引文格式：张铭洋,魏海涛,徐强,等. 河南省碳源/汇时空演化特征及驱动因素分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):51-56. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.011

河南省碳源/汇时空演化特征及驱动因素分析

张铭洋[1]，魏海涛[1*]，徐　强[1]，柴宙拢[1]
（1. 郑州大学地球科学与技术学院，河南 郑州 450001）

摘　要：河南省拥有丰富的生态资源，碳汇能力强大，研究河南省碳源/汇的演化机理对于优化生态管理策略至关重要。基于河南省2000—2020年MODIS的NPP数据以及气象数据和土地利用数据，结合定量NEP估计模型，采用Theil-Sen趋势分析、Mann-Kendall检验、相关性分析和Hurst指数等方法，对河南省NEP进行综合计算，并对其时空演化特征及驱动因素进行全面分析。结果显示：①从2000年到2020年，河南省的总NEP呈整体波动上升趋势，年平均增长量为1.18 $TgCa^{-1}$。②河南省大部分地区（95.13%）是碳汇区，主要分布在河南省西部的太行山、伏牛山以及南部的桐柏山、大别山。碳源区主要分布在省内主要城市建成区，占总研究区域的4.87%。③由农田转变为不透水面对河南省NEP的影响最为负面，说明城市扩张以及过度开垦等人类活动是导致NEP损失的重要原因。④尽管河南省的生态系统碳汇能力正在增强，区域碳汇潜力未来有增加的趋势，但大部分（86.03%）地区NEP发展存在不确定性。研究结果在一定程度上可为河南省生态系统减排增汇及实现双碳目标提供参考。

关键词：NEP；河南省；气象因子；土地利用/覆盖变化；NEP估计模型
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0051-06

Spatio-temporal Evolution Characteristics and Driving Factors of Carbon Sources/Sinks in Henan Province

ZHANG Mingyang[1], WEI Haitao[1], XU Qiang[1], CHAI Zhoulong[1]
(1. School of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Henan Province has rich ecological resources and strong carbon sink capacity, so it is important to study the evolution mechanism of carbon source/sink for optimizing ecological management strategies. Based on the MODIS NPP data, meteorological data and land-use data of Henan Province from 2000 to 2020, combined with the quantitative NEP estimation model, we used the Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall method, correlation analysis and Hurst exponent to comprehensively calculate the NEP in Henan Province, and comprehensively analyzed its spatio-temporal evolution characteristics and driving factors. The results showed that ①from 2000 to 2020, the total NEP of Henan Province presented an overall fluctuating upward trend, with an average annual increase of 1.18 $TgCa^{-1}$. ②Most of Henan Province (95.13%) was the carbon sink area, mainly located in Taihang Mountain and Funiu Mountain in the west of Henan Province and Tongbai Mountain and Dabie Mountain in the south. The carbon source areas were mainly distributed in the built-up areas of major cities in the province, accounting for 4.87% of the total study area. ③The conversion from farmland to impervious land had the most negative impact on NEP in Henan Province, indicating that human activities such as urban expansion and excessive reclamation were the main causes of NEP loss. ④Although the carbon sink capacity of ecosystem in Henan Province was improving, and the regional carbon sink potential had an increasing trend in the future, but the development of NEP in most areas (86.03%) was uncertain. The results of this study can provide a reference for the ecological system of Henan Province to reduce emissions and increase sinks and achieve the goal of “double carbon”.

Key words: NEP, Henan Province, meteorological factor, land-use/cover change, NEP estimation model

河南省地处中原，拥有着丰富的生态资源和自然景观，包括森林、农田、草地等各种植被类型，这些生态资源在吸收CO_2和维持生态平衡方面具有重要作用，是河南省碳汇的重要组成部分。然而，这些生态资源受气温和降水的影响较大，且河南省气候类型复杂，中西部地区干旱多发、豫中与豫南东部地区雨涝多发，生态系统面临诸多挑战。此外，河南省又作为人口密集且农业发达的省份，近20 a的无序的开垦和快速的城镇化直接影响到该区域的植被状态和生态环境平衡，使河南省不同区域在碳排放和碳储量之间存在较大的地缘差异，因此，全面理解河南省的生态环境状况已刻不容缓。但目前对碳源/汇的研究主要集中在国家和省级以下尺度，针对河南省碳源/汇的专门研究相对较少[1]，有关碳源/汇时

