

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022347

引用格式: 职露,胡涛,邹滨,等. 河南省植被 NPP 时空分异及其驱动因子[J]. 自然资源遥感,2023,35(4):169 – 177. (Zhi L, Hu T,Zou B,et al. Spatio – temporal differentiation of vegetation net primary productivity in Henan Province as well as its driving factors[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):169 – 177.)

河南省植被 NPP 时空分异及其驱动因子

职 露^{1,2}, 胡 涛², 邹 滨³, 李浩生¹, 赵永强¹

(1. 郑州师范学院地理与旅游学院,郑州 450000; 2. 信息工程大学数据与目标工程学院, 郑州 450000; 3. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083)

摘要: 植被净初级生产力(net primary productivity,NPP)是判定生态系统碳源/碳汇的主要参数之一,具有区域差异性。综合 MOD17A3HGF、地形和人类活动等数据,运用重心、趋势分析和地理探测器等方法,探究 2010—2020 年河南省植被 NPP 时空分异及其对驱动因子的响应,揭示各因子解释力及交互作用。结果表明,时间上,2010—2020 年植被 NPP 呈波动微上升趋势,多年均值为 $424.89\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 重心演变时间分异明显,平均重心距离几何中心较近。空间上,植被 NPP 自东北向西南递增,以中值区($300\sim600\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)为主。影响因素上,降水与植被 NPP 的相关性高于气温;植被 NPP 随海拔、坡度的增加而先增加后减少,海拔小于 200 m、坡度小于 2° 的区域对研究区 NPP 贡献最大;阳坡植被 NPP 相较于阴坡更高;土地利用变化下,向耕地的转化对 NPP 总量增长起主要作用。地理探测显示,对植被 NPP 变化解释力最强的单因子为降水;双因子交互均表现为增强关系,其中降水 $\cap$ 程度 q 值最高。研究结果可为河南省生态保护和高质量发展提供数据支持。

关键词: 河南省; 植被 NPP; 时空分异; 驱动因子

中图法分类号: TP 79; P 237; TP 751 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2023)04 – 0169 – 09

0 引言

植被是陆地生物圈的重要组成部分,在维护全球气候稳定中扮演着重要的角色^[1]。单位时间、单位面积内,植被通过光合作用将无机物转换成有机物,减去自身生长和生殖消耗部分后所积累的有机物总量被称为植被净初级生产力(net primary productivity,NPP)^[2]。作为调节碳循环的主要因子,植被 NPP 体现了植被在自然环境下的生产、恢复、退化能力,且表征了植被生长对气候变化、人类活动的响应,是区域生态环境质量评价的重要依据^[3]。研究植被 NPP 估算模型、时空演变及驱动因素,对于改善生态环境、调节区域及全球的气候系统具有重要的理论和实际意义。

传统植被 NPP 监测以实地测量为主,精度虽高,却由于大范围实地调查的不便性,难以实现全球或区域性 NPP 估算^[4–5]。国内外学者针对大尺度 NPP 估算相继提出了统计模型、机理模型以及光能

利用率模型^[6]。随着遥感技术的迅速发展,诸多学者基于 MODIS NPP 产品展开了区域植被 NPP 空间分布、动态变化以及驱动因子分析,并取得了一定的研究成果^[7–8],刘婵等^[9]分析了 2000—2014 年间中亚地区不同生态分区下植被 NPP 分布,结果发现典型草原区的植被 NPP 下降趋势最为显著;茆杨等^[10]在西南地区植被 NPP 研究中发现,该区域 NPP 与气温相关性更强;朱思佳等^[11]和冯婉等^[12]分别针对洞庭湖流域、长江流域进行了长时间序列 NPP 研究,多驱动因素中土地利用、海拔分别对 2 个流域 NPP 时空差异解释程度最高;刘旻霞等^[13]发现土地利用变化是青海省植被 NPP 变化的主要原因。上述研究验证了 MODIS NPP 产品的可靠性,揭示了植被 NPP 受气候、地形和土地利用等多种因素影响,具有明显的区域差异性。

河南省地处中国中东部,是我国主要的粮食生产基地,是黄河流域生态保护和全国生态格局的有机组成部分,复杂多变的气候、无序的开垦和快速的城镇化建设直接关系到该区域的植被状态、生态环

收稿日期: 2022 – 08 – 30; 修订日期: 2022 – 12 – 16
基金项目: 国家自然科学基金面上项目“东北杨树农田防护林碳储量遥感估算”(编号: 31971723)和自然资源部东南沿海海洋信息智能感知与应用重点实验室课题“滨海湿地红树林生态系统多源遥感碳汇监测研究”(编号: 23103)共同资助。
第一作者: 职 露(1991 –),女,博士,讲师,主要从事生态环境及高光谱遥感影像处理研究。Email: zhilu_361@163.com。
通信作者: 邹 滨(1981 –),男,博士,教授,主要从事环境污染及自然资源遥感监测研究。Email: 210010@csu.edu.cn。

