

戴前坤, 杨海青, 郭子钰, 等. 嘉陵江流域植被 *NPP* 时空演变及驱动因素探究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 61-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.005

DAI Qiankun, YANG Haiqing, GUO Ziyu, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of vegetation *NPP* in Jialing River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 61-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.005

嘉陵江流域植被 *NPP* 时空演变及驱动因素探究

戴前坤¹, 杨海青¹, 郭子钰¹, 黄惠琴¹, 刘浩宇¹, 王明敏¹, 李航²

(1. 西华师范大学地理科学学院, 四川南充 637009; 2. 阜阳师范大学历史文化与旅游学院, 安徽阜阳 236037)

摘要:【目的】植被净初级生产力(*NPP*)作为陆地生态系统碳循环的重要参与者,探究其时空演变和驱动因素对促进区域生态文明建设具有重要意义。【方法】以嘉陵江流域为研究区域,基于变异系数、Theil-Median趋势法、Mann-Kendall统计检验法、R/S分析法和地理探测器和PLS-SEM模型,分析植被*NPP*时空演变规律及驱动因素。【结果】*NPP*时间上呈波动上升趋势,空间上随海拔先增后减;趋势总体稳定,波动“南高北低”,历史极显著增为主,未来分持续增和转减两类。*Temp*、*NDVI*、*DEM*等自然因子主导空间分异,*GDP*等人为影响显著;交互探测中 $Temp \cap Pre$ 、 $NDVI \cap GDP$ 和 $Temp \cap NDVI$ 解释力最强。PLS-SEM揭示地形通过抑制气候恶化、促进植被生长间接最大促进*NPP*;气候直接抑制*NPP*但经植被生长间接正向调节,经人类活动间接抑制;人类活动直接间接均负向。基于未来风险分区,四川盆地应优化植被与城市景观;西北高寒区构建人工-自然协同修复体系;山地丘陵区强化生态红线与廊道;全流域统筹生态补偿与水土保持工程。【结论】嘉陵江流域植被*NPP*以增加为主,自然因子主导空间分异, $Temp \cap Pre$ 、 $NDVI \cap GDP$ 和 $Temp \cap NDVI$ 解释力最强。地形通过抑制气候恶化和促进植被生长间接促进*NPP*,气候直接抑制*NPP*但通过植被生长间接正向调节,人类活动直接和间接均抑制*NPP*。未来策略应着重开展分区治理。

关键词: 植被 *NPP*; 时空演变; 未来趋势; 地理探测器; PLS-SEM; 嘉陵江流域; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: S732

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0061-17



Spatiotemporal evolution and driving factors of vegetation *NPP* in Jialing River Basin

DAI Qiankun¹, YANG Haiqing¹, GUO Ziyu¹, HUANG Huiqin¹, LIU Haoyu¹, WANG Mingmin¹, LI Hang²

(1. School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

2. School of History, Culture and Tourism, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, Anhui, China)

Abstract: [Objective] Vegetation net primary productivity (*NPP*) is a crucial component in the carbon cycle of terrestrial

收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-06-01; 录用日期: 2025-06-04; 网络出版日期: 2025-06-24

基金项目: 西华师范大学博士启动项目(21E021); 国家自然科学基金项目(42104089)

作者简介: 戴前坤(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态修复研究。E-mail: 3467140289@qq.com

通信作者: 杨海青(1988—), 女, 讲师, 博士, 主要从事气候-植被变化研究。E-mail: hqyang2021@cwnu.edu.cn

李航(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地理信息技术研究。E-mail: 202409013@fynu.edu.cn

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

ecosystems. Investigating its spatiotemporal evolution and driving factors is of great significance for promoting regional ecological civilization development. [Methods] Taking the Jialing River Basin as the study area, the spatiotemporal evolution patterns and driving factors of vegetation *NPP* were analyzed based on the coefficient of variation, Theil-Median trend method, Mann-Kendall statistical test, *R/S* analysis, geodetector, and PLS-SEM model. [Results] *NPP* showed a fluctuating upward trend, with spatial variation increasing and then decreasing with elevation. The overall trend remained stable, with fluctuations characterized by “higher in the south and lower in the north”. Historically, extremely significant increases predominated, while future trends were divided into two types: continuous increase and shift to decrease. Spatial differentiation was mainly dominated by natural factors such as temperature (*Temp*), normalized difference vegetation index (*NDVI*), and digital elevation model (*DEM*), while anthropogenic factors such as *GDP* also had significant effects. In interaction detection, $Temp \cap Pre$, $NDVI \cap GDP$, and $Temp \cap NDVI$ demonstrated the strongest explanatory power. PLS-SEM revealed that topography indirectly promoted *NPP* the most by inhibiting climate deterioration and promoting vegetation growth. Climate directly inhibited *NPP* but indirectly exerted a positive regulatory effect through vegetation growth, while indirectly inhibiting *NPP* through human activities. Human activities had negative effects both directly and indirectly. Based on future risk zoning, vegetation and urban landscapes should be optimized in the Sichuan Basin. A synergistic artificial-natural restoration system should be constructed in the northwest alpine area. Ecological redlines and corridors should be strengthened in mountainous and hilly areas. Ecological compensation and soil and water conservation projects should be coordinated across the entire basin. [Conclusion] Vegetation *NPP* in the Jialing River Basin is mainly increasing, with spatial differentiation dominated by natural factors. $Temp \cap Pre$, $NDVI \cap GDP$, and $Temp \cap NDVI$ have the strongest explanatory power. Topography indirectly promotes *NPP* by inhibiting climate deterioration and promoting vegetation growth. Climate directly inhibits *NPP* but indirectly regulates it positively through vegetation growth. Human activities inhibit *NPP* both directly and indirectly. Future strategies should focus on zoned management.

Keywords: vegetation *NPP*; spatiotemporal evolution; future trends; geodetector; PLS-SEM; Jialing River Basin; influencing factors

0 引言

植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, *NPP*) 是指绿色植物在单位时间及空间内通过自身光合作用所积累的有机质总量 (Gross Primary Productivity, *GPP*) 扣除自养呼吸 (Autotrophic respiration, *RA*) 后的剩余部分^[1], 这些能量是植被本身生长与繁殖的关键, 也是植被所处的生态系统中其他成员生存与繁衍的基础。植被 *NPP* 作为陆地生态系统中物质流通和能量循环的重要组成部分, 受到地形、气候和人类活动的共同影响^[2], 对于地形变化、气候变迁和人类活动的反应程度要高于其他植被指数, 更为实际的反映植被生产能力, 可以作为衡量陆地生态系统质量及碳循环的关键因素^[3-5]。因此, 研究植被 *NPP* 的时空演变特征及其对地形、气候和人类活动的响应, 对于陆地生态系统可持续发展的研究, 监测区域生态环境质量变化和促进生态文明建设等方面具有重要意义。自 20 世纪 60 年代国际生物学计划 (International Biological Programme, *IBP*) 提出 *NPP* 概念以来, 其研究方法经历了从站点实测到遥感模型反演的技术革新。早期研究主要是依托构建地面监测点开展区域植被 *NPP* 的测算, 虽然实测数据

的精度很高^[6], 但其仅能代表监测站点附近的植被 *NPP*, 无法大范围监测, 不能很好的反应植被 *NPP* 的空间分异。近年来由于遥感监测技术的发展, 更多学者选择采用遥感模型对大尺度区域的植被 *NPP* 进行估算, 并取得一系列的研究成果^[7-9], 例如, 有学者通过改进后的模型估算了 2001—2020 年安徽省植被 *NPP*, 并与实测计算的 *NPP* 进行相关性分析, 发现两者存在较强的相关关系, $R^2 = 0.736$, 表明遥感模型可以准确估算大区域范围 *NPP* 值^[10], 证实了遥感模型在大区域应用的可靠性。

目前, 有关植被 *NPP* 的研究已经从时空格局的表征转向驱动机制的深度解析。在植被 *NPP* 驱动机制的研究中, 地形条件、气候因子以及人类活动被广泛应用在驱动因子的选择上, 主导因子的划分存在着明显的区域差异。例如石智宇等^[11] 基于残差和偏相关分析方法, 发现中国区域上降水对于植被 *NPP* 的影响更为显著; CAO 等^[12] 基于相关分析方法和相对贡献分析方法, 发现黄河流域降水是主要驱动因素, 其次是温度和辐射, 杨楠等^[13] 通过土地利用转移矩阵法发现黄河流域人类活动对 *NPP* 的增长有明显的促进作用; ZHANG 等^[14] 利用相关分析方法和土地利用转移矩阵法发现长江流域植被 *NPP* 受气温的影响

大于降水量, 人类活动对 *NPP* 的影响总体上为负向影响。然而, 残差分析和相关分析等传统统计学分析方法虽然可以识别各类因子对于植被 *NPP* 的影响程度, 却忽略了因子间的相对作用, 且在因子选取方面相对单一, 不利于系统认识植被 *NPP* 的驱动机制^[15]。地理探测器作为一种空间统计方法, 可以分析单因子影响大小和因子间交互作用的影响程度, 同时该方法还规避了因子间多重共线性的影响, 因子选取不受限制^[16], 是解释植被 *NPP* 复杂驱动因素的有效方法。最优参数地理探测器(OPGD)相较于地理探测器而言, 可以避免人为经验式的选取驱动因子的离散化区间和网格尺度, 实现参数最优选择^[17], 已经得到广泛应用。现有研究大多只基于 OPGD 探究植被 *NPP* 的驱动因子, 很少有人 OPGD 的基础上进一步探究因子间的直接效应和间接效应以及路径系数。偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)是一种探究多种因子之间复杂关系的分析方法, 并且在应用小样本或者非正态分布数据时具有显著优势^[18]。尽管与 OPGD 相比 PLS-SEM 在处理非线性关系因子方面稍显不足, 但仍是探明驱动因子对于植被 *NPP* 的直接效应、间接效应和路径系数的有效分析方法。因此, 将 OPGD 和 PLS-SEM 结合使用将更有利于探究驱动植被 *NPP* 变化的复杂机制。

