

潘鹏飞, 潘飞燕, 张海旭, 等. 渭河流域净初级生产力遥感反演及变化归因分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 70-81. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.006

PAN Pengfei, PAN Feiyan, ZHANG Haixu, et al. Remote sensing inversion of net primary productivity and change attribution analysis in the Weihe River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 70-81. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.006

渭河流域净初级生产力遥感反演及变化归因分析

潘鹏飞¹, 潘飞燕², 张海旭², 金裕³

(1. 河南省轨道交通智能安全工程技术研究中心, 河南 郑州 451460; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048)

摘要:【目的】研究旨在探讨2000年实施生态修复政策以来, 渭河流域净初级生产力的演化特征, 揭示气候变化与人类活动对植被生态的综合作用机制, 为流域生态保护与可持续发展提供理论依据。【方法】基于GEE云平台, 调用MOD17A3HG6.1数据, 分析NPP、CPP和VPG三类净初级生产力的时空分布格局。通过构建六种植被变化情景, 探讨气象因子和人类活动对植被变化的驱动模式, 并结合最小二乘回归分析法、Pearson相关系数和贡献指数对各影响因子进行定量评估。【结果】(1) 2000—2023年间, 渭河流域NPP在年内呈单峰型季节性变化, 年际增幅为 $9.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 空间分布呈现“南高北低”的格局。(2) 在植被恢复过程中, 气温和降水与植被生长呈正相关, 相关系数分别为0.26和0.43; 太阳辐射在以人类活动为主导的植被恢复中呈轻度正相关, 相关系数为0.12; 人口密度和道路密度对约34.77%的植被恢复区域起促进作用。(3) 在植被退化过程中, 降水对植被退化的贡献度为30.43%, 人口密度和道路密度对植被退化的相关系数分别为0.71和0.64。【结论】研究期间, 渭河流域NPP整体呈增长趋势, 气温、降水、人口密度和道路密度对NPP的驱动作用显著, 太阳辐射的影响相对较弱。气候变化是推动流域植被恢复的主要因素, 而生态修复等人类活动措施则有效提升了区域植被的生产力。

关键词: 净初级生产力(NPP); 气候生产潜力(CPP); 气候变化; 人类活动; 渭河流域; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.006

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0070-12



Remote sensing inversion of net primary productivity and change attribution analysis in the Weihe River Basin

PAN Pengfei¹, PAN Feiyan², ZHANG Haixu², JIN Yu³

(1. Henan Railway Intelligent Safety Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 451460, Henan, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-12-16; 录用日期: 2024-12-17; 网络出版日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会青年科学基金项目(62003313); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102241008)

作者简介: 潘鹏飞(1990—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事遥感信息技术研究。E-mail: panpengfei09@126.com

通信作者: 张海旭(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: haixuzhang@chd.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] Aiming at revealing the synergistic impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation ecology, the spatiotemporal dynamics of net primary productivity (*NPP*) in the Weihe River Basin since the implementation of the ecological restoration policy in 2000 are explored, which provide a theoretical basis for the ecological conservation and sustainable development of the region. [Methods] Based on the Google Earth Engine (*GEE*) cloud platform, MOD17A3HGF6.1 datum are utilized to investigate the spatiotemporal distribution patterns of *NPP*, *CPP*, and *VPG*. By constructing six vegetation change scenarios, it examines the influence mechanisms of climatic factors and human interventions on vegetation changes. The contributions of each factor were quantitatively evaluated using least squares regression, Pearson correlation analysis, and contribution indices. [Results] (1) From 2000 to 2023, *NPP* in the Weihe River Basin exhibited unimodal seasonal fluctuations, with an average annual increase of $9.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and demonstrated a spatial gradient of “higher in the south, lower in the north”. (2) During the vegetation restoration phase, temperature and precipitation were positively correlated with vegetation growth, with correlation coefficients of 0.26 and 0.43, respectively. Solar radiation displayed a marginal positive correlation in vegetation restoration driven by human activity, with a correlation coefficient of 0.12. Population density and road density accounted for approximately 34.77% of the restored vegetative area. (3) In the vegetation degradation phase, precipitation was responsible for 30.43% of the vegetation decline, with correlation coefficients for population density and road density reaching 0.71 and 0.64, respectively. [Conclusion] Throughout the study period, *NPP* in the Weihe River Basin exhibited a general upward trajectory. Climate variables such as temperature and precipitation, population and road density, exert substantial influence on *NPP*, while solar radiation has a comparatively limited effect. Climate change emerges as the predominant driver of vegetation restoration, while human interventions such as ecological restoration efforts significantly enhance regional vegetation productivity.

Keywords: net primary productivity (*NPP*); climate potential productivity (*CPP*); climate change; human activities; Weihe River Basin; influencing factors

0 引言

植被是陆地生态系统的关键组成部分,其空间分布和生产力不仅决定了生态系统的碳循环效率和生物多样性水平,还直接影响生态系统的服务功能与整体稳定性。净初级生产力(Net Primary Productivity, *NPP*)是定量反映植被群落生产能力的关键生理指数^[1-3],可表征陆地生态系统恢复与退化情况,在评价生态系统可持续发展中扮演着重要的作用^[4]。研究 *NPP* 的时空变化及驱动因素,尤其是气候变化与人类活动的交互作用,有助于深入理解植被生态演变规律及可持续发展等相关理论,为制定有效的生态保护和恢复策略提供科学依据。

气候变化和人类活动被认为是影响陆地 *NPP* 的主要因素。气候变化已被证实与植被存在显著的耦合关系^[5-8]。气候变化对 *NPP* 的影响是温度、降水和 CO_2 等相互作用的综合体现,且在不同地域、季节、生态系统的响应存在差异显著^[9-11]。例如,范毅宁等^[12]分析 2000—2022 年在内蒙古阴山北麓草原,地形因子的影响相对较弱,降水是流域 *NPP* 的主要驱动因子,并且降水、气温和日照时数的交互作用共同影响草原 *NPP* 的变化。人类活动作为外部动力,可在一定程度上缓解或加剧气候变化对 *NPP* 的影响^[8]。

张宇飞等^[13]通过对汾河流域 *NPP* 影响因素的分析发现,土地利用变化是主导因素,且交互后的因子影响更高。孔俊杰等^[14]对太行山植被 *NPP* 变化研究表明人类活动的影响高于其他因素。庞娇等^[15]定量分离了人类活动和气候变化对固碳效益时空分异的贡献,发现人类活动主导的固碳效益提升占比高达 94.88%。上述研究均证实了人类活动对 *NPP* 的影响具有双向性,因此在制定生态系统管理和环境保护策略时,必须综合考虑人类活动的正负效应。气候变化与人类活动作为影响 *NPP* 变化的主要因素,其作用机制复杂且相互交织。深入探讨这些因素的作用强度及其相互关系,对于精准评估植被动态演变至关重要^[16-18]。为此,学者们采用了多种方法和模型来分析 *NPP* 的驱动机制,而不同方法和模型对作用强度及性质的理解也各不相同,每种方法在揭示影响因子及其相互作用方面具有独特优势与局限性。目前,学者主要通过相关性分析^[19-20]、偏相关性分析^[21-22]、残差分析^[23-24]、地理探测器^[25-26]和地理加权回归方法^[27]等来探究 *NPP* 的驱动机制。相关性分析和偏相关性分析通常只能探讨单一元素的影响,且多侧重于自然因素,忽略了不同因子间的交互作用。残差分析方法因能够通过建立植被与影响因子的关系模型来分离并量化气候变化与人类活动的具体影响,因此得到

