北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应

范雯萱 刘金成

Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model

Fan Wenxuan, Liu Jincheng

引用本文:
范雯萱, 刘金成. 基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):13–22. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250428
Fan Wenxuan, Liu Jincheng. Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):13–22. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250428

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250428

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析

Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220381

基于改进CASA模型的晋北地区植被NPP时空动态及气候影响研究

Spatiotemporal dynamics and climate impact of vegetation NPP in the northern Shanxi Province region based on the improved CASA model

北京林业大学学报, 2023, 45(7): 47–60. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220236

黄土高原青藏高原过渡带植被NPP时空变化及其驱动力

Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 39–50. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240193

黄土高原地区4种常见树种适宜区对气候变化响应

Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(3): 21–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220138

东北阔叶红松林净初级生产力模拟及参数优化

Simulation and parameter optimization of net primary productivity of broadleaved Korean pine forest in northeastern China

北京林业大学学报, 2025, 47(9): 1–13. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250026

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响

Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230072

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250428

基于 CASA 模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应

范雯萱[1] 刘金成[1,2]
（1. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西 杨凌 712100；2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室，湖北 武汉 430079）

摘要:【目的】黄土高原作为典型生态脆弱区，在全球气候变化和退耕还林还草工程实施 20 年的背景下，其植被净初级生产力（NPP）的演变规律与核心驱动机制尚不明晰。本研究聚焦 NPP 时空动态、气候响应及未来趋势，旨在为区域生态恢复的精准调控提供科学支撑。**【方法】**基于 Carnegie-Ames-Stanford Approach（CASA）模型估算 2000—2020 年黄土高原 NPP，结合 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数及 Pearson 相关分析，系统探究 NPP 长时序时空演变特征及对气候因子的响应机制。**【结果】**（1）黄土高原 NPP 年均值为 318.49 g/(m^2·a)（以 C 计，下同），在空间上呈东南高、西北低的分布格局，高值区集中于水热优越的山西南部、关中平原等地，低值区分布于干旱少雨的鄂尔多斯高原等地；（2）2000—2020 年 NPP 整体呈显著上升趋势，年均增速为 6.34 g/(m^2·a)，其中林地增速最快，为 7.63 g/(m^2·a)，极显著增加区域占比 60.77%，集中于陕北榆林、延安等退耕还林重点实施区，印证了生态工程的显著成效；（3）Hurst 指数预测显示，61.08% 区域 NPP 未来可能由上升转为下降，35.28% 区域未来可能持续性上升；（4）降水是 NPP 增加的核心驱动因子，95.24% 区域呈正相关，而气温对干旱区植被生长存在抑制作用，明晰了半干旱区气候驱动的区域分异规律。**【结论】**黄土高原在退耕还林还草工程实施 20 年间植被恢复成效显著，未来需重点关注 61.08% 区域的生态逆转风险。本研究为区域生态恢复成效评估及适应性管理提供了科学依据，对于完善全球碳循环研究体系、推动区域可持续发展具有十分重要的意义。

关键词：气候变化；植被净初级生产力 (NPP)；时空演变；CASA 模型；黄土高原
中图分类号： S771.8 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000−1522(2026)04−0013−10
引文格式：范雯萱，刘金成. 基于 CASA 模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：13−22. Fan Wenxuan, Liu Jincheng. Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 13−22.

Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model

Fan Wenxuan[1] Liu Jincheng[1,2]
(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: ［**Objective**］As a typical ecologically fragile area, the evolution law and core driving mechanism of vegetation net primary productivity in the Loess Plateau are not yet clear against the backdrop of global climate change and the implementation of the Grain for Green Project for 20 years. This study focuses on the

收稿日期: 2025−11−01 **修回日期:** 2026−02−01
基金项目: 国家自然科学基金项目（32371875），陕西省重点研发计划（2025NC-YBXM-209），武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金（24A01）。
第一作者: 范雯萱。主要研究方向：气候变化下植被适应性评价。Email：fan_wenxuan@nwafu.edu.cn 地址：712100 陕西省杨凌农业高新技术产业示范区邰城路 3 号西北农林科技大学南校区。
责任作者: 刘金成，教授，博士生导师。主要研究方向：智慧林业多源遥感监测、林草生态适应性评价、气候变化和碳汇评估。Email：jinchengl@nwafu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

spatiotemporal dynamics, climate response, and future trends of NPP, aiming to provide scientific support for precise regulation of regional ecological restoration. [**Method**] Based on the Carnegie Ames Stanford Approach model, the NPP of the Loess Plateau from 2000 to 2020 was estimated. Combining Theil Sen trend analysis, Mann Kendall significance test, Hurst exponent, and Pearson correlation analysis, the long-term spatiotemporal evolution characteristics of NPP and its response mechanism to climate factors were systematically explored. [**Result**] (1) The annual average value of NPP on the Loess Plateau is 318.49 g/(m^2·year), which shows a spatial distribution pattern of high in the southeast and low in the northwest. The high-value areas are concentrated in areas such as southern Shanxi and the Guanzhong Plain with superior water and heat, while the low value areas are distributed in areas such as the arid and rainless Ordos Plateau. (2) From 2000 to 2020, the overall NPP showed a significant upward trend, with an average annual growth rate of 6.34 g/(m^2·year). Among them, forest land had the fastest growth rate, at 7.63 g/(m^2·year), with a highly significant increase in the proportion of regions accounting for 60.77%, concentrated in key implementation areas such as Yulin and Yan'an in northern Shaanxi, which confirms the significant effectiveness of ecological engineering. (3) The Hurst exponent prediction shows that 61.08% of the regions' NPP may shift from an upward trend to a downward trend in the future, and 35.28% of the regions may continue to rise in the future. (4) Precipitation is the core driving factor for NPP increase, with a positive correlation in 95.24% of regions, while temperature has an inhibitory effect on vegetation growth in arid areas, clarifying the regional differentiation patterns driven by climate in semi-arid regions. [**Conclusion**] The vegetation restoration on the Loess Plateau has achieved significant results in the implementation of the Grain for Green and Grassland Project for 20 years. In the future, special attention should be paid to the ecological reversal risk in 61.08% of the region. This study provides a scientific basis for the evaluation of regional ecological restoration effectiveness and adaptive management, and is of great significance for improving the global carbon cycle research system and promoting regional sustainable development.

