

# 永定河流域植被碳汇时空演变及其驱动因素

杨光 任东生 潘潇

河北省地球物理勘查院 (河北省浅层地热能研究中心)

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2323

**[摘要]** 科学评估区域植被碳汇动态对实现生态系统碳平衡具有重要意义。基于改进的CASA模型,结合遥感影像和气象数据,分析了2000—2025年永定河流域植被NEP的时空变化特征及其影响因素。研究表明:(1)2000—2025年间研究区NEP整体呈波动上升趋势,碳汇能力呈波动式增强的趋势。空间上,NEP呈现“东南低、西北高”的分布格局,北部山区碳汇强度显著高于南部平原。地理探测器分析表明,降水量对植被碳汇空间分异的解释力最强( $q=0.43$ ),其次为NDVI、气温和高程,而人口密度与GDP的解释力较弱,说明自然因素在植被碳汇变化中起主导作用。同时,人为因素与自然因素的交互效应明显增强,表明人地耦合关系日益紧密。研究结果可为区域碳汇评估与生态调控提供科学依据。

**[关键词]** 植被碳汇; CASA模型; 地理探测器

中图分类号: Q948; X173 文献标识码: A

## Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation Carbon Sequestration in the Yongding River Basin

Guang Yang Dongsheng Ren Xiao Pan

Hebei Institute of Geophysical Exploration (Hebei Shallow Geothermal Energy Research Center)

**[Abstract]** Scientific assessment of regional vegetation carbon sequestration dynamics is crucial for achieving ecosystem carbon balance. Based on an improved CASA model, combined with remote sensing imagery and meteorological data, this study analyzed the spatiotemporal dynamics of vegetation NEP and its driving factors in the Yongding River Basin from 2000 to 2025. The main findings are as follows: (1) During 2000–2025, NEP in the study area showed an overall fluctuating upward trend, indicating a continuous enhancement of carbon sequestration capacity. Spatially, NEP exhibited a “low in the southeast, high in the northwest” pattern, with significantly stronger carbon sequestration in the northern mountainous regions than in the southern plains and urbanized areas. Geodetector analysis revealed that precipitation had the strongest explanatory power for the spatial differentiation of vegetation carbon sequestration ( $q = 0.43$ ), followed by NDVI, temperature, and elevation, while population density and GDP had relatively weak explanatory power, indicating that natural factors play a dominant role in vegetation carbon sequestration. Moreover, the interaction effects between human and natural factors were significantly enhanced, suggesting an increasingly tight human–environment coupling. These findings provide a scientific basis for regional carbon sequestration assessment and ecological management.

**[Key words]** Vegetation carbon sequestration; CASA model; Geodetector

### 引言

植被在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色,通过光合作用吸收并固定大气中的碳,有效控制了大气中二氧化碳浓度的上升,对缓解全球变暖、实现碳中和目标具有重要意义。然而,由于植被类型多样,不同地区植被的碳汇能力存在显著差异,且其碳固定能力受环境因素的影响程度各不相同<sup>[1,2]</sup>。因此,准确评估区域植被碳汇能力,分析植被碳汇的时空变化模式及其影

响因素成为当前碳循环研究中的重要内容<sup>[3]</sup>。

植被碳汇相关研究从最初的总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)研究<sup>[4]</sup>逐步发展到净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的估算研究<sup>[5]</sup>,GPP和NPP常用来作为表征植被碳汇的重要指标,通过对碳源与碳汇的估算,分析陆地生态系统中碳汇的时空变化特征,定量评估气候变化及人类活动对植被碳汇的影响。已有研究表明,陆地碳汇动态变化主要受气



