

DOI: 10.20103/j.stxb.202310302354

袁静芳,周海丽,张星烁,刘晓曼.京津风沙源治理区植被固碳能力估算及归因分析.生态学报,2024,44(15):6731-6743.

Yuan J F, Zhou H L, Zhang X S, Liu X M. Estimation and attribution analysis of vegetation carbon sequestration capacity in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6731-6743.

京津风沙源治理区植被固碳能力估算及归因分析

袁静芳¹,周海丽²,张星烁^{1,3},刘晓曼^{2,*}

1 生态环境部南京环境科学研究所,南京 210042

2 生态环境部卫星环境应用中心,北京 100094

3 东北林业大学野生动物与自然保护地学院,哈尔滨 150040

摘要: 植被固碳能力是陆地生态系统碳汇的基础,可通过净生态系统生产力(NEP)这一重要指标来反映。估算植被固碳能力是生态学和地表生态系统研究领域的共同科学问题,揭示其变化特征及其因素对于区域生态系统具有重要意义。以京津风沙源治理区为研究区,估算了 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP,并利用趋势分析法和稳定性分析法等方法分析其时空变化特征,并利用地理探测器探究了影响 NEP 的自然因素与人类活动因素。结果显示:(1)2020 年,京津风沙源治理区的 NEP 均值为 110.09 gC m⁻²a⁻¹,碳汇区面积约为 3.591×10⁵ km²,占总面积的 78.80%;(2)2000—2020 年,京津风沙源治理区多年平均 NEP 为 77.54 gC m⁻²a⁻¹,年际变化率为 4.118 gC m⁻²a⁻¹,总体上呈上升趋势,研究区以 NEP 明显增加区为主,占比 55.16%,主要分布在研究区南部,NEP 呈下降趋势地区仅占比 0.15%,主要分布在北部干旱草原沙地治理区,呈斑块状分布;(3)不同生态系统 NEP 从高到低依次为林地、农田和草地,林地固碳作用较强,未来林地固碳潜力较大,草地面积占研究区的 70%,其总固碳量远超其他类型且呈增加趋势;(4)影响京津风沙源治理区 NEP 的主导因素为年降水量,其次,生态工程的实施也是 NEP 变化的重要影响因素,不同因素对京津风沙源治理区 NEP 的影响表现为双因子增强或非线性增强。围绕京津风沙源植被固碳能力估算以及影响因素的空间分异性,研究也在一定程度上提出了空间恢复的建议,以期为京津风沙源加强植被固碳能力以及生态修复等决策提供科学依据。

关键词: 植被固碳能力;Net Ecosystem Productivity;归因分析;地理探测器

Estimation and attribution analysis of vegetation carbon sequestration capacity in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area

YUAN Jingfang¹, ZHOU Haili², ZHANG Xingshuo^{1,3}, LIU Xiaoman^{2,*}

1 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

2 Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

3 College of Wildlife and Nature Reserves, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The carbon sequestration capacity of vegetation is the foundation of terrestrial ecosystem carbon sink, which can be reflected by Net Ecosystem Productivity (NEP). How to quantify the vegetation carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems is a common scientific issue in the research fields of terrestrial surface ecosystems and ecology. Estimating the carbon sequestration capacity of vegetation, as well as identifying its dynamic characteristics and influential factors, holds immense importance for the sustainable development of regional ecosystems. Focused on the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area, this study estimated the NEP from 2000 to 2020, analyzed the spatio-temporal variation characteristics of the area using methods such as trend analysis and stability analysis, and explored the natural and human

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1303403);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX230307)