境平衡和粮食安全^[14]。近年来,已有学者针对河南省植被 NPP 进行了相关研究,李军玲等^[15]探究了改进 CASA(Carnegie – Ames – Stanford approach) 模型下 1994—2008 年河南省植被 NPP 的年际变化、空间分布特征及其与气温、降水的关系;王新闯等^[16]基于 MOD17A3 数据阐明了 2000—2010 年河南省地市植被 NPP 时空变化;刘忠阳等^[17]探讨了 2000—2018 年河南省植被 NPP 季节性变化特征及其对气温、降水的响应。综上,目前研究大多聚焦于通过差值、线性回归和相关分析等方法研究植被 NPP 时空变化趋势及其与气候因子的相关性,关于植被 NPP 本身,鲜有学者从宏观方面分析植被 NPP 时空演变特征;关于驱动因子,对地形和人类活动等因子的考虑较少,且尚缺乏对植被 NPP 空间分异的定量归因。这些不足在一定程度上给区域生态系统研究带来了不确定性^[18-19],制约了有针对性的河南生态强省建设路径的制定^[14]。鉴于此,本文基于 2010—2020 年 MOD17A3HGF 数据分析河南省植被 NPP 时空分异特征,在此基础上引入重心模型揭示植被 NPP 重心分布及其迁移特征,进而结合气候、地形和人类活动等数据全面探究植被 NPP 对各驱动因子的响应,并利用地理探测器定量研究驱动因子对植被 NPP 空间分异的影响力,以期为河南省生态保护与调控政策提供科学支撑。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

河南省地貌类型以平原为主,地势西高东低(图 1)。该区域属于山区向平原、北亚热带向暖温带双重过渡地带,以大陆性季风气候为主,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季干旱少雨,气温西低东高,降水量南多北少。河南省面积约 16.7 万 km²,占国土面积的 1.73%;常住人口约 9936.6 万人,占全国

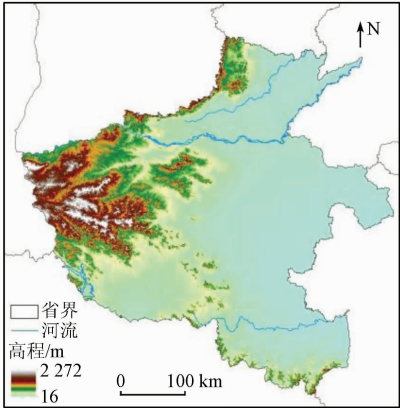


图 1 研究区概况示意图
Fig. 1 An overview of the study area

人口的 7.04%; 面积和人口分别位居全国第 17 位和第 3 位。

1.2 数据源

NPP 数据采用美国国家航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 2010—2020 年 h27v05 分幅的 MOD17A3HGF 产品,空间分辨率为 500 m; 气象数据为国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供的逐月平均气温和逐月降水量数据,空间分辨率为 0.008 333 3°(约 1 km); 地形数据源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的经 90 m STRM 重采样的 1 km 数字高程模型数据; 土地利用数据源于资源环境科学与数据中心,空间分辨率为 1 km。本研究将采用的遥感数据和地面多源数据统一投影为 Albers 坐标系(等积投影),空间分辨率重采样为 1 km。

2 研究方法

2.1 趋势分析法

Theil – Sen Median 是一种通过 Median 函数获取时间序列数据斜率中值的趋势算法,计算简单、不敏感于误差数据^[20],公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i}\right), \quad (1)$$

式中: β 为趋势检测因子,若其值大于 0,植被 NPP 呈增加趋势,反之,呈减少趋势; NPP_i 和 NPP_j 分别为时间序列数 i 和 j 的 NPP 值。

Mann – Kendall 是一种非参数统计检验方法^[20],具体计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(NPP_j - NPP_i), \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\text{sgn}(\theta)$ 为符号函数,当 $\theta > 0, \theta = 0, \theta < 0$ 时,函数值分别为 1, 0, -1; $\text{Var}(S)$ 为 S 的方差; Z 为标准化检验统计量; n 为时间序列总数。

2.2 重心模型法

地理学通过重心描述地理要素属性分布的矢量合力点^[21]。本研究采用地理重心表达研究区域

NPP 在空间上的聚集性,通过长时间序列重心迁移轨迹描述 NPP 动态变化情况。研究区域植被 NPP 分布重心坐标 $(\bar{x},\bar{y})$ 为:

$$(\bar{x},\bar{y}) = \left(\frac{\sum_{k=1}^t w_k x_k}{\sum_{k=1}^t w_k}, \frac{\sum_{k=1}^t w_k y_k}{\sum_{k=1}^t w_k} \right), \quad (5)$$

式中: w_k 为第 k 个像元的 NPP 值; t 为像元总数; x_k 和 y_k 分别为第 k 个像元中心的经度、纬度。

2.3 马尔可夫转移矩阵

马尔可夫模型描述了不确定系统下事物从一个状态到另一个状态的转移情况^[22]。本研究利用马尔可夫模型描述土地利用类型变化,并定量分析各类土地利用类型转移下 NPP 总量变化。结果由马尔可夫矩阵 C 表示,公式为:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1v} & \cdots & c_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{u1} & \cdots & c_{uv} & \cdots & c_{um} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mv} & \cdots & c_{mm} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: m 为土地利用类型总数; c_{uv} 为土地利用类型 u 向类型 v 转移的面积或该类型转移下 NPP 变化。

2.4 地理探测器

地理探测器是一种用于度量地理事物空间分异性、探测其背后驱动因子作用的新统计方法,原理简单、操作方便^[23]。本研究利用地理探测器中的因子

探测模块分析研究区域高程、坡度和坡向等因子对植被 NPP 空间分异的影响程度,用 q 值表示,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (7)$$