Key words: climate change; net primary productivity; spatiotemporal evolution; CASA model; the Loess Plateau

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是绿色植物在单位时间和单位面积内通过光合作用固定的有机碳总量扣除自养呼吸后的剩余部分[1]。NPP 在生态系统碳循环中占据核心地位[2],主导着植物对二氧化碳的固定以及碳在生态系统各组分间的流动与分配,不仅是衡量自然条件下群落状况与生态系统质量的核心指标,也是调控碳源/汇动态及生态过程的关键因子。随着遥感技术的不断进步,卫星遥感已成为植被生态研究的核心手段,其在植被物候监测、生产力估算等领域的应用取得了突破性进展,已能较好地监测 NPP 的年际波动以及长期变化趋势[3]。陆地 NPP 的变化受多种因素影响[4],既受植被自身生理特征制约,又受气候、土壤以及人类活动等影响,且不同地区 NPP 的影响因素存在差异。因此,深入解析典型生态脆弱区 NPP 的时空演变规律及其驱动机制,对于完善全球碳循环研究和推动区域可持续发展具有重要科学价值。

黄土高原是我国典型生态脆弱区之一,开展该区域 NPP 研究具有突出的科学价值与现实意义。首先,该区域水土流失面积占总面积的 80% 以上,人地矛盾长期突出,植被自然恢复能力弱[5],而 NPP 可直接表征区域植被生长状况,通过监测其动态变化精准识别生态脆弱区,进而为黄土高原水土流失治理提供关键的数据支持。其次,退耕还林还草工程已实施 20 余年,区域植被动态亟需再度评估,以全面了解植被恢复成果及生态系统可持续潜力。第三,黄土高原地处半干旱区,对气候变化高度敏感,降水时空分布不均与温度波动直接影响植被光合效率,进而干扰 NPP 积累[4,6]。综上,揭示黄土高原 NPP 的时空演变规律并阐明其对气候因子的响应机制,是实现区域生态恢复精准调控与可持续发展的科学基础。

Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型是典型的多源数据驱动光利用效率模型,因其结构简洁、数据易获取、估算精度较高等优势,已成为全球及区域尺度 NPP 估算的主流方法之一。朱文泉等[1]完成 CASA 模型的中国本土化改造,估算了 1989—1993 年中国陆地植被 NPP,且通过实测数据验证了模型可靠性,为我国区域尺度 NPP 研究提供了关键技术支撑。目前,学者们在 NPP 时空变化特征及驱动机制方面已取得一定进展:刘仟仟等[7]发现,

2000—2019 年大通县 NPP 呈东南高、西北低的分布格局；蔡明泽等[8]指出北京森林 NPP 空间分布表现为西北高、东南低的特征；穆少杰等[9]揭示内蒙古植被 NPP 空间分布具有显著的经度地带性规律。在影响因素方面，刘洋洋等[10]证实降水增加是黄土高原草地生产力提升的主要驱动因子；而许红梅等[11]在黄土丘陵沟壑区小流域的研究表明，NPP 对气温升高的敏感性显著高于降水变化。综上可知，不同区域、不同时空背景下 NPP 的时空变化特征及主导驱动因子存在显著差异，区域尺度针对性研究十分必要。但现有研究仍存在明显不足：一是多数研究时效性较弱，未能完整覆盖退耕还林还草工程实施的关键周期；二是研究多聚焦于历史时段 NPP 的时空变化特征，鲜少开展未来变化趋势的预测。

基于此，本研究基于 2000—2020 年长时序数据，利用 CASA 模型估算黄土高原 NPP，系统探究其时空演变特征、气候响应机制及未来变化趋势，以期为区域生态恢复成效评估与精准调控提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

黄土高原（33° ~ 41°N，100° ~ 115°E）位于中国西北部，涵盖陕、甘、晋、宁、内蒙古大部及青、豫部分地区，总面积约 64 万 km^2。区域整体地势西北高、东南低，海拔 85 ~ 5 100 m；气候属大陆性季风气候，年均温 3.6 ~ 14.3 ℃（由东南向西北递减），冬季严寒、夏季暖热，气温年较差和日较差大，年降水量 250 ~ 750 mm，年太阳辐射量 4 000 ~ 6 000 MJ/m^2（西北区域显著高于东南）。地貌类型丰富，植被呈现明显的经向地带性分异：自东南向西北依次为落叶阔叶林、森林草原、典型草原及荒漠草原。地带性土壤为黄土，土质疏松、孔隙度高，保水保肥性能差，抗侵蚀能力弱。

1.2　数据来源

本研究所用数据包括 2000—2020 年归一化植被指数（NDVI）、逐月气象数据（降水量、平均气温、太阳辐射量）以及植被类型数据，具体数据来源详见表 1。

所有栅格数据统一采用 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影坐标系，空间分辨率重采样至 1 km，并按黄土高原矢量边界裁剪。利用捕捉栅格（Snap Raster）工具对齐所有数据的像元数、行列号及空间范围，确保空间一致性。气象数据原始格式为 NETCDF，每年包含 12 个波段，分别对应全年 12 个月。采用 ArcGIS 的多维工具创建栅格图层。年总降水量由月降水量逐像元累加得到；年平均气温由 12 个月均气温逐像元算术平均计算得到；太阳辐射量单位统一换算为 MJ/m^2。植被类型数据本研究选取 2000—2020 年期间的 8 期数据，包括 2000、2005、2008、2010、2013、2015、2018 和 2020 年。

1.3　研究方法

1.3.1　CASA 模型

本研究采用 CASA 模型估算黄土高原 2000—2020 年 NPP。NPP 由植被吸收的光合有效辐射（PAR）和实际光能利用率（ε）共同决定，其估算公式为

$$Z_{\mathrm{NPP}}(x,t) = Y_{\mathrm{PAP}}(x,t) \times \varepsilon(x,t) \tag{1}$$

