。北部是毛乌素沙地东南缘风沙草滩区,地势平坦;南部是黄土高原腹地,地形破碎,沟壑纵横;西南部还分布有梁状低山丘陵,地势高亢,梁塬宽广,梁涧交错。陕西榆林属于干旱半干旱区,多年平均气温9.3℃,多年平均降水量438 mm。植被型以栽培植被和草原为主,零星分布有灌丛、草甸等。榆林西部毛乌素沙地地处毛乌素沙地东南缘,涉及榆林市5个县,由北至南依次为神木市、榆阳区、横山区、靖边县以及定边县(图1B)。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 遥感数据

遥感数据采用NASA官网提供的EOS/MODIS产品2000—2020年陕西省榆林市MOD13Q1-NDVI数据集,空间分辨率为250 m×250 m,时间分辨率为16 d。采用MRT软件和ArcGIS软件,对影像进行投影、裁剪、最大值合成、剔除异常值等数据处理,

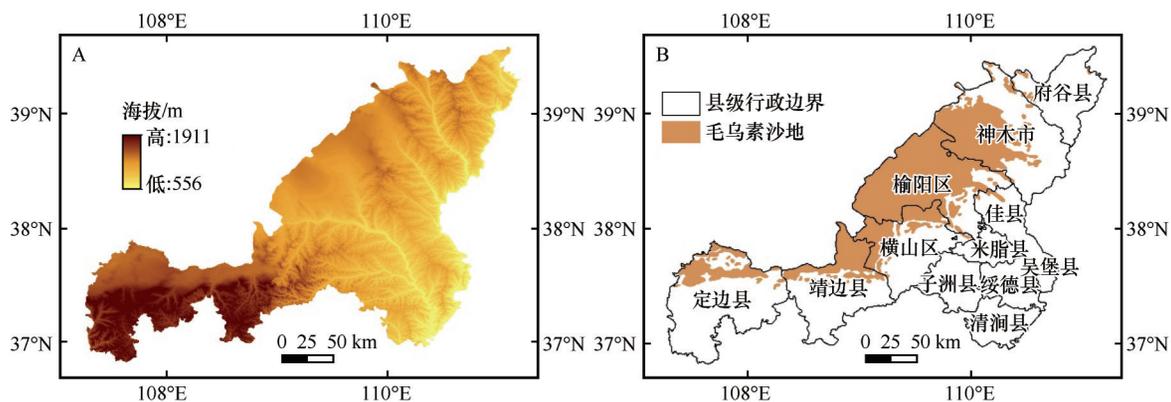


图1 研究区海拔及研究区内毛乌素沙地分布示意图

Fig.1 DEM and distribution of Mu Us Sandy Land in the study area

获取研究区2000—2020年逐月NDVI数据。

1.2.2 气象数据

降水量数据和气温数据采用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)提供的2000—2020年中国逐月降水量数据集以及逐月平均气温数据集,空间分辨率为0.0083333°(约1 km),数据格式为NETCDF,即.nc格式。太阳总辐射数据采用地理遥感生态网(<http://www.gisrs.cn/>)提供的2000—2020年陕西省榆林市逐月太阳总辐射数据,空间分辨率为0.0083333°(约1 km),数据格式为栅格数据。

估算植被NPP时需要栅格化的气象数据,并从空间上与遥感数据相匹配。文中利用ArcGIS软件将数据格式为NETCDF的降水量和气温数据转换为栅格数据,并对栅格化的降水量、气温、太阳辐射数据进行投影转换、裁剪、重采样等数据处理,获取像元大小、行列数与NDVI数据一致、投影相同的气象要素栅格数据。

1.2.3 植被类型数据

植被类型数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)提供的1:1 000 000中国植被图集,数据格式为矢量数据。利用ArcGIS软件对植被数据进行裁剪、栅格转换、重分类、投影、重采样等数据处理,获取像元大小、行列数与NDVI数据一致、投影相同的栅格数据。陕西省榆林市植被类型主要有栽培植被、草原、草甸、灌丛、针叶林、草丛、荒漠、阔叶林以及沼泽9类。

1.3 研究方法

1.3.1 植被NPP估算

植被NPP估算。CASA模型能够有效反映气候和人类活动双重影响下陆地植被生态系统的变化,因此在植被生态系统动态研究中应用广泛。采用朱文泉等^[11,23-24]改进的CACA模型对植被NPP进行估算(本文中都以C计量):

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

式中:APAR(x,t)表示像元 x 在 t 月获取的光合有效辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$); $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的光能转化率($\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$)。

植被潜在NPP和人类活动作用下的NPP估算。植被潜在NPP(PNPP)采用Miami模型进行估算。Miami模型是最早由Lieth^[25-26]利用最小二乘法根据

陆地生态系统中实测生产力数据与相匹配的年平均气温和年降水量数据建立,是第一个被广泛应用的区域NPP估算的气候模型:

$$PNPP=\min(NPP_T, NPP_R) \quad (2)$$

$$NPP_T=3000/(1+e^{1.315-0.1197T}) \quad (3)$$

$$NPP_R=3000(1-e^{-0.000664R}) \quad (4)$$

式中: NPP_T 和 NPP_R 分别为利用年平均气温 $T(^{\circ}\text{C})$ 和年降水量 $R(\text{mm})$ 计算得到的潜在植被净初级生产力($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。根据Liebig最小因子定律,选取二者的最小值作为潜在植被净初级生产力PNPP。