式中: h 为变量的分层; N 和 N_h 分别为研究区及层 h 数据量; σ 和 σ_h 分别为研究区及层 h 因变量的方差。

3 结果与分析

3.1 河南省植被 NPP 时空分异特征

2010—2020 年河南省 NPP 整体呈现缓慢增加趋势(图 2(a)),多年均值为 $424.89 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 植被 NPP 年际波动幅度较为明显,尤其对于先急速下降后迅速上升的 2012—2014 年和 2018—2020 年,该阶段气候、人类活动可能出现了较大变化。河南省植被 NPP 重心主要集中于该区域几何中心西南部,平均重心与几何中心相距约 18.42 km,表明植被 NPP 分布较为均衡。植被 NPP 重心演变时间分异明显(图 2(b)), 2010—2014 年 NPP 重心变化较为强烈,依次沿着东北、西北、东南、东北方向迁移,迁移距离最小为 8.6 km,该时间段内各方向轴两端 NPP 具有较大的变化,形成空间上的拉扯力; 2014—2020 年 NPP 重心变化微弱,迁移距离均小于 5.5 km,整体呈现向西北微弱迁移趋势。

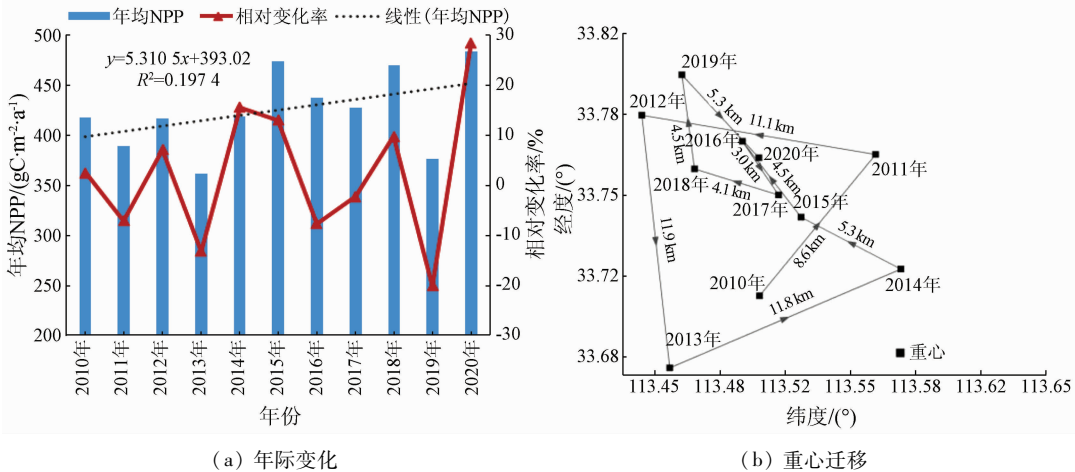


图 2 河南省 2010—2020 年植被 NPP 年际变化以及重心迁移轨迹
Fig.2 Interannual change and migration trajectory of the gravity center of vegetal NPP in Henan Province from 2010 to 2020

2010—2020 年河南省 NPP 空间分异较为明显(图 3(a)),平均值为 $34.5 \sim 918.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,整体上呈现从东北到西南不断增加的趋势,与海拔走势分布较为一致。为了进一步分析植被 NPP 变

化趋势,采用 Theil - Sen Median 方法计算 2010—2020 年植被 NPP 趋势值(图 3(b)),并对其进行 Mann - Kendall 检验(图 3(c))。结果表明,河南省约 92% 区域植被 NPP 呈现增加趋势且主要表现为

不显著增加；显著增加区域主要分布在太行山山地、豫西黄土丘陵区、豫西山地丘陵区东部；不显著减少区域主要位于南阳盆地、桐柏山—大别山山地丘陵区与黄淮海平原交界处以及黄河（河南段）中下游区域；显著减少区域呈零星分布。

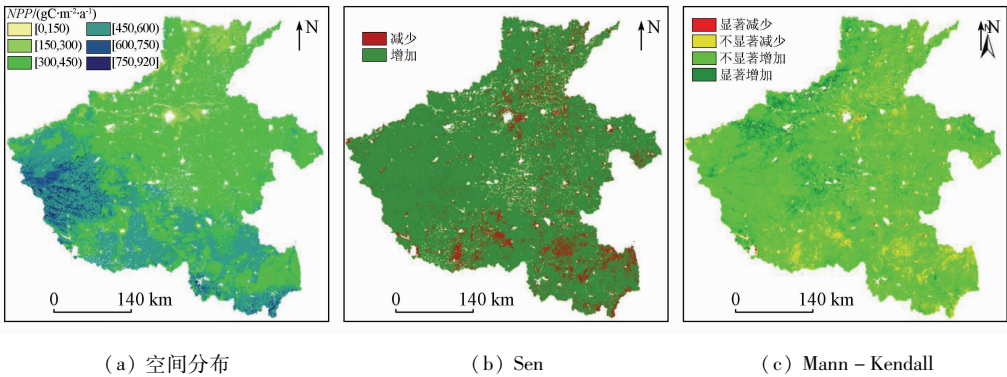


图 3 河南省 2010—2020 年植被 NPP 空间分布、变化趋势及其显著性检验

Fig.3 Spatial distribution, trend and significance of vegetal NPP in Henan Province from 2010 to 2020