图1 研究区位置图

候变化和人类活动的共同驱动,而NPP作为表征植被碳汇的重要指标,其遥感估算方法主要包括统计模型、过程模型以及参数模型三类,其中CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)<sup>[6]</sup>应用最为广泛,该方法基于遥感影像,结合光合有效辐射和光能利用率等参数,实现NPP的精准模拟。随着研究的深入,学者们开始结合NPP与土壤异养呼吸量计算净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)<sup>[7]</sup>,以获得更精确的碳汇表征。永定河作为京津冀地区重要的跨界河流和生态功能性水系,受水资源过度开发等因素影响,河道断流等生态问题长期存在。近年来,随着持续开展的生态补水工程,永定河已基本实现全线通水。现有该区域的研究多聚焦于植被时空变化及地下水动态等方面,但针对永定河两岸城市植被碳汇变化及其驱动因素的分析仍相对较少<sup>[8]</sup>。

本研究依托Google Earth Engine(GEE)平台,利用MODIS遥感数据与气象资料,结合土壤呼吸模型,获得2000—2025年永定河流域植被碳汇时序数据。通过分析其时空分布特征及对气候变化的响应规律,揭示永定河流域植被碳汇的时空格局与主导驱动因素,以期为流域植被生态恢复、水资源优化配置及区域可

持续发展提供科学支撑。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

永定河地跨山西、内蒙古、河北、北京和天津等地,地形由西部山地向东部平原过渡,气候属温带季风型。永定河不仅承担着区域防洪、供水及生态涵养等功能,也是维系京津冀生态安全格局的重要水系之一。研究区域位于京津冀地区永定河两岸,涵盖怀来县、门头沟区、房山区、石景山区、丰台区、大兴区、涿州市、固安县、广阳区、永清县、安次区、武清区及北辰区,跨北京、天津和河北三地,是流域生态与城市交互影响显著的核心区域(图1)。

### 1.2 数据源

基于GEE平台获取并处理了研究区2000—2025年所需的研究数据。主要包括:(1)MOD13Q1产品中的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据。在预处理过程中,对每年的16天合成NDVI栅格进行逐像素计算,提取最大值生成月尺度NDVI,并最终合成为12波段的年尺度NDVI栅格。由于2025年数据尚未完全发布,11月和12月的数据采用2024年同期

数据进行替代,以保证数据的完整性与时序连续性。(2)气温、降水量及太阳辐射数据来源于ERA5-Land再分析数据集,通过对数据进行时间尺度汇总,生成研究区年均气温、年降水量及年太阳辐射数据。

土地利用数据采用武汉大学杨杰、黄昕团队制作的30m分辨率数据集,该数据包括耕地、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地、建设用地、湿地,共9类<sup>[9]</sup>。DEM数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为30m。

在研究区实地选取分布较为均匀的耕地和草地区域,布设面积为30m×30m的样地。在每个样地内沿对角线方向设置3个样方,测定地上植被生物量,并取其加权平均值作为该样地的代表值。样地采集工作于2025年3月、5月、7月和9月分期开展,利用所得数据计算净初级生产力,基于实测数据调整最大光能利用率并验证模拟结果。

## 2 NEP估算方法

净初级生产力NPP表示植物通过光合作用固定的碳量减去植物自养呼吸损失的碳量。然而,由于生态系统碳汇还包括土壤有机质的异养呼吸,净生态系统生产力NEP因此能更全面地反映陆地生态系统的净碳积累量<sup>[10]</sup>。NEP是评估生态系统碳汇能力的重要指标,其计算公式如下:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

式中NEP表示植被净生态系统生产力,NPP表示植被净初级生产力; $R_h$ 代表土壤异养呼吸速率。在NPP模拟过程中,研究采用改进的CASA模型,在光能利用率计算框架基础上,引入植被覆盖分类参数,针对不同植被类型设定相应的最大光能利用率值。

$R_h$ 的估算采用裴志永等<sup>[11]</sup>提出的土壤微生物呼吸模型。模型计算公式如下:

$$R_h = 0.22(Exp(0.0913T)) + \ln(0.3145P + 1) \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中: $R_h$ 表示月土壤异养呼吸速率,单位为 $gC/m^2$ ;T表示月平均温度,单位为 $^{\circ}C$ ;P表示月降水量,单位为mm,