作为长江上游最大流域, 嘉陵江流域地处青藏高原向四川盆地阶梯过渡带, 地形地貌复杂多变, 气候垂直分异明显, 属于典型的过渡带生态屏障区。同时, 嘉陵江流域是长江上游重要的生态屏障^[19], 流域内有着秦巴山区生物多样性保护与生态修复和长江中上游防护林体系建设工程等重要生态建设项目^[14-22], 其生态健康状况直接影响着长江流域整体的生态平衡^[23], 对于长江流域生态环境保护极其重要, 因此也应关注其面临的生态环境问题^[24-27]。由于其特殊的过渡带型地理区位, 嘉陵江流域仍面临着湿地退化、水土流失等生态环境问题^[28], 因此, 研究嘉陵江流域植被 *NPP* 时空变化特征及其驱动机制, 对于监测嘉陵江流域生态环境质量、巩固其生态屏障作用具有重要作用。然而现有研究多将嘉陵江流域嵌套于长江全流域分析框架内^[14-30], 或局限于干流行政边界^[31]、次级支流等局部区域^[32-33], 缺乏针对全流域的系统性研究, 研究方法也大多局限于传统统计分析方法, 缺少对驱动因子全面定量分析。

鉴于此, 以嘉陵江流域为研究区域, 植被 *NPP* 为研究对象, 本研究的目标如下: (1) 采用趋势分析方法探究 2001—2022 年植被 *NPP* 的时空演变特征和

未来变化趋势; (2) 利用 OPGD 方法识别植被 *NPP* 的主要驱动因子; (3) 应用 PLS-SEM 模型量化各类型因子对植被生长空间格局的直接和间接影响。该研究旨在探索分析植被 *NPP* 的时空演变特征以及驱动机制, 以期为嘉陵江流域筑牢长江上游重要生态屏障、开展生态保护和区域生态规划提供重要支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

嘉陵江流域位于长江流域上游区域, 大致介于东经 102°30′—109°, 北纬 29°40′—34°30′ 之间, 流域范围囊括陕、甘、川、渝四省地界, 流域总面积约为 15.91 km², 占长江流域总面积的 9%^[19] (见图 1)。嘉陵江流域地势自西北向东南递减, 地处中国一、二级阶梯的地形过渡带, 地形自西北向东南依次可划分为上游段的山地地形、中游段的盆地和丘陵以及下游段的峡谷^[34], 气候以亚热带湿润气候为主, 夏季炎热多雨, 冬季温暖湿润, 多年平均气温及降雨量分别约为 10 °C 和 935 mm。由于嘉陵江流域海拔高差在 4 000 m, 气候差异显著, 流域内除常绿阔叶林外, 还包括高山植被、针叶林、针阔混交林、草原草甸草丛及灌丛等多种植被类型。

1.2 数据来源及处理

植被 *NPP* 数据采用 MODIS 系列的 MOD17A3HGF 产品, 时间分辨率为 1 a, 空间分辨率为 500 m, 来自美国国家航空航天局 (<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/>), 数据格式为 HDF。利用 MRT 软件对 MOD17A3HGF 文件进行拼接、栅格转换、重投影、重采样, 并在 ArcGIS 中进行掩膜处理、比例转换及单位换算, 最终得到时间序列为 2001—2022 年的嘉陵江流域的 1 km 分辨率 *NPP* 年值数据。

气象数据(月降雨量、月平均气温)来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>), 空间分辨率为 1 km, 数据储存为 NC 格式, 时间年限为 2001—2022 年。基于 ArcGIS Pro 3.0 软件中的 Arcpy 平台将 NC 格式转化为栅格格式, 并将月值融合成多年平均值, 最终得到嘉陵江流域多年平均降雨量、气温数据。

数字高程模型(DEM)、GDP 公里网格数据和植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 其中 GDP 千米网格数据年限为 2000—2020 年。人口密度公里网格数据来源于 LandScan 数据 (<https://>

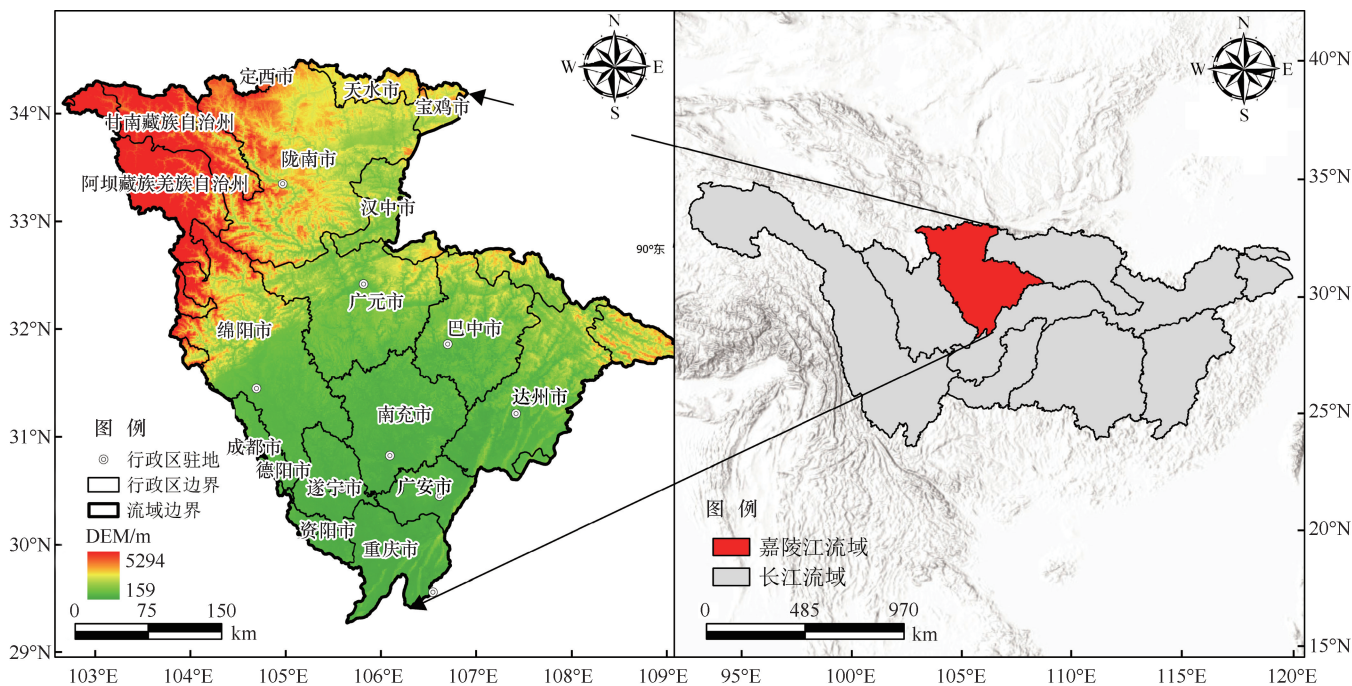


图1 嘉陵江流域区域概况

Fig. 1 Overview of Jialing River Basin

landscan.ornl.gov/), 数据年限为 2001—2022 年。坡度和坡向借助 ArcGIS Pro 中的坡度和坡向工具箱计算得来。

归一化植被指数 ($NDVI$) 数据为 MOD13Q1 数据集, 原始空间分辨率为 250 米, 时间分辨率为 16 天, 基于 GEE 平台 将该数据集 (数据目录: “MODIS/061/MOD13Q1”) 进行年值合成、比例缩放、投影转换、重采样和按流域裁剪等操作, 最终得到 2001—2022 年多年平均 $NDVI$ 数据。

1.3 研究方法

1.3.1 变异系数

变异系数 (CV) 是衡量数据中各观测值变异程度的一个统计量^[35], 它是用标准差除以平均值, 可以表征长时间尺度下观测数据的波动规律。变异系数的公式为

$$CV = \frac{SD_{NPP}}{NPP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NPP_i - \overline{NPP})^2}{n-1}} \frac{1}{NPP} \quad (1)$$

式中, CV 值表示嘉陵江流域 2001—2022 年植被 NPP 的变异系数; SD_{NPP} 表示 2001—2022 年长时间序列下植被 NPP 的标准差; \overline{NPP} 则表示 2001—2022 年 NPP 的均值; NPP_i 表示第 i 年的 NPP 值; n 表示时间序列, 本文取 22。参考王芳等^[36]的研究, 将 CV 值划

分为高稳定区 ($CV < 0.1$)、较高稳定 ($0.1 < CV < 0.2$)、较低稳定区 ($0.2 < CV < 0.3$)、不稳定区 ($CV > 0.3$)。

1.3.2 趋势分析及显著性检验

采用趋势分析方法分析 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP 趋势变化特征, 并通过 Mann-Kendall 统计检验法进行显著性检验^[37]。 Sen 趋势分析方法公式为

$$K = median \frac{NPP_j - NPP_i}{j - i} (1 < i < j < n) \quad (2)$$

式中, K 表示 Sen 斜率; $median$ 为取中值函数; NPP_i 和 NPP_j 表示第 i 年和第 j 年的 NPP 均值。 $K > 0$ 表示 NPP 在时间序列内呈上升趋势; $K < 0$ 表示 NPP 在时间序列内呈下降趋势。

Mann-Kendall 统计检验法是对 Sen 趋势分析的结果进行显著性检验, 是一种非参数性检验法, 服从某种分布特征, 且不易受到少数异常值的干扰, 时间序列变化指标用统计量 Z 表示, 在给定显著性水平下, 可以判断序列值变化的显著性, 当 $|Z| > 1.96$ 和 2.58 时, 表示变化趋势通过了 0.05 与 0.01 置信水平的显著性检验。将趋势分析结果与显著性分析结果叠加, 参考石智宇等^[11]的划分方法, 将其划分为极显著减少、显著减少、无明显变化、显著增加、极显著增加 5 种类型 (见表 1)。

1.3.3 R/S 分析

重标极差 (R/S) 分析法是一种定量描述时间序列

表 1 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP 变化趋势统计

Table 1 Statistics of vegetation NPP variation trends in Jialing River Basin (2001—2022)

变化类型	判断依据	面积占比/%
极显著减少	$Sen < 0, Z > 2.58$	0.18
显著减少	$Sen < 0, Z > 1.96$	0.21
无明显变化	$ Z \leq 1.96$	25.80
显著增加	$Sen > 0, Z > 1.96$	9.79
极显著增加	$Sen > 0, Z > 2.58$	64.01

分形特征方法, 可以预测时间序列数据相较于过去的未来变化趋势, 被广泛的应用于气候学和植被变化等领域中。通过该方法得出来的取值范围在(0~1)指数即为 *Hurst* 指数。当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明植被 NPP 呈现反持续性变化; 当时 $H = 0$ 时, 表明植被 NPP 在过去的时间序列中发生的变化对未来趋势不产生影响; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明植被 NPP 的未来变化趋势与过去相同, 呈现持续性^[38]。

1.3.4 最优参数地理探测器(OPGD)