3.2 植被 NPP 变化驱动因子分析

气温、降水是影响植被生长的决定性气候因素。通过散点图分析年尺度下植被 NPP 与气温、降水的关系(图 4(a)和(b)),结果表明气温与植被 NPP 的相关性较弱,降水对研究区域的植被 NPP 影响更为

显著。进一步探究像元尺度下植被 NPP 与气温、降水相关性的空间特征(图 4(c)和(d)),植被 NPP 与气温、降水的相关性均呈现正负相关并存、以正相关为主的趋势。其中,植被 NPP 与降水正相关区域面积约占 84%,相关系数自西向东逐步增加。

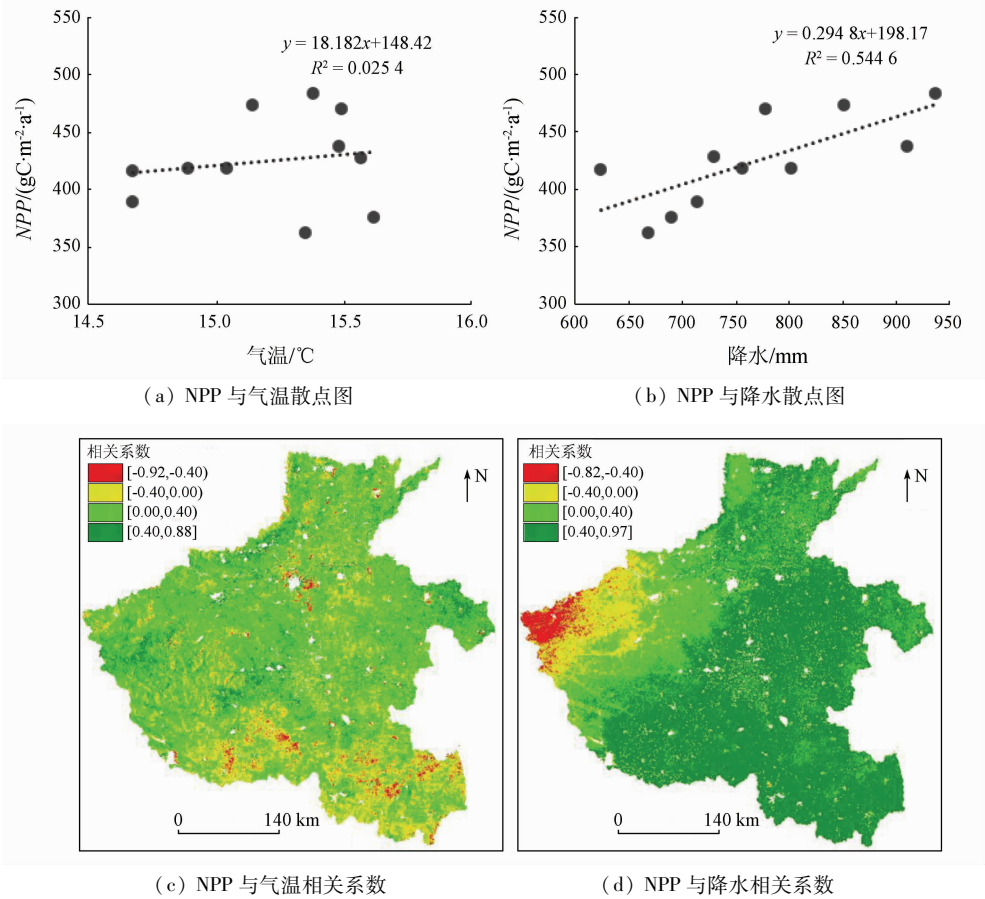


图 4 植被 NPP 对气温、降水的响应关系

Fig.4 Effects of temperature and precipitation on vegetal NPP

河南省地跨两级阶梯,地形条件是生态环境的重要影响因素。研究区域以低海拔区为主(图 5

(a)),随着海拔的增加,NPP 先增加后降低,1~1.5 km 海拔区间 NPP 均值最高(约 529.69 gC·m⁻²·a⁻¹),

所占面积却较少,对研究区 NPP 贡献不大。植被 NPP 对坡度的响应类似于海拔(图 5(b)),植被 NPP 均值随坡度增加而先增加后降低,当坡度大于 35°时,植被 NPP 均值迅速下降;低坡度区域(小于 2°)的植被 NPP 均值(约 406.13 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)所占面积最多(约 74%),对河南省植被 NPP 贡献较

大。图 5(c)显示,随着经度的增加,植被 NPP 均值先下降后增加,114°E 以西植被 NPP 快速下降,以东植被 NPP 缓慢上升;随着纬度的增加,植被 NPP 均值整体呈现下降趋势。图 5(d)表明,对于研究区而言,阳坡植被 NPP 均值较高,平均高于阴坡 $9.26 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

