黄河流域三生空间净初级生产力时空变化与驱动机制研究[1]

郑恒梁[1]，曹永强[1]，刘子华[1]，刘艳丽[2,3]，常奂宇[1]

（1.天津师范大学 京津冀生态文明发展研究院，天津 300387；2.南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210029；3.水利部应对气候变化研究中心，江苏 南京 210029）

摘　要：【目的】基于生产-生活-生态（“三生空间”）框架，揭示黄河流域植被净初级生产力（NPP）的时空分异特征及其驱动机制，明确不同功能空间NPP变化及影响因素的差异，为黄河流域不同功能空间的生态管理提供科学参考。【方法】基于“三生空间”功能分区框架，利用CASA模型反演2000—2025年黄河流域NPP，并运用地理探测器，分别在生产、生活与生态空间内分析自然因子与人为因子对NPP变化的主导作用及交互效应。【结果】①2000—2025年间，黄河流域生产空间净减少约4 201 km²，生态空间净减少约1 912 km²，生活空间净增加约6 113 km²，其变化主要表现为农业生产空间向生活空间及工业生产空间转移。②黄河流域NPP整体呈缓慢上升趋势，年均增长率约为0.25 g C·m^{-2}·yr^{-1}，增长区域主要分布于中上游生态功能区与重点灌溉农业区。③生产空间与生态空间NPP在2000—2010年以上升为主，2010—2020年显著上升范围有所收窄，2020—2025年则趋于稳定；生活空间NPP整体水平较低，且在局部呈现下降趋势。【结论】黄河流域“三生空间”NPP变化以自然条件为主导，同时受到人类活动的显著干扰，且不同功能空间对不同驱动因子的响应程度存在明显差异。

关键词：黄河流域；三生空间；净初级生产力（NPP）；CASA模型；地理探测器

中图分类号:K903;TV882.1　　文献标识码:A　　**文章编号:**

植被净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）指单位时间内植被通过光合作用固定的有机碳减去自养呼吸消耗后的净积累，这部分能量不仅用于植物自身生长繁衍，也是生态系统中其他成员生存与发展的基础，因而可作为反映生态系统碳循环过程和植被生长状况的重要指标。在多种因素共同作用下，NPP时空格局存在空间异质性，厘清其变化及驱动机制具有重要科学与管理意义。近年来，国内外学者围绕植被净初级生产力（NPP）的时空演变特征及其驱动机制展开了广泛研究。在区域尺度上，水热条件对NPP具有显著指示性作用，且这种响应具有明显的时间尺度差异[1]。在气候变化背景下，陆地生态系统生产力对变暖与水分再分配产生持续响应，且不同区域的主导因子、整合效应与敏感性差异明显[2-3]。近年研究表明，黄土高原生态系统碳汇对气温、降水变化及退耕还林（草）工程具有显著响应，区域生态恢复与气候条件改善共同促进了植被NPP提升[4]；全球尺度上，温度与降水等气候驱动因子的综合变化曾促成NPP总量上升[5]。与此同时，人类活动对NPP的塑造作用愈加突出。总体而言，已有研究揭示了以下3类作用：①水热条件与地形因素构成基础性约束；②气候变化在年代际尺度上改变水热配置；③人类活动通过土地利用格局变化产生叠加效应。植被NPP的空间格局具有显著的地域差异与复杂性，在不同土地功能类型下，NPP对气候变化与人类活动的响应存在明显差异。因此，在功能空间框架下探讨NPP变化，有助于更准确地刻画不同土地类型的NPP变化特征及其驱动机制。党的十八大报告明确提出了要构建“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的国土空间格局，为生产、生活、生态3类功能空间

基金项目:国家自然科学基金项目（52579016,52325902,52361145889）;天津市自然科学基金资助项目（24JCQNJC01320）。

第一作者:郑恒梁（2000—）,男,硕士研究生,从事碳源碳汇方面的研究。E-mail:2410080013@stu.tjnu.edu.cn。

通信作者:曹永强（1972—）,男,教授,博导,博士,从事水土能碳互馈及调控机制方面的研究。E-mail:caoyongqiang@tjnu.edu.cn。

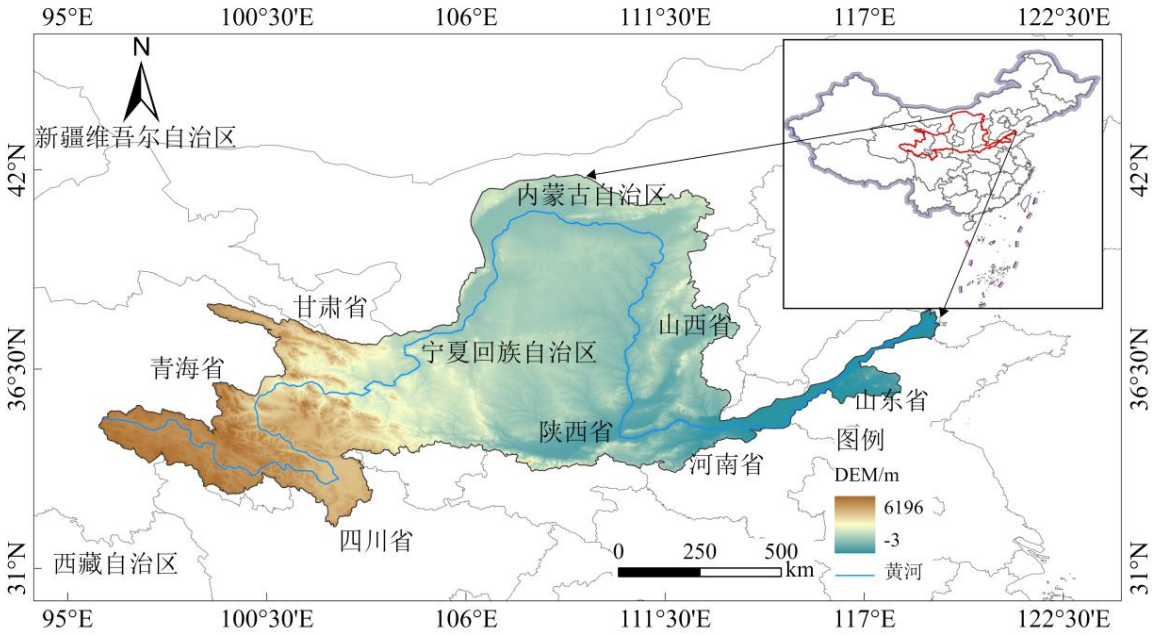
（简称“三生空间”）的划分与优化确立了目标与原则[6]。在这一导向下，逐步形成了相应的理论框架与方法体系。理论层面，学界阐释了“三生空间”的内在逻辑、系统结构与制衡机制，为其功能识别与相关政策设计奠定了共同的话语基础；方法层面，则发展出以土地利用主导功能为核心的分类与评价体系，为在全国尺度上刻画其时空格局并进行比较提供了支撑[7]。在流域及重点区域尺度上，“三生空间”的功能转换往往导致生态系统服务与环境质量发生显著改变，且其内在机制具有明显的空间分异和阶段性特征[8]。总体而言，现有研究在概念规范、分类口径方面奠定了坚实基础，并为不同尺度的比较与政策评估提供了重要参照[6-8]。但目前将“三生空间”及其空间格局与植被净初级生产力（NPP）的时空动态相结合的系统研究仍较为欠缺，本文在“‘三生空间’”的内涵界定与类型划分上采用已有文献[6]的定义与分类框架，将国土空间识别为生产、生活、生态 3 类功能空间，以保证与既有研究体系的可比性与可解释性。