广泛应用。但该方法容易将所有的残差归因于人类活动的影响, 忽视了其他气候因素的作用。地理探测器模型由于其不稳定性及“尺度效应”, 不同尺度或离散化方法可能导致模型结果的不一致。地理加权回归虽能量化空间异质性, 但未考虑局部模型之间的差异, 缺乏针对性地选取最优参数和最重要变量^[28]。虽然目前已有较多针对 *NPP* 的影响机制研究, 但对人类活动影响的定量分析仍较为粗略。因此, 为实现 *NPP* 的可持续提升和生态系统的可持续发展, 定量评估气候变化与人类活动对 *NPP* 的综合驱动模式是区域植被生态监测与管理的关键, 同时也是实现区域生态系统可持续发展的核心所在。

渭河流域是一个具有独特地理位置和丰富自然资源的区域, 在享受其带来的便利和利益的同时, 也应关注其面临的生态和环境问题^[29-31]。2000 年以来, 在强烈的人类活动和快速的气候变化双重影响下, 渭河流域植被生态系统结构和功能发生了显著的变化。气候变暖、地下水位上升、农业开发、城市扩张和生态修复等一系列驱动作用由于缺少合理和可靠的评估方法, 对渭河流域植被生态演化影响的发展趋势仍不明晰, 且人类活动对植被生态的驱动过程和贡献也尚有争议。鉴于此, 本研究基于 GEE 云计算平台, 利用 *NPP* 产品数据分析植被时空分布特征, 并与 Thornthwaite Memorial 模型结合模拟了气候生产潜力、植被生产力差, 通过构建不同植被变化情景定量评估气候变化和人类活动对植被恢复与退化的影响, 并结合气象数据、人类活动数据、土地利用数据等分析 *NPP* 变化的原因。本研究结论对理清 2000 年以来气候变化和人类活动对渭河流域植被生态系统的影响, 调控和优化复杂的人地关系, 促进区域经济和生态环境的协调发展, 实现区域生态功能改善和价值提升具有现实意义。

1 研究区概况

渭河流域 (104°00' E—110°20' E, 33°50' N—37°18' N) 地处我国内陆腹地, 横跨陕西省中部、甘肃省东部及宁夏回族自治区南部, 流域面积 $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。位于西北内陆干旱半干旱地区, 属温带大陆性季风气候, 冬冷夏热, 四季分明, 年均降水量 400~800 mm, 年均气温 7.8~13.5 °C^[8]。流域内地形特征丰富, 北有黄土高原, 南有秦岭山脉, 从西至东依次为六盘山、子午岭、黄龙山, 其间为山谷沟壑区与关中平原, 水流自山上汇集其中, 形成渭河、泾河、洛河等渭河流域主要水系。

渭河流域地处暖温带落叶阔叶林地带, 植被资源丰富且类型多样, 主要类型包括栽培植被、落叶阔叶林和草地, 流域内生物多样性突出, 土地覆盖类别繁多。同时该地区也是我国西部地区重要的交通枢纽地, 多条铁路、公路及航线并交汇于此, 为流域经济发展提供了优良的运输网络。由于人口增长和经济发展, 城市用地不断向外扩张, 区域内人类干扰呈增加趋势。

2 材料和方法

2.1 数据来源与处理

基于 Google Earth Engine 平台在线编写代码调用净初级生产力数据与高程数据, 进行渭河流域影像筛选及拼接并去除无效值, 分析净初级生产力及其相关因子的时空演变特征。其中净初级生产力数据调用自美国国家航空航天局 (<https://earthdata.nasa.gov/>) 提供的 MOD17A3HGF6.1 月值产品数据集, 时间序列为 200001—202312, 空间分辨率 500 m; 地形数据调用自欧洲航天局 (<https://panda.copernicus.eu/panda>) Copernicus DEM 数据集, 空间分辨率 30 m。

气象数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn>) 逐月气温、降水数据集, 空间分辨率为 1 km, 时间序列为 200001—202312, 该数据集是根据 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集, 通过 Delta 空间降尺度方案在中国降尺度生成的。

道路网络数据来自 OpenStreetMap 路网矢量数据 (<http://www.openstreetmap.org>), 包括不同等级的道路: 高速公路、国道、省道、县道、乡镇道路和乡镇以下其他道路。

人口数据来自《甘肃统计年鉴》《陕西统计年鉴》及《宁夏回族自治区统计年鉴》。

2.2 植被退化与恢复情景构建

2.2.1 气候生产潜力

气候生产潜力 (Climate Potential Productivity, *CPP*) 指其他条件均适宜, 植被充分利用自然资源的理想状态下, 无人干预的最大生产力。在某种程度上揭示了陆地生态系统支撑人类可持续发展的最大潜能^[33]。

本文选用 Thornthwaite Memorial 模型^[34] 估算气候生产潜力。Thornthwaite Memorial 模型是在 Miami 模型基础上考虑植物蒸散量建立的一种运用实际蒸散量估算气候生产潜力的经验统计模型, 充分考虑植物生产量与光、温、水等气象要素的综合驱动关系。计算

