

河南省黄河流域耕地 NPP 时空变化 特征及其驱动因子

赵曼宇^{1,2}, 马泉来^{1,2}, 孙晓兵³, 周浩⁴

[1.河南省资源环境调查一院,河南 郑州 450007; 2.河南省自然资源科技创新中心
(资源环境承载力评价与监测预警研究),河南 郑州 450007; 3.天津工业大学
环境科学与工程学院,天津 300387; 4.湖南师范大学 地理科学学院,湖南 长沙 410081]

摘要: [目的] 揭示河南省黄河流域耕地净初级生产力(NPP)的时空演变特征与驱动因子,为有效协同区域耕地生产能力挖掘和流域生态环境保护提供科学依据。[方法] 综合运用土地利用/覆盖数据集(CIUD)、MOD17A3H NPP数据集等多源数据,采用变异系数、Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall检验方法和Hurst指数等方法,揭示2000—2023年河南省黄河流域耕地NPP时空变化特征,并借助地理探测器模型对其影响因子进行探测。[结果] ①2000—2023年河南省黄河流域耕地NPP年均值为383.04 g/(m²·a),以4.35 g/(m²·a)的速度显著增加;空间分布总体呈现南高北低的特点,空间变异以较低波动和中度波动为主。②耕地NPP变化趋势以极显著增加为主,面积比例为43.61%,主要分布于研究区中西部;显著增加和不显著增加的耕地NPP面积分别为20.83%和22.76%。③耕地NPP的Hurst指数平均值为0.44,正向持续和负向持续面积比例分别为22.87%和77.13%;未来耕地NPP由增到减的区域面积最大,其面积比例为59.65%,广泛分布于各个地市。④年均气温、年均降水量、年均蒸发量和高程是影响耕地NPP的主要因子;气候条件、地形状况、社会经济等不同因子之间以非线性增强或双因子增强的交互作用方式共同影响耕地NPP。[结论] 2000—2023年河南省黄河流域耕地NPP总体呈现波动增加,自然因素和人为因素共同影响该区域耕地NPP;有效调控各因素以协同耕地利用与生态保护共同发展,对河南省黄河流域尤为重要,特别是在耕地NPP由增到减的区域。

关键词: 耕地; 净初级生产力(NPP); 时空变化; 驱动因子; 黄河流域; 河南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0385-12

中图分类号: F301.21, X171.1

文献参数: 赵曼宇, 马泉来, 孙晓兵, 等. 河南省黄河流域耕地 NPP 时空变化特征及其驱动因子[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 385-396. Zhao Manyu, Ma Quanlai, Sun Xiaobing, et al. Spatiotemporal variation in NPP of cultivated land and its driving factors in Yellow River basin of Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 385-396. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.019; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.019.

Spatiotemporal variation in NPP of cultivated land and its driving factors in Yellow River basin of Henan Province

Zhao Manyu^{1,2}, Ma Quanlai^{1,2}, Sun Xiaobing³, Zhou Hao⁴

[1.The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450007, China; 2.Science and Technology Innovation Centre of Nature Resources of Henan Province (Evaluation Monitoring and Early Warning of Resource Environmental Bearing Capacity), Zhengzhou, Henan 450007, China; 3.School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 4.School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China]

Abstract: [Objective] To provide a scientific basis for effectively coordinating the tapping of regional cultivated

收稿日期: 2024-12-23

修回日期: 2025-01-21

采用日期: 2025-01-22

资助项目: 河南省科技攻关项目“河南典型粮食主产区耕地种植结构变化对水土资源平衡的影响机理及调控研究”(252102321114); 2024年河南省高等院校重点科研项目(24A630025); 2025年度河南省软科学项目(252400411068); 国家自然科学基金青年项目(42301300)

第一作者: 赵曼宇(1992—),女(汉族),河南省新郑市人,硕士研究生,研究方向为土地资源管理。Email:18703636589@163.com。

通信作者: 孙晓兵(1990—),男(汉族),河南省襄城县人,博士,主要从事土地资源评价、利用与保护方面的研究。Email:sunxiaobing@tiangong.edu.cn。

land production capacity and ecological environmental protection of the Yellow River basin of Henan Province, the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the net primary productivity (NPP) of cultivated land in the basin were analyzed. [Methods] Using multi-source data, including those from China's land use/cover dataset (CLUD) and MOD17A3H NPP dataset, this study employs the coefficient of variation, Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, and Hurst index to reveal the spatiotemporal changes in cultivated land NPP in the basin from 2000 to 2023. A geographical detector model is used to identify influencing factors. [Results] ① From 2000 to 2023, the average annual NPP of cultivated land in the basin was $383.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, increasing significantly at a rate of $4.35 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. The spatial distribution generally showed the characteristics of being higher in the south and lower in the north, and the spatial variation was mainly dominated by low and medium fluctuations. ② The trend of change in cultivated land NPP was chiefly characterized by a very significant increase, with an area proportion of 43.61%, mainly distributed in the central and western parts of the study area. The cultivated land NPP areas with significant and insignificant increases were 20.83% and 22.76%, respectively. ③ The average Hurst index of cultivated land NPP was 0.44, and the proportions of positive and negative sustained areas were 22.87% and 77.13%, respectively. The largest proportion of future cultivated land NPP is expected to transition from increasing to decreasing, covering 59.65% of the area and being widely distributed across cities. ④ The main factors influencing cultivated land NPP include the annual average temperature, annual average precipitation, annual average evaporation, and elevation. Climate conditions, topographic features, and socioeconomic factors jointly influence cultivated land NPP through a nonlinear enhancement or dual-factor enhancement interactions. [Conclusion] From 2000 to 2023, the cultivated land NPP in the Yellow River basin of Henan Province showed an overall fluctuating increase. Both natural and anthropogenic factors influenced the NPP of cultivated land in this region. Effective regulation of these factors to harmonize cultivated land use and ecological protection is crucial, particularly in areas where cultivated land NPP is transitioning from increasing to decreasing in the region.