由CASA模型估算的植被NPP反映的是气候和人类活动双重影响下陆地植被的变化,由Miami模型估算的植被PNPP反映的是没有人为干扰,仅受到气候影响的植被变化。因此,人类活动影响下的植被NPP(HNPP)由NPP与PNPP的差值计算:

$$HNPP=NPP-PNPP \quad (5)$$

1.3.2 NPP变化趋势分析

采用一元线性回归分析法分析沙漠化逆转过程中植被NPP的年际变化趋势,采用趋势线的斜率来反映植被NPP的年际变化趋势^[22],并进行显著性T检验:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (6)$$

式中:Slope为趋势线的斜率,即NPP的变化趋势; Y_i 为像元第 i 年的NPP值; n 为监测时段的年数。 $Slope>0$ 表示在某一时间段植被NPP呈增加趋势, $Slope<0$ 表示植被NPP呈减小趋势。显著性检验结果表现如下: $P<0.01$ 表示极显著, $0.01<P<0.05$ 表示显著, $P>0.05$ 表示不显著。

为了便于区分,气候和人类活动双重影响下植被NPP的趋势线斜率值记为 S_{NPP} 。植被潜在NPP以及人类活动作用下的NPP趋势线斜率亦由上述公式计算而得,分别记为 S_{PNPP} 和 S_{HNPP} 。

1.3.3 相关性分析

采用相关分析法,分析沙漠化逆转过程中植被NPP与温度、降水量的相关性:

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_p)(y_i - y_p)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2}} \quad (7)$$

式中: $R_{x,y}$ 表示 x,y 变量间的相关关系; x_i 和 y_i 表示 x,y

变量在第 i 年的值; x_p 和 y_p 表示 x, y 变量的多年平均值; n 为样本数。 $R_{x,y} > 0$ 表示植被 NPP 与气候因子呈正相关, 反之呈负相关。

采用 T 检验对植被 NPP 与温度和降水量的相关系数分别进行显著性检验。显著性检验结果表现如下: $P < 0.01$ 表示极显著, $0.01 < P < 0.05$ 表示显著, $P > 0.05$ 表示不显著。

1.3.4 气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对作用分析

气候变化和人类活动是驱动植被变化的主要原因。采用斜率比较法来评价气候变化和人类活动在植被 NPP 变化中的相对作用, 这里使用植被潜在 NPP 的趋势线斜率绝对值 $|S_{PNPP}|$ 与人类活动作用下植被 NPP 的趋势线斜率绝对值 $|S_{HNPP}|$ 进行对比分析, 具体评价方法如表 1 所列。

气候变化和人类活动在植被 NPP 变化中的相对贡献, 采用公式(8)和公式(9)表示^[9]。

表 1 气候变化和人类活动在植被 NPP 变化中相对作用的评价方法^[3]

Table 1 Evaluation method of the relative role of climate change and human activities in NPP change^[3]

NPP 变化趋势	情景	植被 NPP 变化主导因素
<0	$ S_{PNPP} < S_{HNPP} $	人类活动主导的植被 NPP 减小
<0	$ S_{PNPP} > S_{HNPP} $	气候变化主导的植被 NPP 减小
>0	$ S_{PNPP} < S_{HNPP} $	人类活动主导的植被 NPP 增加
>0	$ S_{PNPP} > S_{HNPP} $	气候变化主导的植被 NPP 增加

表 2 植被 NPP 模拟值比较

Table 2 Comparison of simulated NPP values

来源	年份	方法	数据来源	榆林市 NPP / ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	榆林市 NPP 多年平均值 / ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	陕西省 NPP 多年平均值 / ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
本研究	2000—2020	基于改进的 CASA 模型	MOD13Q1-NDVI	100~500	336.57	
石志华等 ^[27]	2003—2012	CASA 模型	SPOT VGT-NDVI	100~300		418.59
李玲 ^[28]	2000—2016	CASA 模型	MOD13A2-NDVI	100~400		521.77
王钊等 ^[29]	2000—2015		MOD17A3-NPP	100~200		344.00
朱莹莹等 ^[13]	2000—2014		MOD17A3-NPP			379.74

2.2 沙漠化逆转过程中榆林市植被 NPP 年际变化特征

2000—2020 年榆林市植被 NPP 为 171.41~458.26 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 平均 336.57 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。2000—2020 年植被 NPP 呈波动增加趋势, 增加速率为

气候变化在植被 NPP 变化中的相对贡献率:

$$\frac{|S_{PNPP}|}{|S_{PNPP}| + |S_{HNPP}|} \times 100\% \quad (8)$$

人类活动在植被 NPP 变化中的相对贡献率:

$$\frac{|S_{HNPP}|}{|S_{PNPP}| + |S_{HNPP}|} \times 100\% \quad (9)$$

1.3.5 精度评价

在分析研究区相关文献资料的基础上, 整理统计其他研究模拟的 NPP 结果, 与本文 NPP 值进行对比, 评价 NPP 值模拟精度。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 模拟值精度

本研究基于改进的 CASA 模型以及 MOD13Q1-NDVI 数据对 NPP 进行估算, 估算结果显示, 2000—2020 年榆林市 NPP 值为 100~500 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 全市多年平均值为 336.57 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。本研究模拟值与石志华等^[27]以及李玲^[28]基于 CASA 模型的模拟结果基本接近(表 2)。王钊等^[29]以及朱莹莹等^[13]均是基于 MOD17A3-NPP 数据对 NPP 进行分析, 与之相比, 本研究模拟值略偏大。总体来讲, 与其他研究模拟值相比, 本研究 NPP 模拟值偏差在一定的范围之内, 即估算结果基本可靠。不同模型估算结果存在差异主要是由于研究时段、数据来源、模型参数、数据处理方法等存在差异, 这也反映了模型反演 NPP 的不确定性。