地理探测器包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测四个部分, 其中最为常见的是分异及因子探测和交互作用探测。分异及因子探测用于探测地理要素的空间分异性, 并揭示影响因子对于其空间分异性的解释力度, 以 q 值表达, 取值范围为[0~1], q 值越大, 表示该影响因子对于地理要素空间分异性的解释力越强^[39], 通常把 q 值最大的影响因子记作主导因子; 地理要素的空间分异性是多种影响因子综合作用的结果, 交互作用探测可以识别不同的影响因子之间的交互作用, 评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对地理要素空间分异的解释力。OPGD 模型相较于地理探测器而言, 实现了空间离散化参数优化和空间分析尺度参数优化。OPGD 模型针对每一个连续变量, 以 q 值最大化为原则选择了离散化方法和断点数的最佳组合, 可选的离散化方法可以是有监督和无监督离散化方法的列表, 可选的断点数可以是观察和实际要求方面的整数序列。因此, 可选组合几乎可以涵盖所有可用的选择^[17]。不同空间分析尺度上因子的地理特征也可能存在明显差异, OPGD 模型通过计算不同空间尺度上所有因子 q 值的 90% 分位数, 并比较其 q 值总体变化趋势, 当某一尺度所有因子的 90% 分位数达到最大值, 便确定该尺度即为最佳空间尺度。

参照 GU 等^[18]的研究, 在 ArcGIS Pro 3.0 中将研究区的网格尺度设置为 1 km×1 km、2 km×2 km、3 km×3 km、4 km×4 km、5 km×5 km 和 6 km×6 km,

提取不同网格尺度的因子数据, 并基于 RStudio 4.4.3 中的“GD”包 (<https://CRAN.R-project.org/package=GD>), 按照不同分级方式(相等区间、自然区间、分位数区间、几何区间和标准差区间分类方法)对因子数据进行统计分析, 分类区间经反复尝试后确定为 4~9 类, 最终得到各驱动因素的 q 值。如图 2 所示, 各驱动因子 q 值的 90% 分位数在 3 km×3 km 处达到最大值, 因此, 确定 OPGD 模型的最优空间尺寸为 3 km×3 km。

1.3.5 偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)

偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)是一种多变量统计分析模型, 它综合了因子分析、回归分析和通径分析, 常用于分析潜在变量之间的关系。与另一个较为常见的基于协方差的结构方程模型(CB-SEM)相比, PLS-SEM 模型依赖于主成分分析, 适合于小样本量、非正态数据以及形成性和反射性测量模型^[40]。PLS-SEM 模型包含测量模型和结构模型两个基本组成部分, 用于解决潜在变量之间的复杂关系。与外生和内生潜变量相关的线性方程^[41]为

$$\xi_j = \sum_{i=1}^i \beta_{ji} \xi_i + \zeta_j \quad (3)$$

式中, ξ_j 为内生潜变量; ξ_i 为外生潜变量; β_{ji} 表示第 i 个外生潜变量与第 j 个内生潜变量之间的通径系数; ζ_j 为模型内关系的随机误差项。

测量模型中潜在变量和测量变量之间关系的线性方程可以表示为

$$x_{jk} = \lambda_{jk} \xi_j + \zeta_j \quad (4)$$

式中, x_{jk} 是被测变量; ξ_j 是潜在变量; λ_{jk} 表示第 k 个主成分对应的第 j 个被测变量的因子载荷; ζ_j 是测量误差项。

2 结果分析

2.1 植被 NPP 时空演变特征

2.1.1 植被 NPP 的时间变化特征

2001—2022 年, 嘉陵江流域 NPP 呈增加趋势, 年平均增加量为 $6.75 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。嘉陵江流域年平均 NPP 变化范围为 $476.66 \sim 723.63 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 多年平均值为 $590.08 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 最小值和最大值分别出现在 2001 年和 2014 年。年总量 NPP 变化范围为 $75.94 \sim 115.49 \text{ TgC}$ ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$), 平均总量 NPP 为 94.14 TgC 。

2001—2022 年嘉陵江流域各植被类型的 NPP 年均值差异较大, 植被 NPP 年均值的排序为针阔叶

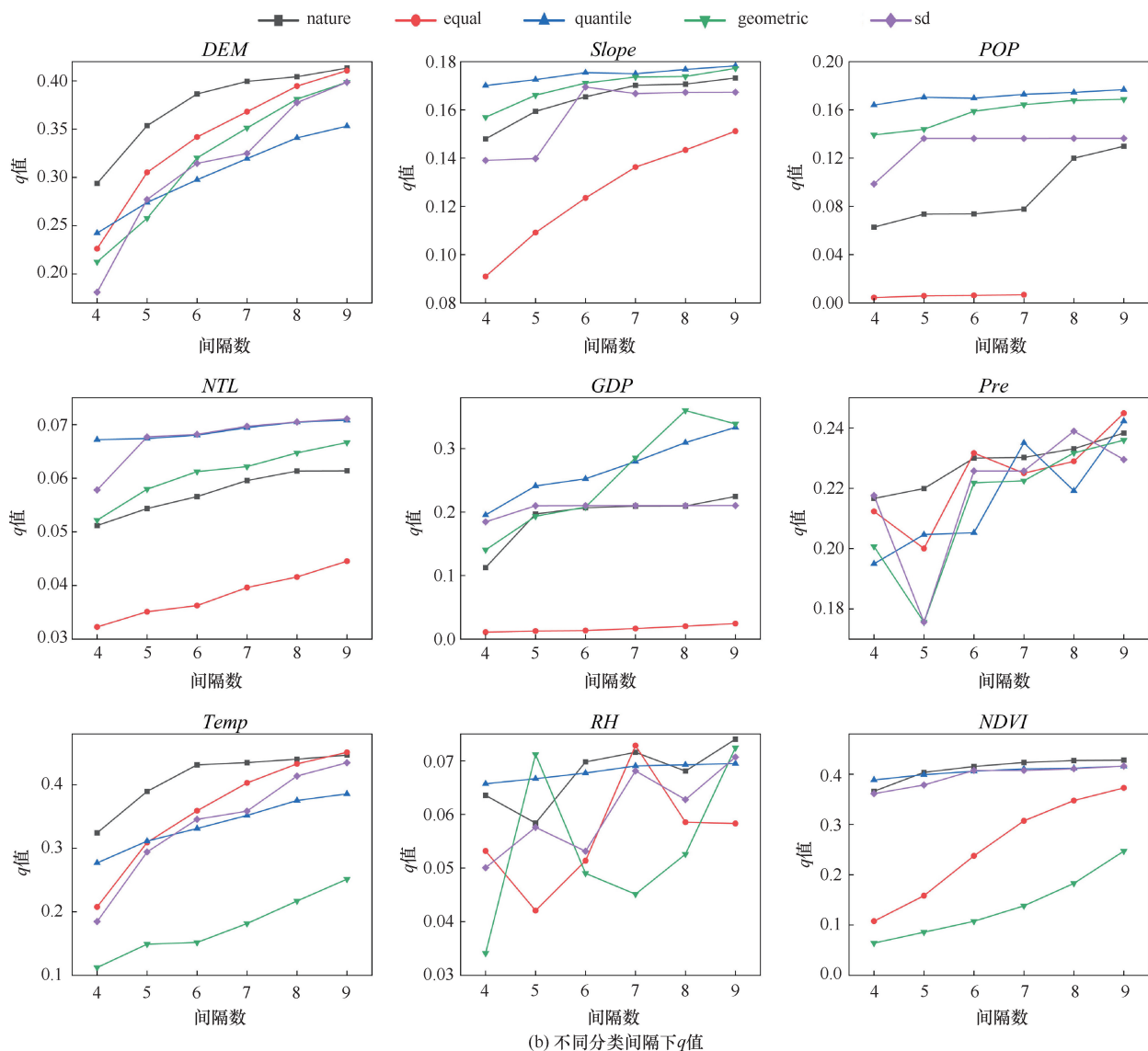
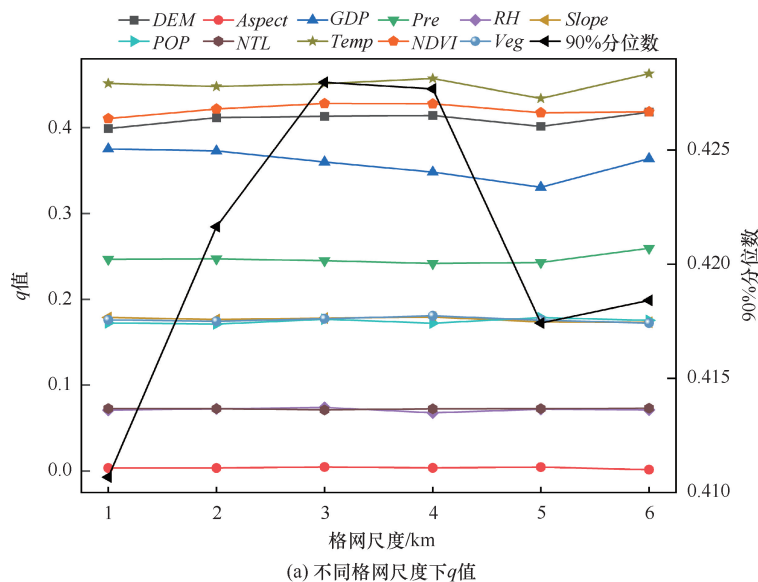