Keywords: cultivated land; NPP; spatiotemporal changes; driving factors; Yellow River basin; Henan Province

耕地作为最为宝贵的自然资源,是保障国家粮食安全的物质基础。面对气候变化、环境污染、生态退化等问题,合理开展耕地利用以提升耕地生产能力对确保粮食安全具有重要的意义,特别像中国这样人多地少的国家^[1-2]。然而,随着中国城市化、工业化以及农业现代化的快速发展,城市扩张占用耕地以及高强度农业集约利用致使耕地出现土壤污染、土壤酸化、土壤重金属污染、地下水位下降等问题,已经严重威胁着耕地生产力的提高^[3-4]。为此,中国政府构建了以耕地数量、质量、生态“三位一体”的保护体系,旨在合理、有序推进耕地保护,同时也对耕地保护提出了新的要求^[4-5]。2024年4月,国务院通过《新一轮千亿斤粮食产能提升行动方案(2024—2030年)》,明确指出到2030年实现新增粮食产能千亿斤以上,全国粮食综合生产能力进一步增强。然而,如何科学地挖掘耕地生产能力,提高粮食安全保障能力是耕地资源开发和利用的关键。因此,充分揭示耕地生产能力的空间分布特征,探索耕地生产能力的影响因素,有针对性地制定耕地利用与管理政策以充分挖掘和提升耕地生产能力,对保障国家

粮食安全具有极其重要的基础性作用。

净初级生产力(net primary production, NPP)作为单位时间和单位面积的植被进行光合作用积累的有机物质减去自身呼吸消耗有机物质而剩余的有机物质,反映植被有机物质的净积累量^[6-7]。NPP是表征植被自然环境中光照、温度、地形等因素综合作用形成的生产能力,通常用来作为植被物质和能量交换的关键指标^[6-8]。国内外学者对植被NPP开展了大量的研究,涵盖NPP估算、时空分布、影响因素等内容,研究尺度涉及县域^[7]、市域^[8]、省域^[9]、流域^[10]、国家等^[11]尺度,如宋午椰等^[12]基于CASA模型估算了2001—2019年黄土高原地区植被NPP,并对其时空分布特征及其驱动因子进行了分析;洪辛茜等^[13]对中国西南地区NPP时空特征进行了分析,并揭示土地利用变化对NPP的影响及其主要原因;石智宇等^[11]揭示了2001—2020年中国净初级生产力时空变化特征及其驱动机制;Zarei A等^[14]揭示了坦桑尼亚气候变化对草原NPP的影响;Cloern J E等^[15]揭示了美国西海岸典型湿地在过去、现在、未来等不同时期的NPP的变化状况。已有研究对植被NPP及不同

土地利用类型NPP进行了研究,然而,针对人类与自然相互作用最为密切的耕地NPP的研究相对比较薄弱,特别是对典型土地复合利用区域的耕地NPP差异特征分析仍需深入研究。

2021年中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,重点强调黄河流域土地资源科学利用与保护对国家生态保护和高质量发展的重要作用,以及如何科学有效地开展黄河流域开发、利用与保护^[16]。河南省作为中国重要的粮食主产区,肩负保障国家粮食安全重任,同时河南省北部也处于黄河流域保护的重点区域^[6,16]。有效协同耕地利用和生态保护是河南省黄河流域高质量发展的基础,在此宏观背景下客观揭示河南省黄河流域耕地生产力时空演变特征及其影响因素,对合理制定该区域耕地利用与生态保护策略,以及提升国家粮食安全保障能力和推动区域农业可持续发展均具有积极的促进作用。因此,本研究以河南省黄河流域为研究区,对2000—2023年耕地NPP时空演变特征进行分析,并定量分析其影响因素,以为河南省黄河流域耕地资源利用与生态保护提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本研究以河南省自然资源厅编制的《河南省黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》为基础确定河南省黄河流域范围^[17],该规划将河南省划分为核心区、拓展区、协同区和辐射区4个区域。本研究以核心区、拓展区和协同区3个区域作为河南省黄河流域。河南省黄河流域位于河南省中北部,范围覆盖10个沿黄河城市和4个引黄受水城市,具体包括三门峡市、洛阳市、焦作市、郑州市、新乡市、开封市、濮阳市、安阳市、鹤壁市、济源市、许昌市、周口市、商丘市和平顶山市14个地市。河南省黄河流域位于33°03′—36°22′N和110°21′—116°39′E,土地总面积为 $1.05 \times 10^5 \text{ km}^2$,占河南省土地总面积的62.75%。依据第3次国土调查数据,河南省黄河流域耕地面积为 $4.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占河南省耕地总面积的61.65%。该区域隶属暖温带大陆性季风气候和亚热带大陆性季风气候,适宜的光温水热条件为河南省黄河流域农业发展提供了良好的基础条件,作物熟制为一年两熟,主要农作物为小麦、玉米、大豆等类型。

1.2 数据来源

本研究采用的主要基础数据为2000—2023年的NPP数据和土地利用数据,其中,NPP数据源自美国

国家航空航天局MOD17A3 H数据集,时间分辨率为1 a,空间分辨率为500 m;土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队的中国土地利用/覆盖数据集(CLOUD),数据分辨率为30 m^[18]。DEM、人口、GDP、年均气温、年均降水量、年均蒸发量、侵蚀状况等相关数据均来自中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>);坡度和坡向则基于DEM数据计算而得。本研究借助ArcGIS软件平台开展数据处理与分析,同时借助Matlab与Origin等软件进行数据处理与图形绘制。

2 研究方法

2.1 变异系数

变异系数用于反映两组或多组数据之间的波动程度^[19]。变异系数越大,数据的波动性越大;反之,数据的波动性越小。具体计算公式为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中: C_v 为变异系数; σ 为标准差; \bar{x} 为平均值。

2.2 趋势分析

综合运用Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验方法可用于准确地揭示长时序数据变化趋势,其中,Theil-Sen Median是一种非参数统计的趋势估算方法,对样本分布无特定要求,且能够排除时间序列中异常值的干扰,已经广泛应用于时间序列的变化趋势分析;Mann-Kendall是一种非参数统计检验方法,不受缺失值和异常值的影响。

Theil-Sen median趋势计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (V_j > i) \quad (2)$$

式中: β 为斜率;median为取中值的函数; x_i, x_j 分别表示第*i*年和第*j*年的耕地NPP数值。当 $\beta > 0$ 时,表明耕地NPP呈现增加趋势;当 $\beta = 0$ 时,表明耕地NPP无变化; $\beta < 0$ 时,表明耕地NPP呈现减少趋势。

Mann-Kendall检验需要以 $x_1, x_2 \dots x_n$ 时间序列变量为基础,构造统计量S的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

式中:sgn为符号函数,计算公式为:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

使用检验统计量Z对耕地NPP变化趋势进行检验,Z统计量的计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{var}(S)$ 为方差。

在给定显著性水平 α 下, 如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 即表示存在明显的趋势变化。当 $|Z|$ 大于 1.65, 1.96, 2.58 时, 分别表示通过置信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

2.3 持续性分析

基于重标极差 (R/S) 分析方法得到的 Hurst 指数, 可用于定量描述长时间序列变化的持续性特征。该方法最早由英国水文学家 Hurst^[20] 提出, 并经 Mandelbrot 等改进^[21], 现在广泛应用于水文学、气候学等领域, 适用于长时间数据序列的持续性变化检测。具体计算公式为:

定义时间序列 $x(t)$:

$$\omega_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (\tau = 1, 2, 3 \dots n) \quad (6)$$

计算累计偏差 $x(t, \tau)$:

$$x(t, \tau) = \sum_{\tau=1}^{\tau} [x(\tau) - \omega_\tau] \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (7)$$

计算极差序列 $R(\tau)$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (8)$$

计算标准差序列 $S(\tau)$

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - \omega_\tau]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

若存在 $R/S \propto \tau^H$, 表明长时间序列存在 Hurst 现象, H 为 Hurst 指数, 其数值用最小二乘法拟合而得。 H 的数值范围为 0~1, 且以 0.5 为界划分为 3 种类型: 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明数据变化具有持续性, 即数据变化与过去趋势一致, 且 H 越接近于 1, 持续性越强; 当 $H = 0.5$ 时, 表明数据变化具有随机性; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明数据变化具有反持续性, 即数据变化与过去趋势相反, 且 H 越接近于 0, 反持续性越强^[22]。

2.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异特征以及揭示其驱动因子的统计学方法^[23]。运用因子探测和交互探测揭示自然和社会等因子对河南省耕地 NPP 的影响及其交互作用, 其中, 因子探测 q 值用以衡量自变量对因变量的解释能力, 具体计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (10)$$

式中: q 为因子探测数值, 其值范围为 0~1, 数值越接近于 1, 表明该因子对耕地 NPP 的影响越大; L 为分层数量; N_h, N 分别为层 h 和全区单元数量; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值等方差。

3 结果与分析

3.1 耕地 NPP 时空变化特征

3.1.1 耕地 NPP 时间变化特征 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP (以 C 计, 下同) 年均值呈现显著的增加趋势 ($p < 0.001$), 线性拟合方程为 $y = 4.35x - 8361.8$ ($R^2 = 0.4138$), 变化斜率为 $4.35 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 但不同阶段耕地 NPP 年均值变化具有较大的差异性 (图 1)。2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 年均值由 $305.08 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 增加到 $446.91 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最大耕地 NPP 年均值为 2021 年的 $449.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最小耕地 NPP 年均值为 2001 年的 $283.73 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 多年均值为 $383.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。从不同时段来看, 2000—2011 年耕地 NPP 多年均值为 $362.11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 年均增长量为 $5.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 变异系数为 0.12; 2012—2023 年耕地 NPP 多年均值为 $403.98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 年均增长量为 $5.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 变异系数为 0.11。由此可知, 河南省黄河流域耕地 NPP 年均值具有较大的波动性, 但总体呈现波动增加的趋势, 2012—2023 年年均增加量略高于 2000—2011 年的年均增加量。

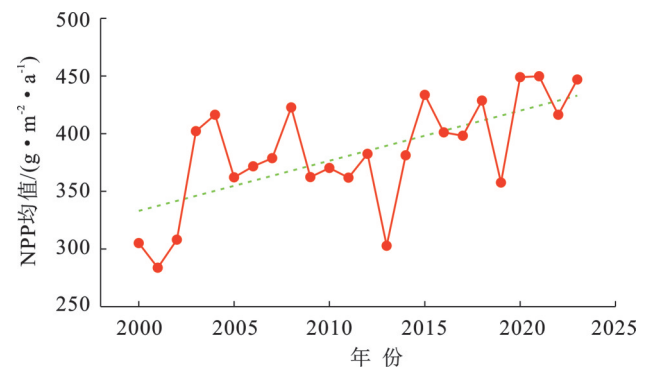


图 1 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 均值年际变化
Fig.1 Annual variation of mean NPP of cultivated land from 2000 to 2023 in Yellow River basin of Henan Province

3.1.2 耕地 NPP 空间分布特征 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 多年均值具有显著的空间差异性, 总体呈现南高北低的特点 (图 2)。耕地 NPP 多年均值的高值区主要分布于三门峡市、平顶山市、洛阳市、周口市和商丘市等区域, 低值区主要分布于濮阳市、安阳市、鹤壁市、新乡市、郑州市、开封市等区域。以 2000, 2011 和 2023 年为例, 2000 年耕地 NPP

变化范围为 53.60~743.30 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 305.08 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 高值区主要分布于三门峡市和洛阳市等区域, 低值区主要分布于安阳市、濮阳市和鹤壁市等区域; 2011 年耕地 NPP 变化范围为 5~828.30 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 361.87 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 高值区主要分布于三门峡市、洛阳市、周口市和商丘市等区域, 低值区主要分布于安阳市、郑州市、开封市等区域;

2023 年耕地 NPP 变化范围为 76.50~999.90 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 446.91 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 高值区主要分布于三门峡市、洛阳市、平顶山市等区域, 低值区主要分布于安阳市、濮阳市、新乡市和开封市等区域。总体而言, 河南省黄河流域耕地 NPP 呈现南高北低的特点, 但 2000, 2011 和 2023 年耕地 NPP 高值区和低值区分布状况略微有所差异。