第一作者简介：张铭洋（2003—），本科生，研究方向为地理信息科学，E-mail：zhangmingyanghn(@l63.com。
通信作者：魏海涛（1986—），博士，讲师，研究方向为健康地理学，E-mail：zzu_wei@zzu.edu.cn。

空分布和驱动因子的研究更为匮乏，且许多学者仅专注于特定植被类型的分析[2-3]，未对河南省整体植被进行综合考虑。因此，迫切需要开展更为深入的研究。

鉴于此，本文利用MODIS的NPP数据，结合NEP估计模型，对河南省NEP进行估算。同时，采用Theil-Sen趋势分析、Mann-Kendall检验、相关性分析和Hurst指数等方法，在500 m尺度揭示河南省NEP的时空变化特征及趋势，分析NEP变化与气象因素（气温和降水）和土地利用/覆盖变化之间的关系，最后探讨河南省NEP的未来发展趋势和持久性特征。本研究不仅能够深入了解河南省NEP的动态变化和驱动因素，为科学评价河南省的碳汇能力和制定气候变化适应政策提供支持，而且能为提升河南省的碳汇功能、优化生态管理策略以及实现中国“双碳”目标提供重要的科学依据。

1 研究区概况

河南省地处中原、黄河流域的中下游地区，北部、西部和南部分别被太行山、伏牛山、桐柏山和大别山环绕，形成了一种半环形的分布格局。大部分地区地处暖温带，南部横跨亚热带，具有自东向西、由平原向丘陵山地过渡的气候特征[4]，地势西高东低，境内有众多的山地、丘陵和平原，气候适宜，四季分明，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥。年总降水量在600~900 mm之间，年平均气温在14°C左右，拥有丰富的生态资源和自然景观。截至2021年，河南植被总面积为1.49万km^2，植被覆盖率为57.5%，在全国生态格局中地位重要。

2 数据来源与处理

NPP数据为MOD17A3HGF.006数据产品，该数据集来源于美国国家航空航天局数据中心（http://lpdaac.usgs.gov/），空间分辨率为500 m，时间跨度为2000—2020年，用于NEP的估算。气象数据（气温数据和降水数据）来自中国国家科学技术基础设施的国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn），空间分辨率为1 km，时间分辨率为月度。土地利用数据来自于《Earth System Science Data》[5]上发布的“1990年至2020年中国30 m年度土地覆盖及其动态数据”（zenodo.org）。

将所有数据统一投影至WGS84坐标系，空间分辨率重采样至500 m，将月气温数据求平均值获得年平均气温，将月降水量数据求和得到年总降水量，所有数据的时间跨度均为2000—2020年。

3 研究方法

3.1 NEP估计模型

NEP估计模型由Woodwell[6]于1978年提出，为碳的净积量，净生态系统生产力（NEP）为植被净初级生产力（NPP）减去土壤异养呼吸（R_H）消耗的光合产物：

$$\mathrm{NEP}=\mathrm{NPP}-R_H \tag{1}$$

式中，NEP为更大尺度的碳净储存量，可以为正值或负值；当NEP>0时，表示该生态系统是碳汇；当NEP<0时，表示该生态系统是碳源。

根据Pei等[7]提出的基于气温、降水的碳排放回归方程计算土壤微生物呼吸碳排放量，公式如下：

$$R_H=0.22\times\left(e^{0.0913T}+\ln(0.3125P+1)\right)\times30\times46.5\% \tag{2}$$

式中，T为月平均气温；P为月降水量；30为使用气象数据的天数；46.5%为微生物呼吸释放的土壤碳排放的比例[8]。

3.2 Theil-Sen趋势分析

Theil-Sen趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法，该方法计算效率高，对于测量误差和离群数据不敏感，常被用于长时间序列数据的趋势分析中[9]。

$$\beta=\mathrm{median}\left(\frac{\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i}{j-i}\right) \tag{3}$$

式中，β为NEP的变化趋势；median()为取中值；NEP_i和NEP_j为第i年和第j年的NEP时间序列值（2000年<i<j<2020年）。当$\beta>0$时，NEP随时间呈增加趋势；当$\beta<0$时，NEP随时间呈减少趋势。