## 3 结果与分析

### 3.1 模型验证

为验证改进后CASA模型计算结果的可靠性,分别将估算的NPP值与MOD17A3HGF NPP产品和实测数据进行对比验证。在研究区范围内随机生成1000个样本点对照MOD17A3HGF产品验证2024年及2000—2025年平均NPP的计算精度,由图2可以看出,本研究计算结果与MOD17A3HGF NPP产品表现出较强的一致性,数据拟合 $R^2$ 在0.67以上。同时,本研究计算的2025年月尺度NPP数据与实测结果进行对比分析发现,2025年6月计算的NPP与实测值基本一致,9月份计算结果在耕地区域NPP存在一定程度的低估,可能与作物成熟及收割阶段植被覆盖变化有关,总体而言,模拟值与实测值的相关系数仍达到0.79,进一步证明模型计算结

果可靠。

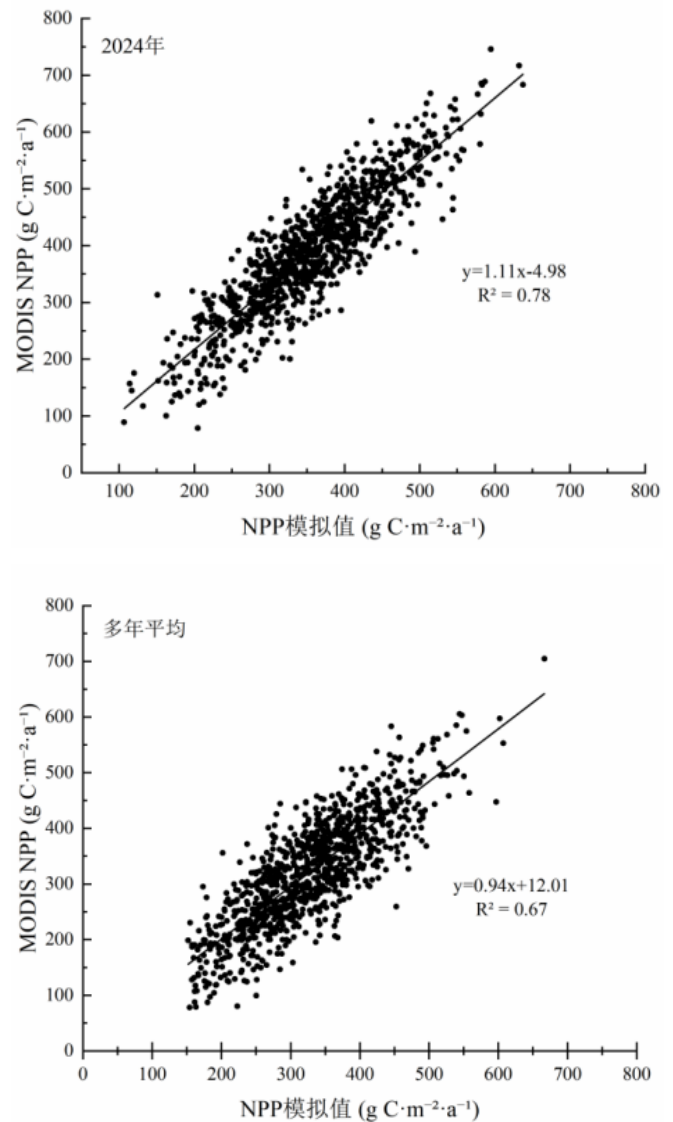


图2 模拟NPP与MODIS数据比对检验结果

### 3.2 NEP年际变化特征

从图3的年际变化趋势来看,2000—2025年间NEP整体呈现波动上升趋势。2001年NEP最小,仅为约 $128.12gC \cdot m^{-2}$ ,在2004年和2008年分别两次达到阶段性峰值 $236.21gC \cdot m^{-2}$ 和 $221.77gC \cdot m^{-2}$ ,2008—2014年这一阶段呈明显的下降趋势,此后NEP值稳步上升,至2025年维持在较高水平,最终达到 $219.32gC \cdot m^{-2}$ ,表明区域碳汇能力呈波动式增强的趋势。从图4的空间分布情况来看,NEP的空间格局存在明显的空间异质性,呈现显著的东南低西北高格局,北部山区值较高,碳汇能力强,南部平原及城市化区域NEP值偏低,局部区域甚至表现为碳源。