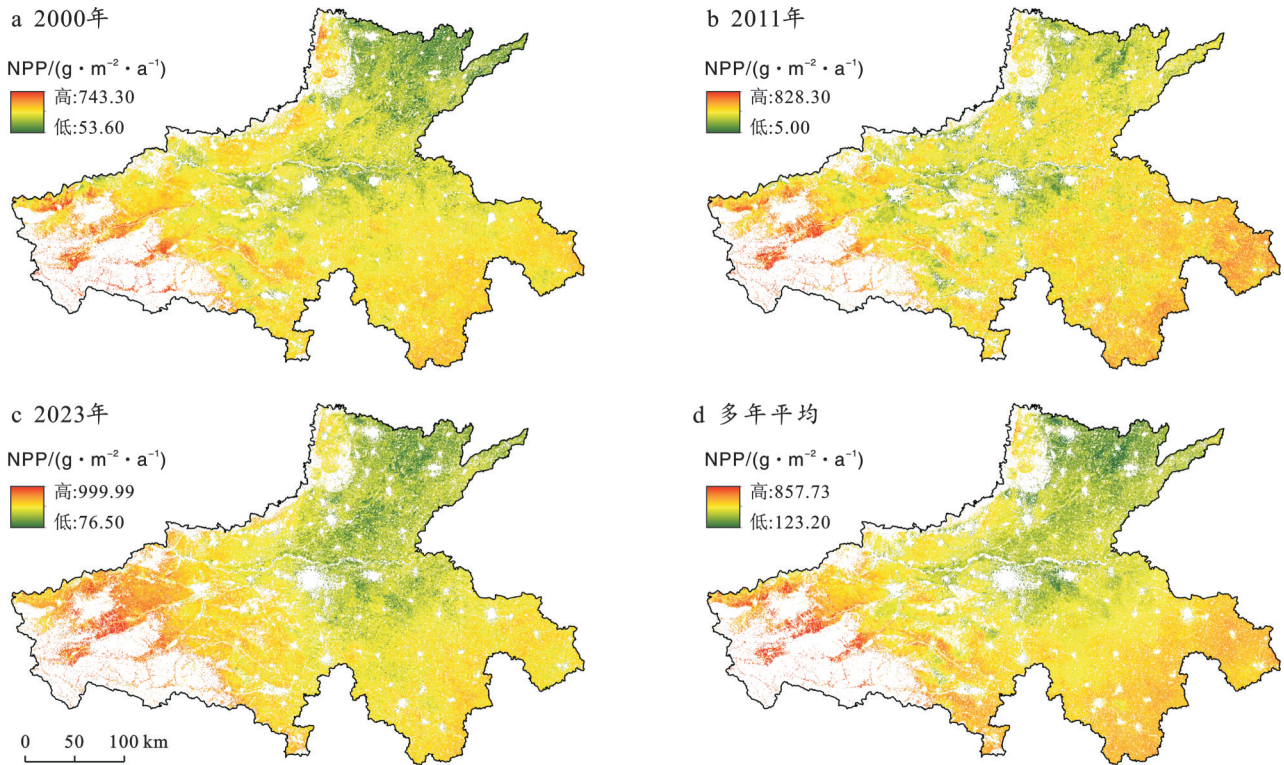


图 2 河南省黄河流域 2000, 2011 和 2023 年和多年平均耕地 NPP 空间分布
 Fig.2 Spatial distribution of NPP of cultivated land in 2000, 2011 and 2023 and multi-year average in Yellow River basin of Henan Province

由图 3 可知, 河南省黄河流域耕地 NPP 的变异系数变化范围为 0.05~0.61, 均值为 0.153, 表明河南省黄河流域耕地 NPP 具有明显的波动性。基于自然断点法以 0.13, 0.15, 0.18, 0.21 为界将变异系数划分为低度波动、较低波动、中度波动、较高波动和高度波动 5 个等级(图 3)。河南省黄河流域耕地 NPP 以较低波动和中度波动为主, 其面积比例分别为 35.02% 和 29.04%, 共占区域总面积的 64.06%, 较为广泛地分布于各个地市; 低度波动面积比例为 19.21%, 主要分布于焦作市、三门峡市、洛阳市、平顶山市、许昌市、安阳市西部、新乡市西部、周口市南部和商丘市西南部等区域; 较高波动面积比例为 13.12%, 主要分布于濮阳市、开封市、安阳市中东部、鹤壁市中东部、新乡市中东部、周口市西北部和商丘市西部等区域; 高度波动面积比例为 3.61%, 主要分布于濮阳市、安阳市中东部、新乡市中东部等区域。总体而言, 河南省

黄河流域耕地 NPP 变异程度具有较大的空间差异性, 以较低波动和中度波动为主, 共占面积比例为 64.06%, 较高波动和高度波动面积比例共为 16.73%, 主要分布研究区中东部、东北部等区域。

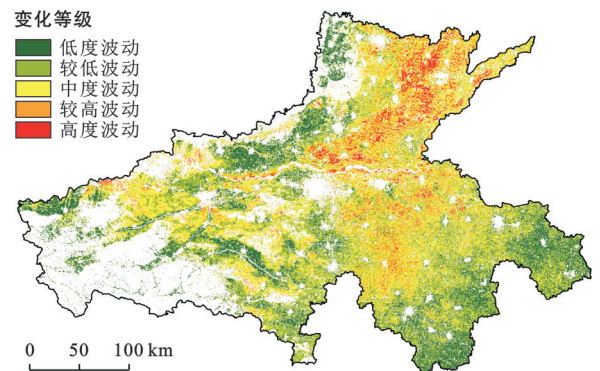


图 3 河南省黄河流域 2000—2023 年耕地 NPP 的变化空间分布
 Fig.3 Spatial distribution of coefficient of variation of NPP of cultivated land in Yellow River basin of Henan Province during 2000—2023

3.2 耕地 NPP 变化趋势分析

本研究综合运用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法检验河南省黄河流域耕地 NPP 的变化趋势,并将趋势特征划分为极显著增加、显著增加、微显著增加、不显著增加、不显著、不显著减少、微显著减少、显著减少和极显著减少 9 种类型(表 1)。由表 1 和图 4 可知,河南省黄河流域耕地 NPP 变化以极显著增加为主,面积比例为 43.61%,主要分布于研究区中西部的焦作市、郑州市、许昌市、平顶山市、洛阳市、三门峡市等区域;不显著增加的耕地 NPP 面积次之,面积比例为 22.76%,主要分布于研究区中东部的濮阳市、安阳市、鹤壁市、新乡市、开封市、商丘市和周口市等区域;显著增加的耕地 NPP 面积比例为 20.83%,主要分布于研究区中东部的濮阳市、安阳市、鹤壁市、新乡市、郑州市、开封市、许昌市、商丘市、周口市等区域;微显著增加耕地面积比例为 11.08%,其空间分布主要分布于中东部等区域。河南省黄河流域耕地 NPP 的不显著减少,微显著减少,显著减少,

极显著减少的面积比例共为 1.72%,其中,以不显著减少为主,主要分布于郑州市、开封市、安阳市、新乡市等区域。总体而言,河南省黄河流域耕地 NPP 呈现以增加趋势的面积为主,面积高达 98.28%,广泛分布于研究区各个区域,呈现以减少趋势的面积较少,主要分布于城市周边或低强度利用区域。

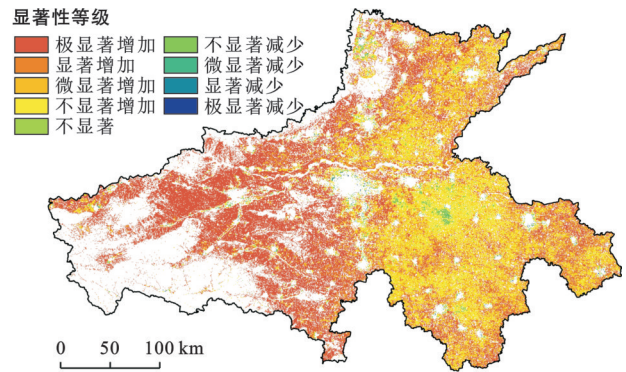


图 4 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 变化趋势
Fig.4 Trend of NPP changes in cultivated land in Yellow River basin of Henan Province during 2000—2023