图 2 q 值随网格尺度和离散化参数变化

Fig. 2 Variations of q value with grid scale and discretization parameters

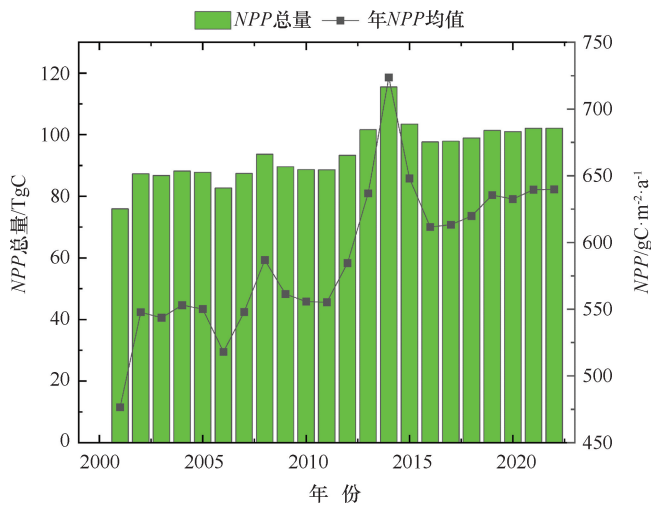
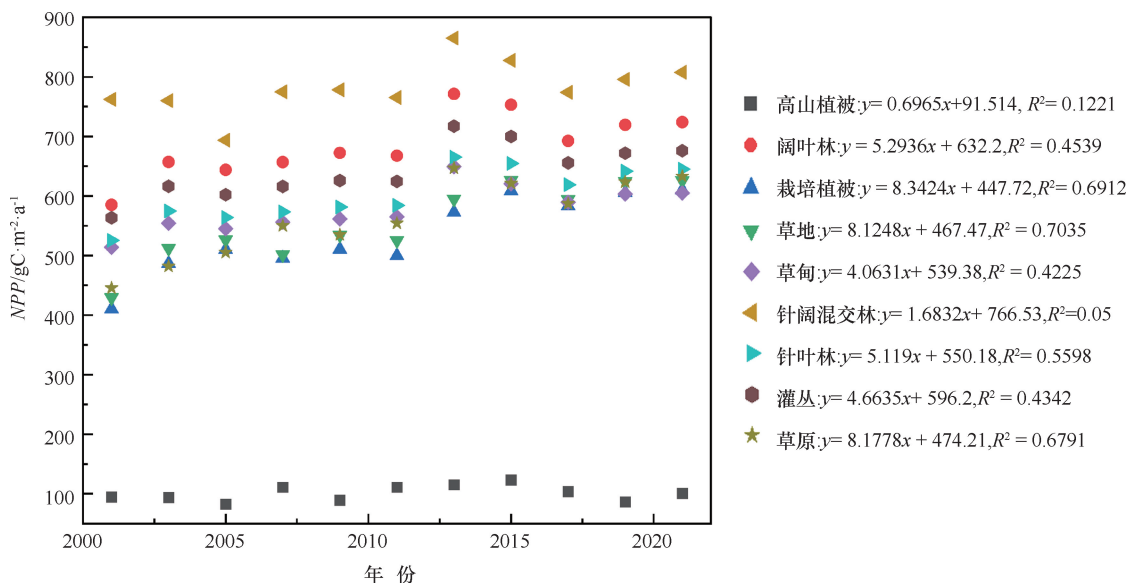


图3 2001—2022年嘉陵江流域植被 NPP 变化特征

Fig. 3 Characteristics of vegetation NPP variations in Jialing River Basin (2001—2022)

混交林 ($785.89 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 阔叶林 ($693.08 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 灌丛 ($649.83 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 针叶林 ($609.05 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 草甸 ($586.10 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 草原 ($560.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 栽培植被 ($543.66 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) > 高山植被 ($99.52 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)。各植被类型的 NPP 值的动态过程与整体植被 NPP 变化具有较高的一致性, 均呈现增加趋势, 但变化趋势存在差异, 不同植被类型中, 栽培植被的年际变化趋势最大, 变化值为 $8.34 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 草原、草甸的年际变化也相对较大, 变化值均达到 $8 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$; 高



y —第 i 年的 NPP 值; x —第 i 年, i 区间为 1~22

图4 不同植被类型 NPP 年际变化

Fig. 4 Interannual variations of NPP across different vegetation types

山植被的 NPP 变化趋势在所有的植被类型中最慢, 年际变化值仅为 $0.70 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (见图 4)。

2.1.2 植被 NPP 的空间变化特征

嘉陵江流域平均 NPP 在空间上呈现出明显的非均匀性 (见图 5), 变化范围介于 $35.63 \sim 1309.99 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 最大值主要集中于绵阳市东北部山地地区 (a), 这里地处龙门山脉, 海拔在 1500 m 左右, 水热资源相对优越, 森林植被覆盖率较高, 植被类型以 NPP 产量较高的阔叶林、针叶林以及针阔混交林为主。最低值区毗邻最大值区 (a), 这里地处岷山山脉, 海拔较 a 区已上升至 3000 m 左右, 水热资源恶劣, 植被覆盖率低, 主要生长高山植被。中值区主要位于四川盆地境内, 尽管盆地内部气温适合、降水充沛, 但太阳辐射低于其他纬度地区, 加之人类活动的干扰, 最终导致植被 NPP 低于龙门山脉地区^[42]。

如图 6 所示, 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP CV 值介于 $0.033 \sim 1.78$ 之间, 平均值为 0.128 , 空间分布表现出从南向北减少的趋势。NPP 的变化波动趋于稳定, 主要以高稳定和较高稳定为主, 覆盖流域面积的 93% , 较低稳定和不稳定区域仅占比 7% , 集中分布在嘉陵江流域南部以及干支流沿岸。整体来看, 嘉陵江流域植被 NPP 呈现出较为稳定的趋势, 受外界干扰程度较小, 具有较强的自我修复能力, 并且流域内生态环境较好。

基于 Theil-Median 法的时间序列数据趋势分析可

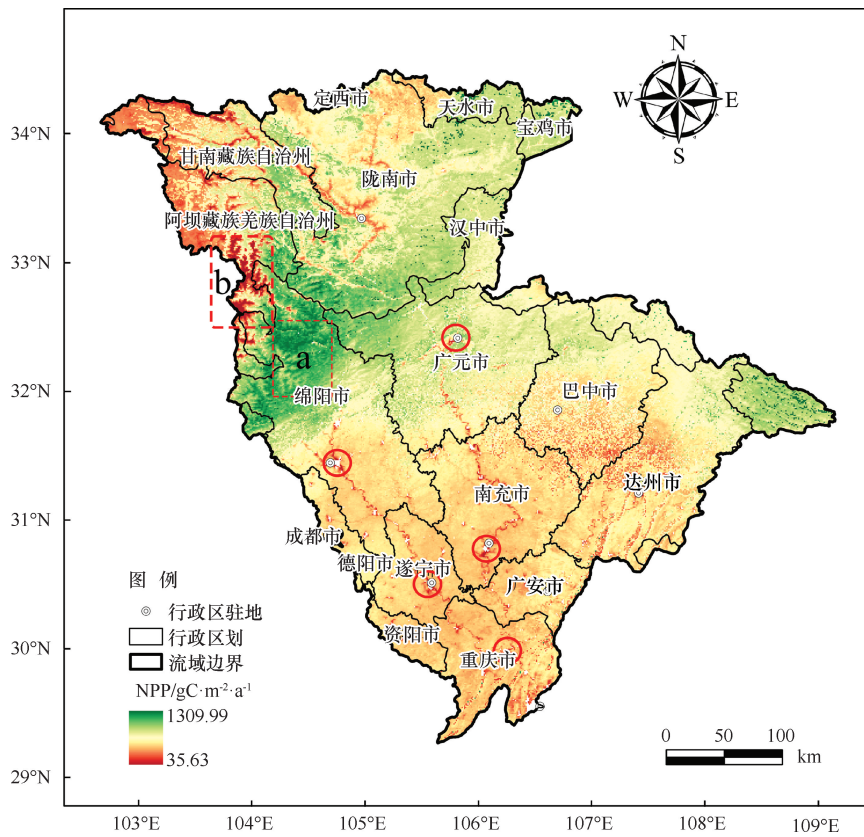


图 5 2001—2022 年嘉陵江流域平均植被 NPP 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average vegetation NPP in Jialing River Basin (2001—2022)

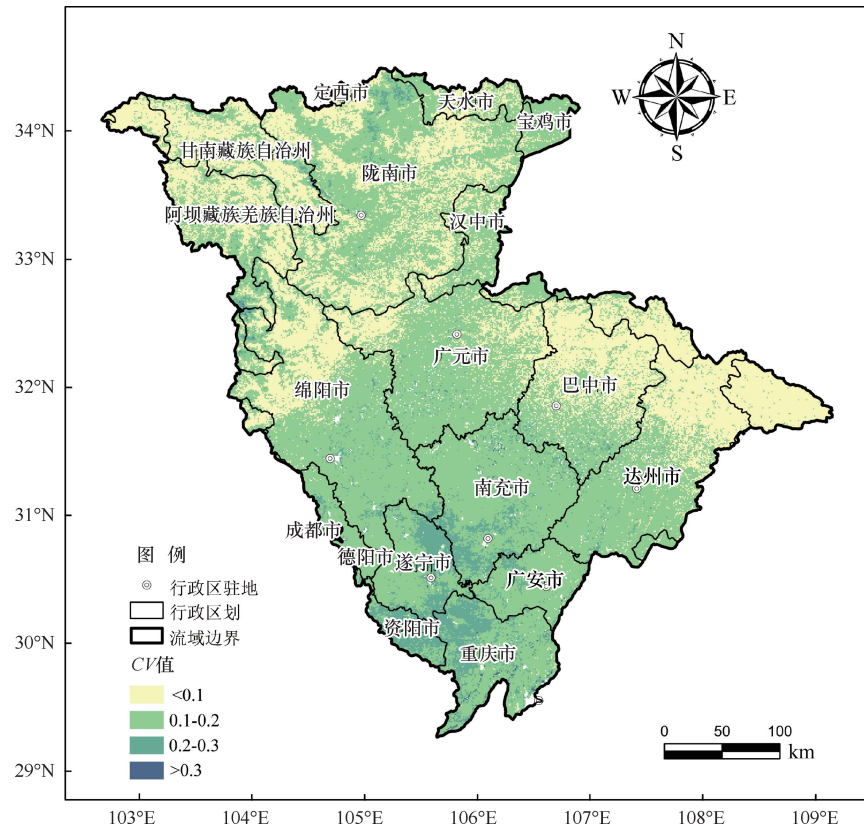


图 6 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP 的 CV 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of CV for vegetation NPP in Jialing River Basin (2001—2022)

以有效地刻画植被 NPP 的变化历史。嘉陵江流域植被 NPP 历史变化趋势显示(见图 7), 植被 NPP 整体呈上升趋势, 极显著增加的区域占比最大(64.01%), 主要分布在嘉陵江流域的北部、中部和南部, 这些地区水热条件相对较好, 本身就适合植被生长, 同时由于农业发展、水土保持、退耕还林、长江生态环境保护修复等工程, 生态环境得到很大程度的改善。无明显变化的区域(25.8%)占比也相对较大, 主要分布在嘉陵江流域东西两侧的山地地区, 这些地方被划定为保护区, 人类活动干扰少, 生态环境没有发生明显变化。呈减少趋势的地区仅占嘉陵江流域总面积的 0.39%, 零星分布在城市边缘和河流干道附近, 植被 NPP 受限于城市扩张等人类活动。