式中：$Z_{\mathrm{NPP}}(x,t)$为像元 x 在 t 月的 NPP（g/(m^2·a)）；$Y_{\mathrm{PAP}}(x,t)$为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射（MJ）；$\varepsilon(x,t)$为像元 x 在 t 月的实际光能利用率（g/MJ）。

光合有效辐射（PAR）由太阳总辐射（SOL）和植物本身的特征决定，其计算公式为

$$Y_{\mathrm{PAP}}(x,t) = S_{\mathrm{SOL}}(x,t) \times F_{\mathrm{FPAR}}(x,t) \times 0.5 \tag{2}$$

式中：$S_{\mathrm{SOL}}(x,t)$表示 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量（MJ/(m^2·月)），$F_{\mathrm{FPAP}}(x,t)$为植被冠层对 PAR 的吸收比例。

光能利用率是指单位面积植被在特定时间内合成的干物质所固定的化学能与同期该面积接收的光合有效辐射的比值。不同植被类型光能利用率参考

表 1　研究数据及来源

Tab. 1　Study data and data sources

数据名称	数据格式	数据来源	数据集	空间分辨率
归一化植被指数	GRID	资源环境科学数据平台（https://www.resdc.cn）	中国年度植被指数（NDVI）空间分布数据集	1 km
逐月降水量	NETCDF	国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn）	中国1 km分辨率逐月降水量数据集（1901—2024）[12]	1 km
逐月平均气温	NETCDF	国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）	中国1 km分辨率逐月平均气温数据集（1901—2023）	1 km
逐月太阳辐射	NETCDF	Google Earth Engine平台（https://earthengine.google.com/）	TerraClimate数据集[13]	4 km
植被类型	TIFF	资源环境科学数据平台（http://www.resdc.cn）	中国多时期土地利用遥感监测数据集（CNLUCC）	1 km

朱文泉等[1]的研究结果确定。

1.3.2 趋势分析

本研究采用 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验，分析黄土高原 2000—2020 年 NPP 的时空变化趋势。其中，Theil-Sen 趋势分析通过计算时序变化斜率，判定 NPP 增减趋势，借助 Mann-Kendall 检验判定趋势的显著性。根据显著性检验分级规则[14]，将研究区内 NPP 变化趋势特征分为极显著增加或减少、显著增加或减少、微显著增加或减少、不显著增加或减少、无变化 9 个等级。

1.3.3 Hurst 指数

采用重标极差分析(R/S 分析)计算 Hurst 指数，预测 NPP 未来变化趋势的持续性特征。Hurst 指数的范围为 0 ~ 1，当 $0.5 < H < 1$，时间序列呈动态持续性，即未来演变方向与历史趋势一致，且 H 值越接近于 1，持续性越强；当 $H = 0.5$，未来趋势与历史趋势无相关性；当 $0 < H < 0.5$，时间序列呈反持续性，H 值越接近于 0，反持续性越强。本研究将 2000—2020 年 NPP 的趋势分析结果与 Hurst 指数进行耦合分析[15]，划分出 4 类变化类型，分别为持续性上升或下降，$H \in (0.5,1)$；从下降变为上升，$H \in (0,0.5)$；以及由上升变为下降，$H \in (0,0.5)$。

1.3.4 Pearson 相关分析

采用 Pearson 相关系数探究黄土高原 NPP 与气候因子(降水、气温、太阳辐射)的线性关联特征。Pearson 相关系数是衡量两个变量间线性关联强度的经典指标，相关系数 r 介于−1 ~ 1，$|r|$越趋近于 1，表明两变量的线性关联度越高；$r > 0$，呈正相关；$r < 0$，呈负相关。

2 结果与分析

2.1 NPP 时空演变特征

2.1.1 精度验证

本研究采用 MODIS 官方产品 MOD17A3 的 NPP 数据对 CASA 模型估算结果进行精度检验。计算 MOD17A3 产品 2000—2020 年逐年逐像元 NPP 的算术平均值，随后随机选取研究区内 10 000 个有效像元点，将本研究估算的多年平均 NPP 与 MOD17A3 多年平均 NPP 进行逐点线性回归分析(图 1)。结果显示，两数据集在像元尺度上呈现显著正相关($R^2 = 0.777$)，表明本研究 NPP 估算结果与 MOD17A3 具有较高的一致性，验证了 CASA 模型在黄土高原的适用性与可靠性。

2.1.2 NPP 年际变化特征

2000—2020 年黄土高原 NPP 呈现显著的年际波动与整体上升趋势(图 2)，最高年均值出现在 2018 年，为 375.59 g/(m²·a)，最低值出现在 2000 年，为 224.59 g/(m²·a)，年均增长量约 6.34 g/(m²·a)。2000—2004 年、2005—2007 年、2009—2012 年及 2015—2020 年呈波动上升趋势，而 2004—2005 年、2007—2009 年和 2012—2015 年呈波动下降趋势。

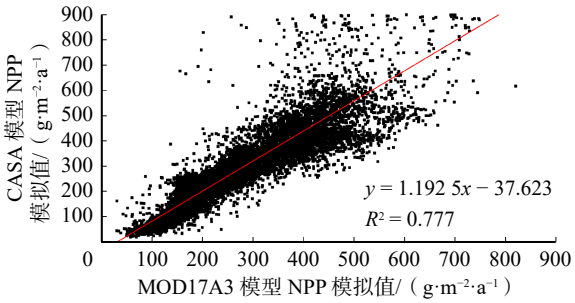


图 1 CASA 模型与 MOD17A3 产品 NPP 估算结果对比

Fig. 1 Comparison of NPP estimation results between CASA model and MOD17A3 product

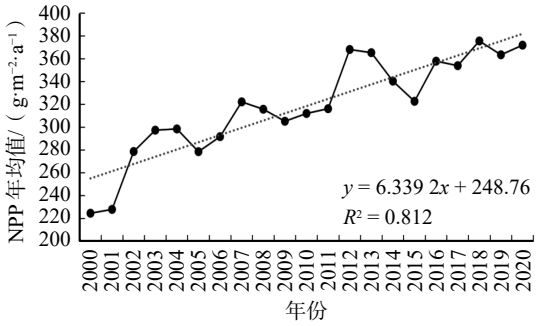


图 2 2000—2020 年黄土高原植被 NPP 年际变化

Fig. 2 Interannual variation of vegetation NPP on the Loess Plateau from 2000 to 2020