表 1 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 变化趋势

Table 1 Trend of NPP changes in cultivated land in Yellow River basin of Henan Province during 2000—2023

斜率 β	统计量 Z	趋势类别	变化特征	通过信度/%	面积比例/%
$\beta > 0$	$2.58 < Z$	4	极显著增加	99	43.61
	$1.96 < Z \leq 2.58$	3	显著增加	95	20.83
	$1.65 < Z \leq 1.96$	2	微显著增加	90	11.08
	$Z \leq 1.65$	1	不显著增加	—	22.76
$\beta = 0$	Z	0	不显著	—	0.00
$\beta < 0$	$Z \leq 1.65$	-1	不显著减少	—	1.44
	$1.65 < Z \leq 1.96$	-2	微显著减少	90	0.09
	$1.96 < Z \leq 2.58$	-3	显著减少	95	0.11
	$2.58 < Z$	-4	极显著减少	99	0.09

3.3 耕地 NPP 未来趋势分析

图 5 为研究区耕地 NPP 的 Hurst 指数的空间分布与未来变化趋势。由图 5a 可知,河南省黄河流域耕地 NPP 的 Hurst 指数范围为 0.17~0.90,平均值为 0.44。其中,Hurst 指数大于 0.5 的面积比例为 22.87%,表明该区域未来耕地 NPP 变化趋势与现在呈现相似的态势;Hurst 指数小于 0.5 的面积比例为 77.13%,表明该区域未来耕地 NPP 变化趋势与现在呈现相反的态势。

本文参照已有研究以 0.5 为界限将 Hurst 指数划分为正向持续和负向持续两种类型^[22],并与耕地 NPP 变化趋势叠加,形成不显著、持续增加、持续减少、由减到增和由增到减 5 种类型,用以反映研究区未来耕地 NPP 的变化状况。由图 5b 可知,由增到减

的区域面积最大,其面积比例为 59.65%,广泛分布于各个地市;持续增加的区域面积比例为 15.87%,主要分布于许昌市、周口市、商丘市、新乡市、鹤壁市、濮阳市、焦作市等区域;持续减少和由减到增的面积比例均相对较小,其面积比例分别为 0.17% 和 0.11%,均是零星分布于各个地市。此外,无显著的区域面积比例为 24.20%,主要分布于中东部的周口市、商丘市、郑州市、开封市、新乡市、鹤壁市、安阳市和濮阳市等区域。总体而言,河南省黄河流域耕地 NPP 未来变化趋势呈现显著的空间差异性,以减少面积最大,无显著面积次之,持续增加面积比例为 15.87%,其余变化类型相对较小,该结果可为河南省耕地利用与保护等政策的制定提供科学依据。

3.4.2 耕地 NPP 驱动因子交互作用探测 由图 6 可知,不同因子之间对河南省黄河流域耕地 NPP 均呈现非线性增强或双因子增强,表明各因子之间相互作用对耕地 NPP 的影响有所提升,但在 2000 和 2020 年有所差异。2000 年,年均气温(X_6) \cap 年均降水量(X_7)的交互探测 q 值最大,其值为 0.419,表明年均气温和年均降水量的交互作用对河南省黄河流域耕地 NPP 的解释程度最强;其次为高程(X_1) \cap 年均气温(X_6)、高程(X_1) \cap 年均降水量(X_7),其交互探测 q 值均在 0.4 以上,分别为 0.415,0.406;此外,年均气温(X_6)和年均降水量(X_7)与其他因子的交互探测的 q 值也相对较大,其 q 值均在 0.2 以上。

2020 年,高程(X_1) \cap 年均蒸发量(X_8)的交互探测 q 值最大,其值为 0.499,表明高程和年均蒸发量的交

互作用对河南省黄河流域耕地 NPP 的解释程度最强;人口(X_4) \cap 年均蒸发量(X_8)、年均气温(X_6) \cap 年均蒸发量(X_8)的交互探测 q 值次之,其值分别为 0.498,0.496;此外,年均蒸发量(X_8)和其他因子的交互探测的 q 值相对较大,其 q 值均在 0.35 以上。高程(X_1) \cap 年均气温(X_6)、高程(X_1) \cap 年均降水量(X_7)、人口(X_4) \cap 年均气温(X_6)、人口(X_4) \cap 年均降水量(X_7)、年均气温(X_6) \cap 年均降水量(X_7)、年均蒸发量(X_8) \cap 侵蚀状况(X_9)等的交互作用也相对较强,其 q 值均在 0.26 以上。总体而言,各因素均以非线性增强或双因子增强的交互方式影响着河南省黄河流域耕地 NPP,其中,2000 年和 2020 年,年均气温(X_6) \cap 年均降水量(X_7)、高程(X_1) \cap 年均蒸发量(X_8)的交互作用对河南省黄河流域耕地 NPP 的影响最大。

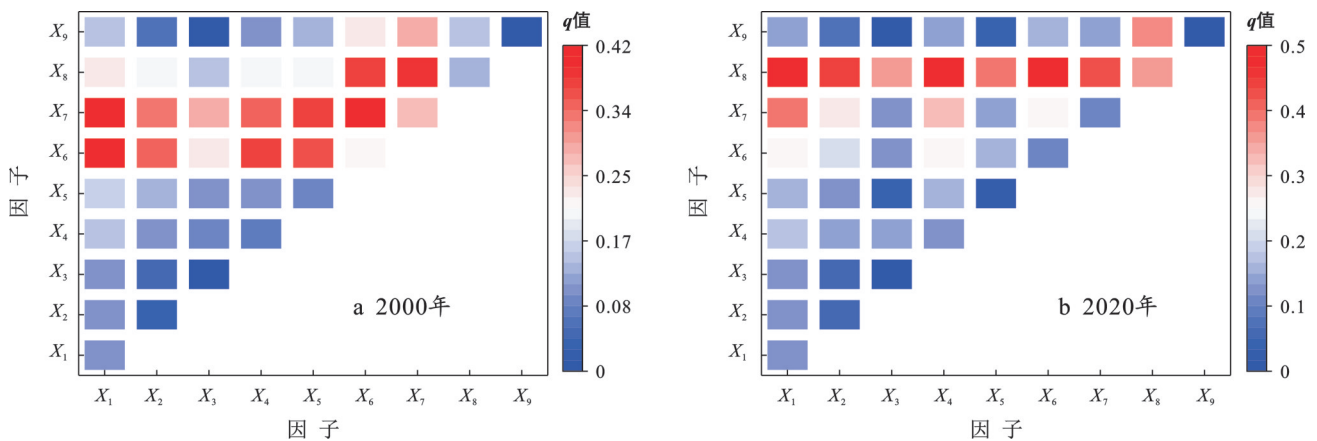


图 6 河南省黄河流域耕地 NPP 驱动因子交互探测结果

Fig.6 Interactive detection results of driving factors of cultivated land NPP in Yellow River basin of Henan Province