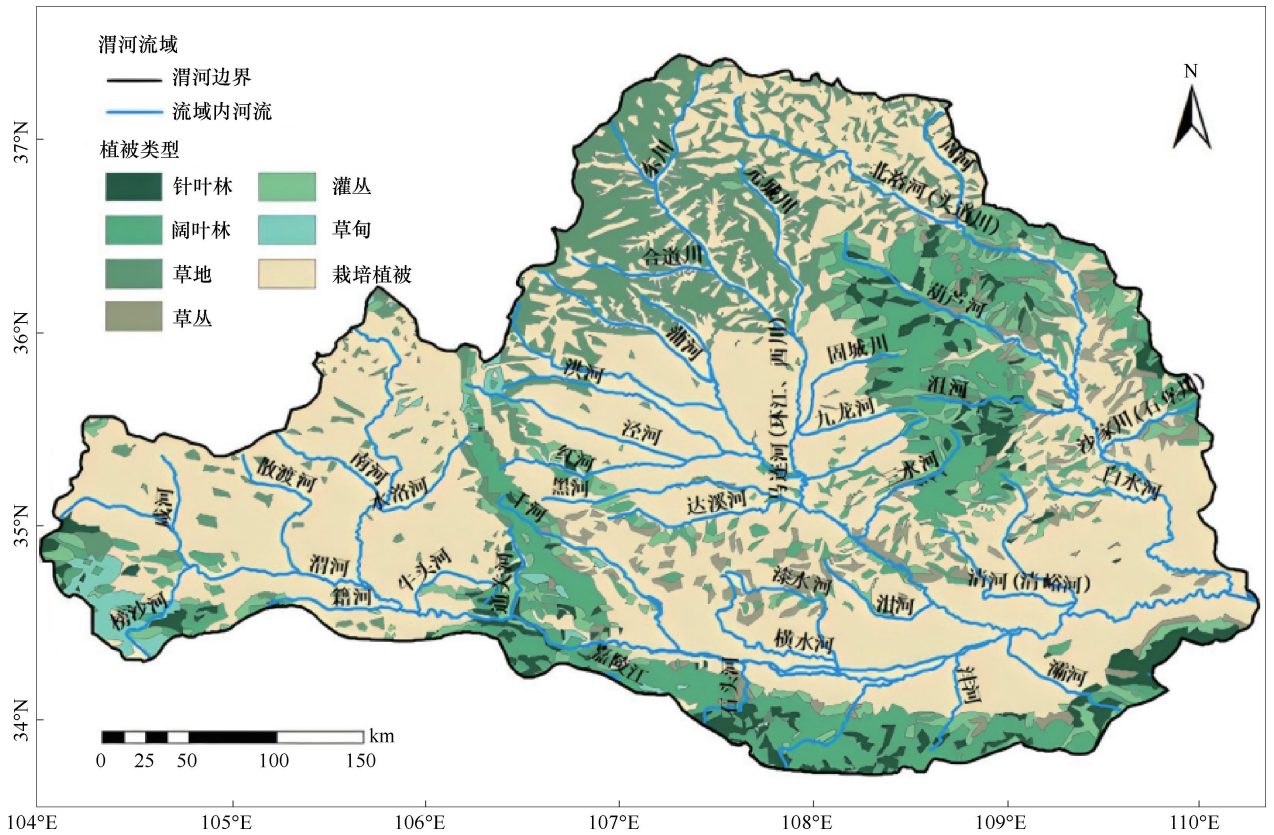


图1 渭河流域植被类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation types in Weihe River Basin

公式为

$$CPP = 3\,000 \times [1 - e^{-0.000\,969\,5(V-20)}] \quad (1)$$

$$V = 1.05R / \sqrt{1 + (1 + 1.05R/L)^2} \quad (2)$$

$$L = 3\,000 + 25T + 0.05T^3 \quad (3)$$

式中, CPP 为气候生产潜力 ($gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$); V 为年蒸散量 (mm); R 为年总降水量 (mm); L 为年最大蒸发量 (mm); T 为年平均气温 ($^{\circ}C$)。

2.2.2 植被生产力差

植被生产力差 (Vegetation Productivity Gap, VPG) 指植被气候生产潜力与实际生产力的差值, 代表当前植被生产能力的提升空间或潜力。从差值水平

进行分析是解释生产力差距和限制条件的基础^[35]。其中, 人类活动是 VPG 长期稳定的组成部分, 本文通过植被生产力差从宏观尺度衡量人类活动因素对植被生态的影像作用。计算公式为

$$VPG = CPP - NPP \quad (4)$$

2.2.3 评估情景构建

通过比较 NPP 、 CPP 、 VPG 的趋势变化, $Slop_{NPP} > 0$ 为植被恢复, $Slop_{NPP} < 0$ 为植被退化, 构建植被生态的恢复区与退化区, 依据 $Slop_{CPP}$ 与 $Slop_{VPG}$ 的变化形态划分 6 种植被变化情景 (见表 1)。分析气候变化与人类活动在植被生态环境中的相对贡献。

表 1 气候变化与人类活动对植被变化影响的情景构建

Table 1 Scenario construction of the effects of climate change and human activities on vegetation change

情景	$Slop_{NPP}$	$Slop_{CPP}$	$Slop_{VPG}$	定义
BDR		>0	>0	气候变化和人类活动共同主导的植被恢复
CDR	>0	>0	<0	气候变化主导的植被恢复
HDR		<0	>0	人类活动主导的植被恢复
BDD		<0	<0	气候变化和人类活动共同主导的植被退化
HDD	<0	<0	>0	气候变化主导的植被退化
CDD		>0	<0	人类活动主导的植被退化

2.3 线性最小二乘回归

采用线性最小二乘回归法对植被指数和气候因子进行一元线性回归处理, 逐个像元计算观测值随时间序列的变化趋势得到趋势线的斜率(*Slope*), 值大于0表示趋势增加, 小于0表示趋势减少, 等于0表示趋势不变^[36], 计算公式为

$$Slope = \frac{t \times \sum_{i=1}^t i \times \gamma_i - \sum_{i=1}^t i \sum_{i=1}^t \gamma_i}{t \times \sum_{i=1}^t i^2 - \left(\sum_{i=1}^t i\right)^2} \quad (5)$$

式中, t 为时间序列长度; γ 可表示 *NPP*、*CPP*、*VPG*、气候因子观测等。

2.4 变异系数

变异系数用于反映多年间 *NPP* 的波动性, 通过数据的标准差与平均值^[37]来计算, 公式为

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NPP_i - NPP_{mean})^2 / n - 1 / NPP_{mean}}{NPP_{mean}}} \quad (6)$$

式中, CV 为变异系数; NPP_{mean} 是多年 *NPP* 均值; NPP_i 是第 i 年 *NPP* 值; n 为年份数。 CV 值越大, *NPP* 波动幅度越大; 其值越小, *NPP* 波动幅度越小。可将 CV 值划分成四类: 最低波动 ($CV \leq 0.1$); 较低波动 ($0.1 < CV \leq 0.2$); 中波动 ($0.2 < CV \leq 0.3$); 高波动 ($CV > 0.3$)。

2.5 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数用以描述两变量之间联系的紧密程度^[38]。模型为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

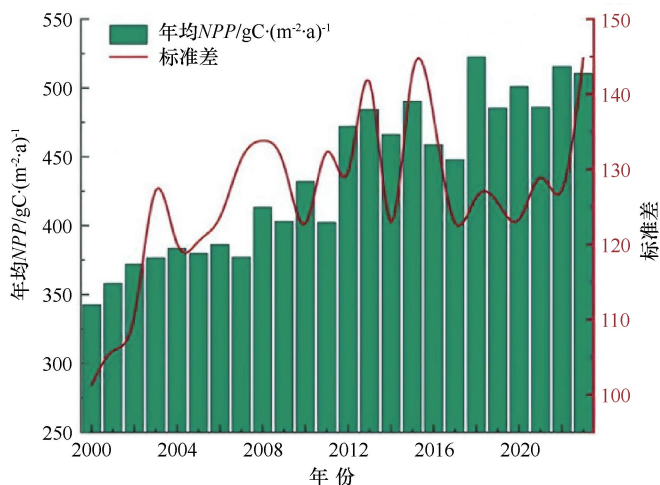
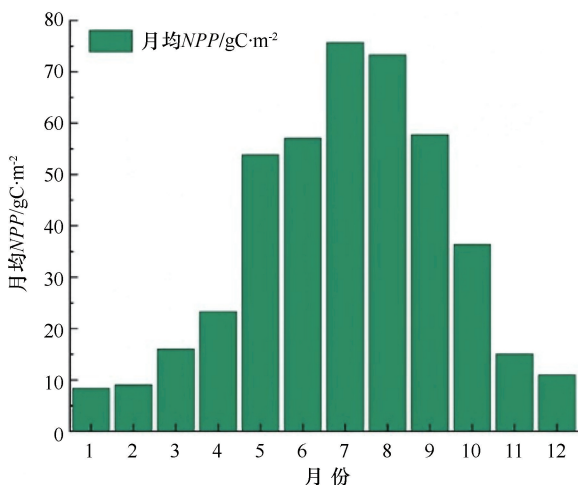