收稿日期: 2023-10-30; **网络出版日期:** 2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: showma79@163.com

activity factors that affected the NEP by the Geodetector. The main results showed that: (1) In 2020, the average NEP of the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area was $110.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the carbon sink area was about $3.591 \times 10^5 \text{ km}^2$, accounting for 78.80% of the total area. (2) From 2000 to 2020, the average annual NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area was $77.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, with an interannual variation rate of $4.118 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, showing an overall upward trend. The study area was mainly characterized by a significant increase in NEP, accounting for 55.16%, and the significantly increased area was mainly distributed in the southern part of the study area. Conversely, regions with a declining NEP constituted a mere 0.15% of the total area, primarily located in the northern arid grassland desertification control area and appearing sporadically. (3) The NEP of different ecosystems in descending order was forest land, farmland, and grassland. The forest land had a strong carbon sequestration effect, and its NEP showed an upward trend, indicating a greater potential for carbon sequestration in the future. The grassland accounted for 70% of the research area, and its total carbon sequestration was much higher than other types, showing an increasing trend. (4) The primary influencing factor of NEP in the study area was annual precipitation, while the ecological engineering was also an important influencing factor of NEP. The NEP in the study area was influenced by multiple factors, manifested as dual factor enhancement or non-linear enhancement. Based on the estimation of vegetation carbon sequestration capacity and spatial differentiation of influencing factors, this study also proposed suggestions for spatial restoration to some extent, to provide scientific basis for decision-making on strengthening vegetation carbon sequestration capacity and ecological restoration for the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area.

Key Words: vegetation carbon sequestration capacity; Net Ecosystem Productivity; factor analysis; geographic detector

陆地生态系统固碳在减缓全球变暖和发展低碳经济中发挥重要作用,是当前国际社会减缓和适应全球气候变化的核心思路 and 重要途径^[1-2]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,陆地生态系统固碳主要依靠森林、草地等植被通过光合作用过程吸收和固定 CO_2 ^[3]。定量评估植被固碳能力强度及时空变化规律,是当前急需回答的重要科学问题,成为人类应对气候变化、实现碳中和研究热点^[4]。目前陆地植被固碳能力的相关研究从对总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)和净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的研究,进一步发展到对净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)的估算^[5-6]。NEP 是陆地生态系统与大气之间的净碳交换,不仅能表征植被固碳能力,更能量化评估生态系统碳源/汇,被广泛应用于碳循环研究中^[7]。因此利用 NEP 能很好地定量描述植被固碳能力,有助于准确评估碳源汇及其动态变化^[8]。

为保护或修复陆地生态系统,针对日益严峻的湿地退化、土壤侵蚀、沙尘暴和荒漠化等生态问题,我国实施了一系列重大生态治理工程^[9],这些工程采用的林草建设能有效增加植被固碳能力,是目前最为经济、安全、有效的碳增汇手段^[10-12]。评估这些生态治理工程区的植被固碳能力对实现碳达峰碳中和目标具有重要意义,对于促进可持续发展和减少碳排放至关重要。已有学者开展相关尝试性研究,如张逸如等人^[13]估算出天保工程持续增强了我国天然林的植被固碳功能, Feng 等人^[14]研究表明退耕还林工程实施后黄土高原 NPP、NEP 及碳储量均呈增长趋势,张祯祺等人^[15]研究发现生态保护工程实施后三江源地区 NEP 呈显著上升趋势,鲁绍伟等人^[16]、蔡丽莎等人^[17]和王艳芳等人^[18]从区域尺度对北京、贵州和河南等地区的退耕还林工程的植被固碳能力初步估算。21 世纪初期,大范围沙尘暴、浮尘、扬沙等灾害在京津地区爆发,为控制京津风沙源区植被退化、抑制土地荒漠化等问题,中国政府实施了京津风沙源治理工程,工程的实施提高了区域植被覆盖度^[19],然而京津风沙源治理工程的植被固碳能力估算研究仍相对较少,目前植被固碳能力时空变化研究不够深入。

植被固碳能力受到自然因素与人为因素共同影响^[20],准确掌握植被固碳能力的驱动机制,有助于增强对区域碳循环变化机制的认知^[21]。在自然因素方面,气候条件、土壤特征和地理背景等自然要素通过直接影响植被光合作用或间接影响植被生长环境,从而影响植被固碳能力^[3,10];在人为因素方面,人口的快速增长与对