4 讨论

本研究结果显示 2000—2023 年河南省黄河流域耕地 NPP 均值呈现波动增加的趋势,多年均值为 $383.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,空间分布总体呈现南高北低的特点,这与肖强松等^[26]基于河南省整体尺度开展耕地 NPP 研究、任利敏等^[6]和职露等^[27]基于河南省整体尺度开展植被 NPP 研究、李登科等^[28]基于全国尺度开展植被 NPP 研究等的结果基本一致。

河南省黄河流域耕地 NPP 高值区主要分布于中西部和西南部等区域,低值区主要分布于中部和中北部。本研究针对耕地 NPP 驱动因子探测结果表明,年均气温、年均降水量、年均蒸发量等自然因素对该区域耕地 NPP 的具有较为显著的影响(表 2)。结合 2000—2010 年和 2010—2020 年温度、降水和蒸发量的年平均数据来看,其高值区和低值区与耕地 NPP 的分布及变化具有较高的吻合度(图 2 和图 7),

与研究结果相符。同时结合已有研究结果,河南省平均温度有所上升和降水有所减少,且夏季极端降水指数有较强的年际变化特征^[29],由此使研究区耕地 NPP 出现较大的波动性,如 2008—2013 年耕地 NPP 的波动与温度和降水的变化具有密切的关系。由此说明河南省黄河流域耕地 NPP 受气候因子的影响具有空间差异性,也体现出气候因素对该区域耕地 NPP 变化具有重要的影响^[30]。

耕地作为人与自然交互作用最为密切的自然资源,自然因素在影响耕地 NPP 的同时,人类活动对耕地 NPP 会产生重要的影响^[3,11]。本文选用人口和 GDP 用以反映社会经济对耕地 NPP 的作用,结果显示这两个指标对耕地 NPP 均有显著的影响。在社会经济发展过程中,城市扩张需要占用土地,绝大部分来源于耕地,因此城市建设占用耕地会导致耕地 NPP 减少^[31]。

随着社会经济的快速发展,农业科技投入的不断增长也会促进耕地 NPP 的变化,特别是河南省作

为粮食主产区,高强度的农业生产活动促使区域耕地NPP有所增加的同时显现出较大的空间差异性^[26]。此外,农业种植行为的变化也会对耕地NPP产生一定的影响^[32-33],如耕地弃耕、撂荒等原因造成耕地NPP的变化,这也是耕地NPP呈现减少的区域零星分布于安阳市西部的山地丘陵等区域的原因。研究发现,高程对耕地NPP有着重要影响,这与农业生产过程需要平坦地势密切相关,且高程会在一定

程度上影响温度、降水等的再分配。结合地理探测器模型的交互探测结果来看,不同因子之间相互作用呈现非线性增强或双因子增强,体现出自然和人为综合作用对该区域耕地NPP影响更加强烈,研究与石智宇等^[11]研究结果具有相似性。此外,本研究显示,侵蚀状况对河南省黄河流域耕地NPP的影响由不显著到显著,但影响程度相对较低,这是人类活动对耕地利用的程度与范围不断拓展的结果。

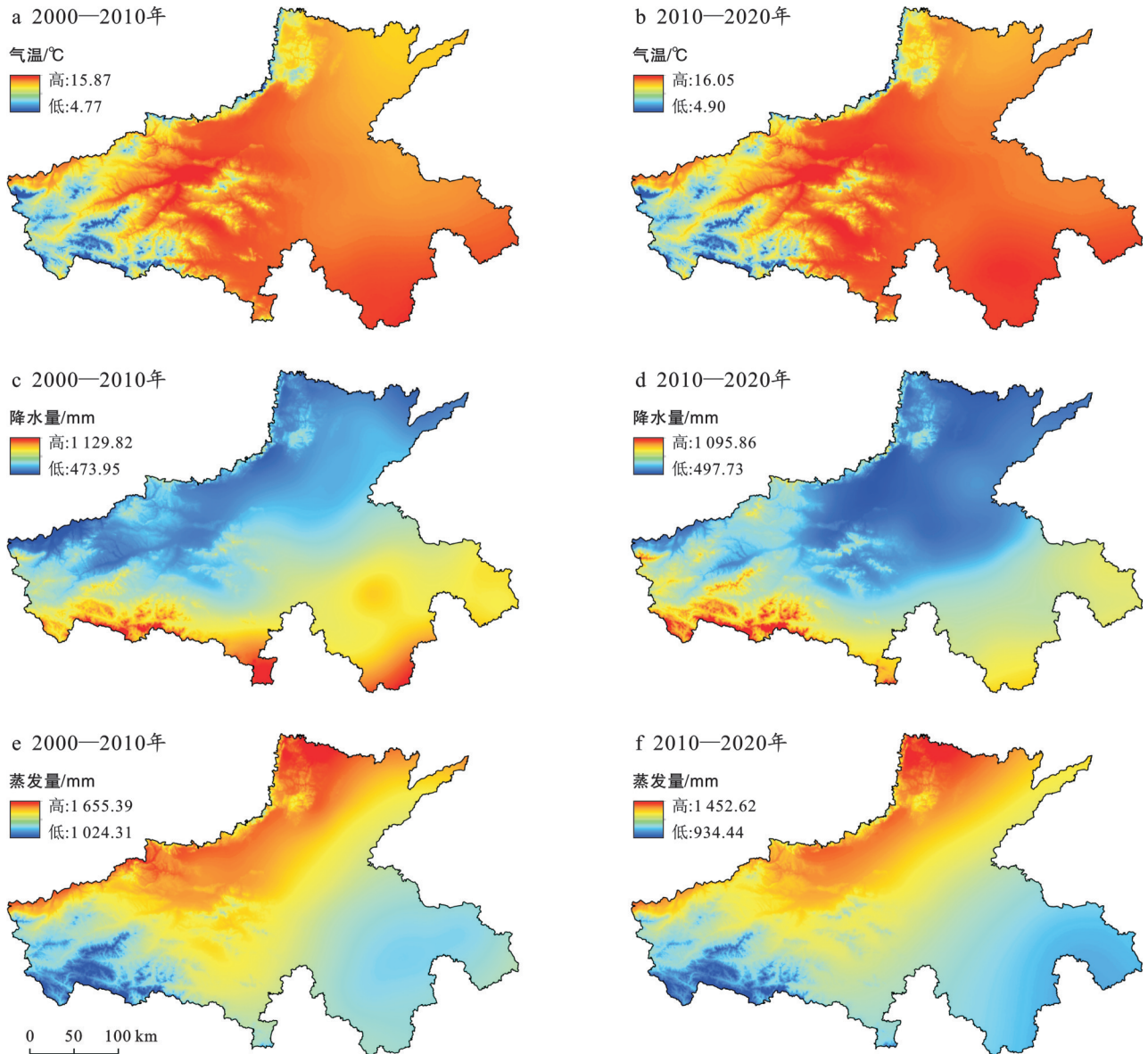


图7 河南省黄河流域气象因素2000—2010年和2010—2020年的均值分布

Fig.7 Mean distribution of meteorological factors during 2000—2010 and 2010—2020 in Yellow River basin of Henan Province