3.3 Mann-Kendall检验

Mann-Kendall检验是一种非参数检验方法，常与Theil-Sen趋势分析相结合，对时间序列趋势的显著性进行检验，其优点是不要求样本遵从一定的分布，且能够排除少数异常值的干扰[10]。使用检验统计量Z进行趋势检验，Z值计算方法如下：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, S>0\\ 0\quad\quad, S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, S<0\end{cases} \tag{4}$$

其中：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=n+1}^{n}\mathrm{sign}\left(\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i\right) \tag{5}$$

$$\mathrm{sign}\left(\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i\right)=\begin{cases}1 & ,\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i>0\\0 & ,\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i=0\\-1 & ,\mathrm{NEP}_j-\mathrm{NEP}_i<0\end{cases} \tag{6}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \tag{7}$$

式中，n 为时间序列中的数据个数；S 为检验统计量；sign() 为符号函数。

当 Z 的绝对值大于1.65、1.96和2.58时，表示趋势分别通过了信度为90%、95%和99%的显著性检验[11]，本研究采用通过95%的信度检验，即 $|Z|>1.96$ 表示趋势通过了显著性水平检验，置信水平为95%（$p<0.05$）。

3.4　相关性分析

相关性分析用来反映要素之间的相关程度，在不考虑其他要素影响的前提下计算2个变量的相关性，得出偏相关系数[12]。计算过程如下：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{8}$$

式中，$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为2个变量 n 年的平均值；R_{xy} 为2个变量间的相关系数。

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{\left(1-R_{xy}^2\right)}\sqrt{\left(1-R_{yz}^2\right)}} \tag{9}$$

式中，$R_{xy,z}$ 为固定自变量 z 后，变量 x 与变量 y 的偏相关系数。

通过 t 检验方法完成显著性检验，计算公式如下：

$$t=\frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}}\sqrt{n-m-1} \tag{10}$$

式中，m 为自变量个数。

3.5　Hurst指数

Hurst指数是时间序列数据持久性的有效指标[13]，其取值范围为 $0<H<1$，根据Hurst指数的定义，以0.5作为分界线，大于0.5的部分被称为“持久系列”，表明NEP时间序列数据具有持久性，即未来变化与过去一致；小于0.5的部分被称为“逆持久系列”，表明NEP时间序列数据具有逆持久性，即未来的变化与过去呈负相关；当 $H=0.5$ 时，表明NEP时间序列数据不持久，即不依赖于过去；H 的值越接近1，持久性越强，相反，H 的值越接近0，逆持久性越强。

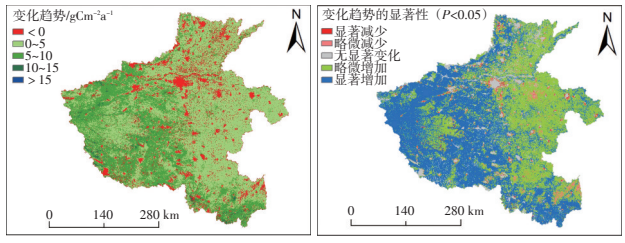
4　研究结果与分析

4.1　河南省NEP时空变化特征

2000—2020年间，河南省总NEP呈整体波动上升趋势，年均值为43.92 TgC，年平均增长量为1.18 $TgCa^{-1}$。NEP的变化范围为24.34~56.75 TgC，其中，2020年的总NEP最高，为56.75 TgC，比平均值高12.83 TgC；而2001年最低，为24.34 TgC，比平均值低19.58 TgC。从河南省NEP的波动增长趋势可以看出，在2000—2020年期间，河南省的固碳能力有明显增加。

河南省2000—2020年的年平均NEP为231.554 $gCm^{-2}a^{-1}$，具有正NEP的区域占河南省总面积的95.13%，表明河南省大部分地区是碳汇区，其中单位面积NEP为200~300 $gCm^{-2}a^{-1}$ 的分布区域最大，约占总面积的55.95%。河南省北部的太行山、西部的熊耳山和伏牛山地区，以及河南省南部的桐柏山和大别山地区，是较高单位面积NEP的主要分布区域，其值约为450 $gCm^{-2}a^{-1}$ 或更高，该地区因丰富的植被和生物多样性等因素共同作用，成为高碳固定能力的生态系统。碳源区主要位于郑州市、洛阳市、开封市等省内主要城市建成区，占总面积的4.87%，由于城市化进程中能源消耗和污染物排放等原因使其成为主要的碳源区。