自然资源需求加大对生态环境造成威胁,但一些研究也发现生态工程是碳储量增加的主导因素^[22]。于是,探讨自然和人为两方面对 NEP 变化的影响程度,在生态保护工程植被固碳能力的研究中尤为重要。然而当前仍缺乏量化多重自然和人为因素对植被固碳能力主导情况研究,以及工程实施与植被固碳能力在空间一致性方面的研究。

京津风沙源治理区作为中国北方生态屏障区的重要组成部分,是气候变化较为敏感的区域之一,在中国及区域气候与环境变化中具有重要的作用。然而有关该区域植被固碳能力的时空格局研究相对缺乏、变化特征分析不够细致,从而影响对京津风沙源治理区碳源/汇的时空分布差异及其影响因素的全面、精细化探索。因此,本研究以京津风沙源治理区为研究区,计算了研究区 2000—2020 年 NEP 并分析其时空分布格局和趋势动态,探讨了京津风沙源治理区的植被固碳时空变化规律。在此基础上利用地理探测器,从空间分异性的角度深入揭示京津风沙源治理区植被碳源/汇时空格局及其影响因素差异,以为科学评估区域植被固碳能力、制定气候变化应对措施、实施生态修复等提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 区域概况

京津风沙源治理工程于 2001 年启动,工程区总面积达 $4.58 \times 10^5 \text{ km}^2$,目前行政区域包括山西、内蒙古、北京、天津以及河北五省(自治区、直辖市)的 81 个县(旗、市、区)(图 1)。京津风沙源治理区年均降水量 460 mm,并由西北向东南递减;年均气温为 7.5°C ,由南向北递减;工程区平均全年大风日数为 36.2 d,其中 70% 的大风日出现在春季。主要地貌类型包括高原、山地、平原三大类,东部为锡林郭勒高原和浑善达克沙地;西部为乌兰察布高原,由阴山北麓的丘陵、地势平缓的层状高原及纵横东西的石质丘陵隆起带组成。京津风沙源治理区地跨温带草甸草原带、温带典型草原带、温带荒漠草原带、温带森林草原带和暖温带落叶阔叶林带五种植被地带。总人口数达 1957.7 万人,平均人口密度为 $42.8 \text{ 人}/\text{km}^2$,其中农牧业和贫困人口数分别占总人口数的 82.9% 和 22.5%。农业总产值约为 259.6 亿元,占工程区国民生产总值的 28.5%。

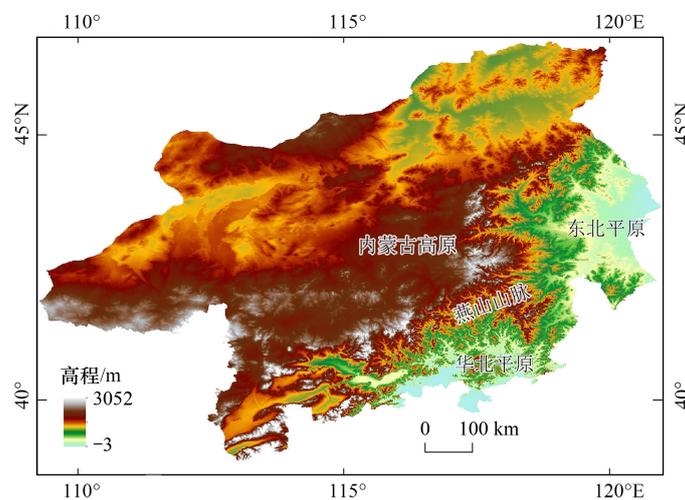


图 1 京津风沙源治理区空间布局示意图

Fig.1 Location map of the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area

1.2 数据来源及处理

1.2.1 NPP 和土地利用数据来源

NPP 来源于美国 NASA 官网(<https://search.earthdata.nasa.gov>)的 MOD17A3HGF 数据集,该数据集为分辨率 500 m 的年度数据,所选时间范围为 2000—2020 年。利用 ArcGIS 10.8 中的重采样工具将 NPP 数据重采

样至 1 km, 然后按照京津风沙源治理区边界进行裁剪得到 2000—2020 年研究区内 NPP 年度数据。2000—2020 年逐年生态系统类型数据来源于武汉大学的中国年度土地覆盖数据集 (China Land Cover Dataset, CLCD)^[23], 该数据集的总体准确率达 80%。