2.1.3 NPP 空间分布特征

2000—2020 年黄土高原 NPP 年均值为 318.49 g/(m²·a)，空间上呈现从东南向西北逐渐减少的趋势(图 3)。其中，山西省大部分区域、陕西省关中地区以及青海省东部的 NPP 值最高，年均值可达 600 g/(m²·a)以上，甘肃省天水市、陕西省宝鸡市和西安市部分地区年均 NPP 达 1 000 g/(m²·a)以上。该区域地形以山地、平原和盆地为主，植被类型多为林地和耕地，水热条件较优越，植被覆盖度较高，为 NPP 积累提供了良好基础。而在黄土高原西北部，包括内蒙古鄂尔多斯高原、宁夏中部和甘肃陇中地区，NPP 值较低，年均值不足 200 g/(m²·a)。该区域气候干旱，降水稀少，河流水系匮乏，植被以沙地、草地和灌木为主，植被覆盖度低，制约 NPP 的累积。

2.1.4 不同植被 NPP 年际变化特征

为探究不同植被类型 NPP 的年际变化差异，本研究基于植被类型数据，借助 ArcGIS 重分类与按属性提取工具，提取 2000—2020 年黄土高原地区稳定

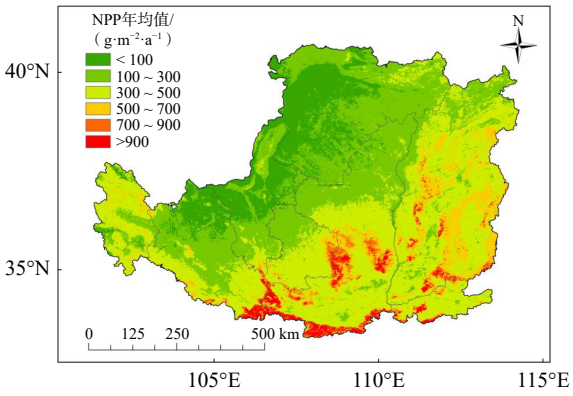


图 3　2000—2020 年黄土高原年均 NPP 空间分布

Fig. 3　The spatial distribution of mean annual NPP in the Loess Plateau from 2000 to 2020

分布的耕地、林地、草地 3 种植被类型，进而对比分析其 NPP 年际变化特征。

如图 4 所示，草地面积占比最大(约 40%)，耕地次之(约 30%)，林地最小(14.4%)。草地分布最广，覆盖所有省市，是研究区面积占比最大的植被类型。耕地以旱地为主，主要分布于黄土丘陵、塬面等区域；河套平原、汾渭谷地等灌溉条件优越的地区以水浇地为主，耕地除内蒙古鄂尔多斯高原鲜有分布外，其他各省份均有广泛分布。林地集中分布于山西省、陕北延安市、青海省部分地区以及黄土高原南部边缘，其余省市仅有零星分布。

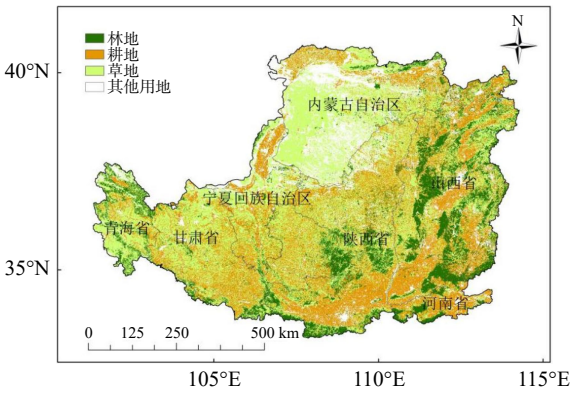


图 4　黄土高原 3 种植被类型分布

Fig. 4　Distribution of three vegetation types in the Loess Plateau

耕地多年平均 NPP 为 321.31 g/(m²·a)，林地为 545.03 g/(m²·a)，草地为 276.09 g/(m²·a)。如图 5 所示，3 种植被类型的年均 NPP 均呈波动上升趋势，与黄土高原整体 NPP 变化趋势一致。其中，林地 NPP 增速最快，达 7.63 g/(m²·a)，耕地与草地的增速较慢且接近，分别为 6.43 g/(m²·a)和 6.51 g/(m²·a)。林地 NPP 于 2016 年达到最高值，2001 年达到最低值，耕地和草地 NPP 于 2012 年达到最高值，2000 年达到最低值。

2.2　NPP 变化趋势与显著性分析

基于 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验，黄土高原 NPP 变化趋势呈现显著空间分异(图 6)。变化速率由东南向西北递减，与多年平均 NPP 空间格局基本一致。高值区集中于吕梁山脉西侧、宁夏固原市、陇东和陇中地区、黄土高原南部秦岭山区以及陕北等区域，年均增幅大于 30 g/(m²·a)，仅 3.5% 的区域 NPP 呈下降趋势，集中分布在阴山南麓、宁夏北部及青海省高海拔地区。