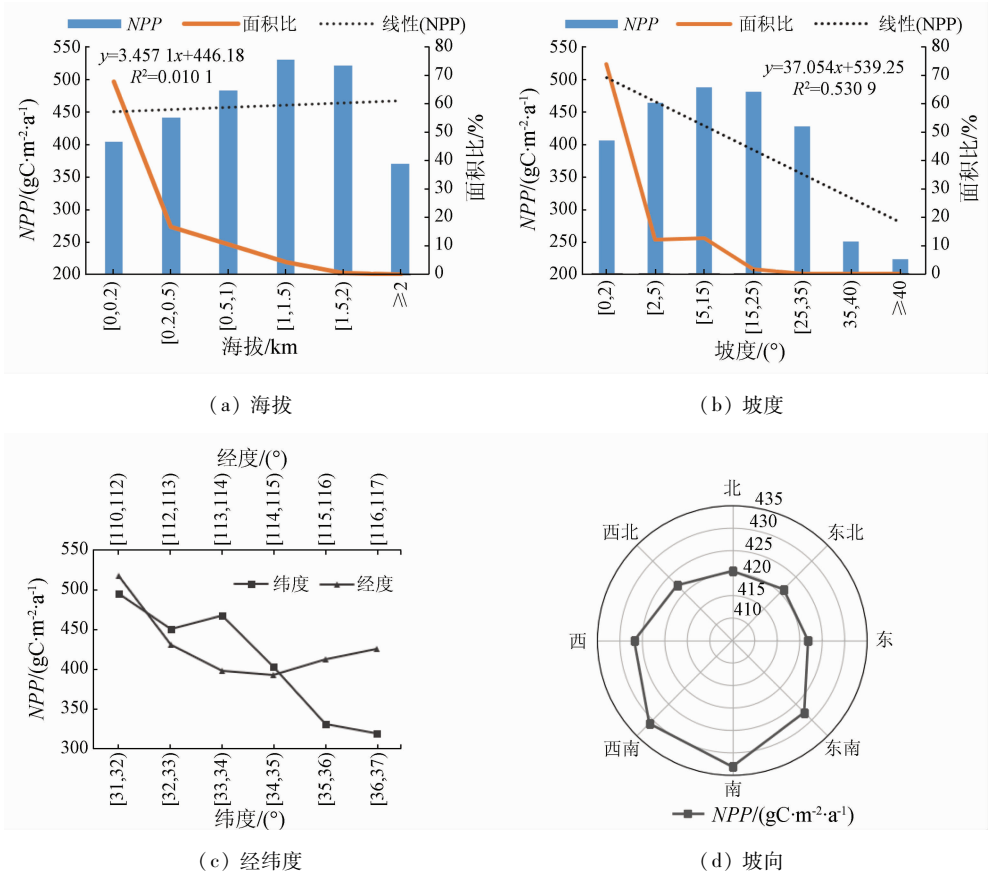


图5 植被 NPP 对海拔、坡度、经纬度和坡向的响应

Fig.5 Effects of altitude, slope, longitude, latitude and aspect on vegetal NPP

人类活动引起的土地利用类型变化能够直接影响生态系统中的碳循环,从而造成植被 NPP 的变化。表 1—2 分别为 2010—2020 年河南省土地利用类型转移矩阵以及该阶段不同土地利用类型转移下的植被 NPP 总量变化。由表 1 可知,2010—2020 年河南省草地、耕地和未利用地 3 种土地利用类型面积分别减少了 397.95 km^2 ,4 255.40 km^2 和 38.97 km^2 ,

建设用地、林地和水体面积分别增长了 4 080.23 km^2 ,326.78 km^2 和 285.31 km^2 ,其中,增长的建设用地面积主要由耕地类型转化而来(94%)。从表 2 中可以发现,2010—2020 年土地利用类型转化下河南省植被 NPP 总量增加了 2 785.68 $\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中,向耕地类型转化引起的 NPP 增长为该区域 NPP 总量增长做了最大的贡献,占 41%。

表 1 2010—2020 年河南省土地利用类型转移矩阵		Tab.1 Transition matrix of land use types in Henan Province from 2010 to 2020						(km ²)	
土地利用类型		2020 年							
		草地	耕地	建设用地	林地	水体	未利用地		
2010 年	草地	4 778.26	2 613.94	294.94	1 463.61	176.47	3.01		
	耕地	2 517.39	84 969.53	14 761.09	3 125.18	1 925.60	3.03		
	建设用地	102.36	11 157.82	6 364.10	104.05	217.82	0.01		
	林地	1 403.01	2 613.45	293.78	22 180.36	286.32	11.99		
	水体	129.26	1 656.64	309.49	231.52	1 723.97	0.00		
	未利用地	2.00	35.04	2.99	10.97	6.01	2.97		

表 2 2010—2020 年河南省土地利用类型转化下的植被 NPP 总量变化

Tab. 2 Change of vegetal NPP under different transition matrix in Henan Province from 2010 to 2020 (kgC · m⁻² · a⁻¹)

土地利用类型		2020 年					
		草地	耕地	建设用地	林地	水体	未利用地
2010 年	草地	—	202.52	18.77	124.45	5.71	0.36
	耕地	201.81	—	775.08	208.28	87.71	0.20
	建设用地	7.37	671.80	—	7.28	9.73	0
	林地	115.91	183.91	16.51	—	14.78	1.00
	水体	8.71	93.64	13.24	12.13	—	0
	未利用地	0.14	3.10	0.30	1.02	0.22	—

