

王娟,何慧博. 气候变化和人类活动对陕北退耕还林区植被 NPP 的影响[J]. 陕西气象,2025(2):32-37.

文章编号:1006-4354(2025)02-0032-06

# 气候变化和人类活动对陕北退耕还林区植被 NPP 的影响

王娟<sup>1,2</sup>,何慧博<sup>3</sup>

(1. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 陕西省气象信息中心,西安 710014)

**摘要:**基于 2000—2022 年 MODIS 17A3 实际植被净初级生产力和气候模型计算的潜在净初级生产力,定量分析陕北退耕还林区植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)受气候变化和人类活动的影响。结果表明:(1)2000—2022 年研究区实际植被净初级生产力总体呈现南高北低的趋势,均值为 257.45 g/(m<sup>2</sup>a)。(2)研究区实际植被净初级生产力、潜在植被净初级生产力均呈上升趋势,实际植被净初级生产力较气候潜在植被净初级生产力增加速率更大。(3)气候因素与人为活动两者均对植被净初级生产力产生了积极的促进效应,其中在气候因素驱动下植被净初级生产力增加的区域面积占比为 65.98%,由人类活动驱动下植被净初级生产力增加的区域面积占比为 28.40%。人类活动在推动植被生长的同时,也有效降低了植被 NPP 对气候因子变化的敏感度,体现人类活动在生态系统调控中的积极作用和深远影响。

**关键词:**植被;净初级生产力(NPP);气候变化;人类活动;陕北退耕还林区

**中图分类号:**Q948.1:P463.22

**文献标识码:**A

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被与外界环境因子相互作用下的产物,是地表碳循环的重要组成部分,可用于评价区域生态系统功能及可持续发展能力<sup>[1-2]</sup>,它是反映气候变化及人类活动对植被综合作用的重要指标<sup>[3]</sup>。近年来随着全球气候变暖,植被 NPP 作为生态系统碳循环的重要指标之一,成为全球学者研究的热点<sup>[4-7]</sup>。陕北退耕还林区是陕西省黄河流域核心地带,黄河“几字弯”腹地,肩负着打好荒漠化综合防治攻坚战的重任。其地质背景独特,降雨变率较大,生态环境脆弱,自然灾害频发,对气候变化和人类活动极为敏感,因此开展该区域植被生态环境变化及驱动机制研究十分必要。

随着全球气候变化加剧,国内外针对气候变化对植被 NPP 的影响研究愈发广泛。王娟等<sup>[8]</sup>对黄河流域开展了植被 NPP 时空变化及驱动因子的研究,结果表明在自然驱动因子中降水作用最大。刘世荣等<sup>[9]</sup>选取气候条件中的降水与温度因素,分析中国森林生态系统生产力和气候因素的相关关系,研究发现降水是制约生态系统生产力的主要驱动因素。Chen 等<sup>[10]</sup>在利用地理探测器分析 2000—2015 年横断山区植被净初级生产力时空变化后认为,自然因素是影响横断山大部分区域植被净初级生产力的主导因素。刘铮等<sup>[11]</sup>研究了黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素,结果表明年降水量是研究区草

收稿日期:2024-01-10

作者简介:王娟(1981—),女,满族,陕西西安人,硕士,高级工程师,从事生态环境遥感监测研究。

通信作者:何慧博(1987—),女,汉族,陕西西安人,学士,工程师,从事气象数据分析与应用研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2022G-12)

地 NPP 变化最重要的驱动因素,且具有最高的平均相对贡献率。李登科等<sup>[3]</sup>利用 MODIS17A3 植被 NPP 数据定量分析了气候变化和人类活动对陕西省植被 NPP 的影响,结果表明陕西省植被 NPP 的变化受到气候和人类活动两种驱动力的作用,而主要驱动力是人类活动。以上研究仅开展气候因素对植被 NPP 的影响,未涉及量化气象条件及人类活动在植被 NPP 变化中的贡献。本研究通过将气候 Miami 模型(气候模型)<sup>[12]</sup>驱动的潜在 NPP 变化特征与生理过程模型驱动的 MODIS NPP 变化特征进行比较,分析陕北退耕还林区植被恢复情况,量化气候变化和人类活动在生态系统碳循环中的作用,为深入探讨气候变化及重点生态工程对研究区生态系统碳循环影响提供有力的数据支撑。