### 3.3 NEP变化驱动因素分析

NEP的变化受多种内外部因素共同驱动,研究综合选取了6个自然与人为因子进行驱动因素分析。其中,人为因素包括人口密度(Population)和国内生产总值(GDP);自然因素包括NDVI、

年平均气温(Temperature)、年平均降水量(Precipitation)和高程(DEM)。对2000—2025年间植被碳汇的空间分异特征进行了地理探测分析,定量评估驱动因子对植被碳汇的贡献程度(表1)。结果显示,降水量对植被碳汇的空间解释力最强,贡献度值为0.43,NDVI对植被碳汇的空间解释力次之,人口密度和国内生产总值对植被碳汇的空间解释力很弱,贡献度值分别为0.12和0.09。总体上,Q值排序为:降水>NDVI>气温>高程>人口密度>国内生产总值,表明自然因素在植被碳汇空间分异中起主导作用。

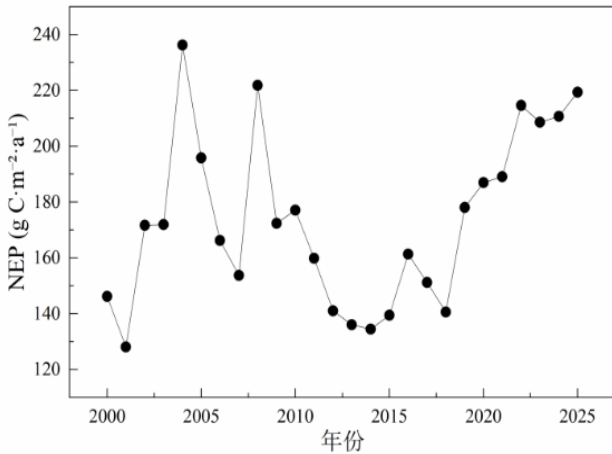


图3 研究区2000—2025年NEP变化趋势

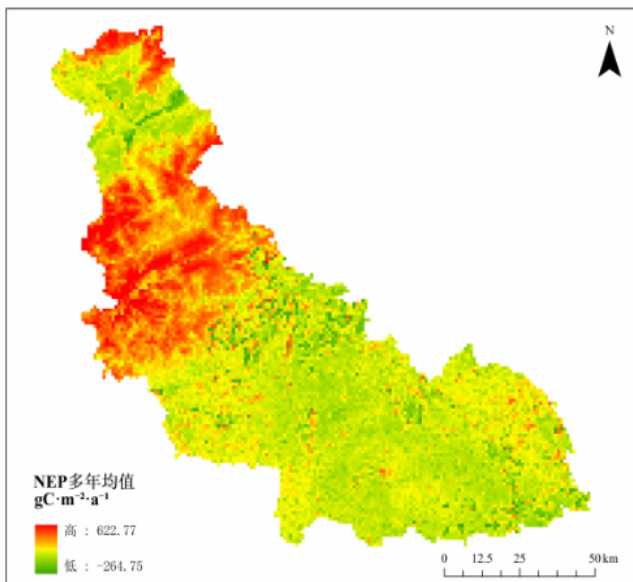


图4 研究区2000—2025年均NEP时空分布

通过交互探测方法分析自然与人为因素的交互效应(图5),结果表明,植被碳汇的变化受多重因素的共同驱动,各因子交互作用对植被碳汇的解释力均显著高于单因子效应,NDVI与其他因子的交互作用显著,人口密度和国内生产总值与自然因素交互效应提升明显,这也进一步说明人地耦合关系不断强化,作用机制也愈加复杂。