图2 2000—2023年渭河流域净初级生产力时间尺度分布特征

Fig. 2 Time scale distribution of net primary productivity in Weihe River Basin from 2000 to 2023

式中, R_{xy} 为相关系数, 取值范围从-1至1, 其值 >0 表示变量间的正向相关作用, 其值 <0 表示变量间的负向相关性, $|R_{xy}|$ 越大表示变量间的相关性越强; x_i 和 y_i 为变量 x 和 y 在第 i 时刻的数值, \bar{x} 和 \bar{y} 为变量 x 和 y 的平均值, n 为样本容量。

2.6 道路网络线密度估算

道路网络线密度估算 (Line Density Estimation, LDE) 是指一定区域内道路总长度占该区域面积的比例 (km/km^2), 考虑到研究区空间分异以及斑块的大小, 将研究区划分为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格, 以网格为样本单元, 计算每个样本单元的 LDE 值^[39-40], 公式为

$$D = L/S \quad (8)$$

式中, D 为斑块路网密度, L 为斑块内道路总长度, S 为斑块面积。

3 结果与分析

3.1 净初级生产力时空变化特征

3.1.1 净初级生产力时间变化特征

2000—2023年渭河流域 *NPP* 在年内呈单峰型季节性波动, 年际变化则表现为逐步增长的趋势如图2所示。

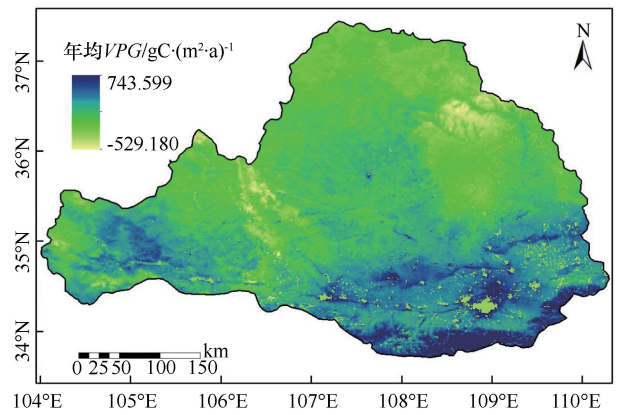
年内 *NPP* 变化特征符合温带植被的物候规律。5—10月期间, *NPP* 总量占全年 81.12%, 为渭河流域的植被生长季, 其中7月至8月 *NPP* 达到峰值, 月均值为 $74.42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$; 而11月至次年4月期间, 月均 *NPP* 为 $13.72 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著低于植被生长季。

在年际变化方面, *NPP* 增长 1.873 倍, 最小值出现在 2000 年, 为 $272.32 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最大值出

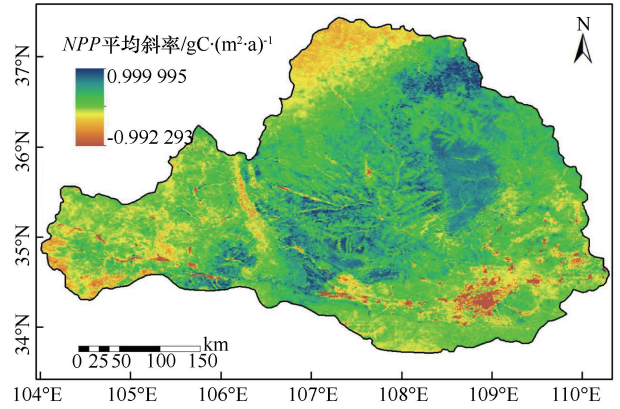
现在 2018 年, 为 $522.15 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均增速 $9.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2000—2004 年 *NPP* 以 $8.199 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度稳定增长; 2005—2011 年 *NPP* 增长出现波动性, 平均标准差为 127.08; 自 2012 年至今, *NPP* 的标准差振动频率增大, 平均增幅 $3.29.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.1.2 净初级生产力空间变化特征

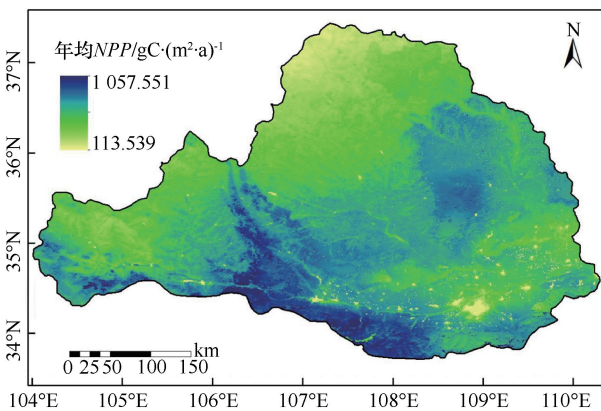
渭河流域 *NPP* 呈现明显的空间分异性, 整体表现为“南高北低”的分布格局。如图 3(a) 所示, 流域内的高生产力区域主要分布在秦岭、六盘山和子午岭等主要山脉, *NPP* 均值为 $525.17 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$; 低生产力区域集中在黄土高原北部及渭河沿岸, *NPP* 均值分别为 $267.40 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $350.38 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。*CPP* 和 *VPG* 的空间分布特征与 *NPP* 相似, 具体而言, *CPP* 如图 3(b) 所示, 负值区域主要于流域北部及关中平原的渭河沿岸聚集性分布, 占比约 1.22%, 其均值为 $-14.15 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 正值区域呈由北向南逐级递增的分布形式, 平均 *NPP* 为 $1018.12 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$; *VPG* 如图 3(c) 所示, 负值区域主要分布在流域北部及渭河沿岸, 占比 64.92%, 均值为 $-93.10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 正值区域位于流域南部及西部, 均值为 $98.10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。



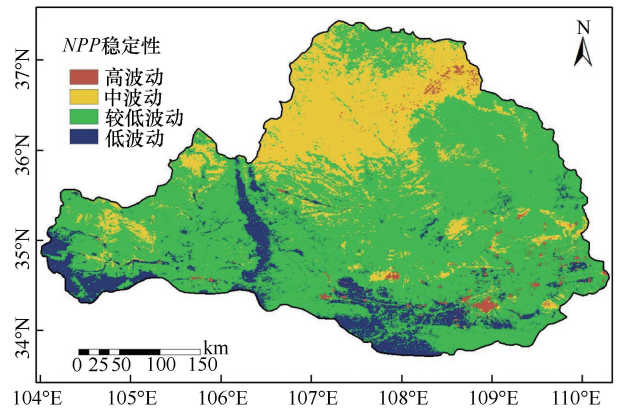
(c) 年均 *VPG* 空间分布



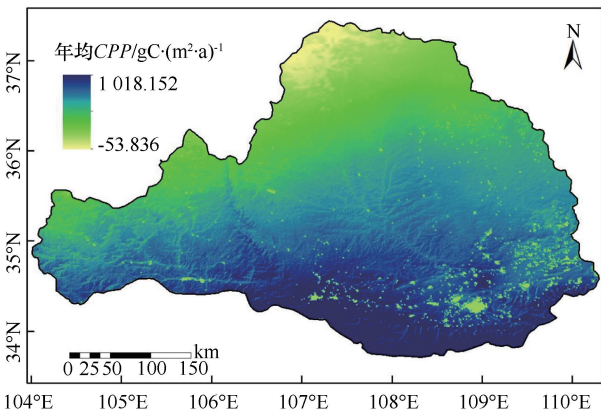
(d) *NPP* 趋势变化



(a) 年均 *NPP* 空间分布



(e) *NPP* 变异系数



(b) 年均 *CPP* 空间分布

图 3 2000—2023 年渭河流域净初级生产力空间尺度分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of net primary productivity in Weihe River Basin from 2000 to 2023