2.1.3 植被 NPP 的未来趋势变化特征

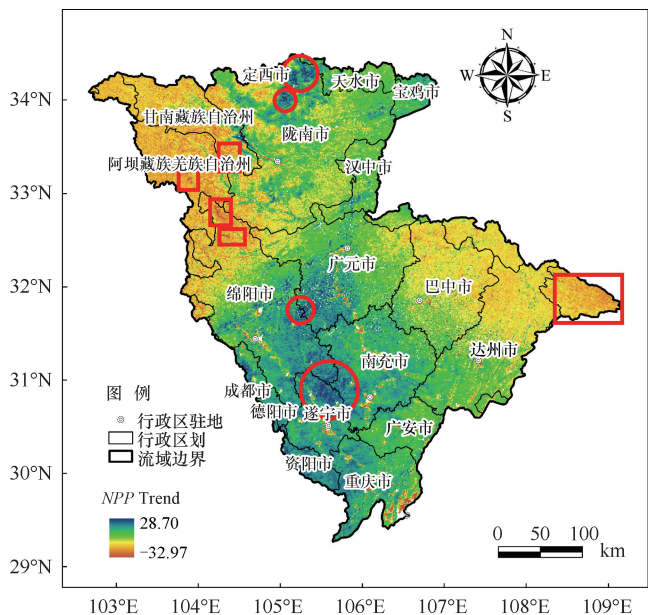
基于 Hurst 指数法探究嘉陵江流域植被 NPP 的未来趋势, 如图 8(a)所示, 植被 NPP 呈现持续性变化($H>0.5$)的区域占全流域总面积的 47.26%, 呈现反持续性变化($H<0.5$)的区域占全流域总面积的 52.74%, 发生持续性变化的区域与反持续性变化的区域面积总体处于相持水平。将 Hurst 指数同 Sen 趋势分析结果叠加得到嘉陵江流域植被 NPP 未来变化类型[见表 2 与图 8(b)]。结果显示, 预计嘉陵江流域 2.88% 的面积植被 NPP 将持续下降, 分布在嘉陵江流域西北高山地带, 因其气候恶劣, 植被生长困难, 不利于植被 NPP 的增加。减少转为增加的地区占比 1.88%, 主要位于龙门山脉以及秦巴山脉, 这

可能与森林保护措施有关。植被 NPP 呈持续增加的地区占比 45.38%, 主要分布在山地丘陵地区, 退耕还林政策以及持续实施长江大保护等措施的实施, 使得这些地区植被 NPP 的增加具有持续性。增加转为减少的地区面积占比达 49.86%, 主要分布在四川盆地内, 这可能与持续性的城镇建设和人类活动有关。

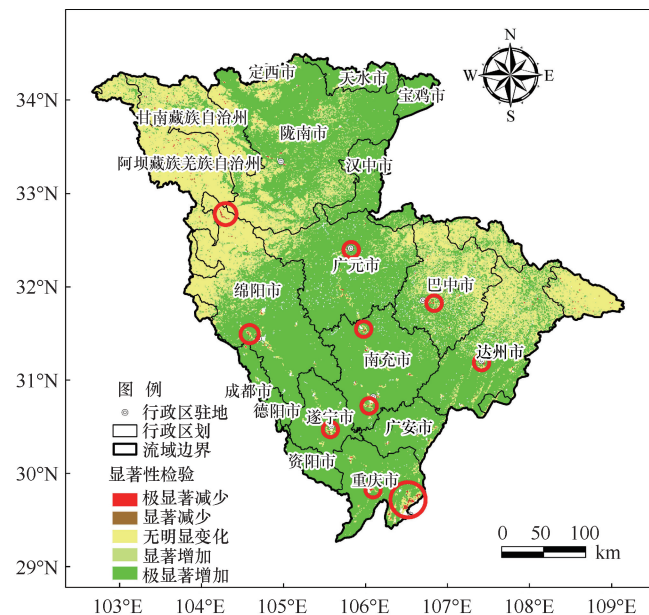
2.2 植被 NPP 的驱动因素分析

2.2.1 因子探测

为探究影响嘉陵江流域植被 NPP 空间格局分布的驱动因素, 根据研究区基本特征, 选取地形因子(高程 DEM、坡度 Slope、坡向 Aspect)、气候因子(气温 Temp、降雨 Pre、相对湿度 RH)、植被因素(归一化植被指数 NDVI、植被类型 Veg)和人类活动因素(国内生产总值 GDP、人口密度 POP、夜间灯光 NTL)共 11 个因子作为解释变量, 基于因子探测器探测各驱动因子 q 值, 统计结果显示各驱动因子对 2001—2022 年植被 NPP 空间格局的影响均到达 0.001 的显著性评价, OPGD 模型运行结果较好。因子探测结果如图 9 所示, 所有驱动因子中, Temp 和 NDVI 的 q 值超过了 0.4, 分别为 0.451 3 和 0.410 7, DEM 的 q 值也接近 0.4, 达到了 0.398 9, 这表明 Temp、NDVI 和 DEM 是主要驱动因子, 自然因素主导着 NPP 空间分异, 此外, GDP 的 q 值为 0.375 1, 超过了 0.3, 这说明人为因素中的经济因素对植被 NPP 空间分异也有较大的影响。Pre、Slope、Veg 和 POP



(a) NPP 变化趋势



(b) 显著性检验

图 7 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP 变化趋势及显著性检验

Fig. 7 Variation trends and significance tests of vegetation NPP in Jialing River Basin (2001—2022)

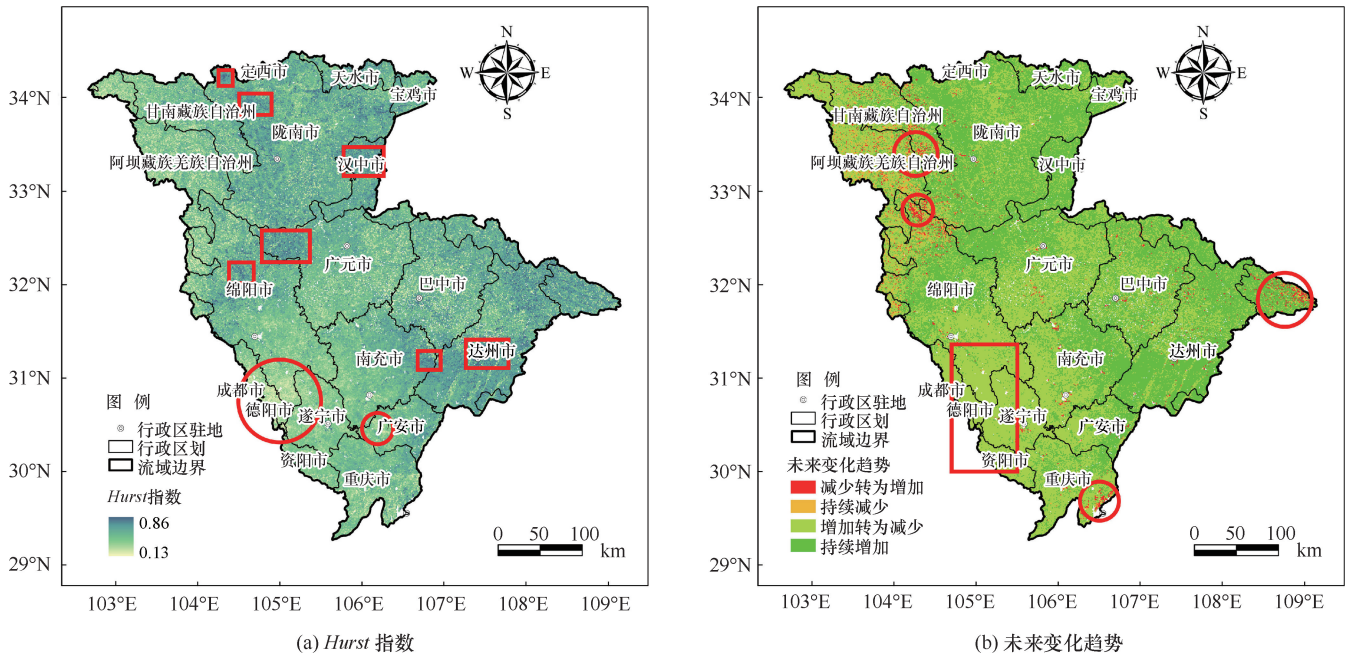


图 8 嘉陵江流域植被 NPP Hurst 指数及未来变化趋势

Fig. 8 Hurst index and future variation trends of vegetation NPP in Jialing River Basin

表 2 嘉陵江流域植被 NPP 未来变化趋势统计

Table 2 Statistics of future variation trends of vegetation NPP in Jialing River Basin

变化类型	判断依据	面积占比/%
持续增加	$Sen > 0, Hurst > 0.5$	45.38
增加转为减少	$Sen > 0, Hurst < 0.5$	49.86
减少转为增加	$Sen < 0, Hurst > 0.5$	1.88
持续减少	$Sen < 0, Hurst < 0.5$	2.88

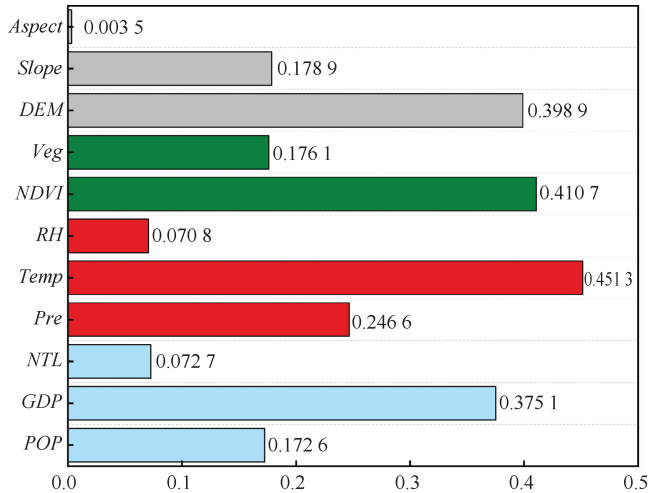


图 9 因子探测结果

Fig. 9 Factor detection results

的 q 值分别为 0.2466、0.1789、0.1761 和 0.1726，解释力均超过 0.1，NTL、RH 和 Aspect 的 q 值偏低，分别为 0.0727、0.0708 和 0.0035，解释力低于