1.2.2 影响因素来源及处理

京津风沙源治理区位于中国干旱半干旱区域内, 气候因素对该地植被具有显著影响^[24]。研究区内地形变化较大, 地貌类型以高原、山地、平地为主。该区域受人类活动干扰强烈, 且经济发展水平较低。鉴于以上因素, 依据系统性、科学性、可量化、可获取等原则, 本研究选择气候、土壤、地理、社会经济和生态工程等 5 个方面共 10 个影响因素, 探测各影响因素对京津风沙源治理区及其不同分区 2000—2020 年 NEP 的影响 (表 1)。

表 1 影响植被固碳能力的因素及数据来源

Table 1 Factors affecting the carbon sequestration capacity of vegetation

类型 Types	因素 Factors	数据解释 Data interpretation	来源 Source
气候条件 Climatic conditions	年降水量 年均气温	2000—2020 年的年总降水量、年均气温 (1 km)	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
土壤特征 Soil characteristics	土壤粘粒含量 土壤有机碳含量 土壤含水量	土壤质地 (1 km)	联合国粮农组织 (https://www.fao.org/)
地理背景 Geographical background	高程	数字高程模型 (30 m)	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
社会经济 Socio economic	GDP 人口密度	2000、2005、2010、2015、2019 年 5 年均 GDP、人口密度 (1 km)	
生态工程 Ecological engineering	累计造林强度 退耕还草强度	2002—2020 年各县累计造林面积与该县面积之比 各县农田转化为草地的面积与之前农田的面积之比	中国林业和草原统计年鉴 中国年度土地覆盖数据集

GDP: 国内生产总值 Gross domestic product

2000—2020 年逐年均气温与逐年降水量数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>) 的“1901—2021 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集”和“1901—2021 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集”, 该数据集空间分辨率为 1 km, 选取的时间尺度为 2000 年 1 月到 2020 年 12 月, 得到 2000—2020 年逐月气温与逐月降水量数据集。年降水量数据为该年内月降水量的总和, 年气温数据为该年内所有月份数据的平均值, 均通过 ArcGIS 10.8 计算得出。土壤数据包括土壤粘粒含量、土壤含水量以及土壤有机碳含量, 来源于世界土壤数据库, 可在联合国粮农组织网站获取 (<https://www.fao.org/>), 利用 ArcGIS 10.8 软件将其裁剪至京津风沙源治理区范围。高程数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM 数据, 可在资源环境科学与数据中心获取 (<https://www.resdc.cn/>), 其分辨率为 90 m, 最终得到京津风沙源治理区范围内高程数据。人口空间分布数据通过资源环境科学与数据中心获取 (<https://www.resdc.cn/>), 单位为人/km²。该数据所选年份为 2000、2005、2010、2015、2019 年, 时间分辨率为 a, 空间分辨率为 1 km, 计算得到多年均人口密度数据, 利用 ArcGIS 10.8 软件将其裁剪至京津风沙源治理区范围。2000—2020 年 GDP 分布数据通过资源环境科学与数据中心获取 (<https://www.resdc.cn/>), 单位为元/km²。该数据所选年份为 2000、2005、2010、2015、2019 年, 时间分辨率为年, 空间分辨率为 1 km, 计算得到多年均 GDP 数据, 利用 ArcGIS 10.8 软件将其裁剪至京津风沙源治理区范围。累计造林强度数据来源于中国林业和草原统计年鉴, 包括 2002—2020 年造林面积的县级统计数据, 本研究将各县中每年的造林面积相加并除以该县面积, 得到各县的累计造林强度。退耕还草强度数据为各县域中 2000 年农田类型转换为 2020 年草地类型的面积占比^[25], 农田类型和草地类型数据均来自于武汉大学的中国年度土地覆盖数据集 (Annual China Land Cover Dataset, CLCD)^[23], 该数据集的总体准确率达 80%。该数据所选年份为 2000 年和 2020 年, 边界为京津风沙源治理区。