基于Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendall检验，利用宏观尺度影像揭示了2000—2020年河南省NEP的空间趋势及其变化过程。如图1所示，河南省单位面积NEP的年变化趋势具有明显的空间变异性（增加区域 > 减少区域）。河南省NEP的Theil-Sen趋势值范围为-20.59~25.60 $gCm^{-2}a^{-1}$，其中85.99%的地区为正值，平均趋势值为3.69 $gCm^{-2}a^{-1}$。



a Theil-Sen趋势分析　　b Mann-Kendall检验

图1　NEP年变化趋势和显著性检验

审图号：GS(2019)3333号

变化趋势显著增加的区域主要集中在济源市、三门峡市、洛阳市、平顶山市、南阳市和信阳市等，共占比46.64%，该区域因农业扩张、林业管理实践以及技术与管理的进步，NEP得到了显著提高。趋势略有增加的区域主要集中在安阳市、濮阳市、新乡市、开封市、商丘市和周口市等城市，共计占比39.36%。趋

势显著减少和略有减少的区域所占比例最小，仅为4.53%，主要分布在省内主要城市及其周边地区，如郑州市、洛阳市、商丘市和林州市，城市NEP显著减少的原因主要与城市化水平提高和建设用地扩大导致的土壤退化有关。此外，还有一部分趋势无变化的区域，共计占比9.47%，仅出现在主要城市的老城区，如郑州市、洛阳市、开封市等城市的老城区，主要因为其很早就进行了城镇化，植被覆盖结构稳定以及土地利用变化有限。总体而言，河南省各地植被NEP的变化趋势呈现明显的地域性空间差异，绝大部分地区的植被NEP主要呈增加趋势（表1）。

表1 河南省NEP变化趋势

NEP变化趋势		类型	面积/km²	百分比/%
Theil-Sen趋势	Z值			
Theil-Sen趋势>0	|Z| > 1.96	显著增加	77 887.84	46.64
Theil-Sen趋势>0	|Z| ≤1.96	略有增加	65 730.24	39.36
Theil-Sen趋势<0	|Z| ≤1.96	略有减少	6 386.17	3.82
Theil-Sen趋势<0	|Z| > 1.96	显著减少	1 189.04	0.71
Theil-Sen趋势=0	|Z|	无变化	15 806.69	9.47

4.2 气象因素对河南省NEP的影响

为探究气象因素对NEP的影响，本研究选取年降水量和年平均温度作为影响因子进行相关分析。2000—2020年间，河南省年平均气温和降水的变化如图2所示，年平均气温在14.66~15.77 ℃之间波动，平均为15.24 ℃，其中2007年平均气温最高，2011年最低。2000—2020年期间，河南省年平均气温呈波动上升趋势，增长速率为0.10 ℃/10 a。河南省平均年降水量在565.45~1 077.81 mm之间波动，平均值为791.65 mm，其中2003年平均年降水量最高，这主要是由于当年特大暴雨的影响；2001年最低，仅有565.45 mm。2000—2020年期间河南省平均年降水量呈波动下降趋势，下降速率为19.53 mm/10 a。

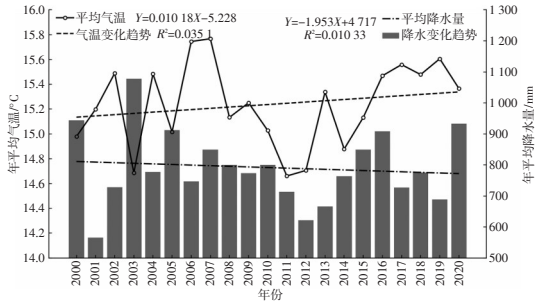


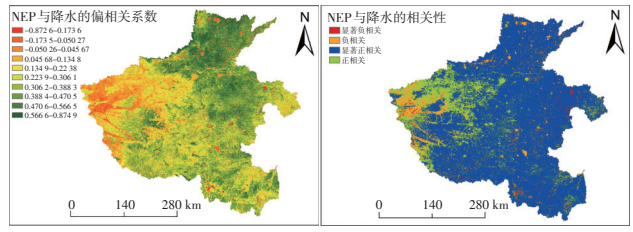
图2 年降水量和年平均气温的趋势

在2000—2020年期间，通过固定年降水量的影响，计算河南省NEP与年平均气温之间的偏相关关系，并进行了显著性检验。结果显示河南省NEP与气温之间的偏相关系数在该时段内范围从−0.86~0.81不等，平均值为−0.05。平均值显示，河南省NEP与年平均气温之间存在负相关关系，表明在气温较高的地区，河南省NEP较低。其中，44.03%的地区为正相关区域，55.97%为负相关区域。