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带。黄河流域生态保护和高质量发展已上升为国家重大战略。然而，当前黄河流域仍面临水资源保障压力大、生态环境脆弱、区域发展质量有待提升等突出问题。2000—2025 年是黄河流域城镇化快速推进、“三生空间”持续重构及生态治理不断实施的重要阶段，能够较完整地反映区域 NPP 变化的长期过程。基于此，本文以黄河流域为研究区，从“三生空间”视角分析 2000—2025 年黄河流域“三生空间”流转变化，以及在“三生空间”视角下 NPP 的变化趋势与自然、人为因素的关系，以期为研究区可持续发展提供建议。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，呈“几”字形流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、山西省、陕西省、河南省、山东省 9 个省级行政区，全长 5 464 km，为中国第二长河。黄河流域西接昆仑山脉，北抵阴山，南倚秦岭，东临渤海，横跨东、中、西部地区，地势西高东低，形成自西向东、由南向北三级阶梯，落差达 4 480 m，研究区位置及范围如图 1 所示。黄河流域不仅是国家重要的生态安全屏障，也承载着密集的人口活动和重要的经济发展功能。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

图 1　研究区概况图

Fig.1　Schematic diagram of the study area

1.2　数据来源及处理

为揭示黄河流域 2000—2025 年 NPP 时空变化，本文选取成熟的遥感数据产品，并将空间分辨率统一为 1 km，具体数据来源见表 1。为了探究 NPP 的驱动因素，本文选取了相关的自然因素与人为因素进行分析。其中，自然因素包括年平均气温、年平均降水量、太阳辐射和归一化植被指数(NDVI)；人为因素包括人口密度、国内生产总值

（GDP）和夜间灯光。本文采用中国多时期土地利用遥感监测数据集，依据其地类属性并参考“三生空间”内涵界定，对土地利用类型进行重分类，详见表 2。

表 1　数据来源

Tab.1　Sources of research data

数据类型	数据集名称
地表温度	MODIS/006/MOD11A2[9]
归一化植被指数(NDVI)	MODIS/006/MOD13Q1[10]
太阳辐射	MODIS/006/MCD43A3[11]
降水量	UCSB-CHG/CHIRPS/PENTAD[12]
土地利用数据	中国多时期土地利用遥感监测数据集[13]
夜间灯光数据	An extended time-series (2000-2024) of global NPP-VIIRS-like night time light data[14]
国内生产总值（GDP）	中国 GDP 空间分布公里网格数据集[15]
人口密度	WorldPop[16]

表 2　“三生空间”分类与土地利用类型的对应关系

Tab.2　Correspondence between production-living-ecological spaces and land use types

一级空间类型	二级子空间类型	土地利用类型
生产空间	农业生产空间	耕地
	工业生产空间	其他建设用地
生活空间	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点
生态空间	林地生态空间	林地
	草地生态空间	草地
	水域生态空间	水域
	其他生态空间	未利用地

1.3　NPP 计算方法

计算 NPP 的常用方法包括光合有效辐射法、植物生长模型和生态模型等。本文采用改进的 CASA（Carnegie-Ames-Stanford Approach）模型估算黄河流域 NPP[17]。该模型以植被吸收的光合有效辐射和实际光能利用率为核心，并结合植被类型、温度、降水和太阳辐射等因子对光能利用率进行修正。其计算公式如下：

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\varepsilon(x,t) \qquad (1)$$

式中：$\mathrm{NPP}(x,t)$为像元x在月份t的净初级生产力，g C·m^{-2}·month^{-1}；$\mathrm{APAR}(x,t)$为像元x在月份t的光合有效辐射量，MJ·m^{-2}·month^{-1}；$\varepsilon(x,t)$为像元x在月份t的实际光能利用率。

$$\mathrm{APAR}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\mathrm{FPAR}(x,t)\times 0.5 \qquad (2)$$

式中：$\mathrm{SOL}(x,t)$为像元x在月份t的太阳总辐射，MJ·m^{-2}·month^{-1}；$\mathrm{FPAR}(x,t)$为像元x在月份t对光合有效辐射的吸收比例，由 NDVI 反演并限定于[0,1]；0.5 表示光合有效辐射约占太阳总辐射的一半。

$$\varepsilon(x,t)=\varepsilon_{\max}(x)T_{\varepsilon 1}(x,t)T_{\varepsilon 2}(x,t)W_{\varepsilon}(x,t) \qquad (3)$$

式中：$\varepsilon_{\max}(x)$为像元 x 对应植被类型的最大光能利用率；$T_{\varepsilon 1}(x,t)$和$T_{\varepsilon 2}(x,t)$分别为低温胁迫因子与高温胁迫因子；$W_{\varepsilon}(x,t)$为水分胁迫因子；三项胁迫因子共同修正$\varepsilon_{\max}$，用于得到像元 x 在月份t的实际光能利用率。

1.4　Sen's 斜率估计和 Mann-Kendall 检验

为识别黄河流域不同区域 NPP 的变化趋势及其显著性，本文采用 Sen’s 斜率估计表征变化趋势强度，采用 Mann-Kendall 检验判断趋势显著性。两种方法均为相关研究中常用的非参数统计方法[18]。

1.5　地理探测器

地理探测器是一种用于探测空间异质性并识别其驱动因素的统计方法，广泛应用于生态环境、土地利用、气候变化等研究领域[19]。其核心思想是：若某一因子与某一变量具有显著关系，则两者在空间分布上应具有相似性[20]。地理探测器通过计算“解释力”指标q值来衡量各驱动因子对因变量空间分布的解释能力，公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\cdot\sigma_h^2}{N\cdot\sigma^2} \qquad (4)$$

式中：q为驱动因子对 NPP 空间分异的解释力，取值范围为[0,1]，q 值越大表示该因子对 NPP 空间分异的解释力越强；h为因子分区，L 为因子分区数量；N_h和σ_h^2分别为第h个子区的样本数和方差；N和σ^2分别为研究区样本总数和方差。

此外，地理探测器还可用于识别多个因子之间的交互作用类型，如双因子增强、非线性增强等。本文采用因子探测和交互探测模块，定量识别影响黄河流域 NPP 空间分布的主导因子及其交互作用机制。

2　结果与分析

2.1　黄河流域“三生空间”变化特征

在 2000—2025 年，黄河流域“三生空间”格局发生明显变化，如图 2 所示。其中，生产空间包括农业生产空间和工业生产空间，生活空间包括城镇生活空间和农村生活空间，生态空间包括林地生态空间、草地生态空间、水域生态空间和其他生态空间。2000—2010 年、2010—2020 年和 2020—2025 年各子空间的面积变化及转移情况分别如图 3（a）—（c）所示。生产空间主要分布于宁夏平原、河套平原、关中平原及黄河下游地区，2000—2025 年其面积总体减少约 4 201 km²，整体表现为先减少、后小幅回升的特征（图 3）。其中，农业生产空间缩减最为显著，净减少约 11 249 km²，主要集中于关中平原、汾河谷地及黄河三角洲区域；工业生产空间增加约 7 048 km²，部分抵消了农业生产空间减少对生产空间总量的影响。

根据空间转移关系，农业生产空间与生态空间之间存在较大规模的双向转换，同时也是生活空间和工业生产空间扩张的重要来源，分别向农村生活空间、城镇生活空间和工业生产空间转化约 10 508、3 057、2 542 km²。生态空间主要集中于上游源区及中游山地，2000—2025 年净减少约 1 912 km²，总体保持相对稳定，其内部表现为草地和其他生态空间减少、林地和水域生态空间增加的结构调整。生活空间扩张较为明显，面积增加约 6 113 km²，城镇生活空间主要集中于西安、银川、太原、郑州和济南等城市，并呈现由城市中心向外围扩展的特征；农村生活空间则在黄土高原沟壑区及下游平原地区广泛分布，其扩张主要源于农业生产空间的转化。