研究区 NPP 变化趋势以显著增加为主导(表 2)：

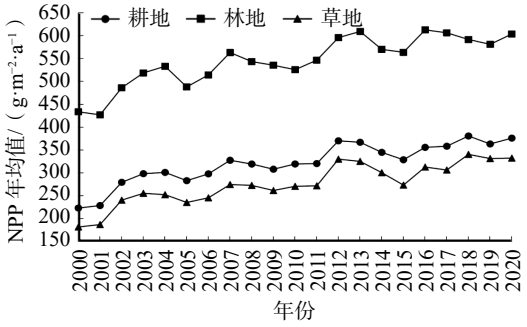
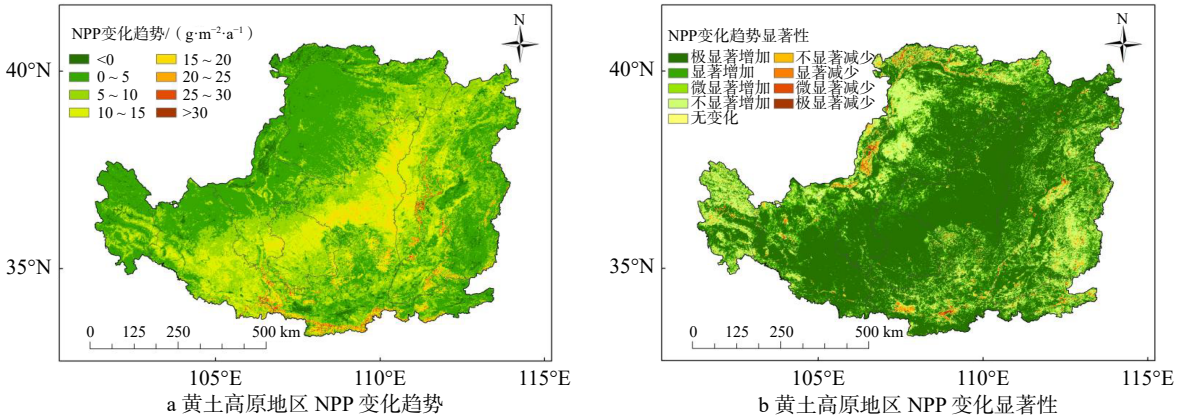


图 5　不同植被类型年平均 NPP 年际变化

Fig. 5　Interannual variation of mean annual NPP for different vegetation types



a 黄土高原地区 NPP 变化趋势　　b 黄土高原地区 NPP 变化显著性

图 6　黄土高原地区 NPP 变化趋势与显著性

Fig. 6　Change trend and significance of NPP in the Loess Plateau

表 2 不同植被类型显著性检验趋势

Tab. 2 Trend of significance test for different vegetation types

β	Z	趋势特征	整体面积占比/%	耕地面积占比/%	林地面积占比/%	草地面积占比/%
$\beta>0$	$Z>2.58$	极显著增加	60.77	62.54	57.30	62.27
	$1.96<Z\leqslant2.58$	显著增加	14.86	14.29	16.80	15.21
	$1.65<Z\leqslant1.96$	微显著增加	5.42	4.83	6.22	5.62
	$Z\leqslant1.65$	不显著增加	15.31	13.96	16.99	15.32
$\beta=0$	Z	无变化	0.13	0.02	0.03	0.03
$\beta<0$	$Z\leqslant1.65$	不显著减少	2.66	3.38	2.32	1.39
	$1.65<Z\leqslant1.96$	微显著减少	0.21	0.29	0.10	0.05
	$1.96<Z\leqslant2.58$	显著减少	0.33	0.40	0.15	0.07
	$Z>2.58$	极显著减少	0.31	0.29	0.09	0.04

注：β为Theil-Sen趋势分析的斜率，反映NPP年变化速率；Z为Mann-Kendall检验的统计量，反映变化显著性水平。下同。

极显著增加占 60.77%，显著增加占 14.86%，不显著增加占 15.31%，3 者合计 90.94%。减少区域集中于西北部和东南部，其中西安市区、宝鸡市区呈显著减少，可能与城市化进程导致的局部植被覆盖下降有关。从不同植被类型来看，耕地、林地和草地的 NPP 均以增加趋势为主(表 2)，各类植被极显著增加、显著增加区域占比均处于较高水平。整体而言，黄土高原植被生产力呈显著恢复态势。

2.3 NPP 未来变化趋势预测

基于 Hurst 指数分析，黄土高原 NPP 未来变化持续性呈现显著空间分异(图 7)。研究区 Hurst 指数范围为 0.14 ~ 0.93，均值为 0.44。其中 Hurst 指数 < 0.5(反持续性)区域占 62.97%，> 0.5(持续性)区域占 37.03%。这表明超过六成区域未来 NPP 变化趋势与 2000—2020 年历史趋势相反，生态系统稳定性面临挑战。如图 7 所示，NPP 未来持续上升的区域主要分布于内蒙古鄂尔多斯市与陕西榆林市交界地区、陇东地区等；未来由上升变为下降的区域主要分布在山西省大部分地区、内蒙古西侧、宁夏大部分地区、甘肃陇中地区及青海等区域。

从不同植被类型 NPP 未来变化趋势(表 3)可以看出，林地反持续性最强，上升转为下降区域约占 64.43%，持续性上升约占 32.88%；草地由上升转为下降区域占比达 63.94%，持续性上升约占 34.47%；

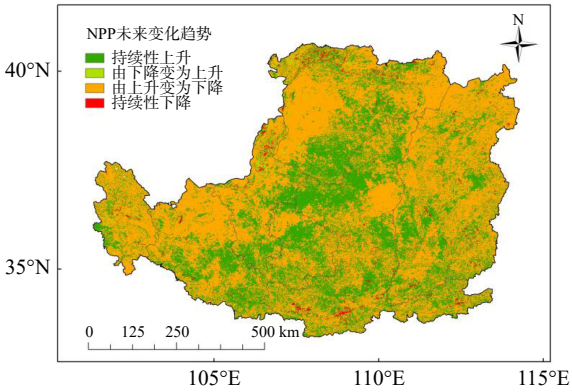


图 7 黄土高原地区植被 NPP 未来变化趋势

Fig. 7 The future trend of vegetation NPP in the Loess Plateau region

耕地上升转为下降区域占 58.25%，持续性上升占 37.37%。3 种植被类型持续性下降区域占比均低于 2%，由下降变为上升区域占比均低于 3%，表明历史退化区域未来自然逆转概率较低，需重点关注。

2.4 气候因子对 NPP 的驱动分析

2.4.1 气候因子的年际变化趋势

2000—2020 年黄土高原气候整体呈暖湿化趋势(图 8)。研究期内，年降水量均值为 457.96 mm，波动幅度较大，变异系数达 9.74%，2003 年(586.81 mm)与 2005 年(390.42 mm)分别为研究期内最高、最低值；年均温均值为 8.61 ℃，波动相对平缓，变异系数为 3.61%，2006 年(9.12 ℃)与 2012 年(7.99 ℃)为研