12.39 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ (图 2)。

榆林市定边县、榆阳区、横山区、神木市和靖边县分布在毛乌素沙地东南缘(榆林西部毛乌素沙地)。由表 3 可以看出, 2000—2020 年榆林西部毛乌素沙地植被 NPP 呈增加趋势, 增加速率为 10.83 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,

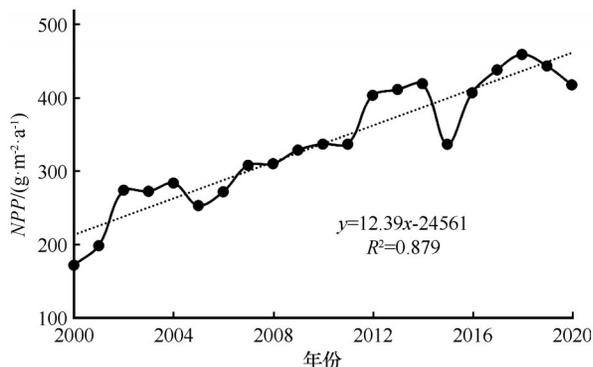


图2 2000—2020年榆林市植被NPP年际变化

Fig.2 Interannual variations of NPP in Yulin from 2000 to 2020

NPP多年平均值为 $311.87 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中,定边县、榆阳区、横山区、神木市、靖边县植被NPP增加速率分别为 7.42 、 10.11 、 12.11 、 13.82 、 $10.69 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, NPP多年平均值分别为 273.75 、 293.01 、 319.28 、 341.55 、 $331.77 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

由上述分析可以看出,2000—2020年沙漠化逆转过程中榆林市植被NPP呈波动增加趋势,分布在榆林西部毛乌素沙地的定边县、榆阳区、横山区、神木市、靖边县,植被NPP均呈增加趋势。

2.3 沙漠化逆转过程中榆林市植被NPP空间分布特征

2000—2020年,榆林市植被NPP多年平均值总体表现为西低东高的空间分布格局(图3)。NPP多年平均值为 $0\sim 100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的分布面积最小,占榆林市总面积的 0.7% ,零星分布在榆林西部的定边县和靖边县。NPP多年平均值为 $100\sim 200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的分布面积占 6.0% ,主要分布在榆林西部的榆阳区 and 神木市。NPP多年平均值为 $200\sim 300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的分布面积占 27.1% ,主要分布在榆林西部。NPP多年平均值为 $300\sim 400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的分布范围最大,占榆林市总面积的 40.4% ,主要分布在榆林中东部。NPP多年平均值为 $400\sim 500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以及 $>500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的分布面积分别占 23.2% 、 2.6% ,主要分布在榆林东部。

2000—2020年,榆林市植被NPP呈减小趋势的区域仅占榆林市总面积的 1.6% ,零星分布在榆林西部毛乌素沙地;其中,极显著减小($S_{\text{NPP}} < 0, P < 0.01$)区域面积占榆林市总面积的 1.1% (图4)。植被NPP呈增加趋势的区域占榆林市总面积的 98.4% ,其中NPP变化率为 $5\sim 15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的区域占榆林市总面

表3 2000—2020年榆林西部毛乌素沙地植被NPP($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)年际变化Table 3 Interannual variation of NPP ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) in the Mu Us Sandy Land in Yulin from 2000 to 2020

年份	定边县	榆阳区	横山区	神木市	靖边县	平均值
2000	155.99	166.94	138.23	179.51	180.76	164.29
2001	196.65	192.57	194.26	183.32	212.27	195.81
2002	265.32	236.56	266.51	256.00	273.78	259.63
2003	263.87	249.66	260.09	274.56	282.51	266.14
2004	246.83	247.61	272.25	272.16	295.43	266.86
2005	219.47	226.62	238.10	258.94	267.55	242.14
2006	226.06	234.75	238.20	269.11	279.43	249.51
2007	229.67	264.74	278.45	311.49	287.82	274.43
2008	224.26	273.87	287.41	319.65	293.03	279.64
2009	264.70	272.98	306.45	329.32	329.44	300.58
2010	284.91	288.90	318.69	341.15	332.38	313.21
2011	263.13	285.81	330.10	326.98	341.84	309.57
2012	344.18	337.35	414.04	386.84	404.86	377.45
2013	307.37	343.34	410.23	420.75	396.74	375.69
2014	319.26	338.50	396.27	419.70	406.30	376.01
2015	254.76	315.49	309.39	362.75	324.92	313.46
2016	305.80	346.67	385.59	431.36	371.04	368.09
2017	331.68	380.62	409.23	467.90	418.39	401.56
2018	387.26	388.71	454.57	450.90	446.32	425.55
2019	354.14	388.26	402.37	467.85	414.74	405.47
2020	303.42	373.17	394.42	442.37	407.63	384.20

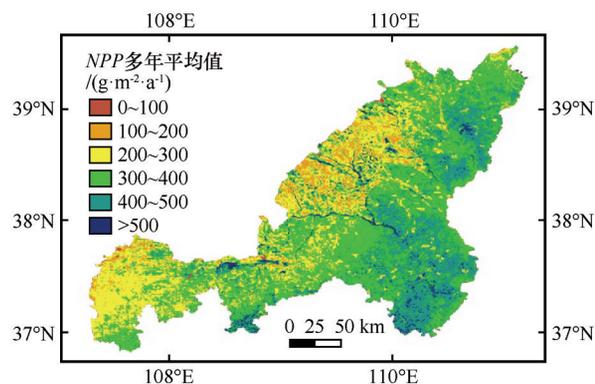


图3 2000—2020年榆林市植被NPP空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution of NPP in Yulin from 2000 to 2020