0.1。基于因子探测器结果，Temp、NDVI、DEM 和 GDP 被认定为影响 NPP 空间分异的主要因素，自然因素的影响力要大于人为因素。

2.2.2 交互探测

植被 NPP 在空间上的分布并非只受到一种因子的影响，而是多个因子共同作用的结果，在此基础上，对各驱动因子进行交互作用探测。交互探测结果如图 10 所示，各影响因子交互作用探测的结果按照交互作用的类型可以划分为双因子增强和非线性增强两类，其中除 $NDVI \cap RH$ 和 $Temp \cap RH$ 外，与 RH 及 Aspect 进行交互作用的结果皆为呈现非线性增强，其他交互作用表现为双因子增强。其中 $Temp \cap Pre$ 的解释力最为显著 ($q = 0.6179$)， $NDVI \cap GDP$ 和 $NDVI \cap Temp$ 的解释力也即为显著 ($q > 0.6$)，值得注意的是，Pre 的单因子解释力仅为 0.2466，并未超过 0.3，但与 Temp 交互作用后的解释力达到最大值。此外，对 NPP 空间分异解释力较强的单因子如 Temp、NDVI、DEM 和 GDP 在与其他因子交互后也表现出较强的解释力， q 值均大于 0.5，因子探测解释力较弱 ($q < 0.1$) 的因子与其他因子组合后大多也产生较强交互解释力，除 $NTL \cap Aspect$ 和 $RH \cap Aspect$ 外，其他因子组合的解释力均大于 0.1。

2.3 潜变量对植被 NPP 空间格局的影响

地理探测器只能解释各驱动因子对植被 NPP 空间分异的影响是否显著，不能解释驱动因子对植被

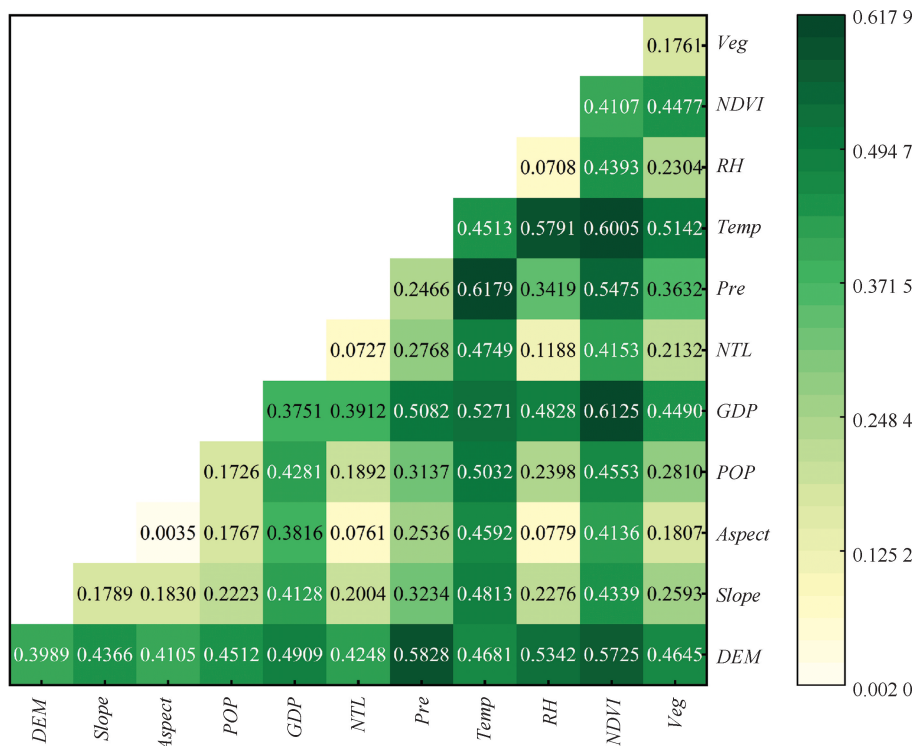


图 10 交互探测结果

Fig. 10 Interaction detection results

NPP 空间分异的直接效应和间接效应, 因此为进一步剖析驱动因子的影响路径, 选用 PLS-SEM 方法, 基于 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 格网尺度以及 OPGD 分析结果, 将影响不显著的 q 值在 0.1 以下的因子剔除, 包括 *NTL*、*RH* 和 *Aspect*, 同时由于 *Veg* 因子与其他因子存在高度共线性, 影响模型运行, 也选择剔除, 然后将 *Temp*、*Pre* 整合为气候潜在变量, *DEM*、*Slope* 整合为地形潜在变量, *GDP*、*POP* 整合为人类活动潜在变量, *NDVI* 为植被潜在变量, *NPP* 为最终解释变量。在一定假设基础上, 建立一个概念模型: 地形、气候、人类活动和 *NDVI* 都直接对植被 *NPP* 空间分异产生影响, 地形通过影响气候、人类活动和 *NDVI* 间接影响植被 *NPP* 空间分异, 气候通过影响人类活动和 *NDVI* 间接影响植被 *NPP* 空间分异, 人类活动通过影响 *NDVI* 间接影响植被 *NPP* 空间分异。为确保 PLS-SEM 模型的可靠性, 参考高翻翻等^[40]的研究评估 PLS-SEM 运行结果(见表 3 与图 11)。结果显示, PLS-SEM 模型具有较高的效度, 其中, 每个潜变量的 *AVE* 均超过 0.5, 与每个潜变量相关的 *FL* 均超过 0.4, 模型 *GOF* 值为 0.516, 大于 0.36 的阈值, 整体拟合度极佳。PLS-SEM 模型中嵌入的潜在植被 *NPP* 的 R^2 值表明, 所有的驱动因子共同解释了植被 *NPP* 的 41.4%。

表 3 PLS-SEM 模型评判标准

Table 3 Evaluation criteria of PLS-SEM model

统计指标	潜变量	评价体系	弱	中	强	值
R^2	—	0~1 越强越好	0.19	0.30	0.67	0.414
<i>GOF</i>	—	>0 越强越好	0.10	0.25	0.36	0.516
<i>AVE</i>	地形因子	>0.5 越强越好	—	—	—	0.773
	气候因子					0.880
	人类活动					0.586
<i>FL</i>	—	越强越好	—	—	—	1

PLS-SEM 模型的路径系数说明了各类型驱动因子对于植被 *NPP* 空间分异的直接效应和间接效应, 表明地形、气候、人类活动和 *NDVI* 这几类潜变量对于植被 *NPP* 产生了显著影响。其中, 地形、气候、人类活动均对于植被 *NPP* 产生直接负面效应(分别为 -0.0426 、 -0.1887 和 -0.0752), *NDVI* 对植被 *NPP* 具有直接正面效应(0.5766), 所有的潜在变量中, *NDVI* 对植被 *NPP* 的直接影响效应最大, 且呈现正面效应, 这可能是因为植被 *NPP* 的生产与植被覆盖密切相关, 植被覆盖越高, 植被 *NPP* 越大; 人类活动对于植被 *NPP* 的直接影响效应也相对较大, 且呈现负面影响, 这可能与 *GDP* 和 *POP* 高的区域主要是城镇地区, 植被覆盖较少相关。

PLS-SEM 运行的结果显示地形、气候和人类活

动对植被 NPP 均有显著的间接效应($p < 0.01$)。如图 11 所示, 虽然地形直接影响最低, 仅为 -0.0426 , 却通过影响其他潜在变量最终对植被 NPP 造成 0.3376 的最大间接影响, 地形产生的间接影响主要通过抑制气候变化(直接影响为 -0.8171)和促进植被生长(直接影响为 0.4244)来实现的(分别产生 0.1542 和 0.2447 的间接影响)。气候对于植被 NPP 的间接影响要弱于直接影响, 尽管气候通过促进植被生长(直接影响为 0.3336)对植被 NPP 产生 0.1923 的正向间接影响, 但同时也通过促进人类活动(直接影响为 0.2686)抑制了植被生长和 NPP 生产, 造成 -0.0625 的负向间接影响。人类活动主要通过干扰植被生长(直接影响为 -0.2732)对植被 NPP 产生负向影响(间接影响为 -0.1575)。

图 11 也展示了各潜在变量对植被 NPP 空间分异的总体效应, 具体而言, NDVI 对植被 NPP 空间分异产生正向影响, 总效应为 0.5766 , 地形对于植被 NPP 空间分异也产生正向影响, 总体效应(0.2951)明显弱于 NDVI。此外, 人类活动是造成植被 NPP 空间分异负面影响的主要驱动力, 总体效应为

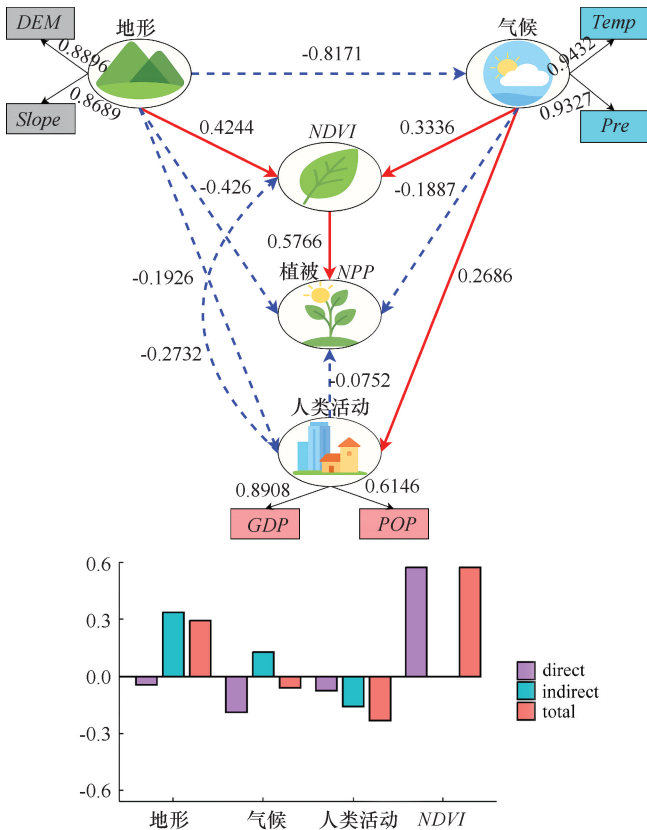


图 11 2001—2022 年潜在变量与多年平均植被 NPP 之间的因果关系

Fig. 11 Causal relationships between latent variables and multi-year average vegetation NPP (2001—2022)

-0.2328 , 气候对于植被 NPP 负面影响的总体效应较弱, 仅为 -0.0588 。

3 讨论

3.1 NPP 的时空变化趋势

从时间变化上看, 嘉陵江流域植被 NPP 呈现出波动上升趋势, 植被 NPP 在 2001 年时仅为 $476.66 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 而在 2013 年以后却能稳定保持在 $600 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据 ZHANG 等^[14]对长江流域植被 NPP 的研究, 嘉陵江流域植被 NPP 整体呈增加趋势的原因可能包括以下几点: 一是长期实施退耕还林、长江流域重点防护林体系建设工程、建设自然保护区等政策^[21-22], 使大部分森林得以自然生长, 其固碳能力随着树木逐渐生长也在不断提升; 二是中国对农业的投资带动了农业技术在生产中的不断应用, 提高了农业产量, 如四川省政府关于天府粮仓的建设^[43], 有效带动了四川盆地的农业发展。