依据 *NPP* 的趋势变化及稳定性分析, 流域内 *NPP* 空间变化可分为平稳增长区、潜力增长区和顽固低值区三种变化趋势。如图 3(d) 和图 3(e) 所示, 其中, *NPP* 平稳增长区占比 9.55%, 均值为 $575.39 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要分布在秦岭山脉及流域中部; 潜力增长区占比约 90.01%, 均值为 $420.43 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 流域北部黄土高原沟壑区作为生态治理的重点区域, 受气候变化和植

被覆盖面积增加的双重影响, *NPP* 呈明显上升趋势; 顽固低值区占比约 0.44%, 均值为 $333.76 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 主要分布在渭河沿岸的城市扩张区及黄土高原东部。

3.2 净初级生产力驱动力分析

3.2.1 净初级生产力气候因子驱动分析

降水与 *NPP* 主要呈正相关关系, 占比高达 96.44%。如图 4 所示, 流域中部及东南部地区降水与 *NPP* 呈显著正相关, 降水的增加有助于改善土壤条件、调节温度和促进养分循环, 从而推动植被生长。流域东北部及南部山谷沟壑区的正相关性较弱, 该区域土壤水分较为充沛, 降水并非该区域植被变化的主要影响因素; 降水与 *NPP* 呈负相关的区域占比为 3.56%, 主要分布在洛河及渭河沿岸, 该区域 *NPP* 数值较低, 植被生长脆弱, 降水的增加反而会抑制植被的生长。

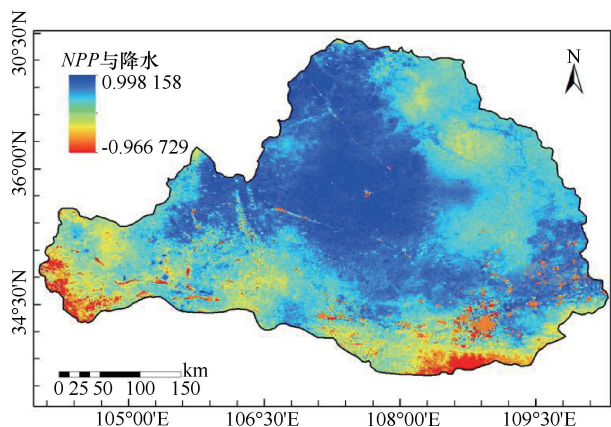


图 4 2000—2023 年渭河流域 *NPP* 与降水相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis of *NPP* and precipitation in Weihe River Basin from 2000 to 2023

气温与 *NPP* 主要呈正相关关系, 占比高达 97.93%。如图 5 所示, 在黄土高原南部、黄龙山脉及六盘山脉地区, 二者的正相关性较为显著, 相关系数均高于 0.62; 而关中平原及渭河沿岸 *NPP* 与气温呈负相关, 占比约 2.07%, 气温的升高加速了植被的蒸腾作用和水分蒸发, 导致植被需水增大, 进而抑制了光合作用并增强呼吸作用, 最终减弱了植被的碳吸收能力, 影响植被的生长和碳固定能力。同时, *NPP* 与气温的相关性存在明显分界, 以年均气温 $\pm 13.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 为基准, 气温高于 $13.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域主要表现为与 *NPP* 的负相关, 而气温低于 $13.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区域则主要呈现与 *NPP* 的正相关。

太阳辐射与 *NPP* 的相关性呈东部负相关, 西部正相关的空间分布格局。如图 6 所示, 太阳辐与 *NPP* 正相关的区域占比约 57.58%, 该区域太阳辐射

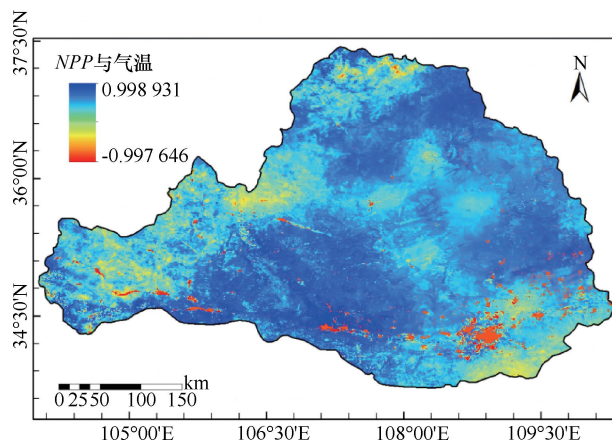


图 5 2000—2023 年渭河流域 *NPP* 与气温相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis of *NPP* and temperature in Weihe River Basin from 2000 to 2023

强度与持续时间较为适宜, 有利于植被进行光合作用, 从而促进植被的生长和生产力的提升。相对而言, 太阳辐射与 *NPP* 呈负相关的区域占比约 42.21%, 该区域负相关性较为明显, 但相关系数普遍较低, 均低于 -0.24 , 该区域太阳辐射过于集中, 植被出现水分和热量胁迫, 影响了光合作用的效率和植被的生长。

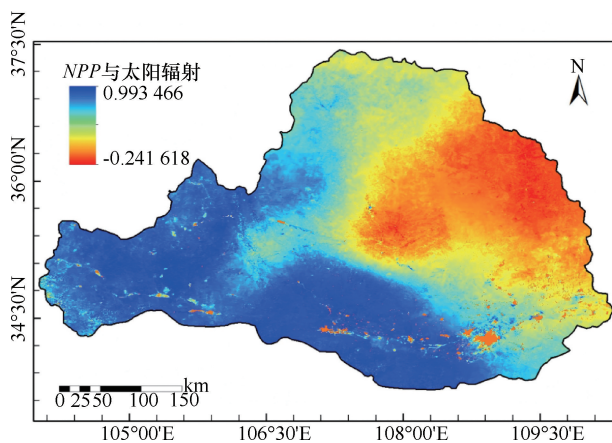
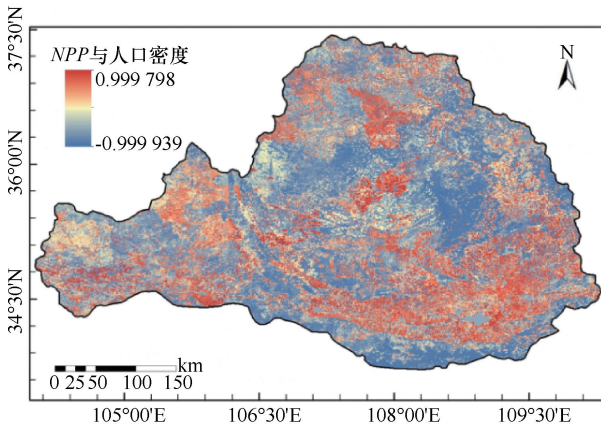