积的 57.0% ,主要分布在榆林西部毛乌素沙地5县。极显著增加($S_{\text{NPP}} > 0, P < 0.01$)区域面积占榆林市总面积的 94.7% ;显著增加($S_{\text{NPP}} > 0, 0.01 < P < 0.05$)区域面积占 2.1% ,主要分布在榆林市西南部的定边县。

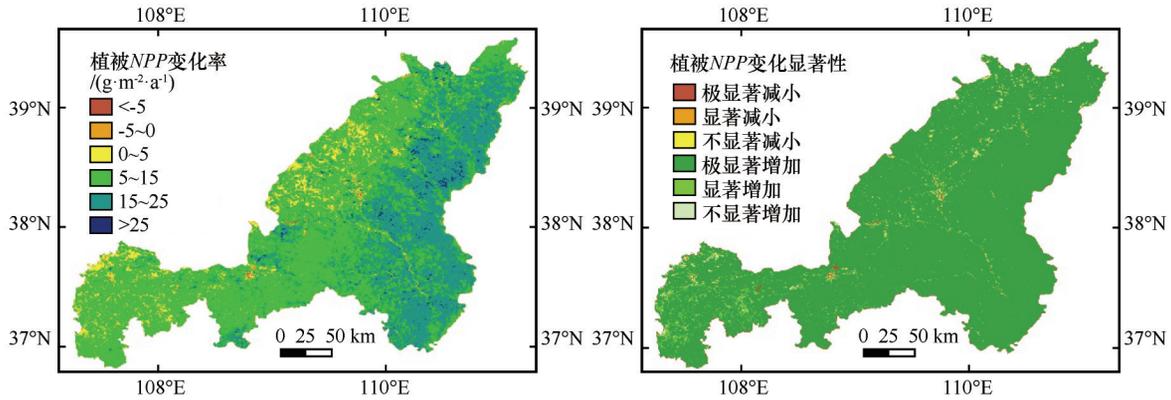


图4 2000—2020年榆林市植被NPP空间变化趋势

Fig.4 Spatial distribution of NPP change trends in Yulin from 2000 to 2020

由上述分析可以看出,2000—2020年榆林市植被NPP在空间上呈现出西低东高的变化趋势,整体上呈极显著以及显著增加的变化趋势,表明沙漠化逆转过程中榆林市植被状况明显好转。

2.4 榆林市植被NPP时空变化的影响因素

2.4.1 气候变化对植被NPP变化的影响

2000—2020年,榆林市年平均气温 $8.68\sim 9.81\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化速率为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,呈缓慢上升趋势,气温多年平均值为 $9.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2000—2020年榆林市年降水量 $301.8\sim 550.1\text{ mm}$,变化速率为 $3.90\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,降水量表现为一定程度的增加,降水量多年平均值为 438.91 mm (图5)。综上分析,2000—2020年榆林市气候呈现出一定程度的暖湿化趋势。

2000—2020年榆林市气温和降水量在空间上的分布总体上呈西低东高的变化趋势(图6)。2000—2020年榆林市气温多年平均值为 $7.1\sim 12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温低值区分布在榆林市西北部的府谷县和神木市以及西南部的定边县;气温高值区分布在榆林市东南部的吴堡县、绥德县和清涧县。降水量多年平均值为 $318.6\sim 529.2\text{ mm}$,降水量低值区分布在榆林西部毛乌素沙地一带,高值区出现在榆林市东南部的

吴堡县、绥德县和清涧县等地。

2000—2020年,榆林市植被NPP与气温相关系数为 $-0.726\sim 0.791$ 。NPP与气温呈负相关的区域占榆林市总面积的15.8%,其中不显著负相关区域占榆林市总面积的14.7%,主要分布在靖边县。NPP与气温呈正相关区域占榆林市总面积的84.3%,其中不显著正相关区域占78.8%。植被NPP与降水量的相关系数为 $-0.481\sim 0.871$ 。植被NPP与降水量呈负相关区域占榆林市总面积的1.3%,零星分布在榆林西部毛乌素沙地。植被NPP与降水量呈正相关区域占榆林市总面积的98.7%,其中,不显著正相关区域占23.3%,主要分布在榆林西部的定边县北部和靖边县,极显著正相关和显著正相关区域分别占24.3%和51.0%,主要分布在榆林中东部、西部的神木市、榆阳区、横山区以及定边县南部(图7)。

由上述分析可以看出,植被NPP的时空变化趋势与气温的相关性不显著,说明气温对植被NPP的影响不显著;与降水量主要呈正相关关系,表现为极显著和显著正相关,说明植被NPP对降水量变化的响应敏感。

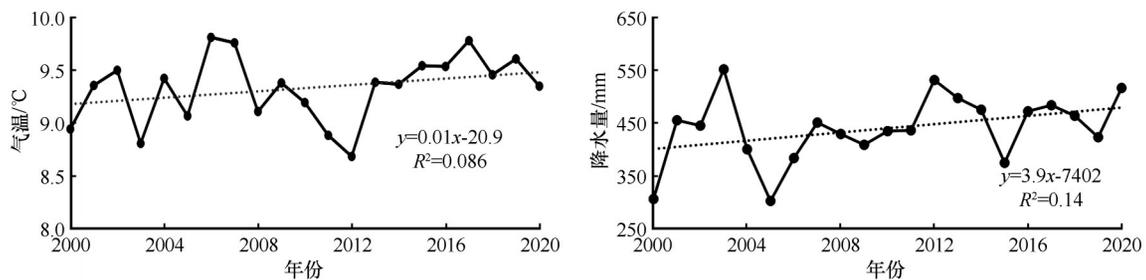


图5 2000—2020年榆林市气温和降水量年际变化

Fig.5 Interannual variations of temperature and precipitation in Yulin from 2000 to 2020