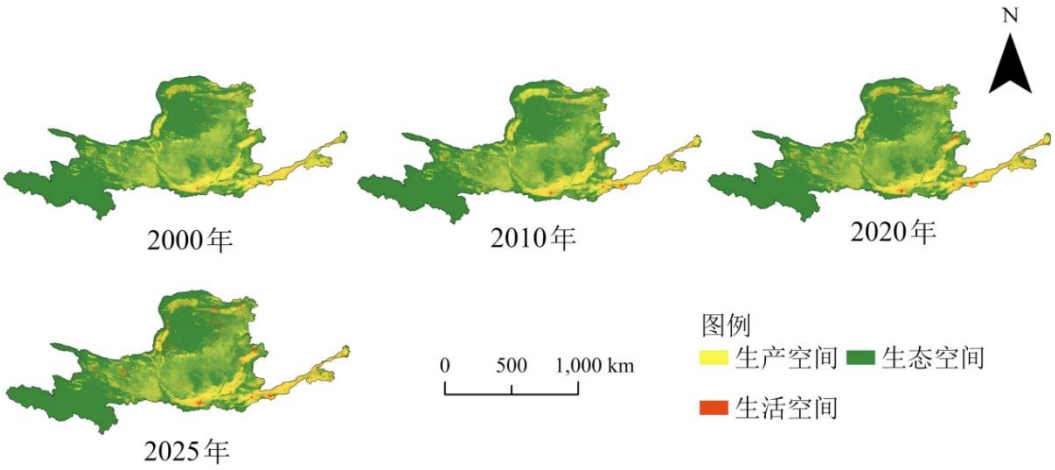
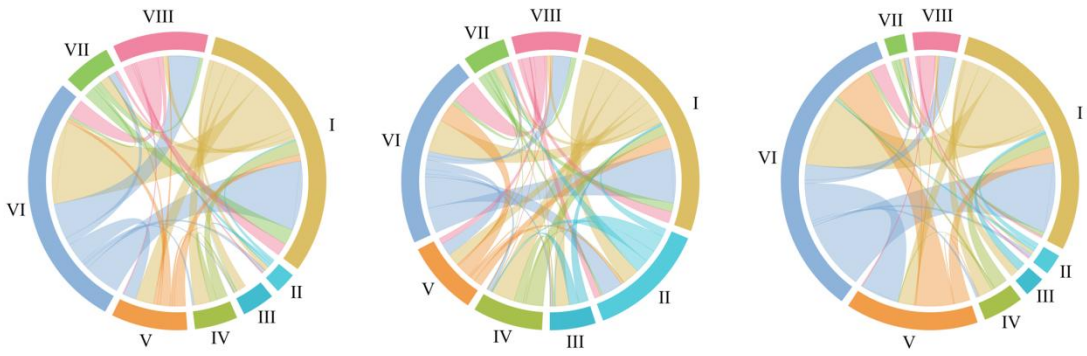


图 2　黄河流域“三生空间”分布

Fig.2　Distribution of production–living–ecological functional spaces of the Yellow River Basin



（a）2000—2010 年　　（b）2010—2020 年　　（c）2020—2025 年

注：I—农业生产空间；II—工业生产空间；III—城镇生活空间；IV—农村生活空间；V—林地生态空间；

VI—草地生态空间；VII—水域生态空间；VIII—其他生态空间

图 3　黄河流域“三生空间”子空间面积转移图

Fig.3　Area transfer among subspaces of production－living－ecological functional spaces in the Yellow River Basin

2.2　“三生空间”NPP 时空变化分析

基于 2000—2025 年逐月 NPP 数据分析，研究期内黄河流域平均 NPP 呈现显著的季节波动，整体呈波动上升趋势，如图 4 所示。年际尺度上，流域平均 NPP 从 2000 年的 21.7 g C·m^{-2}增至 2025 年的 29.6 g C·m^{-2}，线性回归结果表明其年均增长率约为 0.25 g C·m^{-2}·yr^{-1}。季节尺度上，NPP 在夏季（6—8 月）达到峰值（超过 58.48 g C·m^{-2}），冬季（12—2 月）则降至不足 5.86 g C·m^{-2}，显示出明显的生长季节差异。总体而言，2000—2025 年黄河流域 NPP 呈波动上升。

从“三生空间”NPP 时间变化特征看，3 类空间均呈显著季节波动，在夏季（6—8 月）达到峰值，在冬季（12 月至次年 2 月）降至低谷，如图 4 所示。总体水平上，2000—2025 年生产空间 NPP 最高，年均值为 29.48 g C·m^{-2}，并呈现出 0.27 g C·m^{-2}·yr^{-1}的上升趋势；生活空间次之，年均值为 27.16 g C·m^{-2}，增长率为 0.04 g C·m^{-2}·yr^{-1}；生态空间年均值为 26.05 g C·m^{-2}，增长率为 0.25 g C·m^{-2}·yr^{-1}。从季节振幅看，生产空间冬夏差异最大，约为 53.86 g C·m^{-2}，生态空间次之（52.21 g C·m^{-2}），生活空间最小（49.09 g C·m^{-2}）。