图 6 2000—2023 年渭河流域 *NPP* 与太阳辐射相关性分析
Fig. 6 Correlation analysis of *NPP* and solar radiation in Weihe River Basin from 2000 to 2023

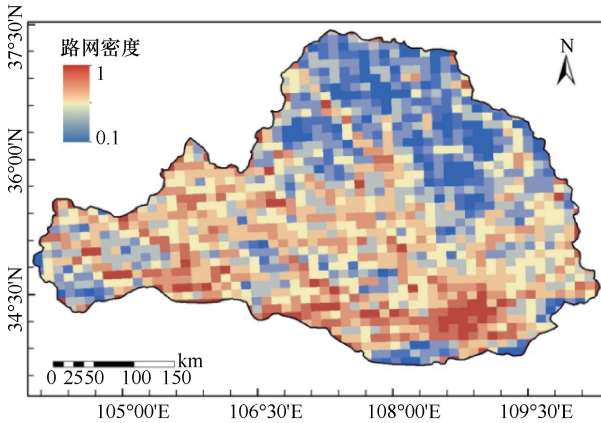
3.2.2 净初级生产力人类活动因素驱动分析

NPP 与人类活动的相关性展现出明显的空间异质性, 具体如图 7 所示。

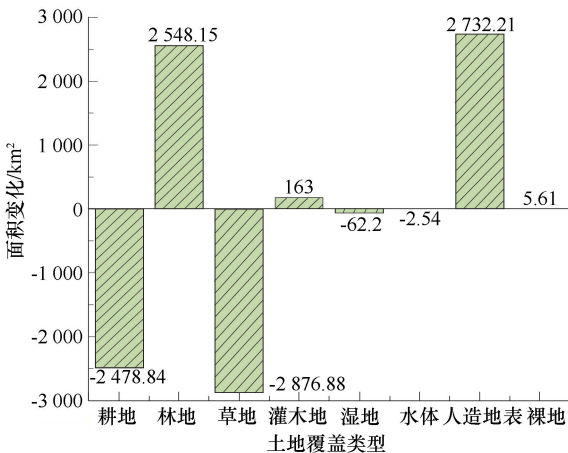
人类活动对 *NPP* 呈促进作用的区域约占流域面积的 34.77%, 广泛分布于关中平原、黄土高原及流域西部, 人口密度约为 $13\ 205.94 \text{ 人}/\text{km}^2$, 道路密度约为 35.34%, 该区域植被恢复的促进作用主要体现在生态修复工程的积极效益。其中, 退耕还林还草工



(a) NPP与人口密度



(b) 路网密度



(c) 土地类型变化

图7 2000—2023年渭河流域 NPP 与人类活动因子相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of NPP and human activity factors in Weihe River Basin from 2000 to 2023

程的实施, 导致秦岭山脉及黄土高原地区约 2 478.84 km² 的耕地面积减少, 同时带来 2 548.15 km² 林地与 2 732.21 km² 人造地表的增加, 从而有效促进了植被的恢复和生态系统的改善。

人类活动对 NPP 呈抑制作用的区域约占流域面

积的 65.23%, 主要分布在秦岭山脉、六盘山脉等植被生长旺盛的地区, 以及关中平原的城市扩张区。这些地区人口密度约为 18 710.56 人/km², 道路密度约为 51.99%, 人类活动的抑制作用主要表现为城市发展进程对生态环境的负面影响。其中, 人口密度与 NPP 的负相关性主要由城市扩张引起的土地利用类型转移, 水土污染等因素, 压缩了植被生长空间从而导致植被退化。同时, 路网密度与 NPP 的负相关关系, 主要源于道路建设导致土地碎片化, 对生态廊道形成阻隔, 并且硬化路面阻止雨水渗透, 进而影响植被生长环境, 导致植被退化。

3.3 净初级生产力变化归因

3.3.1 植被变化情景构建

进一步分析植被恢复与退化的空间分布情况, 如图 8 所示。近 24 年来, 渭河流域约 95.92% 的地区呈植被恢复趋势, 其中气候变化主导的植被恢复占约 72.37%, 为流域植被生态稳定提供了良好的自然环境; 人类活动主导的植被恢复占约 6.44%, 自 1999 年以来, 退耕还林(还草)等生态修复工程对植被生产力低值地区有显著恢复效应; 共同作用的植被恢复占约 17.11%, 主要分布在植被与人类活动主导恢复的过渡区域。此外, 流域约 4.08% 的地区呈现植被退化趋势, 主要由人类活动主导或由气候与人类活动共同作用引起, 集中分布在渭河沿岸的城市扩张区域。

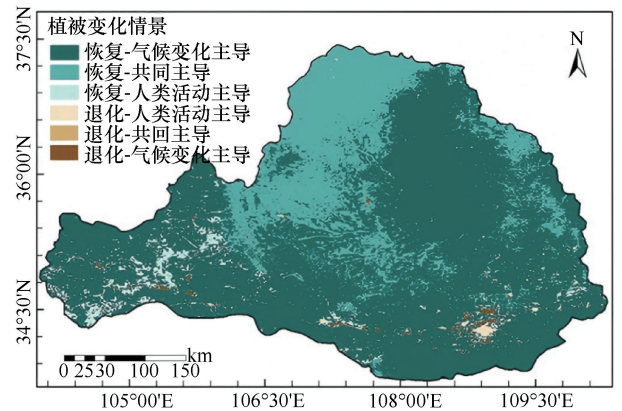


图8 植被变化情景构建分布

Fig. 8 Distribution of vegetation change scenario construction

3.3.2 基于植被变化情景的驱动力归因分析

对气候变化与人类活动在植被恢复与退化中的综合驱动模式进行了深入分析, 通过计算不同植被变化情境下各因子对 NPP 变化的贡献率, 以归因驱动力。具体结果如表 2 所列。

在植被恢复场景中, 气温和降水对植被生长的

表2 气候变化与人类活动对 *NPP* 变化的贡献率Table 2 Contribution of climate change and human activities to *NPP* change

%

%

情景		贡献率				
		降水	气温	太阳辐射	人口密度	路网密度
恢复	气候变化主导	36.65	42.73	1.43	7.75	11.44
	人类活动主导	30.61	22.97	4.20	16.64	25.58
	共同作用	11.49	61.89	1.81	7.77	17.04
退化	气候变化主导	36.72	1.62	2.28	26.01	33.37
	人类活动主导	24.85	11.60	3.46	34.52	25.57
	共同作用	29.72	0.79	3.96	29.56	35.97