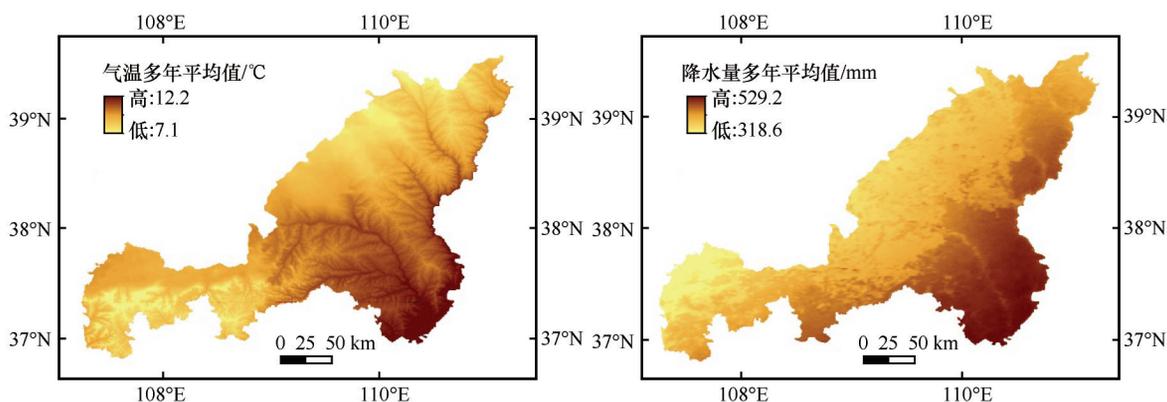


图6 2000—2020年榆林市气温和降水量空间分布格局

Fig.6 Spatial distribution of temperature and precipitation in Yulin from 2000 to 2020

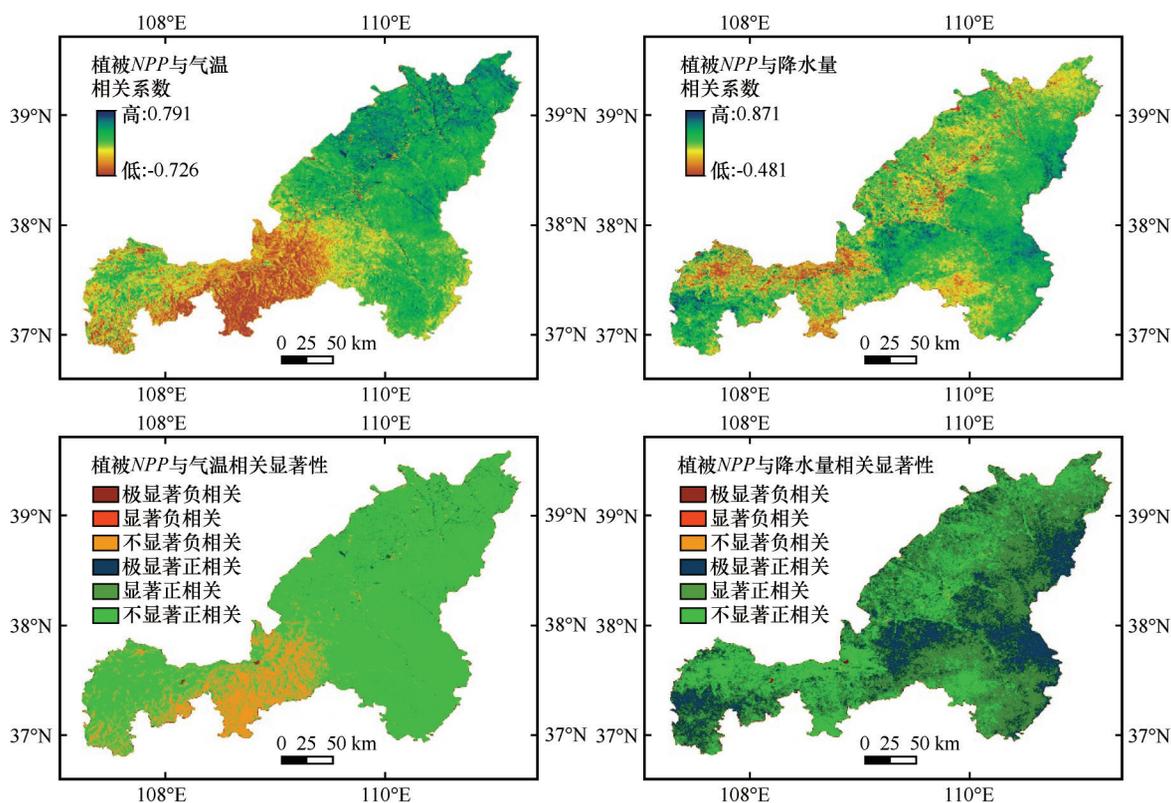


图7 植被NPP与气温和降水量的相关性

Fig.7 Correlation between NPP and temperature and between NPP and precipitation

2.4.2 人类活动对植被NPP变化的影响

2000—2020年,榆林市人类活动对植被NPP产生负效应($S_{\text{HNPP}} < 0$)的区域占榆林市总面积的9.9%,主要分布在榆林西部的神木市和榆阳区,定边县以及靖边县也有少量分布,植被NPP减小速率为 $2.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中,极显著减小($S_{\text{HNPP}} < 0, P < 0.01$)以及显著减小($S_{\text{HNPP}} < 0, 0.01 < P < 0.05$)区域共占榆林市总面积的0.9%,不显著减小($S_{\text{HNPP}} < 0, P > 0.05$)区域占9.0%(图8)。可以看出,人类活动对植被生长表现出的抑制作用并不显著。