## 1 研究区及数据来源

陕北退耕还林区位于黄土高原核心地区,包括延安市北部及榆林市南部地区,总面积达 45 257.60 km<sup>2</sup>;气候属于干旱季风气候,降水年际变化大,多年平均降水量 500 mm 左右,降水主要集中在 7—9 月,可占年均降水量的 62.4%<sup>[13]</sup>。

研究所用数据为 MOD17A3HGF 006 数据(2000—2022 年)。该数据由美国 NTSG(numerical terradynamic simulation group)于 2019 年发布。数据空间分辨率为 500 m,投影为 SIN GRID,下载网址 <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>,数据产品为年 NPP。数据下载后利用 MRT 软件,对原始数据进行拼接及投影变换,结果为等经纬度坐标系,基准面为 WGS-84,并根据研究区域矢量边界统一裁剪形成数据集。气候数据(气温、降水)来源于陕西省气象信息中心,选取研究区 20 个气象站点 2000—2022 年平均气温、年降雨量数据,采用“标准克里金”法进行插值,通过 ArcGIS 软件进行重采样。

## 2 研究方法

运用 NPP 气候学模型来计算植被潜在净初级生产力(MNPP),同时,将 MOD17A3HGF 数据作为植被实际净初级生产力(ANPP)。通过对比仅受气候因素影响、无人类干扰下的植被潜在净初级生产力(MNPP)与现实情况下受到气候及

人类活动双重作用影响的植被 ANPP(即 PNPP),利用空间分析法分析人类活动及气候因素在不同区域间的差异性,揭示人类活动在植被 NPP 变化过程中所起的相对作用及其主要贡献。

### 2.1 MNPP 与 PNPP 的计算

Miami 模型是被广泛应用的区域 NPP 估算的气候模型之一<sup>[14]</sup>,最早由 Lieth 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,公式为

$$V_{NPP_M} = \min(V_{NPP-T}, V_{NPP-R}), \quad (1)$$

$$V_{NPP-T} = 3\ 000 / (1 + e^{1.315 - 0.119T}), \quad (2)$$

$$V_{NPP-R} = 3\ 000(1 - e^{-0.000\ 664R}). \quad (3)$$

式中, $V_{NPP-T}$ 和 $V_{NPP-R}$ 分别是利用年平均气温 $T(^{\circ}\text{C})$ 和年降水量 $R(\text{mm})$ 计算得到的植被潜在净初级生产力( $\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$ )。利用 Lieth 最小因子定律,选取二者最小值做为植被潜在净初级生产力 $V_{NPP_M}$ 。

$V_{NPP_P}$ 定义为人类活动造成的 NPP 增加或减少的量, $V_{NPP_P}$ 可能为正值也可能为负值,当人类活动造成生态环境变差植被受损时, $V_{NPP_P}$ 为负值。计算公式如下:

$$V_{NPP_P} = V_{NPP_A} - V_{NPP_M}. \quad (4)$$

$V_{NPP_A}$ 为植被实际净初级生产力。

### 2.2 植被 NPP 年际变化趋势

采用最小二乘法分析植被 NPP 的变化斜率,实现像元尺度上的线性变化趋势分析。NPP 随时间变化表现为上升或下降趋势。公式为

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}. \quad (5)$$

式中: $S$ 为线性倾向率; $X_i$ 代表 $V_{NPP_M}$ 、 $V_{NPP_A}$ 或 $V_{NPP_P}$ , $i$ 表示年份数, $n=23$ 。 $S>0$ ,表示 NPP 呈上升趋势,反之为下降趋势。应用相关关系检验法对变化趋势进行显著性检验,分为 6 类:极显著减少( $S<0, P\leq 0.01$ );显著减少( $S<0, 0.01<P\leq 0.05$ );不显著减少( $S<0, P>0.05$ );不显著增加( $S>0, P>0.05$ );显著增加( $S>0, 0.01<P\leq 0.05$ );极显著增加( $S>0, P\leq 0.01$ )。