本文从气候条件、地形状况、社会经济等维度选取的9个因子均对河南省黄河流域耕地NPP变化有着一定的影响,各因子之间的交互作用均呈现增强的态势,但总体以气候条件和地形状况两个维度的因子交互作用较为强烈,例如年均气温和年均降水量、高程和年均蒸发量。然而,社会经济等因子与其

他因子交互作用也对河南省黄河流域耕地NPP有着较为显著的影响,表明影响河南省黄河流域耕地NPP的因子具有主导性的同时也具有综合性。因此,合理调整单项因子与综合调控多维因子是提升河南省黄河流域耕地NPP乃至促进该区域耕地资源可持续利用的重要内容。

5 结论

(1) 2000—2023年河南省黄河流域耕地 NPP 年均值由 305.08 g/(m²·a) 增加到 446.91 g/(m²·a), 维持年均 383.04 g/(m²·a) 的水平。耕地 NPP 多年均值具有显著的空间差异性, 总体呈现南高北低的特点, 且耕地 NPP 以较低波动和中度波动为主。河南省黄河流域耕地 NPP 时空分布及其变异特征是开展耕地利用与生态保护的基础, 应结合其时空变异特征制定相应的利用与保护策略。

(2) 河南省黄河流域耕地 NPP 变化以极显著增加为主, 面积比例为 43.61%; 不显著增加的耕地 NPP 面积次之, 面积比例为 22.76%; 耕地 NPP 的不显著减少、微显著减少、显著减少、极显著减少的面积比例共为 1.72%。研究表明河南省黄河流域耕地 NPP 呈现增加趋势为主, 但应有效协同耕地利用与生态保护, 避免单纯重视耕地利用对生态环境造成负面影响。

(3) 河南省黄河流域耕地 NPP 的 Hurst 指数平均值为 0.44, 正向持续和负向持续面积比例分别为 22.87% 和 77.13%。未来耕地 NPP 由增到减的区域面积最大, 其面积比例为 59.65%, 广泛分布于各个地市; 无显著的区域面积比例和持续增加的区域面积比例分别为 24.20% 和 15.87%。未来耕地 NPP 呈现减少的区域是耕地利用与保护的重点, 也是权衡耕地利用和生态保护的关键区域。

(4) 2000 和 2020 年, 年均气温、年均降水量、年均蒸发量等气候因素和高程等地形因素对河南省黄河流域耕地 NPP 具有较为显著的影响 ($p < 0.001$), 是影响耕地 NPP 的主要因子。不同因子之间的交互作用均呈现非线性增强或双因子增强的态势, 自然因素和人类活动共同作用于耕地 NPP。在对气候因素进行适应的基础上, 合理对人为因素进行调控, 是协同耕地利用和生态保护的重要内容。

参考文献 (References)

- [1] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet [J]. *Nature*, 2011, 478 (7369): 337-342.
- [2] Zuo Lijun, Zhang Zengxiang, Carlson K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 304-313.
- [3] 孙晓兵, 蔡为民, 孔祥斌, 等. 基于多元主体协同的县域耕地质量调控模式与整治时序分区 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(21): 232-245.
- [4] Sun Xiaobing, Cai Weimin, Kong Xiangbin, et al. Quality regulation pattern and consolidation time zone of county-level cultivated land based on multi agent collaboration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(21): 232-245.
- [5] 韩杨. 中国耕地保护利用政策演进、愿景目标与实现路径 [J]. *管理世界*, 2022, 38(11): 121-131.
- [6] Han Yang. The policy evolution, vision goal and realization path of China's cultivated land protection and utilization [J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(11): 121-131.
- [7] 孔祥斌, 陈文广, 党昱灏. 中国耕地保护现状、挑战与转型 [J]. *湖南师范大学社会科学学报*, 2023, 52(5): 31-41.
- [8] Kong Xiangbin, Chen Wenguang, Dang Yuxuan. Current situation, challenges and transformation of cultivated land protection in China [J]. *Journal of Social Science of Hunan Normal University*, 2023, 52(5): 31-41.
- [9] 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.
- [10] Ren Limin, Wang Lin, Li Na, 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.
- [11] 陈峰, 李红波, 刘亚静. 基于 GIS 和 CASA 的滇南山区植被 NPP 时空分异及其影响因素: 以云南省元阳县为例 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2148-2158.
- [12] Chen Feng, Li Hongbo, Liu Yajing. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of vegetation net primary productivity using GIS and CASA: A case study in Yuanyang County, Yunnan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2148-2158.
- [13] 张颖, 黄执美, 孟伟庆, 等. 2001—2022 年天津市植被净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6): 278-287.
- [14] Zhang Ying, Huang Zhimei, Meng Weiqing, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation net primary production and its relationship with climate factors in Tianjin City from 2001 to 2022 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6): 278-287.
- [15] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 等. 贵州省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 408-416.
- [16] Qian Fangyan, Lan Anjun, Fan Zemeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of NPP in Guizhou Province from 2000 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 408-416.
- [17] 赵金彩, 潘涛. 基于多时间尺度的黄河流域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 214-222.
- [18] Zhao Jincai, Pan Tao. Spatiotemporal variation of mul-