人类活动对植被NPP产生正效应的区域占榆林市总面积的90.1%,NPP增加速率为 $7.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。人类活动作用下,植被NPP极显著增加($S_{\text{HNPP}} > 0, P < 0.01$)区域占榆林市总面积的28.0%,主要分布在榆林市的中东部;植被NPP显著增加($S_{\text{HNPP}} > 0, 0.01 < P < 0.05$)区域占18.4%,主要分布在榆林市的东南部以及东北部;植被NPP不显著增加($S_{\text{HNPP}} > 0, P > 0.05$)区域占43.6%,主要分布在榆林西部毛乌素沙地。

总体来看,人类活动对榆林市植被NPP的影响以正效应为主,人类活动促进了植被NPP的增加。

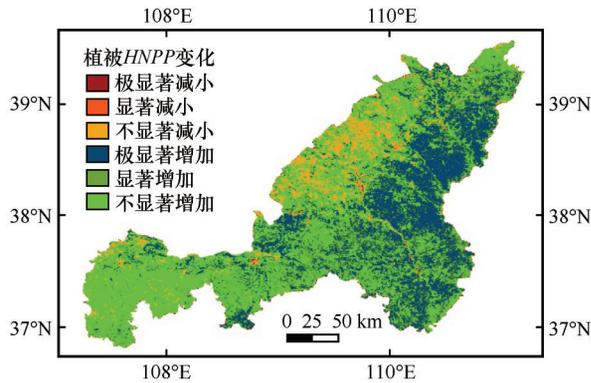


图 8 2000—2020年榆林市植被HNPP变化显著性空间分布
Fig.8 Spatial distribution of HNPP change trends in Yulin from 2000 to 2020

其中,极显著以及显著正效应区域主要分布在榆林市中东部,不显著正效应区域主要分布在榆林西部。

2.4.3 气候变化与人类活动在植被 NPP 变化中的相对作用

2000—2020年,人类活动主导的NPP减小区域占榆林市总面积的1.2%,人类活动的相对贡献率为54.9%;气候变化主导的NPP减小区域占0.5%,气候变化的相对贡献率为99.9%。NPP减小区域均零

星分布在榆林西部毛乌素沙地。人类活动主导的NPP增加区域占55.8%,主要分布在榆林市中东部以及西部的靖边县和横山区,人类活动的相对贡献率为60.8%。气候变化主导的NPP增加区域占42.6%,主要分布在榆林西部的神木市、榆阳区以及定边县,气候变化的相对贡献率为68.6%(图9~10)。

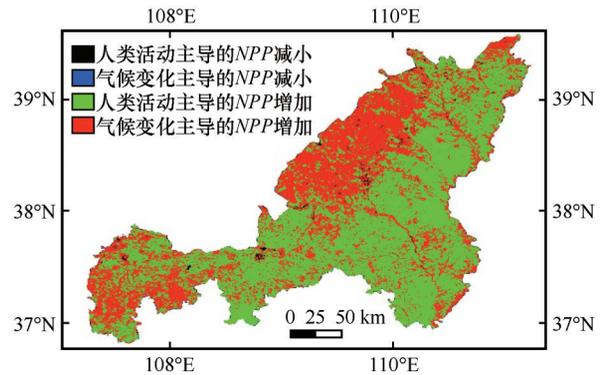


图 9 2000—2020年榆林市植被NPP变化主导因素的空间分布
Fig.9 Spatial distribution of dominant factors of NPP change in Yulin from 2000 to 2020

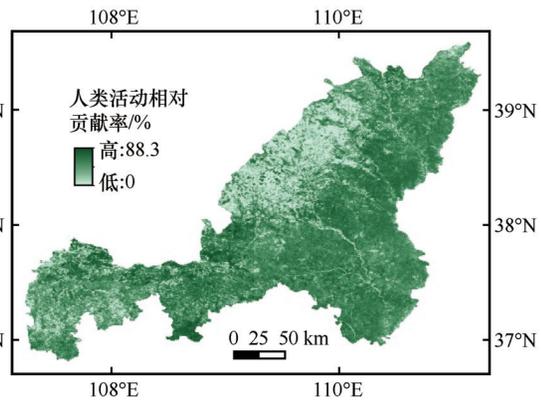
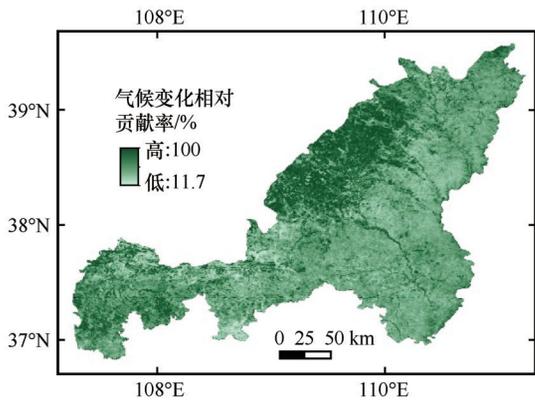