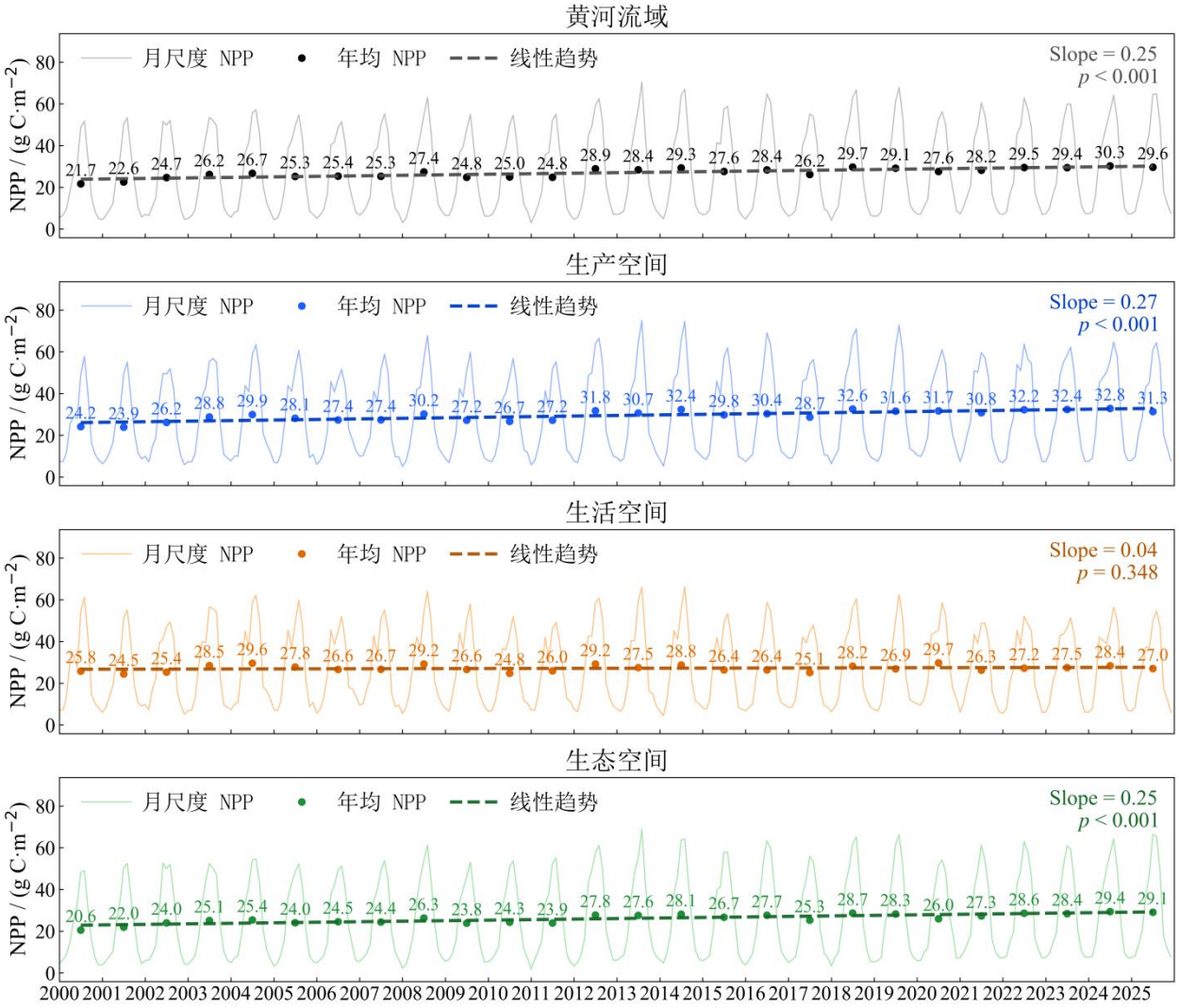


图 4　2000—2025 年黄河流域及“三生空间”NPP 时间变化

Fig.4　Temporal variations in NPP of the Yellow River Basin and its production, living and ecological spaces, 2000-2025

在 2000—2025 年，黄河流域“三生空间”NPP 变化表现出明显的阶段性差异与空间分异，具体见表 3 和如图 5—7 所示。2000—2010 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化如图 5 所示。该阶

段无显著变化区域占主导（84.95%～93.50%），整体以显著增加为主，其中生产空间与生态空间的显著增加比例分别为 14.87%和 17.03%，显著减少比例均低于 0.2%。显著增加区主要集中在黄土高原中部及毛乌素沙地—鄂尔多斯高原过渡带，显著下降区则零散分布于西安、郑州等城市周边。2010—2020 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化见图 6。与上一阶段相比，无显著变化区域比例有所下降，生态空间显著减少比例上升至 2.05%，显著增加比例降至 6.37%，表明该阶段 NPP 变化的空间分异有所增强。2020—2025 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化见图 7。该阶段 3 类空间 NPP 变化进一步趋于稳定，无显著变化比例均超过 98%，其中生产空间、生活空间和生态空间分别为 98.91%、98.45%和 99.29%；显著增加和显著减少区域均较为零散。显著增加区范围有所收缩，主要分布在黄土高原中部、关中平原东部及黄河三角洲一带；显著下降区主要集中在河套平原局部地区。从变化速率来看，2000—2010 年和 2010—2020 年显著增加区的 Theil–Sen 斜率均值整体较高，其中 2010—2020 年生态空间最高，为 13.04 g C·m^{-2}·yr^{-1}；2020—2025 年显著变化面积虽明显缩小，但显著增加区斜率均值仍较高，生产空间、生活空间和生态空间分别为 15.31、14.21、15.36 g C·m^{-2}·yr^{-1}。

表 3　2000—2025 年“三生空间”NPP 面积变化趋势统计

Tab.3　Statistical trends in NPP area changes of production-living-ecological functional spaces from 2000 to 2025

时期	类型	显著增加/%	显著减少/%	无显著变化/%	增加区斜率均值/（g C·m^{-2}·yr^{-1}）	减少区斜率均值/（g C·m^{-2}·yr^{-1}）
2000—2010 年	生产空间	14.87	0.18	84.95	9.35	-12.77
	生活空间	4.95	1.55	93.50	7.95	-14.91
	生态空间	17.03	0.10	82.87	6.85	-6.90
2010—2020 年	生产空间	9.84	0.43	89.73	10.51	-10.13
	生活空间	9.06	0.69	90.25	9.59	-13.40
	生态空间	6.37	2.05	91.58	13.04	-4.72
2020—2025 年	生产空间	0.53	0.56	98.91	15.31	-11.53
	生活空间	0.85	0.70	98.45	14.21	-10.70
	生态空间	0.70	0.02	99.29	15.36	-15.78

注：M–K 检验 p<0.05；斜率为 Theil–Sen（g C·m^{-2}·yr^{-1}）。

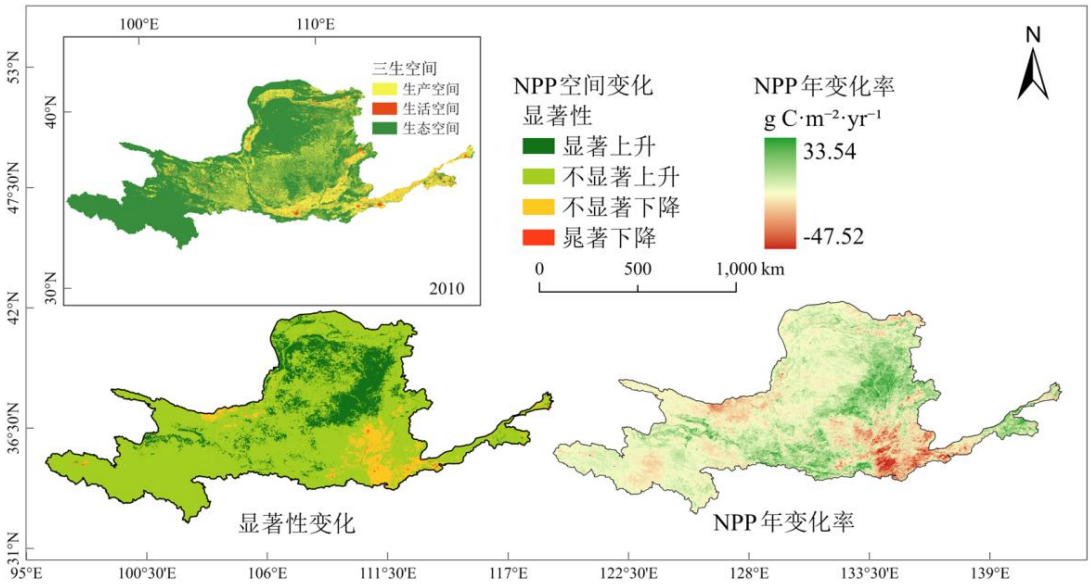


图 5　2000—2010 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化

Fig.5　Spatial variation of NPP in the production-living-ecological spaces of the Yellow River Basin, 2000-2010

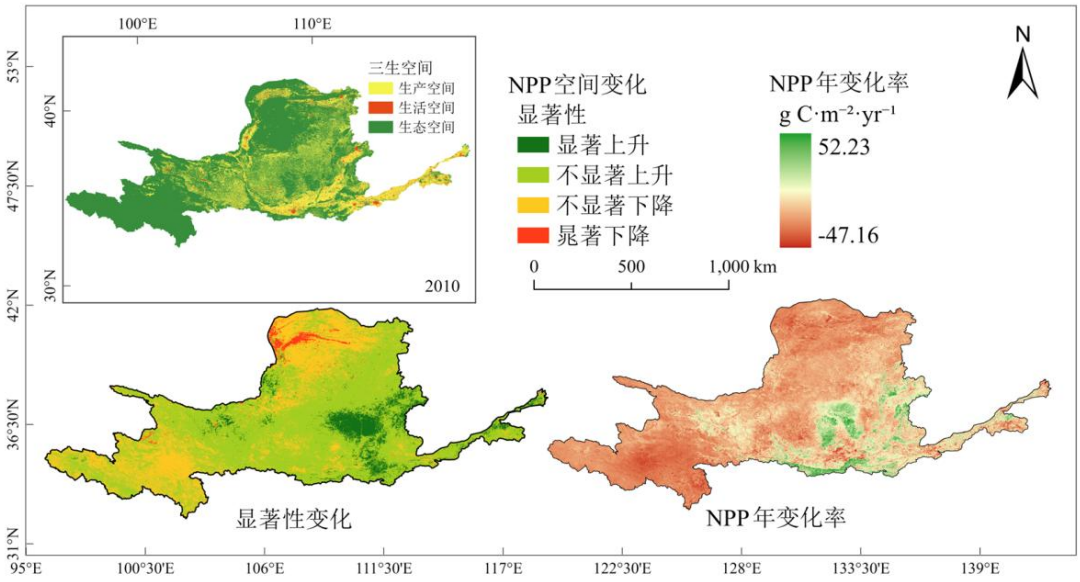


图 6　2010—2020 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化

Fig.6　Spatial variation of NPP in the production-living-ecological spaces of the Yellow River Basin, 2010-2020