采用地理探测器探究海拔、坡度和坡向等 8 个因子对河南省植被 NPP 空间分异的解释力,以及各因子间交互作用。结果表明,对于单因子而言,坡向、气温、降水、土地利用和纬度是研究区域植被 NPP 空间分异的主要影响因子,其贡献率均大于 25%, q 值分别为 0.299, 0.390, 0.435, 0.263, 0.432; 海拔和坡度因子对植被 NPP 空间分异的贡献特征($q = 0.129$ 和 $q = 0.134$)相对较弱; 经度变化通过影响区域下垫面特征、干湿度等参数,对植被 NPP 空间分异具有相当的贡献率($q = 0.230$)。对于双因子交互而言,河南省植被 NPP 各因子间交互

作用关系均呈现双因子增强或非线性增强,对植被 NPP 空间分异解释力处于前 7 位的双因子交互 q 值如表 3 所示,整体上海拔、降水与其他因子存在更为明显的交互作用, q (海拔 $\cap$ 降水)和 q (海拔 $\cap$ 纬度)为 0.728 和 0.685,明显增强了海拔单因子对 NPP 空间分异的解释力; 值得注意的是,排名前 7 位的双因子交互有 5 类为降水与其他因子的交互结果,不仅表明降水与地形条件、人类活动驱动因子的交互作用,而且进一步说明了降水对河南省植被 NPP 的重要性。

表 3 驱动因子交互作用探测结果

Tab. 3 Detection results of interaction for different driving factors

因子	海拔 $\cap$ 降水	海拔 $\cap$ 纬度	降水 $\cap$ 坡向	降水 $\cap$ 气温	降水 $\cap$ 土地利用	降水 $\cap$ 经度	经度 $\cap$ 纬度
q	0.728	0.685	0.781	0.682	0.740	0.804	0.699

4 讨论

与以往研究不同,本研究利用重心模型从宏观视角揭示了河南省植被 NPP 空间分布的均衡性以及重心变化先强烈而后微弱的特征,全面分析了气候、地形和土地利用等多因子对植被 NPP 的影响,借助地理探测器从空间角度对植被 NPP 空间分异进行了定量归因。

2010—2020 年河南省植被 NPP 呈波动微上升趋势,年均增加了 6.51 gC · m⁻² · a⁻¹。由于 2013 年河南省降水量偏少、气温偏高,干旱缺水和高温分别减弱了植被的光合作用、加快了植被的自身消耗,给植被 NPP 带来了较大的负面影响,尤其对于作为农业大省的研究区,农作物生长和粮食安全更是受到严重的威胁,同期水土流失治理面积较 2012 年减少 127.4 万 hm²^[24]; 2019 年河南省降水量和年均气温分别为 1961 年以来第三少及第二高,且全年的阶段性干旱及短期洪涝灾害使得农业生产受损严重^[25],导致该时期植被 NPP 显著减少; 相较于 2013 年和 2019 年植被 NPP 低谷期,2014 年和 2020 年河

南省降水量增加、气温降低、水土流失治理面积增多,对植被 NPP 增长产生了积极作用,由此形成了 2012—2014 年和 2018—2020 年植被 NPP 先急速下降后迅速上升的现象。

年尺度、像元尺度下分析河南省植被 NPP 与气温、降水的相关性,发现植被 NPP 与降水相关性更强,这与刘忠阳等^[17]、陈阳^[26]的研究结果一致。部分区域植被 NPP 与降水呈负相关,主要位于三门峡、洛阳、济源高海拔区,这是因为垂直分布于高海拔区的植被受人类活动影响较小,植被类型较为单一,多属于耐干旱植被,过多的降水不利于植被的生长; 与气温呈负相关区域主要位于河南省南部地带,该地带纬度偏低、气温相对较高,过高的气温导致水分蒸发反而抑制了植被的生长。河南省以低海拔、低坡度为主,这些区域植被 NPP 相对较弱却所占面积较多,成为河南省植被 NPP 的主要贡献源; 随着海拔、坡度的升高,人类活动减弱,更多的有机物被固定,植被 NPP 逐步提升; 当海拔、坡度继续升高,植被营养逐步流失,气温持续降低等气候条件不利于植被生长,植被 NPP 呈减少趋势。河南省植被 NPP 呈现明显的坡向差异,阳坡植被 NPP 均值高于

阴坡,向阳坡热量充足,有利于植被生长,而王莉娜等^[27]发现祁连山国家公园阴坡植被 NPP 高于阳坡,光照条件对该区域植被 NPP 影响相对较小,体现了植被 NPP 对驱动因子响应的区域差异性及机制复杂性。因子影响力探测表明降水对研究区域植被 NPP 空间分异贡献最大,水分是该区域植被 NPP 空间分异形成的外部主导因子,这与相关性分析结果具有相似性,也进一步说明了 2013 年和 2019 年植被 NPP 迅速下降与当年降水量减少有关。此外,不同于气温与植被 NPP 的弱相关性,气温对植被 NPP 空间分异的解释力相对较强,仅次于降水和纬度因子,说明地处山区向平原、亚热带向暖温带双重过渡地带的河南省区域内气温存在较为明显的空间差异性^[28],并直接影响植被 NPP 的空间分布。

5 结论

1)2010—2020 年,河南省植被 NPP 均值呈微弱上升趋势,年际间波动较为强烈;受气候和人类活动影响,2013 年和 2019 年植被 NPP 出现低谷值。植被 NPP 重心演变具有明显的时间分异性,2010—2014 年,NPP 重心在距离、方向上均具有较大的变化,此后重心迁移变化相对微弱。