### 2.3 气候变化和人类活动对植被 NPP 影响的定量评估

将 $V_{NPP_M}$ 、 $V_{NPP_A}$ 和 $V_{NPP_P}$ 的线性倾向率分别记

作  $S_M$ 、 $S_A$  和  $S_P$ 。 $S_A > 0$ , 表示植被实际净初级生产力处于增加趋势;  $S_A < 0$ , 表示植被实际净初级生产力处于下降趋势<sup>[15]</sup>。为了区分植被 NPP 恢复和退化是由气候变化或人类活动影响, 将  $V_{NPP_A}$  分为 5 种不同情况<sup>[16]</sup>, 具体见表 1。

表 1 气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对作用评估方法

变化状态	判别依据	主导因素
$S_A = 0$		$V_{NPP_A}$ 没有变化
$S_A > 0$	$ S_M  >  S_P $	气候因素导致 $V_{NPP_A}$ 增加
$S_A > 0$	$ S_M  <  S_P $	人类活动导致 $V_{NPP_A}$ 增加
$S_A < 0$	$ S_M  >  S_P $	气候因素导致 $V_{NPP_A}$ 减少
$S_A < 0$	$ S_M  <  S_P $	人类活动导致 $V_{NPP_A}$ 减少

注:  $S_M$ 、 $S_A$  和  $S_P$  分别表示  $V_{NPP_M}$ 、 $V_{NPP_A}$  和  $V_{NPP_P}$  的线性倾向率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被 ANPP 空间分布特征

2000—2022 年平均植被实际净初级生产力 ANPP 分布如图 1, ANPP 总体呈南高北低, 均值为

为  $257.45 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ 。榆林市北部毛乌素沙漠南缘年均 ANPP 在  $100 \sim 200 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$  之间。延安市北部及榆林市南部为黄土高原丘陵沟壑区, 年均 ANPP 在  $200 \sim 300 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$  之间; 延安市南部安塞、志丹、延长、宜川及吴起大部分地区植被恢复较好, 年均 ANPP 在  $300 \sim 500 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$  之间。

#### 3.2 植被 ANPP、MNPP、PNPP 年际变化趋势

线性拟合研究区植被 ANPP、MNPP、PNPP 的年均值(图 2)。结果表明: 2000—2022 年植被 ANPP、MNPP 及 PNPP 均呈上升趋势, 其中上升速率 ANPP 为  $9.13 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ , MNPP 为  $5.40 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ , PNPP 为  $3.73 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ , 表明无论是气候因素还是人类活动都促进植被 ANPP 的增加, 使植被 ANPP 出现上升趋势。

植被 MNPP 和 PNPP 呈现出显著的波动性特征, 而植被 ANPP 在年际尺度上的变化则相对稳定。植被 MNPP 是仅基于气候因子动态模拟所得, 波动显著表明, 在纯粹气候驱动的条件下, 植被生长对气候变量的变化表现出极高的敏感性。近年来, 研究区降雨量发生了大幅度的波动,

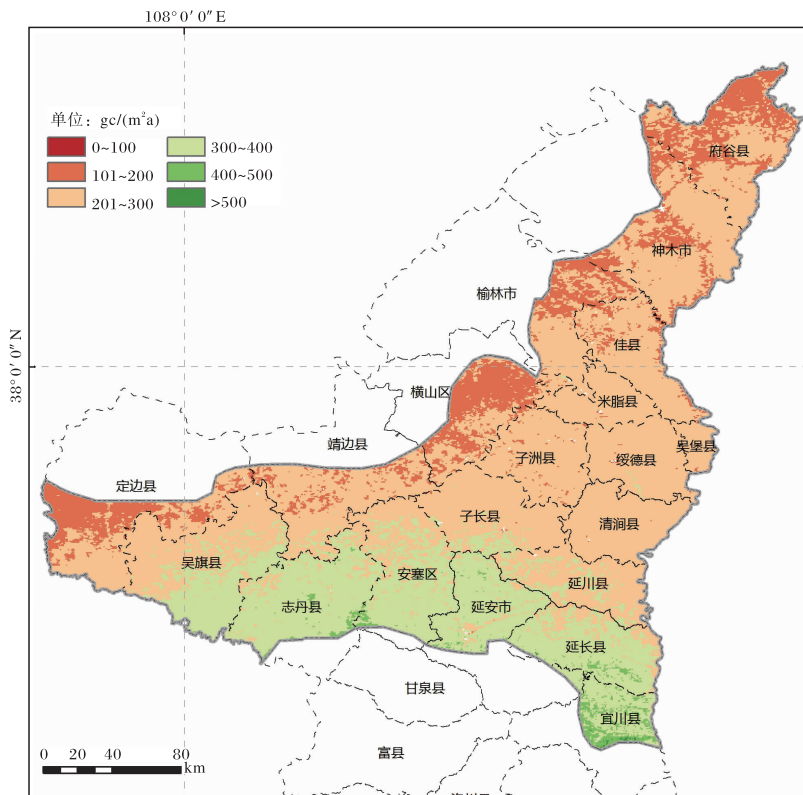


图 1 2000—2022 年陕北退耕还林区年均植被 ANPP 分布(审图号:GS(2024)0650 号,下同)