在正相关区域，通过0.05显著性水平检验的地区只占了0.16%，零星分布在河南省的东部和西部地区；在负相关区域中，有8.79%通过了0.05显著性水平，主要位于河南省的郑州市、新乡市、开封市和南阳市以及其他省内主要城市市中心地区，表明城市建筑、人口密集以及工业等活动所释放的热量对植被的生长和光合作用产生不利影响，从而导致NEP与气温呈现显著负相关趋势。

同时，通过固定年平均气温的影响，计算2000—2020年间河南省NEP与年降水量之间的偏相关关系，并进行了显著性检验（图3）。结果显示，NEP与年降水量之间的偏相关系数范围为−0.87~0.87，平均值为0.30。证实了NEP与年降水量之间存在正相关关系，并且这种相关性高于NEP与年平均气温之间的相关性。其中，92.70%的地区为正相关区域，7.3%为负相关区域。负相关的区域主要分布在2条山脉之间的山谷地区，这种现象是由于这些地区受到山脉阻挡了部分降水量的影响，导致植被生长受到限制，从而使植被NEP与年降水量呈现负相关关系。

在正相关区域中，有27.68%通过了0.05显著性水平测试，主要分布在河南省东北部的新乡市、鹤壁市、濮阳市、安阳市和开封市等地区。此外，只有0.08%的负相关区域通过了0.05显著性水平测试，与年平均气温存在较大不同的是，这些区域主要位于河南省与其他省的交界处。



a 划分为10类 b 结果通过显著性（95%）测试

图3 NEP与降水的偏相关系数及显著性检验结果

审图号：GS(2019)3333号

此现象说明水分是限制生态系统生产力的关键因素。降水量增加意味着更多的水分可供植被光合作用和生长使用，从而提高植被的固碳能力，进而增加该生态系统的NEP[14]。相反，水分不足时，植物生长受限，生态系统的固碳能力下降。此外，气温升高会加剧水分蒸发，进而加剧了水分胁迫。当气温升高到一定

程度时，它对NEP的负面影响（通过增加水分胁迫）可能超过了其正面影响。总而言之，河南省NEP的年际变化与年平均气温呈负相关，与年降水量呈正相关，且年降水量对NEP的影响大于年平均气温的影响。

4.3　土地利用类型变化对NEP的影响

土地利用是人类活动的一种表现形式，而土地利用/覆盖类型（LUCC）是人类活动影响区域NEP的主要方式之一，因此不同土地利用类型的NEP能力差异显著。基于30 m空间分辨率的土地利用/覆盖类型数据产品，将河南省2000—2020年的LUCC数据进行空间叠加，得到了河南省的土地利用/覆盖转移矩阵，并制作了土地利用/覆盖变化桑基图（图4）。

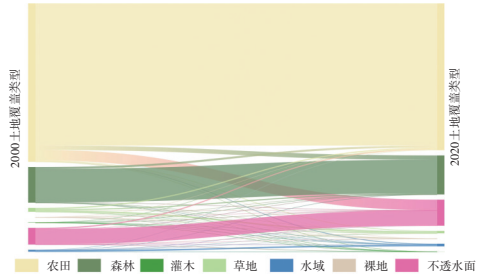


图4　2000—2020年河南省的土地利用/覆盖变化

选取变化面积百分比大于1%的LUCC单位，共提取10个LUCC单位，占总变化面积的96.94%，对每种土地利用类型之间的转换进行定量统计。在2000—2020年期间，河南省内共有15 358.41 km^2的土地利用类型发生变化，其中农田、森林和不透水面3种土地利用类型之间的转换占比为75.81%，由农田转为不透水面的土地利用变化是河南省内最大的土地利用变化单元，共7 264.89 km^2，占变化总面积的47.30%，与之相关的NEP变化了0.593 3 TgC。由农田转为森林的土地利用变化仅占变化面积的19.60%，但NEP在该时段变化了0.595 3 TgC，是NEP变化最多的土地利用变化类型。此外，有566.39 km^2的农田被转化为水域，占变化面积的3.69%，全区NEP仅变化了0.010 1 t，NEP变化量最少。