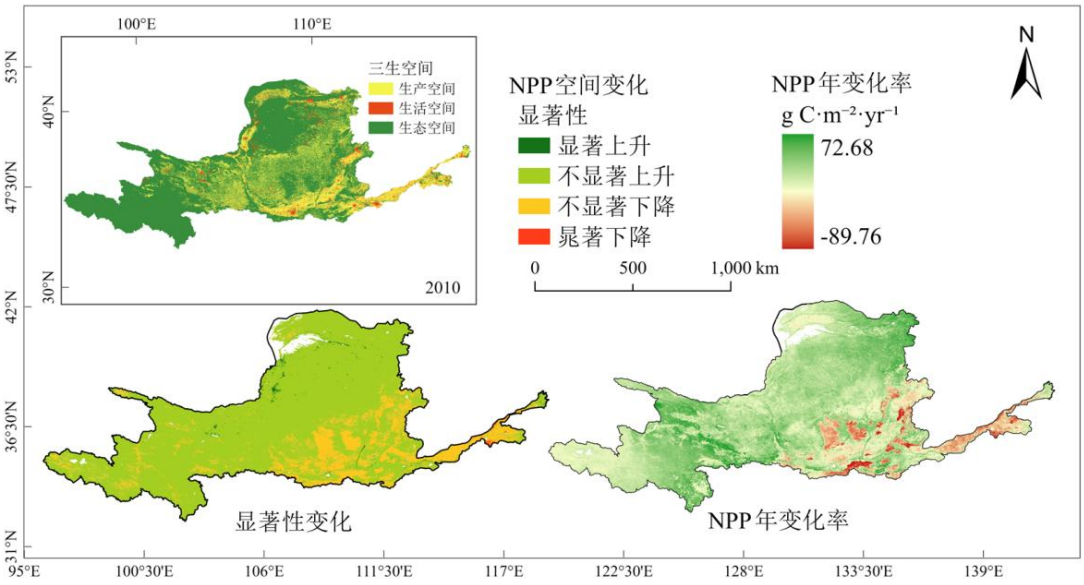


图 7　2020—2025 年黄河流域“三生空间”NPP 空间变化

Fig.7　Spatial variation of NPP in the production-living-ecological spaces of the Yellow River Basin, 2020-2025

2.3　“三生空间”NPP 的影响因素变化

在对黄河流域“‘三生空间’”NPP 变化驱动机制的研究中，本文从自然条件和人类活动两个方面构建驱动因子体系，用于分析“三生空间”NPP 变化的影响因素。

自然因子方面，选取气温、降水、太阳辐射和 NDVI 作为核心指标，分别表征植物生长所需的温度条件、水分供应、能量基础及植被覆盖状况，共同反映自然环境对生态系统生产力的影响[21]。

人类活动因子方面，选用人口密度、GDP、夜间灯光数据和土地利用类型作为关键指标。人口密度直接反映人类活动强度，GDP 体现区域经济发展水平，夜间灯光数据可作为人类经济活动空间分布的替代指标，有效识别其强度与范围，并可通过反映城镇扩张和人类活动集聚特征，间接表征人类活动对植被生产力的影响；土地利用类型则直观反映人类对地表覆被的改变，直接影响植被的生长[14]。

基于这种驱动因子体系，采用地理探测器方法量化各因子对“三生空间”NPP 变化的独立解释力，分析 2000—2025 年驱动机制的演变特征。具体分析结果如图 8 所示。

生产空间中，自然因子始终占据主导地位，其中 NDVI、降水和太阳辐射整体的解释力最高，q 值主要分布在 0.29~0.62，在 2010 年出现一定程度的阶段性减弱；相比之下，人口密度、GDP 和夜间灯光等人为因子表现出较为明显的阶段性变化，解释力相对较低，2025 年 q 值均低于 0.02，土地利用类型 q 值为 0.11，虽高于其他人为因子，但整体仍弱于主要自然因子。生活空间中，NDVI 始终是 NPP 变化的首要驱动因子，但其解释力随时间逐步减弱，q 值由约 0.59 降至 0.29；降水对 NPP 的影响波动较大，q 值为 0.08~0.42，2025 年为 0.26，而人口密度、GDP 和夜间灯光等人为因子在 2010 年的解释力相对较高，三者 q 值均处于 0.22~0.32 范围内，随后有所回落，说明生活空间对人类活动变化较为敏感。同时，土地利用类型在 2025 年 q 值为 0.276，与 NDVI 解释力较为接近，表明生活空间 NPP 变化受到植被状况、气候条件和土地利用结构的共同影响。生态空间中，自然因子的主导作用最为稳定，太阳辐射、NDVI 和降水的解释力长期保持在较高水平，q 值主要集中在 0.42~0.62；人为因子的整体作用相对较弱，但土地利用类型在研究期内始终具有较高解释力，在 2020 年进一步增强，2025 年虽有回落，但 q 值一直保持在 0.44~0.59，反映出其对生态空间 NPP 变化具有持续影响。