1.3 研究方法

1.3.1 植被固碳能力估算及验证

净生态系统生产力在区域尺度上常常作为估算植被固碳能力大小的重要指标,可以表示为净初级生产力(NPP)中减去土壤呼吸所消耗的光合产物(R_h)的剩余部分^[26],其公式为:

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

式中,NPP 来源于 MOD17A3HGF 数据集; R_h 表示异养微生物呼吸消耗,通过计算获得。当 $NEP > 0$ 时,表示该生态系统储存碳为碳汇,当 $NEP < 0$,表示该生态系统释放碳为碳源。

土壤异养呼吸消耗(R_h)的估算采用 Bond-Lamberty 等人^[27]基于土壤呼吸提出的估算模型,即:

$$\ln R_h = 0.22 + 0.87 \times \ln R_s \quad (2)$$

式中, R_s 表示年土壤呼吸速率(kgC/m^2),土壤呼吸估算模型基于 1000 多组样本,且通过 $P < 0.05$ 的显著性检验,因此该方法适用于本研究^[28]。

年土壤呼吸速率 R_s 的估算采用 Raich 等人^[29]提出的土壤呼吸模型,即:

$$R_s = 1.250 \times e^{[b \times T]} \times \left[\frac{P}{4.259 + P} \right] \quad (3)$$

式中, b 为温度敏感性系数($b = \ln Q_{10}/10$); T 为年均气温($^{\circ}\text{C}$); P 为年降水量(cm)。

较为常见的 NEP 精度验证方法有两种:利用野外实测数据进行验证,或是与前人研究结果对比验证。由于京津风沙源治理区范围广,难以开展大范围的 NEP 野外实测,而且实测数据获取时段较难与本研究时段(2000—2020 年)相匹配。基于以上考虑,本研究利用与研究区以及研究时段有所重合的其他研究结果,对 NEP 数据可靠性进行综合评价(图 2)。对于有经纬度坐标点的前人实测数据,本研究利用 ArcGIS 10.8 软件定位至该点并获取与前人研究中相对应年份的 NEP 数据作为验证数据;对于具有行政边界的前人研究数据,本研究获取与前人研究中相应年份的该行政区内 NEP 均值作为验证数据。本研究模拟的 NEP 值与前人研究中的实测数据^[30—31]以及相关研究结果^[32]进行相关性分析、显著性检验,验证结果显示 $R^2 = 0.8531$ (图 2),NEP 模拟结果具有可靠性。

1.3.2 植被固碳能力分级

为进一步分析京津风沙源治理区 NEP 现状,本研究结合前人研究^[28]将 NEP 划分为不同碳源/汇程度: $NEP < 0 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 为碳源区、 $0 < NEP < 100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 为低碳汇区、 $100 \leq NEP < 170 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 为中碳汇区、 $170 \leq NEP < 260 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 为中高碳汇区、 $NEP \geq 260 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 为高碳汇区。

1.3.3 植被固碳能力趋势分析

以一元线性回归分析来表示 2000—2020 年 NEP 的际年变化率,计算研究区多年回归趋势线斜率,反映 NEP 趋势变化^[33]。其中 Slope 为 NEP 回归方程的斜率,若 Slope 值为正,表示随时间变化 NEP 升高,且数值愈大 NEP 增加趋势愈明显;反之,Slope 值为负,则表示随时间变化 NEP 呈下降趋势。其计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (NEP_i \times i) - \sum_{i=1}^n NEP_i \sum_{i=1}^n i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4)$$