的区域占总面积的 21.35%，显著增加 ( $0.01 < P \leq 0.05$ ) 的占总面积的 32.75%。其余区域均为不显著增加，城市建成区无变化。与李登科等<sup>[3]</sup>气候与人类活动对陕西省植被 NPP 影响的结论基本一致。然而由于研究时段的差异性 & 近两年延安市大部分区域夏季降雨量较大，导致植被生长环境相较于之前有所恶化，延安市大部分地区的植被 NPP 增加不显著。

2000—2022 年陕北退耕还林区植被 MNPP (图 3b) 呈增加变化趋势，其中呈极显著增加 ( $P \leq 0.01$ ) 的区域面积占比极低；显著增加 ( $0.01 < P \leq 0.05$ ) 的占总面积的 15.50%，主要分布在米脂、绥德、吴堡及清涧等县。这些区域属于半干旱地区，降雨量是影响植被生长的主要因子。近年来降雨量增加显著，因此在降雨量增加较大时植被 MNPP 增加趋势更为显著。

植被 PNPP 的变化趋势与其他两种植被净初级生产力的变化趋势相同，均为增加趋势 (图 3c)，其中有 5.03% 的区域通过极显著性检验 ( $P \leq 0.01$ )，12.20% 的区域通过显著性检验 ( $0.01 < P \leq 0.05$ )，其余区域为不显著增加趋势 (82.77%)。

植被 PNPP 显著增加的区域主要分布在延安市辖区、志丹县、安塞区及吴起县部分区域。

### 3.3 植被 NPP 变化原因分析

根据表 1 的判别方法逐像元比较植被 ANPP、MNPP 和 PNPP 变化斜率  $S$  的绝对值，以此来确定陕北退耕还林区植被 NPP 变化原因分别为：气候因素导致 NPP 增加、人类活动导致 NPP 增加、气候因素导致 NPP 降低、人类活动导致 NPP 降低及没有变化。从图 4 可以看出，2000—2022 年间，陕北退耕还林区植被 NPP 受气候变化和人为活动影响增加的作用大于降低的作用。植被 NPP 增加的区域占总面积的 94.38%，其中在气候因素驱动下植被 NPP 增加的区域面积占比为 65.98%，主要分布在榆林大部及延安东部地区；由人类活动驱动下植被 NPP 增加的区域面积占比为 28.40%，主要分布在延安大部分地区。植被 NPP 减少的区域仅占总面积的 5.61%，其中有 5.58% 的区域是由气候因素驱动，零星分布在府谷、神木、榆阳区、米脂、绥德、佳县及定边等地；仅 0.03% 的区域是由人类活动导致，主要分布在延安市区周边区域。整体来看，陕北退耕还