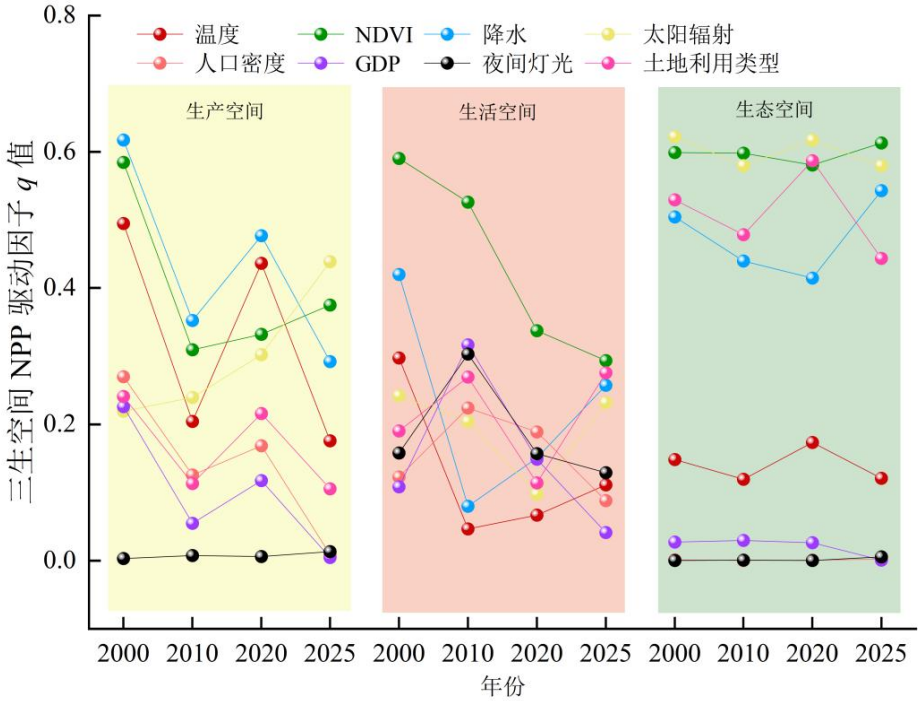


图 8　地理探测器驱动因子结果

Fig.8　Geodetector results for driving factors

2.4　交互作用探测结果

在 2000—2025 年，黄河流域“三生空间”NPP 交互作用探测结果呈现明显的时空差异，如图 9 所示。2000 年生产空间、生活空间和生态空间的交互探测结果分别见图 9（a）—（c）；2010 年、2020 年和 2025 年对应空间类型的交互探测结果分别见图 9（d）—（f）、图 9（g）—（i）和图 9（j）—（l）。生产空间中，研究期前期以 NDVI 与降水、NDVI 与温度等自然因子交互为主；2000—2010 年，人类活动相关交互作用阶段性增强；2010—2025 年，气候因子与 NDVI 的交互作用重新增强并占据主导。至 2025 年，NDVI 与温度、太阳辐射与温度的交互 q 值分别为 0.57 和 0.54，表明自然因子相互作用对生产空间 NPP 变化具有持续影响。生活空间中，研究期前期以 NDVI 与降水、NDVI 与温度等自然因子交互为主；2000—2010 年，GDP 与 NDVI、土地利用类型与 NDVI 等人类活动相关交互作用增强；2010—2025 年，土地利用类型与 NDVI、降水及太阳辐射的交互作用持续保持较高水平。2025 年，土地利用类型与 NDVI、夜间灯光与 NDVI 的交互作用仍较为突出，反映出人类活动与土地格局叠加对生活空间 NPP 的综合影响。生态空间在研究期内始终由自然因子交互主导，NDVI 与温度、太阳辐射与 NDVI

及降水与温度等组合在各时期均保持较高解释力；研究期内，自然因子之间以及土地利用类型与自然因子之间的交互作用仍处于较高水平，表明生态空间 NPP 的分布与变化持续受到自然环境因子及土地利用结构协同作用的影响。

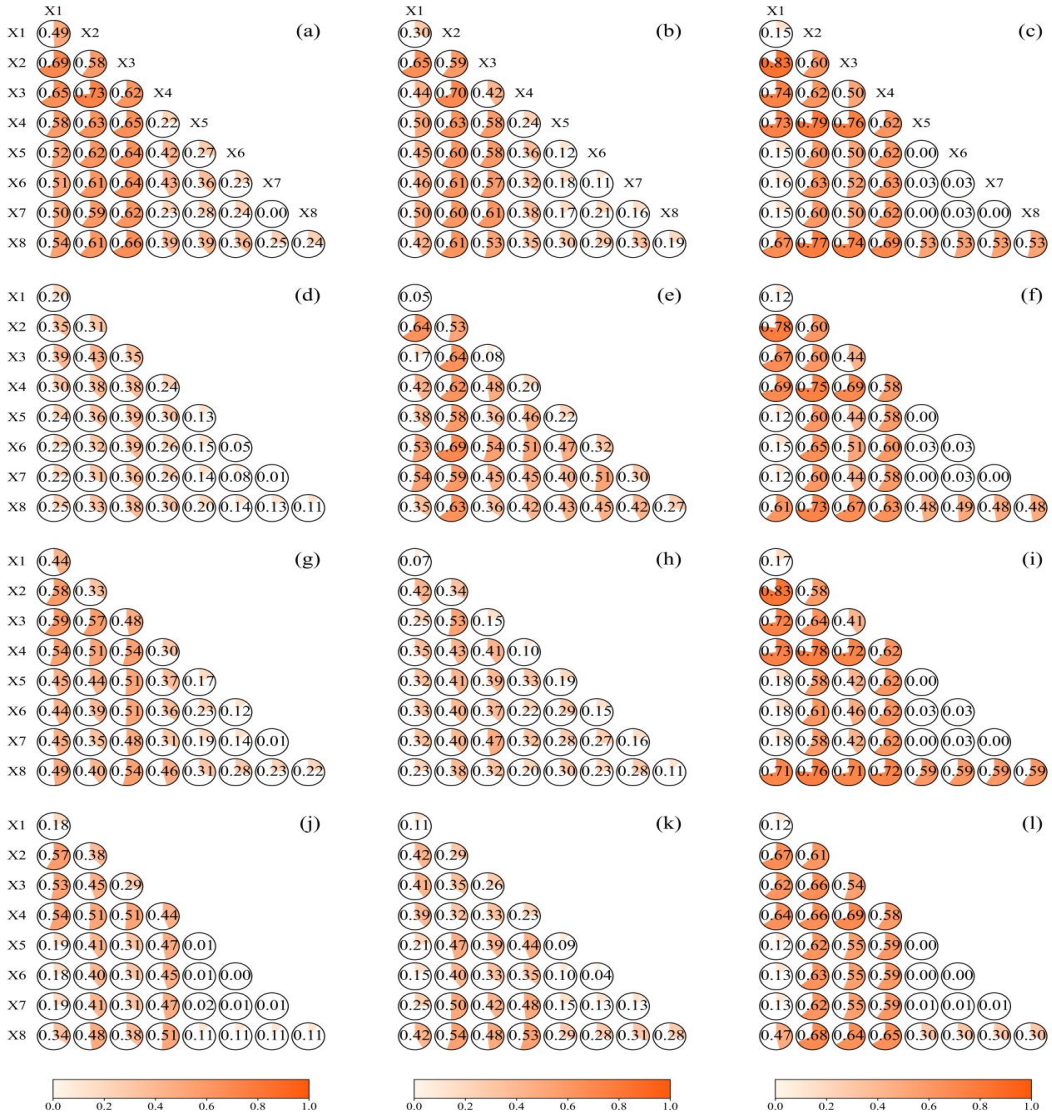


图 9　交互作用探测结果

Fig.9　Interaction detection results

3　讨论

1）2000—2025 年，黄河流域“三生空间”格局发生变化，具体表现为生产空间净减 4 201 km²，生活空间净增 6 113 km²，生态空间相对稳定。格局重塑的路径主要包括：耕地持续向城乡生活空间及工业生产空间转化，这与已有研究中关于城市扩张效应的结论相一致；部分林地、草地等生态用地被转为农业用地。生态空间整体保持相对稳定，但净减少约 1 912 km²。总体而言，在“退耕还林还草”等政策驱动下，流域生态功能得到一定恢复与提升，然而在局部自然环境脆弱、人类活动密集的区域，仍存在生态空间退化的趋势。农业生产空间向生活空间的转化趋势，与已有关于黄河流域“三生空间”演变及其驱动因素的研究结论基本一致[22]。

2）2000—2025 年，黄河流域 NPP 整体呈波动上升趋势，年均增幅约为 0.25 g C·m^{-2}·yr^{-1}，表明区域碳汇能力持续增强，这一趋势表明研究期内黄河流域植被生产力总体提升。在季节尺度上，NPP 表现为典型的“夏高冬低”格局，夏季迅速上升并于 6—8 月达到峰值，冬季则降至低谷，体现出气候条件对植被生长物候的直接调控。空间上，NPP 增长主要集中在中游黄土高原，反映出退耕还林（草）及水土保持工程对植被生产力的提升作用显著[23]；而在下游城镇化程度较高的区域，NPP 普遍增长停滞甚至下降，说明人类活动通过土地利

用变化对植被生产力产生了抑制效应[24]。从不同功能空间来看，生产空间在农业集约化与灌溉条件改善的支持下，NPP 稳步提高；生态空间在政策推动下总体维持稳定并稳步提升；生活空间受城镇扩张影响，NPP 增长有限甚至有所下降。这一格局与已有关于土地利用类型与 NPP 空间异质性的研究结论一致[24]，进一步揭示了在自然环境和人类活动共同作用下植被生产力变化的复杂响应机制。