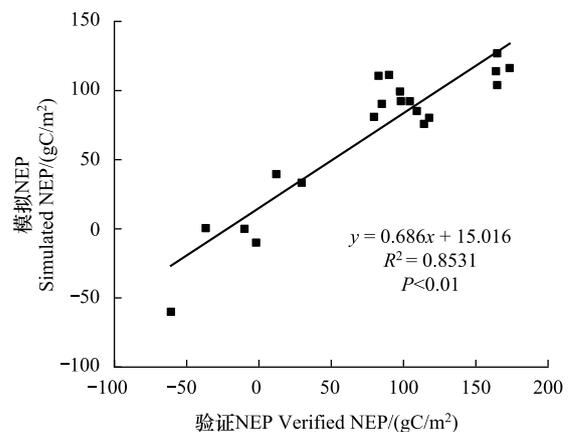


图 2 京津风沙源治理区 NEP 验证

Fig.2 Verification of the NEP in the Beijing Tianjin sand source control zone

NEP:净生态系统生产力 Net ecosystem productivity

式中, n 为研究时段年份长度, 此处 n 为 21, i 代表年序号, NEP_i 为第 i 年的 NEP 值。采用 F 检验对 Slope 进行显著性检验^[34], 根据检验结果将变化趋势分为 5 个等级: 明显增加 (Slope > 0, $P < 0.01$)、轻微增加 (Slope > 0, $0.01 < P < 0.05$)、不显著变化 ($P > 0.05$)、轻微减少 (Slope < 0, $0.01 < P < 0.05$) 以及明显减少 (Slope < 0, $P < 0.01$)。

1.3.4 植被固碳能力稳定性计算及划分

变异系数能够反映数据的离散程度, 从而根据多年来 NEP 数据的离散程度确定其稳定性^[35]。本研究通过计算 NEP 在研究时段内的变异系数, 揭示京津风沙源治理区 NEP 的稳定性分布状况, 变异系数越小, NEP 稳定性越好; 反之, 变异系数越大, NEP 稳定性越差。计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n NEP_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n NEP_i\right)^2 / n}}{n} \times \bar{NEP} \quad (5)$$

式中, CV 为变异系数, \bar{NEP} 为 2000—2020 年 NEP 平均值, n 为研究时段年份长度, 此处 n 为 21。

根据前人研究^[36], 将 CV 划分为以下 5 个等级以代表不同稳定性程度: $CV \leq 0.15$, 稳定性高; $0.15 < CV \leq 0.2$, 稳定性较高; $0.2 < CV \leq 0.25$, 稳定性中等; $0.25 < CV \leq 0.3$, 稳定性较低; $CV > 0.3$, 稳定性低。

1.3.5 地理探测器模型

地理探测器 (Geographical Detector Model, GDM) 是一种统计工具, 通过定量检测变量之间的相关性来探索响应变量的主要因素^[37]。本研究利用地理探测器定量测定影响因素对京津风沙源治理区 NEP 的影响程度, 确定生态工程因素与其他因素的交互作用对四个子治理区 NEP 的影响程度。因素 X 的影响程度可以用 q 值来度量:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

根据因素 X 或 NEP 将研究区域划分为 $h=1, 2, \dots, L$ 层, 即 L 个子区域; N_h 和 N 分别是层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区中 NEP 的方差; q 范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 因素 X 对 NEP 的影响程度越强。除此之外, 我们还利用 GDM 评估因素间的两两交互作用对 NEP 的影响程度, 评估 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对 NEP 的影响程度。评估的方法是首先分别计算 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值, 即 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 并且计算它们交互时的 q 值, 即 $q(X_1 \cap X_2)$, 并对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较 (表 2)。两个因子之间的关系可分为以下几类:

表 2 影响因素间交互作用的类型

Table 2 Types of interaction between the factors

判别依据 Basis for discriminating	交互作用 Interaction	判别依据 Basis for discriminating	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	相互增强		

在进行地理探测前, 所有数据必须使用离散值, 因此必须对因子分级。为最小化每个类别内的平均偏差, 同时最大化每个类别与其他类别的平均偏差来实现不同类别的最佳分组, 利用自然间断点分级法将气候条件和地理背景类型的因素分为 7 组, 将社会经济与生态工程类型的因素分为 8 组^[38]。根据世界土壤数据库中分组将土壤粘粒含量、土壤含水量、土壤有机碳含量分别分成 7、6 和 5 组。利用 ArcGIS 10.8 创建随机点共 2500 个, 以随机点来提取 2000—2020 年 NEP 与各因素值, 将随机点中包含的属性值转移至地理探测器中进行探测。