表1 研究区植被碳汇影响因子交互作用q值

	NDVI	Temperature	Precipitation	DEM	Population	GDP
Q	0.29	0.26	0.43	0.23	0.12	0.09
P	0	0.05	0.02	0.98	0.99	0.99

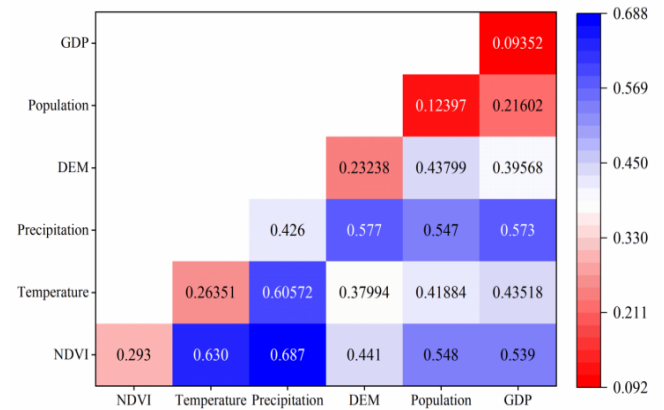


图5 植被NEP因子探测及交互因子探测

#### 4 结论与展望

(1)改进后的CASA模型能够准确反映研究区植被碳汇的时空演变特征。与MOD17A3HGF产品对比,拟合相关系数 $R^2$ 在0.67以上,月尺度模拟与实测数据相关系数达0.79,说明模型计算结果具有较高的可信度。

(2)2000—2025年间,研究区NEP整体呈波动上升趋势,碳汇能力呈波动式增强的趋势。空间分布呈“西北高、东南低”格局,北部山区碳汇强度高于南部平原及城市化区域,部分城市化区域甚至呈现碳源特征。

(3)地理探测器分析显示,降水量、NDVI、气温对NEP空间分异具有显著解释力,自然因素在植被碳汇形成中占主导地位;人口密度和GDP的解释力相对较低,表明人为因素对碳汇的直接影响有限。双因子交互分析表明,自然因素与人为因素之间存在明显增强效应,尤其是NDVI与气候因子的交互作用显著。人口密度和GDP与自然因素的交互效应提升明显,反映出人地耦合关系不断强化,生态系统碳汇形成的驱动机制愈加复杂。

本研究受河北省地矿局科技项目资助(项目编号:13000025 P0069B410363B)。

#### 【参考文献】

- [1]赵海溶,莫宏伟.湖南省植被碳汇动态及其自然驱动因子分析[J].自然资源遥感,2023,36(4):304—313.
- [2]朴世龙,方精云.1982—1999年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J].自然资源学报,2002,17(3):373—380.
- [3]潘竟虎,文岩.中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J].生态学报,2015,35(23):7718—7728.

[4]林尚荣,李静,柳钦火.陆地总初级生产力遥感估算精度分析[J].遥感学报,2018,22(2):234-252.

[5]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.

[6]Chen G, Zhang K, Zhang X, 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.

[7]王莺,夏文韬,梁天刚.陆地生态系统净初级生产力的时空动态模拟研究进展[J].草业科学,2010,27(2):77-88.

[8]张镡文,杨冉,侯文星,等.生态补水前后永定河两岸植被覆盖度变化及驱动力分析[J].生态环境学报,2023,32(2):264-273.

[9]Yang J, Huang X. 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.

[10]Dai E F, Huang Y, Wu Z, Zhao D S. Analysis of spatio-temporal features of a carbon source/sink and its relationship to climatic factors in the Inner Mongolia grassland ecosystem [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(3): 297-312.

[11]裴志永,周才平.青藏高原高寒草原区域碳估测[J].地理研究,2010,29(1):102-110.

#### 作者简介:

杨光(1997--),男,辽宁彰武人,硕士,助理工程师,主要从事资源与环境遥感研究。

#### \*通讯作者:

任东生(1979--),男,河北廊坊人,本科,正高级工程师,主要研究方向为航空摄影与大地测量学。