3）黄河流域 NPP 的时空演变是在自然和人为因素共同作用下形成的。自然因素方面，降水及植被状况对植被生产力的作用最为突出，而温度通过影响植被生长季长度、光合作用速率和蒸散过程，在高海拔及寒冷地区对 NPP 具有一定限制效应，降水则在干旱与半干旱区发挥关键作用，对土壤水分供给与生物量积累有重要影响[25]。根据结果可知，2000—2010 年生产空间中降水因子的解释力呈下降趋势。已有研究指出，黄河流域降水过程在 2010 年前后存在明显变化[26]，同时黄河中游植被变化并非仅受气候因子控制，人类活动也发挥了重要作用[27]。因此，生产空间中降水因子解释力在 2000—2010 年的减弱趋势，可能与区域降水过程调整及人类活动调节共同作用有关，其具体机制仍有待进一步研究。从 2000—2025 年三类空间的因子探测结果来看，自然因子在总体上占据主导或重要地位，尤其在生态空间中表现最为突出，表明自然环境条件在生态系统生产力形成过程中发挥了基础性支撑作用，这一认识与黄河流域生态区尺度植被 NPP 时空变化及其影响因素分析的结果基本一致，表明区域生态分异背景下驱动机制具有显著空间异质性[28]。

不同类型空间对自然和人为因素的响应特征存在明显差异。生产空间以农田为主，受人为因素影响较为显著；生活空间的 NPP 差异则主要受植被覆盖状况及其质量影响。相比之下，生态空间以林地和草地为主，自然因素长期处于主导地位，温度和降水共同塑造了其 NPP 的时空格局[21,25]。温度的影响虽相对有限，但在高海拔或寒冷地区仍具有重要意义。人为因素方面，GDP、人口密度和土地利用类型是影响流域 NPP 变化的重要驱动因子。经济发展与人口集聚推动了生产空间的集约化利用，同时也对生态空间及部分生活空间形成挤占。生活空间内，城镇扩张与建设用地增加显著改变了植被覆盖格局，成为 NPP 变化的关键因素；夜间灯光等指标进一步表明，城镇化对 NPP 的影响在人类活动强度高的区域尤为显著。总体来看，人类活动与生态过程的相互作用趋于增强。生活空间对人为因子较为敏感，生态空间虽仍以自然因子为主导，但土地利用类型在研究期内也保持较高解释力，说明生态空间 NPP 逐渐呈现出自然条件与土地利用结构共同作用的复合特征。

4 结论

本文综合利用土地利用、遥感、气象和社会经济数据，依据土地利用主导功能划分黄河流域生产、生活和生态空间，并分析其格局演变特征。采用 CASA 模型估算 2000—2025 年黄河流域植被净初级生产力（NPP），结合 Sen's 斜率估计和 Mann-Kendall 检验分析 NPP 的时空变化。进一步运用地理探测器，探讨自然因素和人为因素对不同功能空间 NPP 的影响及其交互作用。主要结论如下：

1）2000—2025 年黄河流域“三生空间”格局总体呈现生产空间减少、生活空间扩张、生态空间相对稳定的演变特征。生产空间的面积总体减少约 4 201 km²，农业生产空间主要向农村生活空间（约 10 508 km²）和城镇生活空间（约 3 057 km²）转化，同时约有 2 542 km²转化为工业生产空间，表明研究期内生产空间变化以农业生产空间向生活空间转移及生产空间内部结构调整为主；生活空间扩张最为显著，增加约 6 113 km²，在关中盆地、黄土高原沟壑区及下游城市群表现较为突出；生态空间总体保持相对稳定，但仍净减少约 1 912 km²。

2）2000—2025 年黄河流域植被 NPP 在明显季节波动背景下总体呈缓慢上升态势，由 2000 年的 21.7 g C·m^{-2}增至 2025 年的 29.6 g C·m^{-2}，年均增长率约为 0.25 g C·m^{-2}·yr^{-1}。空间分布上，NPP 增长主要集中于中上游生态功能区及主要农耕灌区，而下游快速城镇化地区则表现出一定的局地下降特征。在“三生空间”尺度上，各类型空间总体以无显著变化为主，但不同时段和空间类型之间的变化特征存在明显差异：2000—2010 年生产空间和生态空间显著增加区占比分别为 14.87%和 17.03%；2010—2020 年生态空间显著减少比例上升至 2.05%，显著增加比例降至 6.37%；2020—2025 年三类空间 NPP 变化进一步趋于稳定，生产空间、生活空间和生态空间无显著变化比例分别达到 98.91%、98.45%和 99.29%。相比之下，生活空间 NPP 整体水平较低、增长幅度有限，并在部分大城市及其周边地区持续呈现下降趋势。

3）2000—2025 年黄河流域“三生空间”NPP

的时空差异主要受自然因素控制，但不同空间类型对自然条件与人类活动的响应程度存在明显差别。生产空间中，NDVI、降水和太阳辐射的解释力较高，q 值整体主要分布在 0.29~0.62；生态空间中，太阳辐射、NDVI 和降水的解释力长期保持较高水平，q 值主要集中在 0.41~0.62，表明自然因子在两类空间中始终发挥基础性作用。生活空间中，NDVI 解释力虽随时间减弱，但仍为重要影响因子；2025 年土地利用类型、降水和太阳辐射的解释力与 NDVI 趋于接近，表明生活空间 NPP 变化受植被状况、土地利用结构及气候条件共同影响。综合来看，多种因子共同作用对 NPP 的影响明显强于单一因子，交互作用整体表现为增强效应，2025 年生产空间中 NDVI 与温度、太阳辐射与温度的交互 q 值分别为 0.57 和 0.54；生态空间中降水与太阳辐射、NDVI 与温度、NDVI 与降水及 NDVI 与太阳辐射的交互 q 值均超过 0.65，表明黄河流域“三生空间”NPP 的演变是在自然环境约束背景下叠加人类活动扰动共同形成的。

参 考 文 献

[1] 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, 232.[Zhao Jincai, Pan Tao.Spatiotemporal variation of 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):214-222,232.]

[2] 王娟,何慧娟,董金芳,等.黄河流域植被净初级生产力时空特征及自然驱动因子[J].中国沙漠, 2021, 41(6): 213-222.[Wang Juan, He Huijuan, Dong Jinfang, et al. Spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in the Yellow River Basin in 2000-2019 and its natural driving factors[J]. Journal of Desert Research,2021,41(6):213-222.]

[3] Wang Yingxuan, Tian Jia, Feng Xuejuan, et al.Analysis of spatio-temporal changes in net primary productivity and their driving factors in ecological functional areas of the Yellow River Basin[J]. Ecological Engineering, 2024, 203: 107262.

[4] 杨梅焕,陶冰玉,王涛,等.黄土高原植被 NEP 时空变化及对气温降水和退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报,2026,40(2):405-416.[Yang Meihuan,Tao Bingyu,Wang Tao,et al. Spatiotemporal variation of vegetation NEP on loess plateau and its responses to temperature, precipitation, and grain-for-green program[J].Journal of Soil and Water Conservation,2026,40(2):405-416.]

[5] 刘杰,汲玉河,周广胜,等.2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J].应用生态学报, 2022, 33(6): 1533-1538.[Liu Jie, Ji Yuhe, Zhou Guangsheng, et al.Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1533-1538.]

[6] 孔冬艳,陈会广,吴孔森.中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J].自然资源学报, 2021,36(5):1116-1135.[Kong Dongyan,Chen Huiguang,Wu Kongsen.The evolution of "Production-Living-Ecological" space, eco-environmental effects and its influencing factors in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(5):1116-1135.]