2)研究期间河南省植被 NPP 年均值介于 34.5~919 gC·m⁻²·a⁻¹,由东北至西南不断增加,中值区域所占面积最多,主要位于研究区南部环山区域及南阳盆地;低值区域和高值区域分别位于北部和西南部。

3)河南省植被 NPP 与降水相关性更强,相关系数具有空间分异性;随着海拔、坡度增加,植被 NPP 均先增后减,低海拔、低坡度区域植被 NPP 较低,却对研究区植被 NPP 贡献率最大;阳坡植被 NPP 高于阴坡;耕地面积增长下的植被 NPP 为近 11 a 来 NPP 增长主要来源。

4)单因子而言,降水对河南省植被 NPP 变化解释力最强,其次为纬度、气温;各因子交互关系为双线性增强或非线性增强,其中,降水与经度、土地利用、坡向双因子交互对植被 NPP 具有更为显著的协同增强作用。

参考文献(References):

[1] Yan M,Xue M,Zhang L,et al. A decade's change in vegetation productivity and its response to climate change over northeast China[J]. Plants,2021,10(5):821.
[2] Li F,Meng J,Zhu L K,et al. Spatial pattern and temporal trend of

land degradation in the Heihe River basin of China using local net primary production scaling[J]. Land Degradation and Development,2020,31(4):518-530.
[3] Wang H,Liu G H,Li Z S,et al. Assessing the driving forces in vegetation dynamics using net primary productivity as the indicator:A case study in Jinghe River basin in the Loess Plateau[J]. Forests,2018,9(7):374.
[4] 田义超,杨 棠,徐 欣. 北部湾典型入海流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报,2021,30(5):938-948.
Tian Y C,Yang T,Xu X. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of net primary productivity of vegetation in typical basin entering the sea Beibu gulf[J]. Ecology and Environmental Sciences,2021,30(5):938-948.
[5] 孙庆龄,李宝林,李 飞,等. 三江源植被净初级生产力估算研究进展[J]. 地理学报,2016,71(9):1596-1612.
Sun Q L,Li B L,Li F,et al. Review on the estimation of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwater region,China[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(9):1596-1612.
[6] 徐雨晴,肖风劲,於 琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. 生态学报,2020,40(14):4710-4723.
Xu Y Q,Xiao F J,Yu L. Review of spatio-temporal distribution of net primary productivity in forest ecosystem and its responses to climate change in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(14):4710-4723.
[7] Han H Z,Bai J J,Ma G,et al. Seasonal responses of net primary productivity of vegetation to phenological dynamics in the Loess Plateau,China[J]. Chinese Geographical Science,2022,32(2):340-357.
[8] Guan X B,Shen H F,Li X H,et al. A long-term and comprehensive assessment of the urbanization-induced impacts on vegetation net primary productivity[J]. Science of the Total Environment,2019,669:342-352.
[9] 刘 婵,刘 冰,赵文智,等. 中亚地区植被净初级生产力时空动态及其与气候因子关系[J]. 遥感技术与应用,2020,35(4):924-933.
Liu C,Liu B,Zhao W Z,et al. Temporal-spatial variation analysis of net primary productivity and its relationship with climate in central Asia[J]. Remote Sensing Technology and Application,2020,35(4):924-933.
[10] 茆 杨,蒋勇军,张彩云,等. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应[J]. 生态学报,2022,42(7):2878-2890.
Mao Y,Jiang Y J,Zhang C Y,et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in south-west China in the past 20 years and its response to ecological engineering[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2878-2890.
[11] 朱思佳,冯微微,邹 滨,等. 2000—2019 年洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及驱动因素分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):196-206. doi:10.6046/zrzyyg.2021283.

Zhu S J, Feng H H, Zou B, et al. Spatial – temporal characteristics of 2000—2019 vegetation NPP of the Dongting Lake basin and their driving factors [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 196 – 206. doi:10.6046/zrzyyg.2021283.

[12] 冯 婉, 谢世友. 长江流域片 2000—2015 年植被 NPP 时空特征及影响因子探测[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 176 – 183.

Feng W, Xie S Y. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of vegetation NPP in the Yangtze River basin from 2000 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 176 – 183.

[13] 刘旻霞, 焦 骄, 潘竟虎, 等. 青海省植被净初级生产力 (NPP) 时空格局变化及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5306 – 5317.

Liu M X, Jiao J, Pan J H, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5306 – 5317.

[14] 宋晓森, 杨朝兴. 基于习近平生态文明思想建设生态强省的路径探讨[J]. 中州学刊, 2022(7): 90 – 94.

Song X S, Yang C X. Research on the path for building a strong eco – province based on Xi Jinping’s concept of ecological civilization [J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2022(7): 90 – 94.

[15] 李军玲, 陈怀亮, 邹春辉, 等. 1994—2008 年河南省植被净第一性生产力及其时空变化 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1424 – 1429.

Li J L, Chen H L, Zou C H, et al. Vegetation net primary productivity and its temporal – spatial changes in Henan Province during 1994—2008 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1424 – 1429.

[16] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. 生态学报, 2013, 32(10): 2797 – 2805.

Wang X C, Wang S D, Zhang H B. Spatiotemporal pattern of vegetation net primary productivity in Henan Province of China based on MOD17A3 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(10): 2797 – 2805.