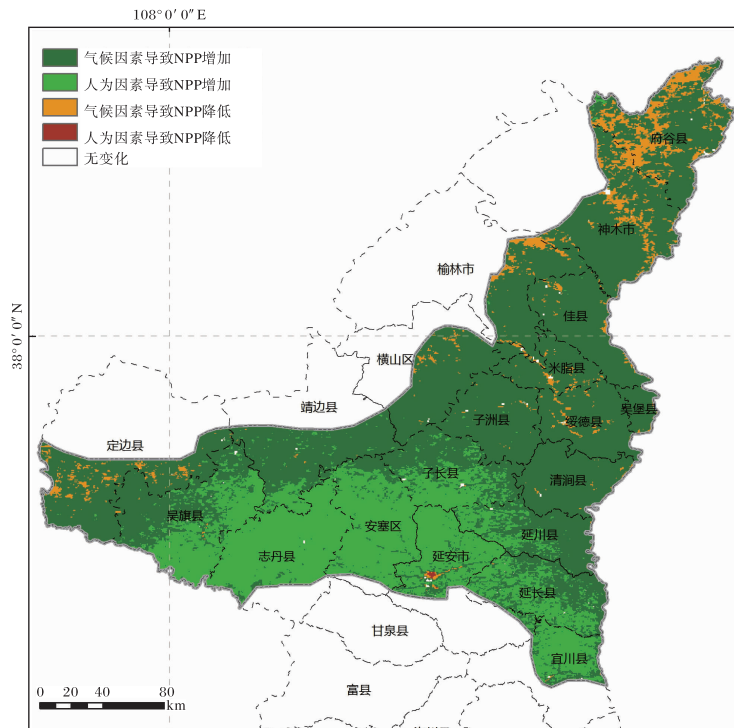


图 4 2000—2022 年陕北退耕还林区植被 NPP 变化原因分布图

林区植被 NPP 主要受气候因素影响,受气候驱动变化的区域占总面积的 71.56%。

#### 4 结论

本文基于 2000—2022 年实际植被净初级生产力 ANPP(MOD17A3GF)和气候模型计算的潜在植被净初级生产力 MNPP,定量分析气候变化和人类活动对陕北退耕还林区植被生态系统的影响,结论如下。

(1)2000—2022 年陕北退耕还林区植被 ANPP 总体呈现南高北低的趋势,均值为 257.45 g/(m<sup>2</sup>a)。研究区植被 ANPP、MNPP 及 PNPP 均呈上升趋势,ANPP 增加速率最大为 9.13 g/(m<sup>2</sup>a)。

(2)2000—2022 年间,陕北退耕还林区植被 NPP 受气候变化和人为活动影响增加的作用大于降低的作用。其中在气候因素驱动下植被 NPP 增加的区域面积占比为 65.98%;由人类活动驱动下植被 NPP 增加的区域面积占比为 28.40%。植被 NPP 减少的区域仅占总面积的 5.61%,其中有 5.58%的区域是由气候因素驱动。

(3)气候因素与人为活动两者均对植被 NPP 产生了积极的促进效应。人类活动在推动植被生长的同时,也有效降低了植被 NPP 对气候因子变化的敏感度,体现人类活动在生态系统调控中的积极作用和深远影响。因此,建议在未来生态建设和保护的进程中,巩固已取得成果,持续提升退耕还林重大生态工程效益。

#### 参考文献:

- [1] WANG Q,ZHANG Q P,ZHOU W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu county[J]. Physics Procedia,2012,33: 1292-1297.
- [2] 陈峰,李红波,刘亚静. 基于 GIS 和 CASA 的滇南山区植被 NPP 时空分异及其影响因素:以云南省元阳县为例[J]. 生态学杂志,2018,37(7):2148-2158.
- [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] 于静,高亚敏,陶晨,等. 通辽市植被净初级生产力时空特征及其对气候的响应[J]. 陕西气象,2023(5):43-47.
- [5] 王娟,何慧娟. 吴起县 2000—2013 年植被 NPP 变化特征[J]. 陕西气象,2015(6): 6-9.
- [6] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等. 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[J]. 生态学报,2019,39(22):8504-8515.
- [7] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J]. 生态学报,2020,40(15):5306-5317.
- [8] 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.
- [9] 刘世荣,郭泉水,王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报,1998,18(5):32-37.
- [10] CHEN S T, GUO B, ZHANG R, et al. Quantitatively determine the dominant driving factors of the spatial temporal changes of vegetation NPP in the Hengduan Mountain area during 2000-2015 [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(2):427-445.
- [11] 刘铮,杨金贵,马理辉,等. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J]. 应用生态学报,2021,32(1):113-122.
- [12] LIETH H. Primary productivity:terrestrial ecosystems [J]. Human Ecology, 1973,1(4):303-332.
- [13] 王娟,卓静. 基于 RS 和 GIS 的陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报,2015,35(1):220-223.
- [14] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTROM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 71-88.
- [15] 秦景秀,郝兴明,张颖,等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理,2020, 43(1): 117-125.
- [16] 赵鹏,陈桃,王茜,等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报,2020, 37(1): 51-62.
- [17] 林龙超,王晓飞,刘延平,等. 退耕还林工程背景下延安植被覆盖时空变化及其对气候的响应[J]. 陕西气象,2022(4):1-6.