贡献度较高, 体现出其对该区域生态系统的积极影响。太阳辐射在人类活动主导的植被恢复贡献度较高于另两种恢复场景, 表明生态修复工程恢复的植被多为新生植被, 其光合作用活跃, 对太阳辐射的反应尤为敏感。在人口密度贡献率低于 16.64% 和路网密度贡献率低于 25.58% 的区域, 城市化进程相对较慢, 该区域对于环境的人为破坏相对较少, 该区域的植被恢复得益于城市绿地建设, 生态廊道修复以及淤地坝修建等生态修复工程的推进。

在植被退化情境中, 降水对植被退化的贡献度相对较高, 原因在于城市排水不良导致的土壤积水、水土流失等问题对植被生长的抑制作用。同时, 高人口密度与路网密度对植被生长空间的压缩, 加剧了生态破碎化, 导致土壤压实和水土流失等问题出现, 严重破坏植被的生长环境。

4 讨论

研究系统分析了 2000—2023 年渭河流域 *NPP*、*CPP*、*VPG* 三种净初级生产力的时空分布特征, 通过对气象因子(气温、降水、太阳辐射)和人类活动(人口密度、道路密度、土地利用变化)与 *NPP* 的相关性分析, 逐一探讨了各影响因子的驱动作用。同时, 构建了植被变化情景, 结合贡献指数, 按情境分析了各影响因子对 *NPP* 的综合驱动效果。

当前, 人类活动对植被演化的驱动机制和作用机理已成为研究热点, 探索人类活动与自然环境变化的综合驱动方式, 对于实现植被生态的可持续发展至关重要。近年来, 渭河流域内城市扩张、经济发展、以及退耕还林还草等人类活动对净初级生产力的变化产生了显著影响^[41-42]。需要指出的是, 相互独立的探讨因子对 *NPP* 的驱动模式, 容易忽略因子之间的交互影响, 导致研究结果存在一定的不确定性。本研究选用人口密度和道路密度数据作为代表性因子量化人类活动的影响作用, 但基于指数的直接量化方法和理论框架还有待进一步完善与验证。

此外, 在区域尺度的因子分析中, 并未考虑极端

气候事件及洪水、森林火灾、虫害等扰动因素对 *NPP* 的影响。

后续的研究将引入熵权法、多元回归模型和 BP 神经网络等方法, 对多因子的综合驱动作用进行更全面的分析。同时, 采用多源影像融合的手段, 考虑不同尺度干扰因素对 *NPP* 的潜在影响, 从而提升模型的适用性和准确性。

5 结论

(1) 2000—2023 年期间, 渭河流域 *NPP* 在时间上表现出年内呈单峰型季节性变化特征, 5 至 10 月为植被生长季, *NPP* 产值占全年总量的 81.12%; 年际变化上, *NPP* 以 $9.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的增速波动性增长。空间上, *NPP* 呈现“南高北低”的分布格局, 且约 90.01% 的区域具有 *NPP* 增长潜力。

(2) 气象因子与 *NPP* 相关关系存在显著的空间异质性。气温与 *NPP* 呈正相关的区域占比 97.93%, 其中在黄土高原南部、黄龙山脉及六盘山脉地区表现出显著正相关; 降水与 *NPP* 在流域中部及北部呈正相关, 占比约 96.44%, 南部则呈负相关; 太阳辐射与 *NPP* 呈东负西正的空间格局, 太阳辐射与 *NPP* 相关性相对较弱, 其中正相关占比 57.58%。

(3) 人类活动对 *NPP* 的促进作用占流域面积的 34.77%, 主要体现在生态修复工程的实施区域, *NPP* 增长率约 $0.53 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 广泛分布于关中平原、黄土高原及流域西部; 人类活动对 *NPP* 的抑制作用占流域面积的 65.23%, 主要集中在城市扩张建设区域, 特别是秦岭山脉、六盘山脉等植被生长旺盛区及关中平原城市扩张区, *NPP* 减少率约 $0.64 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(4) 在植被恢复过程中, 气温和降水对植被的促进作用明显, 贡献率分别为 42.53% 和 26.25%; 太阳辐射在人类活动主导的植被恢复区域对 *NPP* 呈轻度正相关, 相关系数为 0.12; 人口密度和道路密度对流域内约 34.77% 的植被恢复起促进作用。在植被退化过程中, 降水对植被退化的贡献度为 30.43%,

而人口密度和道路密度对植被退化的相关系数分别为 0.71 和 0.64。

参考文献 (References):

- [1] 杨安乐. 祁连山植被 NPP 时空演变及驱动因子分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
YANG A L. Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of NPP in Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
- [2] WANG Y F, LV W W, XUE K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668-683.
- [3] HANSEN P M, EVEN R, KING A E, et al. Distinct, direct and climate-mediated environmental controls on global particulate and mineral-associated organic carbon storage [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17080.
- [4] 王丽霞, 张海旭, 刘招, 等. 一种净初级生产力格局模拟及预测耦合模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(11): 1756-1765.
WANG L X, ZHANG H X, LIU Z, et al. A coupling model for net primary productivity pattern simulation and prediction[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2021, 46(11): 1756-1765.
- [5] 郝永萍, 陈育峰, 张兴有. 植被净初级生产力模型估算及其对气候变化的响应研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998(6): 55-62.
HAO Y P, CHEN Y F, ZHANG X Y. Research progress on model estimation of vegetation net primary productivity and its response to climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 1998(6): 55-62.
- [6] FELDMAN A F, FENG X, FELTON A J, et al. Plant responses to changing rainfall frequency and intensity[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(4): 276-294.
- [7] SMITH M D, WILKINS K D, HOLDREGE M C, et al. Extreme drought impacts have been underestimated in grasslands and shrublands globally [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(4): e2309881120.
- [8] 张海旭. 渭河流域净初级生产力格局模拟及其环境因子响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2022.
ZHANG H X. Simulation of Net Primary Productivity Pattern and Response Analysis of Environmental Factors in Weihe River Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [9] 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.
- [10] CHANG J F, CIAIS P, GASSER T, et al. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 118.
- [11] CHEN Y Z, FENG X M, TIAN H Q, et al. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in China after 2010: A turning point resulting from climate and human interaction [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5848-5864.
- [12] 范毅宁, 廖梓龙, 龙胤慧, 等. 内蒙古阴山北麓草原植被净初级生产力变化特征及其气候驱动力[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(8): 38-50.
FAN Y N, LIAO Z L, LONG Y H, et al. Characteristics of vegetation net primary productivity change and its climatic driving forces in the Yinshanbeilu Steppe, Inner Mongolia [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(8): 38-50.
- [13] 张宇飞, 杨文府, 张文凯, 等. 2001—2021 年汾河流域 NPP 时空分异特征及影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2024, 49(5): 30-43.
ZHANG Y F, YANG W F, ZHANG W K, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of NPP in Fenhe River Basin from 2001 to 2021 [J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2024, 49(5): 30-43.
- [14] 孔俊杰, 刘海新, 王晓, 等. 气候变化和人类活动对太行山区植被 NPP 变化的影响[J]. *山东林业科技*, 2024, 54(3): 8-15.
KONG J J, LIU H X, WANG X, et al. Impact of climate change and human activities on vegetation npp changes in Taihang mountains [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2024, 54(3): 8-15.
- [15] 庞娇, 单婧, 闫愉悦, 等. 京津冀生态系统固碳效益时空格局及驱动因素定量分离[J]. *环境科学*, 2025, 46(3): 1666-1678.
PANG J, SHAN J, YAN Y Y, et al. Quantitative separation of spatiotemporal patterns and driving factors of carbon sequestration benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(3): 1666-1678.
- [16] TERRY T J, SALA O E, FERRENBURG S, et al. Disturbance amplifies sensitivity of dryland productivity to precipitation variability [J]. *Science Advances*, 2024, 10(30): eadm9732.
- [17] WANG G J, PENG W F, ZHANG L D, et al. Quantifying the impacts of natural and human factors on changes in NPP using an optimal parameters-based geographical detector [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111018.
- [18] LONG B Y, ZENG C L, ZHOU T, et al. Quantifying the relative importance of influencing factors on NPP in Hengduan Mountains of the Tibetan Plateau from 2002 to 2021: A Dominance Analysis[J]. *Ecological Informatics*, 2024, 81: 102636.
- [19] 刘健, 张泽中, 冯凯, 等. 内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及驱动因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(22): 1-13.
LIU J, ZHANG Z Z, FENG K, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River Basin of the Inner Mongolia Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 1-13.
- [20] 任利敏, 王琳, 李娜, 等. 河南省植被 NPP 时空变化特征及其驱动因素[J]. *测绘科学*, 2024, 49(8): 69-80.
REN L M, WANG L, LI N, et al. Spatiotemporal variations characteristics and driving factors of vegetation NPP in Henan Province[J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2024, 49(8):