[17] 刘忠阳, 李梦夏, 李军玲, 等. 河南省植被净初级生产力变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 141 – 151, 163.

Liu Z Y, Li M X, Li J L, et al. Spatial – temporal changes of vegetation net primary productivity and its response to climate change in Henan Province [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 141 – 151, 163.

[18] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648.

[19] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 686 – 694.

Zuo L Y, Gao J B. Quantitative attribution analysis of NPP in Karst peak cluster depression based on geographical detector [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(4): 686 – 694.

[20] Libiseller C, Grimvall A. Performance of partial Mann – Kendall tests for trend detection in the presence of covariates [J]. Environmental metrics, 2002, 13(1): 71 – 84.

[21] 梁龙武, 先 乐, 陈明星. 改革开放以来中国区域人口与经济重心演进态势及其影响因素 [J]. 经济地理, 2022, 42(2): 93 – 103.

Liang L W, Xian Y, Chen M X. Evolution trend and influencing factors of regional population and economy gravity center in China since the reform and opening – up [J]. Economic Geography, 2022, 42(2): 93 – 103.

[22] 肖东洋, 牛海鹏, 闫弘轩, 等. 1990—2018 年黄河流域 (河南段) 土地利用格局时空演变 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271 – 281, 326.

Xiao D Y, Niu H P, Yan H X, et al. Spatiotemporal evolution of land use pattern in the Yellow River basin (Henan section) from 1990 to 2018 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 271 – 281, 326.

[23] 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.

[24] 河南省统计局. 2013 年河南统计年鉴 [EB/OL]. (2019 – 12 – 31) [2022 – 06 – 05]. <https://oss.henan.gov.cn/sbgt-wztipt/attachment/hntjj/hntj/lib/tjnj/2013/indexch.htm>.

Henan Province Bureau of Statistics. 2013 Henan statistical yearbook [EB/OL]. (2019 – 12 – 31) [2022 – 06 – 05]. <https://oss.henan.gov.cn/sbgt-wztipt/attachment/hntjj/hntj/lib/tjnj/2013/indexch.htm>.

[25] 2019 年河南十大天气气候事件公布 [EB/OL]. (2020 – 01 – 03) [2022 – 07 – 06]. <https://www.henan.gov.cn/2014/01-01/335400.html>.

The announcement of the top ten weather and climate events in Henan in 2019 [EB/OL]. (2020 – 01 – 03) [2022 – 07 – 06]. <https://www.henan.gov.cn/2014/01-01/335400.html>.

[26] 陈 阳. 河南省植被 NPP 与水气象要素的时空变化及其响应关系 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.

Chen Y. Temporal and spatial changes of vegetation NPP and hydrological and meteorological in Henan Province and their response relationship [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.

[27] 王莉娜, 宋伟宏, 张金龙, 等. 祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析 [J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1458 – 1474.

Wang L N, Song W H, Zhang J L, et al. Spatio – temporal evolution of vegetation net primary productivity in Qilian Mountain National Park and its driving factors [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(8): 1458 – 1474.

[28] 郭灵辉, 高江波, 邹友峰. 21 世纪以来河南省植被覆盖变化及气候驱动解析 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 161 – 173.

Guo L H, Gao J B, Zou Y F. Analysis on the vegetation cover change in Henan Province of China since the 21st century and its climatic driving [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5): 161 – 173.

Spatio – temporal differentiation of vegetation net primary productivity
in Henan Province as well as its driving factors

ZHI Lu^{1,2}, HU Tao², ZOU Bin³, LI Haosheng¹, ZHAO Yongqiang¹

(1. School of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Data and Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Geosciences and Info – Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The net primary productivity (NPP) of vegetation, exhibiting regional differentiation, serves as a crucial parameter for determining the carbon source/sink of ecosystems. Based on the MOD17A3HGF, topography, and human activity data, this study delved into the spatio – temporal differentiation of vegetation NPP in Henan Province from 2010 to 2020 and its response to driving factors using methods like the gravity center model, trend analysis, and the geographical detector model. Moreover, it revealed the explanatory power and interactions of the driving factors. The results are as follows: ① Temporally, the vegetation NPP from 2010 to 2020 displayed a slightly fluctuating upward trend, averaging $424.89\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Its gravity center exhibited significant temporal differentiation, with the average center of gravity closer to the geometric center. ② Spatially, the vegetation NPP values increased from the northeast to the southwest and were dominated by median values ($300 \sim 600\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). ③ In terms of influencing factors, the vegetation NPP showed a higher correlation with precipitation compared to temperature. Moreover, it first increased and then decreased with an increase in altitude and slope. The areas with altitudes below 200 m and slopes less than 2° contributed the most to NPP in the study area. The vegetation NPP on sunny slopes was higher than that on shady slopes. In the case of land use changes, the shift to arable land plays a significant role in the increase of total NPP. ④ The geographical detection results indicate that precipitation exhibited the highest explanatory power for changes in vegetation NPP. The two – factor interactions all showed an enhanced relationship, with the q value of precipitation $\cap$ longitude being the highest. These findings provide data support for ecological protection and high – quality development of Henan Province.

Keywords: Henan Province; vegetation NPP; spatio – temporal differentiation; driving factor

(责任编辑: 陈 理)