2 结果分析

2.1 京津风沙源治理区 NEP 时空分析

2.1.1 2020 年京津风沙源治理区 NEP 分布现状分析

2020 年京津风沙源治理区 NEP 均值为 $110.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 碳汇区面积约为 $3.59 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占研究区面积的 78.80%; 碳源区面积约为 $9.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占研究区面积的 21.20%。不同类型碳源/汇面积比例为: 低碳汇区 (25.95%) > 中碳汇区 (22.51%) > 碳源区 (21.20%) > 中高碳汇区 (18.57%) > 高碳汇区 (11.78%)。从空间来看(图 3), 碳源区主要分布在北部干旱草原区域, 面积占比 39.91%, 碳汇区以低碳汇区为主, 面积占比 29.97%, 高碳汇区面积占比仅有 1.39%。浑善达克沙地区低碳汇区面积占比最高, 达到 35.78%, 中低碳汇区次之, 为 25.54%, 碳源区面积占比仅 9.68%。农牧交错带的碳汇区面积占比 99.41%, 其中以中碳汇区为主, 面积占比 40.84%, 其次为中高碳汇区, 面积占比达到 31.76%。南部燕山丘陵山地以高碳汇区为主, 面积占比高达 49.54%, 其次为中高碳汇区, 面积占比 34.51%, 碳源区面积仅占 0.29%。

2.1.2 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 及变化特征分析

2000—2020 年, 京津风沙源治理区 NEP 多年平均值为 $77.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。碳汇区面积约为 $3.35 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总面积的 73.58%; 碳源区面积约为 $1.20 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占总面积的 26.42%。京津风沙源治理区 NEP 空间分布格局呈中间高两边低, 由南部以及中部向两边逐渐减少(图 4)。年均 NEP 高值区分布在京津风沙源治理区的南部及东北部; 年均 NEP 低值区主要分布在研究区广大西部地区及东部地区。

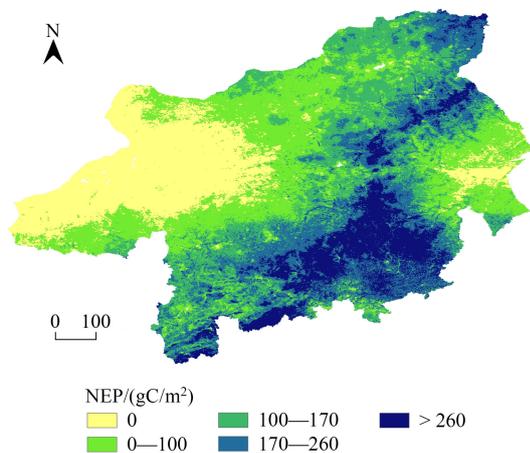


图 3 2020 年京津风沙源治理区 NEP 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area in 2020

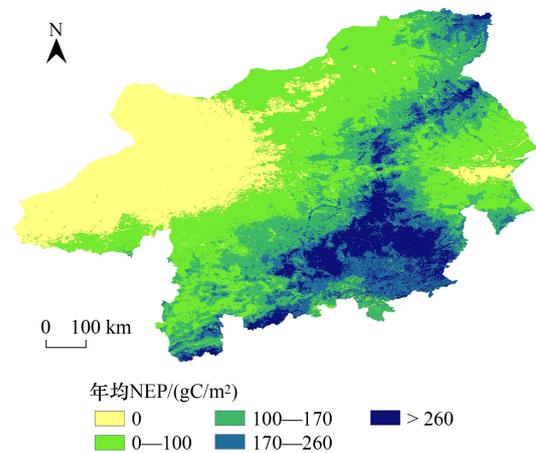


图 4 2000—2020 京津风沙源治理区年均 NEP 空间分布

Fig.4 Annual average NEP spatial distribution in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area from 2000 to 2020