在空间分布上, 嘉陵江流域植被 NPP 呈现出沿海拔先升再降的变化趋势, 这与流域内的地形地势特征息息相关^[44], 由于嘉陵江流域地处一、二级阶梯的过渡带, 其西北方向为高原山脉, 植被类型草原和荒漠为主, 多年冻土分布, 土壤贫瘠, 植被生长条件差^[45], 其气温和降雨条件不利于固碳能力高的植被生长^[46], 其植被 NPP 偏向低值, 甚至低于 $100 \text{ gC} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, CHEN 等^[47]对长江流域地形对 NPP 影响的研究证实了这一观点。NPP 高值区主要分布在海拔 $1000 \sim 2000 \text{ m}$ 区间内, 在此区间内, 降雨以及气温条件尚可, 同时由于地处山地, 植被主要为光能利用率较高的阔叶林、针叶林、针阔叶混交林以及灌丛等^[48], 所生产的 NPP 要大于其他植被生产量。海拔最低处四川盆地由于其地形平坦、水热适宜, 是嘉陵江流域人类活动的主要区域, 受此影响, 其植被类型主要为栽培植被, 植被 NPP 处于中等水平。

过去 22 a 间嘉陵江流域植被 NPP 总体呈稳定状态, 其波动变化表现出“南高北低”的空间格局, 与张炜等^[49]的研究相一致。在西北部高原山脉区, 植被类型多为高山植被, 生长稀疏, 植被 NPP 处于较低水平, 东部区域为森林生态系统保护区, 人类活动干扰少, 植被 NPP 也相对稳定, 这两个地区植被 NPP 变化趋势表现为无明显变化。嘉陵江干流流经四川盆地, 这里地势低平, 水源丰富, 气温适宜, 适宜植被生长, 同时由于水土保持、退耕还林、长江生态环境保护修复等工程, 生态环境得到进一步改善,

同时由于天府粮仓的建设, 栽培植被的 *NPP* 也显著提高, 植被 *NPP* 的变化趋势不如前面两个地区稳定, 主要表现为极显著增加。嘉陵江流域植被 *NPP* 的未来变化趋势表现为持续性变化与反持续性变化在空间上呈相持水平, 植被 *NPP* 持续增加和增加转为减少是植被 *NPP* 未来变化的主要方向, 这与在 ZHANG 等^[14,29] 关于长江流域的研究相一致。

3.2 *NPP* 变化的驱动因素

本研究从社会经济、气候、地形和植被 4 个方面选取了 11 个指标, 并采用 OPGD 模型实现了空间离散化参数优化和空间尺度参数优化, 确认了各指标的最优离散化分类以及 3 km×3 km 这一最优空间尺度。OPGD 的结果表明气温、*NDVI* 和 *DEM* 是影响植被 *NPP* 空间分异的主要驱动因子, *GDP*、*Pre*、*Slope*、*Veg* 和 *POP* 是次要驱动因子, 而 *NTL*、*RH* 和 *Aspect* 的影响相对较小。同时, *Temp*、*NDVI* 和 *DEM* 的耦合作用对于植被 *NPP* 的影响也极为显著, 这与冯婉^[50] 的研究结论相一致。此外, 虽然 *Pre* 的单因子 *q* 值不算太高, 但其与 *Temp* 耦合后却主导了植被 *NPP* 的变化, 这与嘉陵江流域的环境特征密不可分。由于 *Temp* 和 *Pre* 通常伴随着海拔变化而变化, 如海拔适宜地区, 水热资源往往适宜植被生长, 而在高海拔地区, 因其气候恶劣, 水热资源不足, 限制了植被的生长^[51]。

尽管自然因素主导着嘉陵江流域植被 *NPP* 的空间分异, 但社会因素的影响也不容忽视。社会因子中, *GDP* 深刻影响着植被 *NPP* 的空间分异, 其 *q* 值排在了 11 个指标的第 4 位, 仅比 *DEM* 低 0.023 8, 而 *POP* 的 *q* 值也超过了 0.1。在交互探测中, $GDP \cap NDVI$ 、 $GDP \cap Temp$ 、 $GDP \cap Pre$ 和 $POP \cap Temp$ 的 *q* 值均超过了 0.5, 即使是因子探测中 *q* 值小于 0.1 的 *NTL*, 与一些自然因子的耦合 *q* 值也超过了 0.4, 说明自然因素与社会因素的耦合也对植被 *NPP* 产生巨大的影响, 验证了 *NPP* 的空间分异是自然因素和社会因素共同作用的结果。*GDP*、*POP* 和 *NTL* 作为衡量人类活动强度和经济发展的重要指标, 与城市化水平、人类分布以及工业活动密切相关^[52]。在嘉陵江流域, 除高山地区不利于植被生长, *NPP* 水平偏低以外, *NPP* 的低值区集中分布在四川盆地内, 此区域也是 *GDP*、*NTL* 和 *POP* 较大的区域, 通过土地开发、城市扩张等人类活动影响了生态系统的稳定性和恢复力, 植被生长受到限制, 同时由于人口集聚、工业活动等引发城市热岛效应, 较高的温度导致植被水分快速蒸发, 加剧了植被 *NPP* 对降雨的依赖。而在

龙门山脉和秦巴山区, 人为干扰较少, 植被 *NPP* 保持在较高的水平。

PLS-SEM 分析解释了气候、地形、*NDVI* 和人类活动之间存在复杂的因果关系。本研究中, *NDVI* 对植被 *NPP* 具有直接的正向效应, 而气候、地形和人类活动则抑制植被 *NPP*。*NDVI* 对植被 *NPP* 的直接影响比其他潜在变量更为显著, *NDVI* 的增加与碳的吸收密切相关^[53], 凸显植被恢复对固碳能力的核心作用。地形通过抑制人类活动间接促进了植被固碳, 尤其是在海拔较高、坡度较陡的山区, 这些地区的地形条件限制了人类活动。此外, 气候对于植被 *NPP* 具有直接的负向效应, 气候也通过促进人类活动对植被 *NPP* 产生微弱的负向效应, 这可能缘由嘉陵江流域高海拔地区气候恶劣而低海拔地区气候适宜人类居住有关, 同时, 气候通过促进植被生长对植被 *NPP* 产生正向效应, 这可能与山区降温和增湿效应有利于植被生长有关^[18]。人类活动对植被 *NPP* 有直接抑制作用, 也通过抑制植被生长最终不利于植被固碳, 因此应时刻关注人类活动的影响, 避免过度的人为干扰。

3.3 关于防治未来生态风险的建议

研究发现, 尽管 2001—2022 年嘉陵江流域植被 *NPP* 总体呈增加趋势, 但其未来变化趋势的结果显示嘉陵江流域植被 *NPP* 仍面临一定的未来生态风险, 占流域总面积 49.86% 的植被 *NPP* “增加转为减少”区域集中分布于四川盆地核心区, 持续的城市化进程导致建设用地扩张与耕地占用, 可能削弱该区域碳汇功能, 加剧热岛效应与水土保持能力退化。此外, 仍有 2.88% 的区域植被 *NPP* 未来呈持续减少趋势, 主要分布在西北高山地区, 受寒冷气候与脆弱生态制约, 可能会威胁到区域水源涵养能力。尽管有 1.88% 的逆转恢复区显现生态修复成效, 但其与持续退化地区相邻, 恢复进程易受土地退化影响。植被 *NPP* 呈持续增加态势的地区位于盆地边缘向山地过渡带, 人类活动与自然生态系统的动态平衡面临挑战, 存在生态廊道断裂、生物栖息地破碎化风险。

针对上述风险, 需要基于不同未来风险分区建立差异化生态治理体系。首先, 针对由增加转为减少的地区, 特别是受人类干扰较大的城市地带及其周边地区, 应实施耕地保护、加大植被绿化和优化植被类型^[44], 并进行科学的城市景观规划, 以改善其生态状况^[54]。针对植被 *NPP* 呈持续增加态势的山地丘陵地区, 应通过划定生态保护红线, 因地制宜建设生态廊道, 促进生态环境的流动^[55]。针对植被 *NPP* 持续减少和有减少转为增加的地区, 应构建人工修复与生

态修复相结合的综合发展路径^[56], 同时由于植被 NPP 持续减少的区域分布分散, 应更加注重优化植被类型和格局, 促进生态文明建设^[57]。嘉陵江流域的生态保护是一个整体工作, 应建立全流域生态补偿机制, 推进后续水土保持工程建设。

4 结论

(1) 2001—2022 年嘉陵江流域植被 NPP 呈现波动上升趋势, 年均增加 $6.75 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 空间上, 植被 NPP 随海拔上升呈先增后减趋势。22 年间, 嘉陵江流域植被 NPP 大部分区域表现为极显著上升, 未来变化中植被 NPP 主要呈持续增加和由增加转为减少两类。

(2) 自然因子主导 NPP 空间分异, 气温、NDVI 和 DEM 为关键驱动因子, GDP 是重要人为因子。交互作用中, Temp 与 Pre、NDVI 与 GDP 的耦合效应显著。PLS-SEM 模型显示, NDVI 对 NPP 的直接正向效应最大, 地形通过抑制气候和促进植被间接提升 NPP, 人类活动直接抑制或通过干扰植被生长间接抑制 NPP。

(3) 四川盆地因城市化面临 NPP “增转减” 风险, 需优化植被类型与城市景观规划; 西北山区因其环境恶劣, 土地退化风险较大, 需构建人工—自然协同修复体系以巩固修复成果, 缓解持续退化; 山地丘陵区应划定生态红线、建设生态廊道, 巩固退耕还林成效。生态保护与修复是一个整体过程, 需要建立全流域生态补偿机制, 强化水土保持工程, 差异化治理以平衡人类活动与生态保护。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 方贺, 樊高峰, 王阔, 等. 2000—2022 年长江三角洲地区植被净初级生产力时空演化特征及驱动因素[J/OL]. 环境科学, 2024; 1-17. [2025-02-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408215>.

FANG H, FAN G F, WANG K, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in the Yangtze River Delta from 2000 to 2022 [J/OL]. Environmental Science, 2024; 1-17. [2025-02-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408215>.

[3] BAI X Y, ZHANG S R, LI C J, et al. A carbon-neutrality-capacity index for evaluating carbon sink contributions [J]. Environmental

Science and Ecotechnology, 2023, 15: 100237.