从表2可以看出，由农田转变为森林和由草地转变为森林对河南省NEP的影响最为明显，其单位面积NEP变化量分别达到197.78 gCm^{-2}和186.61 gCm^{-2}，这表明恢复森林生态系统有助于增加地上生物量和土壤有机碳含量，从而增强碳汇能力。

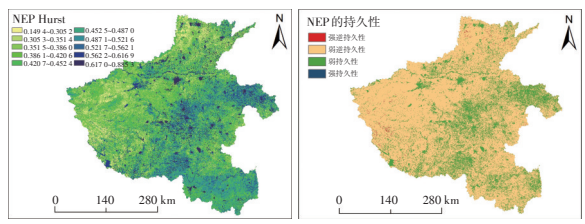
相比之下，由农田转变为不透水面的面积最大，且对NEP的影响最为负面，其NEP单位面积变化量仅为81.67 gCm^{-2}，这表明城市化进程和工业化发展过程，大量农田被转化为不透水面，这让原本具有较高植被覆盖和生物多样性的农田变成了无法进行光合作用的不透水面，导致了碳吸收能力的急剧下降，对生态系统碳平衡带来了负面影响。

表2　土地利用/覆盖类型及其对NEP的影响

LUCC（2000—2020年）	面积/km^2	转达率	累计百分比/%	NEP变化总量/10^{-2}TgC	单位面积NEP变化量/gCm^{-2}
农田–不透水面	7 264.89	47.30	47.30	59.33	81.67
农田–森林	3 009.96	19.60	66.90	59.53	197.78
森林–农田	1 233.63	8.03	74.93	22.99	186.36
草地–农田	1 005.82	6.55	81.48	18.65	185.42
草地–森林	712.19	4.64	86.12	13.29	186.61
农田–水域	566.39	3.69	89.81	1.01	17.83
农田–草地	428.29	2.79	92.60	6.85	159.94
水域–农田	257.78	1.68	94.28	3.11	120.65
不透水面–水域	250.09	1.63	95.91	1.21	48.38
灌木–森林	158.36	1.03	96.94	2.69	169.87

4.4　未来趋势分析

Hurst指数是表征时间序列数据未来趋势与过去变化依赖强度的重要指标。河南省NEP的Hurst指数范围为0.149 4~0.885 3（图5），平均值为0.440 9。NEP持久性的比例仅为19.92%，逆持久性的比例为80.08%。NEP弱持续趋势区域主要分布在建设用地区域，包括郑州市、洛阳市、开封市、许昌市等河南省内其他主要城市老城区附近。由于早期的城镇化进程，这些地区的植被覆盖和土地利用结构相对稳定，并且土地利用变化有限，因此在NEP方面呈现出较弱的持续性趋势。



a 计算结果划分为10类　　b 持久性特征分布

图5　NEP Hurst指数

审图号：GS(2019)3333号

河南省NEP的正态分布（图6）显示，强逆持久性、弱逆持久性、弱持久性和强持久性的面积占比分别为0.28%、79.80%、19.90%和0.02%。河南省多年NEP的持续趋势显著小于逆持续趋势（正态分布峰值小于平均值且具有左偏趋势），即河南省NEP的总体趋势不稳定，持续变化的区域较小。

将NEP Hurst指数与Theil–Sen趋势分析和Mann–Kendall检验相结合，进一步探究河南省NEP未来发展趋势和持续特征。实验结果显示，河南省NEP具有持续增加特征（显著增加和轻微增加）的区域比例为12.487 3%，高于持续减少特征的区域（显著减少和轻微减少）的比例，后者仅为1.487 8%，其余地区

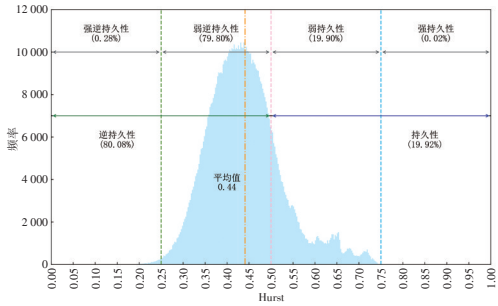


图6　NEP Hurst指数的正态分布图

则无法确定（86.025 0%）。在具有持续增加NEP的区域中，“弱持续－略有增加”（6.813 8%）是主导，主要分布在商丘市、许昌市与漯河市的交界地带、驻马店市与南阳市的交界地带。在持续减少NEP的区域中，“弱持续–略有下降”（1.099 3%）是主导，在河南省内零散分布。持续发展区域的NEP以弱可持续性为主，这表明河南省某些地区的碳汇能力在未来会有更加稳定的趋势改善。然而，河南省大部分地区（86.025 0%）的NEP发展在未来存在不确定性，这表明需要进一步提高河南省生态系统的稳定性，综合考虑气候变化、土地类型、人类活动等多方面因素的共同影响，加强数据监测，通过更深入的研究和有效的管理措施来保障生态系统的健康和可持续发展。