69-80.

- [21] 薛港. 2001—2020年中国植被净初级生产力时空变化及其影响因素分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
XUE G. Spatial-Temporal Variation of Net Primary Productivity of Vegetation in China and Its Influencing Factors from 2001 to 2020 [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [22] 罗健梅, 阿布都热合曼·哈力克, 段越帆, 等. 艾比湖流域植被NPP时空演变特征及其驱动因素分析[J]. 生态学报, 2025, 45(1): 182-196.
LUO J M, ABUDUREHEMAN H, DUAN Y F, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factors of net primary productivity in the Ebinur Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 182-196.
- [23] 王志鹏, 石长春, 马雅莉, 等. 毛乌素沙地植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 草地学报, 2024, 23(9): 2962-2972.
WANG Z P, SHI C C, MA Y L, et al. Characteristics of vegetation net primary productivity change and its climatic driving forces in the Yinshanbeilu Steppe, Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 23(9): 2962-2972.
- [24] 周娜芳, 贡恩军, 白天豪, 等. 基于CASA模型的秦巴山区NPP时空动态及影响因素分析[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1829-1843.
ZHOU N F, GONG E J, BAI T H, et al. Analysis of temporal and spatial dynamics and its influencing factors of NPP in Qinba Mountain Area based on the CASA model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1829-1843.
- [25] 任利敏, 王琳, 李娜, 等. 河南省植被NPP时空变化特征及其驱动因素[J]. 测绘科学, 2024, 49(8): 69-80.
REN L M, WANG L, LI N, et al. Spatiotemporal variations characteristics and driving factors of vegetation NPP in Henan Province [J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(8): 69-80.
- [26] 何萍, 刘延坤, 陈瑶, 等. 黑龙江省植被NPP的时空格局及其影响因素[J]. 环境生态学, 2024, 6(11): 19-29.
HE P, LIU Y K, CHEN Y, et al. Spatiotemporal patterns and influencing factors of vegetation NPP in Heilongjiang Province [J]. Environmental Science, 2024, 6(11): 19-29.
- [27] 徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 等. 基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 900-911.
XU Y, HUANG W T, ZHENG Z W, et al. Detecting influencing factor of vegetation NPP in southwest China based on spatial scale effect [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 900-911.
- [28] 师静, 鲁雪媛, 陈旭. 昆明市城市化及城市热岛效应对植被净初级生产力的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2589-2603.
SHI J, LU X Y, CHEN X. Study on the impact of urbanization and urban heat island effect on net primary productivity in Kunming [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2589-2603.
- [29] 卫格冉, 李明泽, 全迎, 等. 基于地理加权随机森林的黑龙江省森林碳储量遥感估测[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(7): 64-76.
WEI G R, LI M Z, QUAN Y, et al. Geographically weighted random forest approach to predict forest carbon storage by remote sensing in Heilongjiang [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(7): 64-76.
- [30] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在2024年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [31] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.
- [32] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.
- [33] 曹丹. 全球陆地生态系统气候生产潜力及干旱驱动作用分析研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2022.
CAO D. Climate productivity potential and drought driving effect of global terrestrial ecosystem [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Academy of Aerospace Information Innovation), 2022.
- [34] 同琳静, 刘洋洋, 章钊颖, 等. 定量评估气候变化与人类活动对西北地区草地变化的相对作用[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 202-210.
TONG L J, LIU Y Y, ZHANG Z Y, et al. Quantitative evaluation of the relative effects of climate change and human activities on grassland change in Northwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 202-210.
- [35] 许端阳, 李春蕾, 庄大方, 等. 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用评价综述[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 68-76.
XU D Y, LI C L, ZHUANG D F, et al. Evaluation of the relative role of climate change and human activities in the process of desertification [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 68-76.
- [36] 陈希孺. 最小一乘线性回归(上)[J]. 数理统计与管理, 1989(5): 48-55.
CHEN X R. Least one linear regression (Part 1) [J]. Mathematical Statistics and Management, 1989(5): 48-55.
- [37] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与Kriging插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566.

- GUO X D, FU B J, CHEN L D, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrients in Zunhua Plain, Hebei Province: Analysis of variance function and Kriging interpolation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 555-566.
- [38] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 398-409.
- XU H J, YANG T B. Spatial and temporal variation of vegetation growth in Qaidam Basin and its response to climate factors [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 398-409.
- [39] 林玉英, 李宝银, 邱荣祖, 等. 道路网络生态干扰测度指数的改进及其空间分异特征: 以闽江上游为例[J]. *地理科学*, 2021, 41(6): 951-959.
- LIN Y Y, LI B Y, QIU R Z, et al. Improvement and spatial differentiation of ecological disturbance index of road network: A case study of the upper reaches of Minjiang River [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(6): 951-959.
- [40] 范科红, 李阳兵, 冯永丽. 基于 GIS 的重庆市道路密度的空间分异[J]. *地理科学*, 2011, 31(3): 365-371.
- FAN K H, LI Y B, FENG Y L. Spatial distribution of road density in Chongqing based on GIS[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(3): 365-371.
- [41] 王丽霞, 夏鹏宇, 杨潇, 等. 渭河流域蒸散发时空反演及其对人类活动的响应[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(12): 120-132.
- WANG L X, XIA P Y, YANG X, et al. SpCtemporal inversion of evapotranspiration in Weihe River Basin and its response to human activities[J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2023, 54(12): 120-132.
- [42] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北植被净初级生产力人为影响定量测评与分析[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(5): 81-88.
- DUAN Y F, REN Z Y, SUN Y J. Quantitative evaluation and analysis of human influence on net primary productivity of vegetation in Northern Shaanxi[J]. *Science of Soil and Water Conservation in China*, 2020, 18(5): 81-88.

(责任编辑 王海锋)