[4] WU Y Y, YANG J L, LI S L, et al. The impact of climate change and human activities on the spatial and temporal variations of vegetation NPP in the hilly-plain region of Shandong Province, China [J]. Forests, 2024, 15(6): 898.

[5] 宋颖, 高明秀, 王卓然, 等. 环渤海山东区耕地 NPP 时空变化特征及其驱动因子探测[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4733-4743.

SONG Y, GAO M X, WANG Z R, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of cultivated land NPP in the Shandong area around the Bohai Sea [J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4733-4743.

[6] 肖晶, 饶良懿. 2001—2020 年乌梁素海流域植被 NPP 时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4744-4755.

XIAO J, RAO L Y. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in the Wuliangsu Lake Basin from 2001 to 2020 [J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4744-4755.

[7] CHEN G Z, ZHANG K Q, ZHANG X D, et al. Enhancing terrestrial net primary productivity estimation with EXP-CASA: A novel light use efficiency model approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 326: 114790.

[8] HAO L, WANG S, CUI X P, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its response to climate change in Inner Mongolia from 2002 to 2019 [J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13310.

[9] ZHENG Z T, ZHU W Q, ZHANG Y J. Seasonally and spatially varied controls of climatic factors on net primary productivity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00814.

[10] 方浩玲, 程先富, 秦丽. 安徽省植被净初级生产力估算—基于改进的 CASA 模型. 生态学报, 2024, 44(4): 1601-1612.

FANG H L, CHENG X F, QIN L. Estimation of net primary productivity of vegetation in Anhui Province based on improved CASA Model. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1601-1612.

[11] 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.

SHI Z Y, WANG Y T, ZHAO Q, et al. The spatiotemporal changes of NPP and its driving mechanisms in China from 2001 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(11): 2111-2123.

[12] CAO Y, LI H W, LIU Y L, et al. Regional contribution and attribution of the interannual variation of net primary production in the Yellow River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(21): 5212.

[13] 杨楠, 王凌雨, 朱琳, 等. 黄河流域近十年 NPP 变化特征及驱动因子分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 280-295.

- YANG N, WANG L Y, ZHU L, et al. NPP variation characteristics and driving factors of the Yellow River valley in the last decade[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(2): 280-295.
- [14] ZHANG Y Z, GONG J, YANG J X, et al. Evaluation of future trends based on the characteristics of net primary production (NPP) changes over 21 years in the Yangtze River Basin in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10606.
- [15] 籍健勋, 童新, 段利民, 等. 内蒙古河套灌区所在流域植被 NPP 时空动态特征及其驱动力分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4392-4402.
- JI J X, TONG X, DUAN L M, et al. Characterization of spatial and temporal dynamics of vegetation NPP and its driving force in the watershed of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4392-4402.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [18] GU Z P, CHEN X W, RUAN W F, et al. Quantifying the direct and indirect effects of terrain, climate and human activity on the spatial pattern of kNDVI-based vegetation growth: A case study from the Minjiang River Basin, Southeast China [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 80: 102493.
- [19] 周建伟, 罗君. 嘉陵江流域生态系统服务价值与生态风险时空分异特征及关联性[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(5): 72-83.
- ZHOU J W, LUO J. Spatial-temporal differentiation characteristics and correlation of ecosystem service value and ecological risk of Jialing River Basin [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2023, 40(5): 72-83.
- [20] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
- LUO X L, WANG S J, BAI X Y, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 680-693.
- [21] DING Z, LIU Y, WANG L C, et al. Effects and implications of ecological restoration projects on ecosystem water use efficiency in the karst region of Southwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 170: 106356.
- [22] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3230-3240.
- XU Y, HUANG W T, DOU S Q, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6): 3230-3240.
- [23] DUAN X, CHEN B, ZHANG T X, et al. Habitat quality evolution and multi-scenario simulation based on land use change in the Jialing River Basin [J]. *Sustainability*, 2024, 16(16): 6968.
- [24] 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.
- PAN P F, PAN F Y, ZHANG H X, 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.
- [25] 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.
- [26] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. *水利发展研究*, 2025, 25(1): 1-12.
- LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 1-12.
- [27] 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.
- [28] 王天雯, 罗明良, 白雷超. 嘉陵江流域生态系统服务动态变化及权衡协同分析[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(6): 888-901.
- WANG T W, LUO M L, BAI L C. Dynamic changes and trade-off-synergy analysis of ecosystem services in the Jialing River Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(6): 888-901.
- [29] LIU C, SHI S, WANG T, et al. Analysis of net primary productivity variation and quantitative assessment of driving forces: A case study of the Yangtze River Basin [J]. *Plants*, 2023, 12(19): 3412.
- [30] ZHANG F Y, ZHANG Z X, KONG R, et al. Changes in forest net primary productivity in the Yangtze River Basin and its relationship with climate change and human activities [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1451.

- [31] 向晓宇. 嘉陵江流域植被 NPP 时空变化与驱动力研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
XIANG X Y. Study on the SPATIO-TEMPORAL VARIATION and Driving Force of Vegetation NPP in Jialing River Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [32] 邓小菲, 杜华明, 王雪梅, 等. 涪江流域植被净初级生产力时空变化及对气候的响应[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 47-58.
DENG X F, DU H M, WANG X M, et al. Spatio-temporal variation of net primary productivity of vegetation and its response to climate in Fujiang River Basin [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2024, 41(3): 47-58.
- [33] ZHOU Y Y, YUE D X, LI C, et al. Identifying the spatial drivers of net primary productivity: A case study in the Bailong River Basin, China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01685.
- [34] 汪士为, 吴伟. 近 31 年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 427-439.
WANG S W, WU W. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in Jialing River Basin in recent 31 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 427-439.
- [35] 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.
- [36] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2754-2767.
WANG F, WANG Z, ZHANG Y. Spatio-temporal variations in vegetation Net Primary Productivity and their driving factors in Anhui Province from 2000 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2754-2767.
- [37] 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 等. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2704-2714.
XU Y, HUANG H Y, DAI Q Y, et al. Spatial-temporal variation in net primary productivity in terrestrial vegetation ecosystems and its driving forces in southwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2704-2714.
- [38] LU Z W, CHEN P W, YANG Y R, et al. Exploring quantification and analyzing driving force for spatial and temporal differentiation characteristics of vegetation net primary productivity in Shandong Province, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 153: 110471.
- [39] 彭大力, 张斌, 吴林蓬, 等. 龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 29-37.
PENG D L, ZHANG B, WU L P, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River Basin in recent 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 29-37.
- [40] 高翻翻, 向洋, 王诗媛, 等. 基于地理探测器和 PLS-SEM 的藏东南植被变化及驱动因子分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(12): 225-236.
GAO F F, XIANG Y, WANG S Y, et al. Analysis of vegetation change and driving factors in southeastern Tibet based on geographical detector and PLS-SEM [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(12): 225-236.
- [41] HENSELER J, SARSTEDT M. Goodness of fit indices for partial least squares path modeling [J]. Computational statistics, 2013, 28(2): 565-580.
- [42] JIA L, YU K, LI Z, et al. Spatiotemporal pattern of NPP and its response to climatic factors in the yangtze river economic belt [J]. Ecological Indicators, 2024, 162: 112017.
- [43] 四川省农业农村厅. 聚力整区域推进农田建设 打造更高水平“天府粮仓” [J]. 中国农业综合开发, 2024(9): 11.
whole region to promote farmland construction to build a higher level of “Tianfu Granary” [J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2024, (9): 11.
- [44] JIA L, YU K X, LI Z B, et al. Spatiotemporal pattern of NPP and its response to climatic factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. Ecological Indicators, 2024, 162: 112017.
- [45] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 等. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4770-4783.
LI H Y, ZHANG C G, WANG S Z, et al. Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [46] ZHANG M Y, WANG K L, LIU H Y, et al. Vegetation inter-annual variation responses to climate variation in different geomorphic zones of the Yangtze River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 152: 110357.
- [47] CHEN S S, MA M H, WU S J, et al. Topography intensifies variations in the effect of human activities on forest NPP across altitude and slope gradients [J]. Environmental Development, 2023, 45: 100826.
- [48] QIU H H, HU B Q, ZHANG Z. Impacts of land use change on ecosystem service value based on SDGs report: Taking Guangxi as an example [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108366.
- [49] 张炜, 刘亦飞, 沈明星, 等. 长江流域植被净初级生产力时空动态特性及影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10): 165-176.
ZHANG W, LIU Y F, SHEN M X, et al. Spatiotemporal variation of net primary productivity and response to climatic factors in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10): 165-176.
- [50] 冯婉. 基于 CASA 模型和 CMIP6 模式的长江流域植被 NPP 时空

- 分异及预测[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- FENG W. Spatio-Temporal Differentiation and Prediction of Vegetation NPP in the Yangtze River Basin Based on CASA Model and CMP6 model[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [51] 孔维华. 长江流域植被固碳时空变化及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- KONG W H. Spatial and Temporal Changes in Carbon Sequestration by Vegetation in the Yangtze River Basin and Its Influencing Factors [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.
- [52] 武爱彬, 陈辅国, 尤海舟, 等. 京津冀地区植被净初级生产力时空变化特征及影响因素分析[J/OL]. 环境科学, 2025: 1-19. [2025-03-07]. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202411179>.
- WU A B, CHEN F G, YU H Z, et al. Characterization of spatial and temporal changes in net primary productivity of vegetation in the Beijing-Tianjin-Hebei region and analysis of influencing factors [J/OL]. Environmental Science, 1-19. [2025-03-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202411179>.
- [53] 张仲芝, 赵俊三, 陈国平, 等. 基于 OPGD 模型的昆明市植被 NPP 时空演变及驱动机制[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 298-308.
- ZHANG Z Z, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Spatiotemporal evolution of NPP and its influencing factors in Kunming City based on the OPGD model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 298-308.
- [54] GONG J, JIN T T, LIU D Q, et al. Are ecosystem service bundles useful for mountainous landscape function zoning and management? A case study of Bailongjiang watershed in western China[J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108495.
- [55] WANG Y X, GONG J, ZHU Y H. Integrating social-ecological system into watershed ecosystem services management: A case study of the Jialing River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111781.
- [56] LUO Q L, ZHOU J F, ZHANG Y, et al. What is the spatiotemporal relationship between urbanization and ecosystem services? A case from 110 cities in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115709.
- [57] DAI T R, DAI X A, LU H, et al. The impact of climate change and human activities on the change in the net primary productivity of vegetation: Taking Sichuan Province as an example [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(5): 7514-7532.

(责任编辑 王海锋)