- multiple time-scale NPP and its response to climate change in the Yellow River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4):214-222.
- [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 Zhiyu, Wang Yating, Zhao Qing, et al. The spatio-temporal changes of NPP and its driving mechanisms in China from 2001 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(11):2111-2123.
- [12] 宋午椰,许行,林毅雁,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析[J].*北京林业大学学报*,2023,45(8):29-42.
Song Wuye, Xu Hang, Lin Yiyan, et al. Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(8):29-42.
- [13] 洪辛茜,黄勇,孙涛.我国西南喀斯特地区2001—2018年植被净初级生产力时空演变[J].*生态学报*,2021,41(24):9836-9846.
Hong Xinqian, Huang Yong, Sun Tao. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of southwest China from 2001 to 2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24):9836-9846.
- [14] Zarei A, Chemura A, Gleixner S, et al. Evaluating the grassland NPP dynamics in response to climate change in Tanzania [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125:107600.
- [15] Cloern J E, Safran S M, Smith Vaughn L, et al. On the human appropriation of wetland primary production [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 785:147097.
- [16] 王佃利.黄河流域生态协同治理实践与发展路径[J].*人民论坛*,2024(20):55-59.
Wang Dianli. Practice and development path of ecological cooperative management in the Yellow River basin [J]. *People's Tribune*, 2024(20):55-59.
- [17] 河南省自然资源厅.关于公开征求《河南省黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》意见建议的公告.[EB/OL].(2024-06-21)[2024-11-30].<https://dnr.henan.gov.cn/2024/06-21/3011821.html>.
Department of Natural Resources of Henan Province. Announcement on soliciting opinions and suggestions on the "National Land Spatial Planning of the Yellow River basin of Henan Province (2021—2035)" [EB/OL]. (2024-06-21) [2024-11-30]. <https://dnr.henan.gov.cn/2024/06-21/3011821.html>.
- [18] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [19] 孙晓兵,孔祥斌,温良友,等.华北集约化农区耕地细碎化特征及其整治模式研究:以河北曲周为例[J].*农业现代化研究*,2019,40(4):556-564.
Sun Xiaobing, Kong Xiangbin, Wen Liangyou, et al. Farmland fragmentation and its managing models of the concentrated farmland in agricultural region of North China: A case study of Quzhou County in Hebei Province [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40(4):556-564.
- [20] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1):770-799.
- [21] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(5):967-988.
- [22] 徐雪,罗娅,杨胜天,等.全球不同气候带陆地植被净初级生产力变化趋势与可持续性[J].*生态学报*,2023,43(9):3729-3743.
Xu Xue, Luo Ya, Yang Shengtian, et al. Change trend and sustainability of vegetation net primary productivity of terrestrial ecosystems in different global climatic zones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9):3729-3743.
- [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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [24] 聂桐,董国涛,蒋晓辉,等.基于地理探测器的河南省植被NDVI时空变化及驱动力分析[J].*生态学杂志*,2024,43(1):273-281.
Nie Tong, Dong Guotao, Jiang Xiaohui, et al. Temporal and spatial variations and driving force analysis of NDVI in Henan Province based on Geodetector [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(1):273-281.
- [25] 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 Ying, Gao Mingxiu, Wang Zhuoran, et al. Spatio-temporal 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.
- [26] 肖强松,王昱之.粮食主产区(河南省)耕地NPP时空分异特征及影响因素分析[EJ/OL].*环境科学*.1-15(2024-08-20)[2025-04-08].<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406053>. Xiao Qiangsong, Wang Yanzhi. Spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land NPP in

- major grain producing areas(Henan Province) [EJ/OL]. Environmental Science. 1-15 (2024-08-20) [2025-04-08]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406053>.
- [27] 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 Lu, Hu Tao, Zou Bin, 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.
- [28] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3):397-405.
Li Dengke, Wang Zhao. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3):397-405.
- [29] 姚德贵, 刘春, 苗雨沛, 等. 1961—2020 年河南省夏季极端降水异常分布特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 气象与减灾研究, 2024, 47(2):81-94.
Yao Degui, Liu Chun, Miao Yupei, et al. Spatiotemporal characteristics of 1961—2020 summer extreme precipitation anomaly in Henan Province and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2024, 47(2):81-94.
- [30] 夏冰, 马鹏宇, 徐聪, 等. 近 20 年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):256-266.
Xia Bing, Ma Pengyu, Xu Cong, et al. Spatiotemporal variation of NPP and its response to extreme climate indices in Yellow River basin in recent 20 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):256-266.
- [31] 原晋涛, 陈万旭, 曾杰. 中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地 NPP 的影响[J]. 自然资源学报, 2023, 38(12):3135-3149.
Yuan Jintao, Chen Wanxu, Zeng Jie. Spatio-temporal differentiation of cropland use change and its impact on cropland NPP in China [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(12):3135-3149.
- [32] 孔祥斌. 休养生息制度背景下的中国耕地保护转型目标框架与路径[J]. 湖南师范大学社会科学学报, 2021, 50(3):1-12.
Kong Xiangbin. Transition objectives, contents and ways of cultivated land protection in China under the background of rehabilitation system [J]. Journal of Social Science of Hunan Normal University, 2021, 50(3):1-12.
- [33] 马泉来, 吕敏敏, 杨延伟, 等. 河南省耕地粮食生产时空演变及功能分区[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(2):161-167.
Ma Quanlai, Lyu Minmin, Yang Yanwei, et al. Spatial-temporal evolution of cultivated grain production capacity and functional zoning in Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2024, 43(2):161-167.
- [30] Shu Bangrong, Bakker M M, Zhang Honghui, et al. Modeling urban expansion by using variable weights logistic cellular automata: A case study of Nanjing, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(7):1314-1333.
- [31] 谭昭昭, 陈毓遵, 丁憬枫, 等. 浙江东部沿海城市土地利用模拟及生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10):2777-2787.
Zhaozhao, Chen Yuqiu, Ding Jingfeng, et al. Simulation of land use and assessment of ecosystem service value in the eastern coastal cities of Zhejiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10):2777-2787.
- [32] 牟燕, 冯飞. 基于土地利用的北京市多情景模拟下生态服务价值影响评估[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5):14-24.
Mou Yan, Feng Fei. Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5):14-24.
- [33] 石婕妤, 吴秀芹, 董贵华. 三江流域(云南区段)耕地非粮化空间格局及驱动因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(5):893-904.
Shi Jieyu, Wu Xiuqin, Dong Guihua. Spatial pattern and influencing factors of non-grain cultivated land in the three river basin (Yunnan section) [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(5):893-904.
- [34] 胡俊聪, 何华贵, 陈朝霞. 基于 PLUS 模型的土地利用多情景模拟与时空特征分析[J]. 测绘通报, 2023(10):28-33.
Hu Juncong, He Huagui, Chen Zhaoxia. Multi-scenario simulation and spatial-temporal analysis of landuse based on PLUS model [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10):28-33.
- [35] Tang Hua, Halike A, Yao Kaixuan, et al. Ecosystem service valuation and multi-scenario simulation in the Ebinur Lake basin using a coupled GMOP-PLUS model [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):5071.

(上接第 362 页)