[7] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(7):1290-1304.[Liu Jilai, Liu Yansui, Li Yurui. Classification evaluation and spatio-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(7):1290-1304.]

[8] 韩美,孔祥伦,李云龙,等.黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制[J].地理科学, 2021,41(6):1009-1018.[Han Mei, Kong Xianglun, Li Yunlong, et al. Eco-environmental effects and its spatial heterogeneity of ‘ecological-production-living’ land use transformation in the Yellow River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica,2021,41(6):1009-1018.]

[9] MODIS/terra land surface temperature/emissivity 8-day L3 global 1 km SIN grid V061 NASA earthdata[EB/OL]. [2026-01-12].https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod11a2-061.

[10] MODIS/terra vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN grid V061 NASA earthdata [EB/OL]. [2026-01-12]. https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod13q1-061.

[11] MODIS/terra+aqua BRDF/albedo albedo daily L3 global - 500 m V061 NASA earthdata[EB/OL]. [2026-01-12]. https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mcd43a3-061.

[12] The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes Scientific Data [EB/OL]. [2026-01-12]. https:

//www.nature.com/articles/sdata201566.

[13] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DS/OL].资源环境科学数据注册与出版系统,2018.DOI:10.12078/2018070201.[Xu Xinliang,Liu Jiyuan,Zhang Shuwen,et al. China's Multi-Period Land Use Land Cover Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC)[DS/OL].Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center,2018.DOI:10.12078/2018070201.]

[14] Chen Zuoqi,Yu Bailang,Yang Chengshu,et al.An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J].Earth System Science Data,2021,13(3):889-906.

[15] 黄耀欢,江东,付晶莹.中国公里网格 GDP 分布数据集[J].地理学报,2014,69(增刊 1):45-48.[Huang Yaohuan,Jiang Dong,Fu Jingying.1 km grid GDP data of China (2005, 2010)[J].Acta Geographica Sinica,2014,69(S1):45-48.]

[16] Tatem A J. WorldPop, open data for spatial demography[J]. Scientific Data,2017,4(1):170004.

[17] 王菲.“双碳”目标下黄河流域碳源/碳汇时空分布及碳盈亏分析[C]//中国自然资源学会水资源专业委员会,中国地理学会水文地理专业委员会,中国水利学会水资源专业委员会,等.水科学与智慧水务——第十九届中国水论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2022:342-348.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.092168.[Wang Fei. Spatiotemporal distribution of carbon sources/sinks and carbon surplus-deficit analysis in the Yellow River Basin under the "dual carbon" goals[C]//Water Resources Committee of China Society of Natural Resources,Hydrogeography Committee of Geographical Society of China,Water Resources Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society,et al.Water science and smart water affairs:proceedings of the 19th China Water Forum.Beijing: China Water & Power Press, 2022:342-348.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.092168.]

[18] 刘子华,王海军,曹永强,等.基于可解释性分析的黄河流域生态系统 NPP 时空异质性研究[J].人民黄河,2025,47(6):103-109.[Liu Zihua, Wang Haijun, Cao Yongqiang, et al. Exploring the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon sequestration in the Yellow River Basin based on explainability[J]. Yellow River,2025,47(6):103-109.]

[19] 李情情,曹永强,王菲,等.海河流域水-能-碳系统耦合协调发展及驱动因素研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 20-31, 40. [Li Qingqing, Cao Yongqiang, Wang Fei, et al. Study on the coupling coordination development and driving factors of water-energy-carbon System in the Haihe River Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2024,45(6):20-31,40.]

[20] 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.]

[21] Zhou Yanyan, Yue Dongxia, Li Chen, 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.

[22] Zhou Guangliang, Zhang Di, Zhou Qian, et al. Study on the spatiotemporal evolution characteristics of the “production-living-ecology” space in the Yellow River Basin and its driving factors[J]. Sustainability, 2022,14(22):15227.

[23] 谢艳玲,夏正清,王涛,等.黄河流域植被 NPP 时空变化及其对水热条件和退耕还林还草工程实施的响应[J].测绘通报,2023(2):15-20.[Xie Yanling, Xia Zhengqing, Wang Tao, et al. Temporal and spatial variation of vegetation net primary product and its response to hydrothermal conditions and grain for green project in the Yellow River basin[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2023(2):15-20.]

[24] Xuan Wenxi, Rao Liangyi. Spatiotemporal dynamics of net primary productivity and its influencing factors in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020[J].Frontiers in Plant Science,2023,14:1043807.

[25] Wang Huiliang, He Linpo, Yin Jun, et al. Effects of effective precipitation and accumulated temperature on the terrestrial EVI (enhanced vegetation index) in the Yellow River Basin, China[J].Atmosphere,2022,13(10):1555.

[26] 李锋.1998-2020 年黄河流域径流与降水演变规律研究[J].科技创新与应用,2022,12(19):91-95.[Li Feng. Study on the evolution law of runoff and precipitation in the Yellow River Basin from 1998 to 2020[J].Technology Innovation and Application,2022,12(19):91-95.]

[27] Gao Mengmeng, Yang Nan, Liu Qiong. What drives vegetation evolution in the middle reaches of the Yellow River Basin, climate change or human activities?[J]. Sustainability,2024,16(22):10122.

[28] 韩红珠,他志杰,陈晨,等.2001—2022 年黄河流域生态区

植被净初级生产力时空变化及影响因素分析[J].环境生态学, 2024, 6(10): 56-67.[Han Hongzhu, Ta Zhijie, Chen Chen, et al. Analysis on the spatio-temporal variation and influencing factors of net primary productivity of vegetation in the ecological region of the Yellow River basin from 2001 to 2022[J].Environmental Ecology, 2024,6(10):56-67.]

Spatiotemporal Dynamics and Driving Mechanisms of Net Primary Productivity in Production-living-ecological Functional Spaces of the Yellow River Basin

Zheng Hengliang[1], Cao Yongqiang[1], Liu Zihua[1], Liu Yanli[2,3], Chang Huanyu[1]

(1. Institute for Ecological Civilization Development in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract:【Objective】 Based on the production-living-ecological (PLE) space framework, this study aims to reveal the spatiotemporal patterns and driving mechanisms of vegetation net primary productivity (NPP) in the Yellow River Basin, clarify differences in NPP changes and their influencing factors among different functional spaces, and provide a scientific reference for ecological management across different functional spaces in the Yellow River Basin. **【Methods】** Based on the PLE functional zoning framework, this study used the CASA model to estimate NPP in the Yellow River Basin from 2000 to 2025. The geographical detector model was then used to analyse the dominant roles and interaction effects of natural and anthropogenic factors on NPP changes within production, living and ecological spaces. **【Results】** ①From 2000 to 2025, production space in the Yellow River Basin decreased by approximately 4,201 km^2, ecological space decreased by approximately 1,912 km^2, and living space increased by approximately 6,113 km^2. These changes were mainly characterized by the conversion of agricultural production space into living space and industrial production space. ②Basin-wide NPP showed a slow upward trend, with an average annual growth rate of approximately 0.25 g $C \cdot m^{-2}$ yr^{-1}. The areas with increased NPP were mainly distributed in the ecological functional zones of the middle and upper reaches and major irrigated agricultural areas. ③NPP in production and ecological spaces mainly increased during 2000-2010;the extent of significantly increasing areas narrowed during 2010-2020; and NPP tended to stabilize during 2020-2025. In contrast, NPP in living space remained generally low, with localized declines in some areas. **【Conclusions】** NPP changes in the PLE spaces of the Yellow River Basin are mainly dominated by natural conditions and are also significantly affected by human activities. Different functional spaces show clear differences in their responses to different driving factors.

Keywords: Yellow River Basin; production-living-ecological spaces; net primary productivity (NPP); CASA model; geographical detector