5　结论与建议

1）本研究分析了河南省2000—2020年净生态生产力（NEP）的时空演变及驱动因素，并验证了方法的可靠性。主要结论如下：①时空特征：河南省NEP年均总量43.92 TgC，年均增长1.18 TgC·a^{-1}，单位面积NEP为231.554 gC·m^{-2}·a^{-1}，呈波动上升趋势。空间上，95.13%的区域为碳汇区，高值集中于西部太行山、伏牛山及南部桐柏山、大别山；碳源区（4.87%）集中在郑州、洛阳等城市建成区，Theil–Sen趋势显示大部分地区NEP持续增长。②驱动因素：气候因素中，年降水量与NEP正相关，年平均气温负相关，降水作用更显著。土地利用变化对NEP影响深远，20 a间15 358.41 km^2土地类型转变，森林为主要碳汇，农田转为不透水面导致碳汇能力下降，需加强森林恢复并抑制城市扩张。③方法验证：与兰州大学、南京大学NEP数据对比显示趋势一致，局部差异源于数据源和模型参数；与MODIS土地覆盖产品对比表明，森林、草地、不透水地分类差异分别为1.1%、2.4%、1.7%，总体趋势可信。

2）当前研究未涵盖大气CO_2浓度、土壤特性等潜在因素，未来需综合多要素深化机制分析。由于86.025%区域碳汇趋势不明确，需提升生态系统稳定性。建议采用高精度数据、多模型对比优化估算方法，完善数据体系以支撑碳中和目标。研究为河南省生态保护与碳管理提供了科学依据，强调多维度分析的重要性。

参考文献

[1] 于鲁冀,张亚慧,王燕鹏,等. 河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素[J]. 水土保持通报,2023,43(5):288-296

[2] 王莉,刘莹莹,张亚慧,等. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J]. 环境科学学报,2022,42(12):410-422

[3] 滕永忠,白保勋,陈东海,等. 河南省中北部不同土地利用类型净碳汇及其价值[J]. 河南农业科学,2019,48(9):60-66

[4] 李鹏傲,姜永涛,张珍珍,等. 河南省植被覆盖度时空变化及其原因分析[J]. 地理空间信息,2023,21(11):76-80

[5] Yang J，Huang X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990—2019[J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3 907-3 925

[6] Woodwell G M，Whittaker R H，Reiners W A,et al. The Biota and the World Carbon Budget[J]. Science, 1978, 199(4 325):141-146

[7] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P,et al. Carbon Balance in an Alpine Steppe in the Qinghai Tibet Plateau[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2009,51(5):6

[8] Tian H，Melillo J, Lu C ,et al. China\"s Terrestrial Carbon Balance: Contributions from Multiple Global Change Factors[J]. Global Biogeochemical Cycles,2011,25(1):109-201

[9] 徐勇,韦梦新,邹滨,等. 基于空间尺度效应的山东省$PM_{2.5}$浓度时空变化及空间分异地理探测[J]. 环境科学,2023,47(6):1-21

[10] 李自闯,董国涛,姚楠. 1982—2015年黄河中游NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究,2024,31(2):202-210

[11] 田智慧,任祖光,魏海涛. 2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学,2022,43(2):743-751

[12] 喀迪阿依·阿力木,玉素甫江·如素力,肉克亚木·艾克木,等. 2001—2017年艾比湖流域积雪时空变化及其驱动因子分析[J]. 生态科学,2023,42(3):127-135

[13] Yu H, Lachun W, Xiao L C,et al. Long-term Trend and Persistence of Precipitation over Lake Poyang Basin Since 1950s[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3):454-462

[14] 岳东霞,牟鑫亮,周妍妍,等. 疏勒河流域净初级生产力与土壤含水量耦合关系研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2021,57(4):518-527