表 3 不同植被类型 NPP 未来变化趋势

Tab. 3 Future trends of NPP under different vegetation types

β	Hurst指数	NPP变化持续性	整体面积占比/%	耕地面积占比/%	林地面积占比/%	草地面积占比/%
$\beta>0$	0.5 ~ 1	持续性上升	35.28	37.37	32.88	34.47
$\beta<0$	0 ~ 0.5	由下降变为上升	1.89	2.40	1.37	0.96
$\beta>0$	0 ~ 0.5	由上升变为下降	61.08	58.25	64.43	63.94
$\beta<0$	0.5 ~ 1	持续性下降	1.75	1.98	1.32	0.63

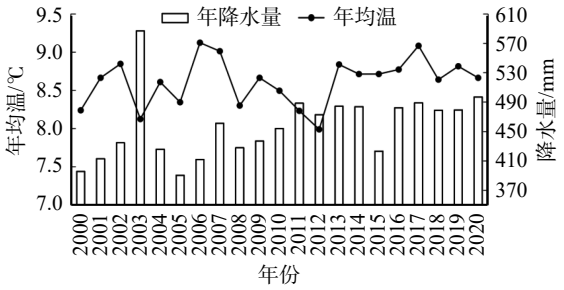


图 8　2000—2020 年气候因子的年际变化

Fig. 8　Interannual variation of climate factors from 2000 to 2020

究期内极值。降水年增速(2.97 mm/a)显著高于气温年增速(0.01 ℃/a)，水热条件整体改善为区域植被恢复提供了有利环境。

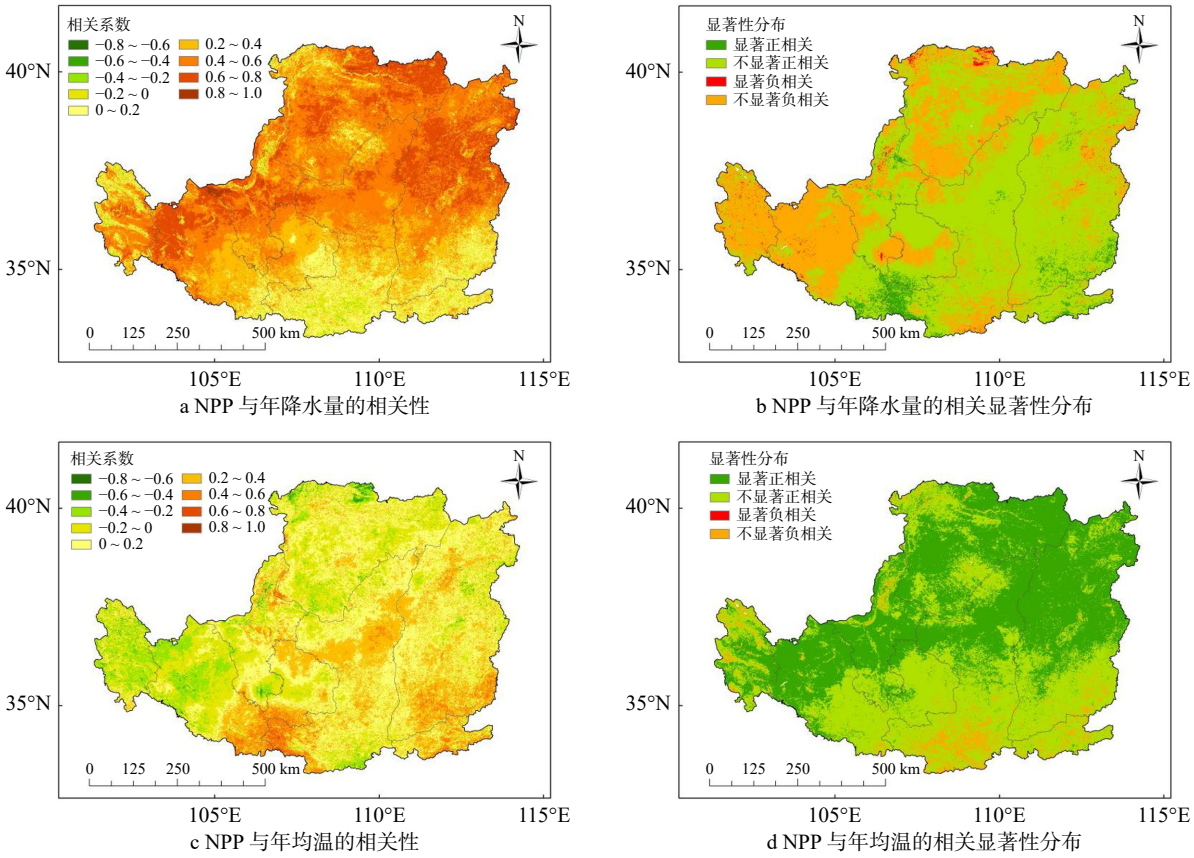
2.4.2　NPP 对年降水量的响应

NPP 与年降水量以正相关为主导(图 9a)，正相关区域占 95.24%，负相关占 4.76%。负相关区域集中在黄土高原东南角，包括关中平原、山西省南部及研究区内的河南部分区域。该区域水热条件优越，降水非限制因子，且灌溉农业发达，NPP 受人为管理影响可能更大。

显著性分析显示(图 9b)：NPP 与年降水量呈显著正相关的区域占总面积的 51.28%，主要分布在黄土高原北部大部分地区，包括陇中地区、宁夏中部、陕北地区、研究区内内蒙古大部分以及山西省北部；呈不显著正相关区域占总面积的 43.96%，主要分布在黄土高原中南部，包括陇南地区、陇东地区、陕西省延安市、山西省运城市、临汾市、长治市等地；呈负相关的区域主要分布在黄土高原东南部、青海省大部分地区、宁夏北部以及鄂尔多斯高原西北角有部分分布。