图 10 气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对贡献率

Fig.10 Relative contribution rate of climate change and human activities for NPP change

总体来看,由人类活动主导的植被NPP变化的区域占榆林市总面积的56.9%,主要分布在榆林中东部地区以及西部部分地区,由气候变化主导的植被NPP变化的区域面积占43.1%,主要分布在榆林西部毛乌素沙地。

3 讨论

气候变化和人类活动是影响植被生长状况的主要因素。2000—2020年榆林市植被NPP以 $12.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈波动增加趋势,并在空间上呈现出西低东高的变化趋势。2000—2020年榆林市年

平均气温以 $0.01 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加,年降水量以 $3.90 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加,气候表现为一定程度的暖湿化趋势,而暖湿化气候更有利于中高纬度地区植被的生长。植被NPP与气温相关性不显著的区域占榆林市总面积的93.4%,说明植被NPP的增加对气温变化的响应不敏感。植被NPP与降水量呈极显著以及显著正相关的区域占75.4%,主要分布在榆林市中东部以及西部毛乌素沙地,不显著正相关区域占23.3%,主要分布在榆林西部的定边县北部和靖边县,说明植被对降水量变化的响应更为敏感。2000—2020年榆林市降水量多年平均值为

318.6~529.2 mm,属典型的干旱半干旱区,水资源是限制植被生长的主要气候因子,降水量的增加有利于植被的生长^[4,30]。

2000—2020年人类活动对榆林市植被 *NPP* 的影响以正效应为主。其中表现为极显著以及显著正效应的区域占榆林市总面积的46.4%,主要分布在榆林市中东部地区,说明人类活动显著促进了植被 *NPP* 的增加;不显著正效应和负效应区域分别为43.6%和9.1%,主要分布在榆林西部毛乌素沙地,说明人类活动对该区域的植被生长有一定的促进或抑制作用,但影响并不显著。陕西省水土流失严重,是国家退耕还林工程重点建设省份之一。陕西省退耕还林区包括陕北退耕还林区以及陕南退耕还林区。其中,陕北退耕还林区主要分布在黄土高原丘陵的沟壑区。1999—2017年,陕西省累计完成退耕还林工程面积可达268.9万 hm^2 ,占1999年全省耕地面积的53.3%。一系列生态环境工程的实施,包括榆林西部毛乌素沙地防沙治沙工程以及榆林中东部退耕还林工程的实施,使得榆林市植被逐步恢复^[17,20,31]。榆林西部毛乌素沙地由于气候干旱,降水量较少,加之土壤贫瘠,尽管一系列防沙治沙工程的实施使得植被逐步恢复,但随着植被大面积的生长,植被对水资源的需求越来越大,一旦供水不足,沙区植被将难以继续生存,所以长期来看沙区植被的恢复更多依赖水资源的供给。另外,已实施的生态环境工程的维护对植被的恢复也非常重要。

植被的生长状况受气候变化与人类活动双重作用的影响。通过分析气候变化和人类活动在植被 *NPP* 中的相对作用发现,气候变化主导的 *NPP* 增加区域占榆林市总面积的42.6%,主要分布在榆林西部毛乌素沙地,该区域植被生长对人类活动的响应不显著,但对降水量变化的响应更为敏感,气候变化的相对贡献率为68.6%。毛乌素沙地因其恶劣的生态环境,人口数量相对稀少,经济欠发达,因而人类活动对植被生态系统的干扰相对较小^[4]。人类活动主导的 *NPP* 增加区域占榆林市总面积的55.8%,主要分布在榆林市中东部以及西部的靖边县和横山区,该区域也是退耕还林建设工程的核心区域,相比西部沙区,该区域降水状况良好,降水量对植被生长的影响表现为极显著以及显著的促进作用,人类活动对植被的影响也表现为极显著及显著正效应。由此可以看出,气候变化以及人类活动

均促进了该区域植被 *NPP* 的增加,但是人类活动的相对作用大于气候变化,人类活动的相对贡献率为60.8%,说明在降水量相对较好区域,退耕还林工程的实施取得了显著成效。

总的来看,榆林西部毛乌素沙地植被的恢复在防沙治沙工程的辅助下,更多依赖水资源的供给,而榆林中东部地区作为退耕还林的核心区域,相比气候变化,生态建设工程等人类活动对植被的恢复表现出更为积极的作用。

4 结论

2000—2020年,沙漠化逆转过程中榆林市植被 *NPP* 表现为波动增加的变化趋势,总体呈现出西低东高的空间分布格局。植被 *NPP* 呈增加趋势的区域面积占榆林市总面积的98.4%,呈减少趋势的区域面积占1.6%。

榆林市植被 *NPP* 与气温的相关性不显著,与降水量呈正相关关系,对人类活动的响应以正效应为主。榆林西部毛乌素沙地植被 *NPP* 与降水量主要呈正相关关系,对人类活动的响应不显著,说明该区域植被 *NPP* 对降水量变化的响应更为敏感。榆林市中东部植被 *NPP* 与降水量主要呈正相关关系,对人类活动的响应以正效应为主,说明降水量变化及人类活动均促进了该区域植被 *NPP* 的增加。

气候变化和人类活动对榆林市植被 *NPP* 变化的影响在空间上表现出一定的差异性。气候变化主导的 *NPP* 增加区域占榆林市总面积的42.6%,主要分布在榆林西部毛乌素沙地,人类活动主导的 *NPP* 增加区域占55.8%,主要分布在榆林市中东部以及西部的靖边县和横山区。人类活动和气候变化主导的 *NPP* 减小的区域面积分别占1.2%和0.5%,均零星分布在榆林西部毛乌素沙地。

不同估算模型、估算参数、数据来源以及数据处理方法均会影响植被 *NPP* 的估算结果,因此结合区域特征,研究出一套更为精准的 *NPP* 估算模式仍是今后的工作重点。本文在分析气候变化对 *NPP* 的影响时仅考虑了降水和气温两个因子,并未细化人类活动各个因子对 *NPP* 的影响,因此,气候变化和人类活动各因子对植被 *NPP* 变化的影响机制仍需进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇

- 的估算[J].中国科学:D辑,2007,37(6):804-812.
- [2] 李诗瑶,丛士翔,王融融,等.气候变化和人类活动对盐池县植被净初级生产力的影响[J].干旱区地理,2022,45(4):1186-1199.
- [3] 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[J].生态环境学报,2022,31(6):1071-1079.
- [4] 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.
- [5] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648.
- [6] 石智宇,王雅婷,赵清,等.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[J].生态环境学报,2022,31(11):2111-2123.
- [7] 刘杰,汲玉河,周广胜,等.2000—2020年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J].应用生态学报,2022,33(6):1533-1538.
- [8] Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. Spatio-temporal changes of vegetation Net Primary Productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1566-1587.
- [9] 魏建洲.黄土高原草地植被变化及其驱动力分析[D].兰州:兰州大学,2020.
- [10] 高艳妮,于贵瑞,张黎,等.中国陆地生态系统净初级生产力变化特征:基于过程模型和遥感模型的评估结果[J].地理科学进展,2012,31(1):109-117.
- [11] 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.
- [12] 朱志辉.自然植被净第一性生产力估计模型[J].科学通报,1993,38(15):1422-1426.
- [13] 朱莹莹,韩磊,赵永华,等.中国西北地区NPP模拟及其时空格局[J].生态学杂志,2019,38(6):1861-1871.
- [14] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [15] Zhu W Q, Pan Y Z, Yang X Q, et al. Comprehensive analysis of the impact of climatic changes on Chinese terrestrial net primary productivity [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(23): 3253-3260.
- [16] Wu L Z, Ma X F, Dou X, et al. Impacts of climate change on vegetation phenology and net primary productivity in arid Central Asia [J]. Science of The Total Environment, 2021, 796: 149055.
- [17] 李登科,王钊.退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J].生态学杂志,2020,39(1):1-10.
- [18] Niu Q F, Xiao X M, Zhang Y, et al. Ecological engineering projects increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid Northern China [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(13): 1620-1631.
- [19] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 44-50.
- [20] 李晓岚.毛乌素沙地沙漠化逆转过程及成因分析[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [21] 贺军奇,魏燕,高万德,等.毛乌素沙地东南缘植被NDVI时空变化及其对气候因子的响应[J].干旱区地理,2022,45(5):1523-1533.
- [22] 刘凤,曾永年.2000-2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].生态学报,2021,41(14):12.
- [23] 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.
- [24] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006,51(6):700-706.
- [25] Lieth H. Primary productivity: terrestrial ecosystems [J]. Human Ecology, 1973, 1(4): 303-332.
- [26] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world [J]. Nature and Resources, 1975, 8(1): 237-263.
- [27] 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.
- [28] 李玲.气候变化和人类活动对西北地区植被NPP变化的影响研究[D].西安:陕西师范大学,2019.
- [29] 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.
- [30] 鲍超,方创琳.干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J].地理科学进展,2008,27(3):38-46.
- [31] 成佩昆,胡守庚,孙涛,等.陕西省退耕还林工程对植被恢复的效应:基于PCSE修正的面板数据模型[J].干旱区研究,2018,35(6):1477-1486.

Temporal and spatial pattern of *NPP* in Yulin and its influencing factors during the desertification reversal

Feng Xiao¹, Qu Jianjun², Ding Xinhui¹, Tian Qin¹, Fan Qingbin³

(1.College of Geography and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 2.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710100, China;3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An in-depth understanding of the spatial and temporal pattern of *NPP* and its influencing factors during the process of desertification reversal is of great scientific significance for the regulation of carbon cycle and the implementation of ecological engineering in desertification reversal zone. This paper estimated the values of *NPP* in Yulin from 2000 to 2020 using CASA model, and quantitatively analyzed the impact of climate change and human activities on *NPP* change through difference analysis, trend analysis and correlation analysis. The results showed that: (1) During the desertification reversal process, the values of *NPP* (calculation in C) of Yulin showed a fluctuating and increasing trend with a rate of $12.39 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and displayed a spatial distribution pattern of low west and high east. The area with an increasing trend of changing *NPP* accounted for 98.4% of the total area of Yulin, and only 1.6% showed a decreasing trend. (2) The correlation between the *NPP* and the temperature was not significant, but the *NPP* was positively correlated with precipitation. The influence of human activities on *NPP* was mainly positive. (3) The change of *NPP* in the Mu Us Sandy Land in western Yulin was dominated by climate change, showing more sensitive to changes in precipitation. The change of *NPP* in the central and eastern regions of Yulin was dominated by human activities. The areas dominated by climate change and human activities accounted for 43.1% and 56.9% of the total area of Yulin, respectively. The restoration of vegetation in the sandy area of western Yulin was subject to the supply of water resources, and human activities such as returning farmland to forest in the central and eastern regions have shown a more positive effect on the restoration of vegetation.

Key words: desertification reversal; *NPP*; climate change; human activities