2.4.3　NPP 对年均温的响应

NPP 与年均温相关性较弱(图 9c、d)，正相关占 62.87%，主要分布于晋陕大部、陇东、宁蒙部分地区；负相关占 37.13%，主要分布于青海、陇中、宁蒙小部分地区。NPP 与年均温呈现不显著正相关区域占总面积的 59.44%，主要集中在黄土高原东南部大部分地区，包括甘肃天水市、平凉市，陕北延安市、榆林市，山西省西部的大部分城市以及研究区内的河南省地区；显著正相关区域仅占 3.43%，分布于甘肃与陕西交界。呈现不显著负相关区域占总面积的 36.52%，主要集中在黄土高原西北部，包括研究区内青海省地区、陇中地区、陇东中部地区、宁夏西北部、内蒙古大部分地区、陕西省西安市以及太行山脉西部部分地区。以上表明温度对黄土高原 NPP 的限制作用弱于降水。



a NPP 与年降水量的相关性

b NPP 与年降水量的相关显著性分布

c NPP 与年均温的相关性

d NPP 与年均温的相关显著性分布

图 9　气候因子对 NPP 的响应

Fig. 9　Response of climate factors to NPP

3 讨 论

本研究基于 2000—2020 年长时序数据，系统揭示了退耕还林还草工程实施 20 年来黄土高原 NPP 的累积效应与未来风险。研究区内 NPP 年均增速达 6.34 g/(m^2·a)，极显著增加区域占比高达 60.77%，这一结果与宋午椰等[16]、刘欢欢等[17]的研究结果基本一致。林地 NPP 增速最快，这与陕北榆林、延安等地退耕还林成效显著相关。谢宝妮等[4]的量化分析也证实，退耕还林还草工程对黄土高原 NPP 增加的贡献率达 43%。但结合 Hurst 指数预测显示，61.08% 区域的 Hurst 指数低于 0.5($\beta > 0$)，表明当前 NPP 上升趋势具有“均值回复”特征。在无外部干预强化下，未来 NPP 极可能转为下降趋势，这表明生态恢复成果面临较高逆转风险。考虑到黄土高原生态本底的脆弱性，其水分胁迫下植被蒸腾与降水失衡[18]、土壤贫瘠削弱根际稳定性[19]以及人类干扰加速斑块化逆转等因素[20]，都会加剧生态恢复的潜在逆转风险。

黄土高原地下水埋藏深，降水是土壤水分的唯一来源且季节分配不均，区域植被生长长期受水分条件约束。人工造林虽能提升固碳与水土保持功能，但高密度、大规模种植会加剧植被蒸腾耗水，可能导致土壤水分亏缺，易打破区域水分收支平衡，限制植被长期生长[21]。退耕还林还草工程推动区域植被覆盖与 NPP 显著提升的同时，使生态系统耗水需求持续增加，当前植被恢复规模已逐步接近区域水资源承载力阈值[22]。植被快速增长与水分供给不足的矛盾日益突出，植被恢复难以持续，这也是区域 NPP 未来存在较高逆转风险、生态系统稳定性面临挑战的核心机制。未来生态保护与恢复的焦点需要从规模扩张向成效巩固和功能提升方向转变，同时应优化植被结构与种植密度，缓解生态需水压力。Yang 等[23]强调潜在自然植被在黄土高原未来生态恢复策略中的核心指导作用，为本研究后续结合植被适应性特征优化恢复方案、防范生态逆转风险提供了重要方向。

气候驱动分析表明，黄土高原 NPP 变化受水热耦合作用共同调控，并呈现显著的区域限制因子转换特征。降水是区域 NPP 主导限制因子，95.24% 的区域 NPP 与年降水量呈正相关，这与史晓亮等[24]研究结论一致。在北部干旱半干旱区，水分供给长期不足，降水为核心限制性因子，升温会加剧水分消耗而抑制植被生长，包括陇中、陕北及内蒙古大部，降水增加可直接改善土壤水分状况，促进光合作用，从而驱动 NPP 提升。相比之下，气温的驱动作用表现出显著空间异质性，并与水分条件存在明显耦合效应。62.87% 的正相关区域集中在山西、陕西等水分相对充足的区域，水分不再成为主要约束，气温转为限制因子。气温升高能提高植物光合酶活性，加快光合作用[25]，这与 Wang 等[26]针对陕西不同地理气候区的研究结论一致，其研究发现森林植被覆盖与地表温度的相互作用存在显著区域差异，水分充足区域的植被生长更易受益于适度升温。而 37.13% 的负相关区域集中在青海东部、甘肃陇中干旱区，这些地方本身水资源匮乏，气温升高会加剧土壤蒸发和植物蒸腾，水分更紧缺[27]，在高温和干旱的双重作用下，植被生长受到抑制，导致 NPP 下降。未来区域生态恢复可依据水热耦合与限制因子空间分异实施差异化治理，提升生态系统稳定性与长期可持续性。

然而，本研究也存在一定的局限性：首先，驱动因子贡献分解不足，仅分析了降水和气温对 NPP 的影响，未对两者的贡献比例进行定量拆分，无法明确二者对植被变化的相对贡献率；其次，考虑因素不够全面，植被生长除了受到气候因素干扰，同时会受到人类活动等多种因素综合影响[3]，接下来的研究会重点考虑多因素协同对大尺度植被生长的影响模式；第三，存在空间不确定性问题，数据时空分辨率对生态过程细节捕捉至关重要，本研究采用的 1 km 空间分辨率数据、太阳辐射数据重采样及植被类型数据时间分辨率，均可能带来一定的空间不确定性[28]；第四，方法假设相对简化，基于像元独立、趋势稳定的传统假设开展分析，未考虑极端气候等非线性变化带来的影响。因此，未来的研究可致力于构建更高分辨率、多因子耦合的生态系统模型，引入残差分析、地理探测器等方法量化驱动贡献，整合遥感、地面观测和过程模型，以更精准地模拟和预测植被生产力的动态变化。

4 结 论

本研究基于 CASA 模型估算了 2000—2020 年黄土高原 NPP 变化趋势，结合 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数及 Pearson 相关分析等方法，系统探究了 NPP 的时空演变特征及其对气候因子的响应，并预测了未来变化趋势的持续性。

(1)黄土高原 NPP 呈东南高、西北低梯度分布，多年均值为 318.49 g/m^2。高值区(NPP > 600 g/m^2)集中于水热条件优越的山西省南部、关中平原及甘肃省天水市；低值区(NPP < 200 g/m^2)分布于干旱少雨的鄂尔多斯高原。2000—2020 年 NPP 整体显著上升，年均增速为 6.34 g/(m^2·a)，极显著增加区域占

比 60.77%，主要分布在黄土高原东北—西南一线两侧。其中林地增速最快，为 7.63 g/(m^2·a)。

(2)Hurst 指数表明，黄土高原 61.08% 区域的 NPP 呈现反持续性，未来可能由上升转为下降，主要分布于山西省大部分地区、内蒙古西侧、宁夏大部分地区、甘肃陇中地区及青海等区域；仅 35.28% 区域可能持续上升，分布于鄂尔多斯东侧、陇东地区。不同植被类型中，林地和草地由上升转为下降的占比均超 60%，需防范生态恢复成果的逆转风险。

(3)降水是黄土高原 NPP 的主导限制因子，95.24% 区域的 NPP 与年降水量呈正相关，其中 51.28% 区域呈显著正相关，集中于黄土高原北部。温度对 NPP 的影响有限，仅 4% 区域显著相关。

参 考 文 献

[1] 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 W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413−424.

[2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. science, 1998, 281(5374): 237−240.

[3] Wang X Y, Gong Z, Liu J C. Quantitative assessment of vegetation carbon sequestration in typical natural secondary forests of the Loess Plateau: incorporating the influences of human activities and climate variations [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 388: 126000.

[4] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244−253.
Xie B N, Qin Z F, Wang Y, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 244−253.

[5] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11−19.
Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11−19.

[6] 苟娇娇, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原植被恢复引发区域气温下降 [J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3970−3978.
Gou J J, Wang F, Jin K, et al. Cooling effect induced by vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3970−3978.

[7] 刘仟仟, 贺康宁, 左亚凡, 等. 黄土高原−青藏高原过渡带植被 NPP 时空变化及其驱动力——以青海省大通县为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 39−50.
Liu Q Q, He K N, Zuo Y F, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 39−50.

[8] 蔡明泽, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京市森林 NPP 时空变化及驱动力分析 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 282−290.
Cai M Z , Xin X B, Pei S X, et al. Spatiotemporal dynamic changes and driving forces of forest NPP in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 282−290.

[9] 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 S J, Li J L, Zhou W, 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.

[10] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309−2319.
Liu Y Y, Wang Q, Yang Y, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NPP and its driving factors in the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2309−2319.

[11] 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 等. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟 [J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2939−2947.
Xu H M, Gao Q Z , Huang Y M, et al. Simulated the impact of climate change on net primary production in hilly area of Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2939−2947.

[12] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931−1946.

[13] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015 [J]. Scientific Data, 2018, 5: 170191.

[14] 崔瑶, 王耀锋, 程艳, 等. 基于 CASA 模型的阿勒泰地区近 10 年植被 NPP 时空分布特征 [J]. 新疆环境保护, 2025, 47(1): 11−22.
Cui Y, Wang Y F, Cheng Y, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of vegetation NPP in the past 10 years based on CASA model in Altay Region[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2025, 47(1): 11−22.

[15] 田朋飞, 闫丰, 王宗超, 等. 太行山−燕山碳源/碳汇时空变化及驱动因素分析 [J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4403−4415.
Tian P F, Yan F, Wang Z C, et al. Analysis of driving factors for spatiotemporal changes in carbon sources/sinks in Taihang and Yanshan Mountains [J]. Environmental Science, 2025, 46(7): 4403−4415.

[16] 宋午椰, 许行, 林毅雁, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29−42.
Song W Y, Xu H, Lin Y Y, et al. Spatial and temporal variation characteristics and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 29−42.

[17] 刘欢欢, 陈印, 刘悦, 等. 基于随机森林模型的黄土高原草地净初级生产力时空格局及未来演变趋势模拟 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 123−131.
Liu H H, Chen Y, Liu Y, et al. Simulation of spatial pattern and future trends of grassland net primary productivity in the Loess Plateau based on random forest model [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 123−131.

[18] 宋仕燕, 祁旭阳, 田露荷, 等. 黄土高原生态系统年总初级生产力响应干旱的时空动态 [J]. 生态学报, 2025, 45(10): 4916−4926.
Song S Y, Qi X Y, Tian L H, et al. Response of annual gross primary productivity to different indices of aridity under climate change in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4916−4926.

[19] Wang J, Liu G, Wang B, et al. Root morphological characteristics as predominant factors enhancing soil resistance in typical grasslands of the Chinese Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2026, 261107164−107164.

[20] 巢妍, 梁丽娥, 高乐凡, 等. 基于 Google Earth Engine 的黄土高原核归一化植被指数动态演变及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2026, 46(2): 846−860.
Cao Y, Liang L E, Gao L F, et al. Study on the dynamic evolution and driving factors of kNDVI on the Loess Plateau based on GEE [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(2): 846−860.

[21] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113−122.

[22] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110−1117.
Bo B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110−1117.

[23] Yang X Y, Liu J C, Dong Z. Critical role of potential natural vegetation in guiding future restoration strategies for China's Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 392: 126919.

[24] 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 X L, Yang Z Y, Wang X S, 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.

[25] Shi C, Sun G, Zhang H, et al. Effects of warming on chlorophyll degradation and carbohydrate accumulation of Alpine herbaceous species during plant Senescence on the Tibetan Plateau [J]. PLoS One, 2014, 9(9): e107874.

[26] Wang M H, Liu J C. Evaluation of the potential effects of forest vegetation cover on surface temperature in different geographical and climatic regions of Shaanxi Province, China [J]. Catena, 2025, 255: 109020.

[27] Anderegg W R L, Plavcová L, Anderegg L D L, et al. Drought's legacy: multiyear hydraulic deterioration underlies widespread aspen forest die-off and portends increased future risk [J]. Global Change Biology, 2013, 19(4): 1188−1196.

[28] Lang N, Schindler K, Wegner J D. Country-wide high-resolution vegetation height mapping with Sentinel-2 [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111347.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 孟 平）