通过京津风沙源治理区 NEP 年均值变化可以看出(图 5), 自 2000 年来, 京津风沙源治理区内 NEP 呈波动上升趋势, 年际变化率为 $4.118 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 在 2012 年达到最大值 $121.34 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 而在 2000 年出现最小值 $9.88 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。以 2011 年为界, NEP 在 2000—2011 年间波动较为剧烈, 分布在 $0—90 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 内, 经过了 2010—2012 年的跃升后, 在 2012—2020 年间较为稳定地分布在 $90—125 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内。

2000—2020 年间, 京津风沙源治理区 NEP 变化趋势具有明显空间异质性, 总体呈增加趋势(图 6 和表 3)。NEP 呈增加趋势的地区占比 74.91%, 且以明显增加为主(占比 55.16%), 明显增加的区域集中在研究区南部, 该区域温度适宜、水源充足, 植被增长迅速, NEP 逐年增加。相比之下, NEP 呈降低趋势的区域稀少且分散, 仅占总面积的 0.15%。NEP 基本不变的区域占 24.94%, 该区域呈斑块状分布在北部干旱草原。

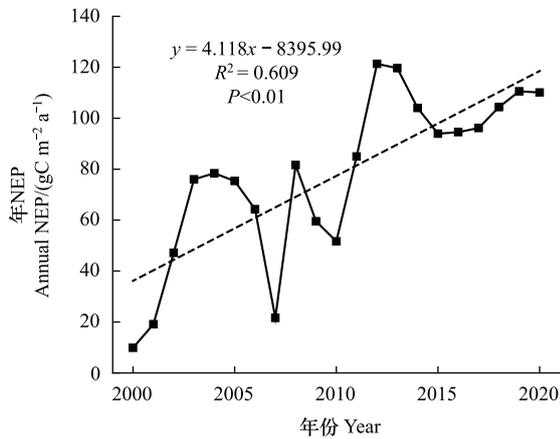


图 5 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 年变化

Fig.5 Annual changes of NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area from 2000 to 2020

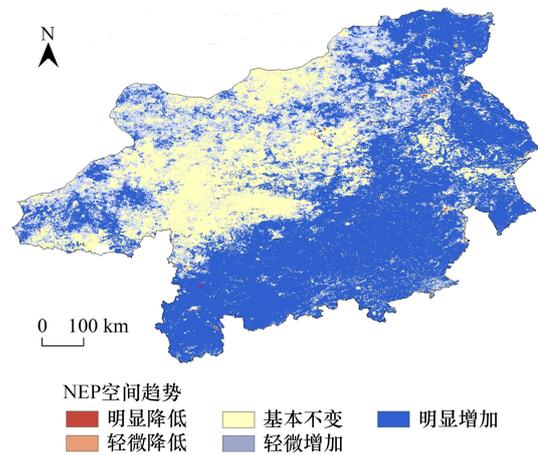


图 6 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 空间趋势图

Fig.6 Spatial Trend of NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area from 2000 to 2020

表 3 2000—2020 年 NEP 空间趋势变化分类面积占比

Table 3 Percentage of NEP spatial trend change classified area from 2000 to 2020

NEP 趋势 Slope of the NEP	面积 Area/km ²	面积占比 Area ratio/%	NEP 趋势 Slope of the NEP	面积 Area/km ²	面积占比 Area ratio/%
明显降低 Significantly reduced	410.22	0.09	轻微增加 Slight increase	90020.5	19.75
轻微降低 Slight decrease	273.48	0.06	明显增加 Significantly increased	251419.28	55.16
基本不变 Basically unchanged	113676.52	24.94			

NEP:净生态系统生产力 Net Ecosystem productivity

2.1.3 2000—2020 年不同生态系统类型 NEP 变化分析

2000—2020 年不同生态系统类型的 NEP 由高到低依次为林地>农田>草地(图 7)。林地作为研究区内 NEP 及其增长潜力最大的生态系统应予以重视,除 2000 年外,林地为中高碳汇区和高碳汇区。草地是京津风沙源治理区最主要的生态系统,总固碳量在 2005 年、2015 年、2020 年远超其他生态系统。另外,草地固碳增加幅度也最大,因此草地在京津风沙源治理区未来总体 NEP 增长中发挥主要作用。

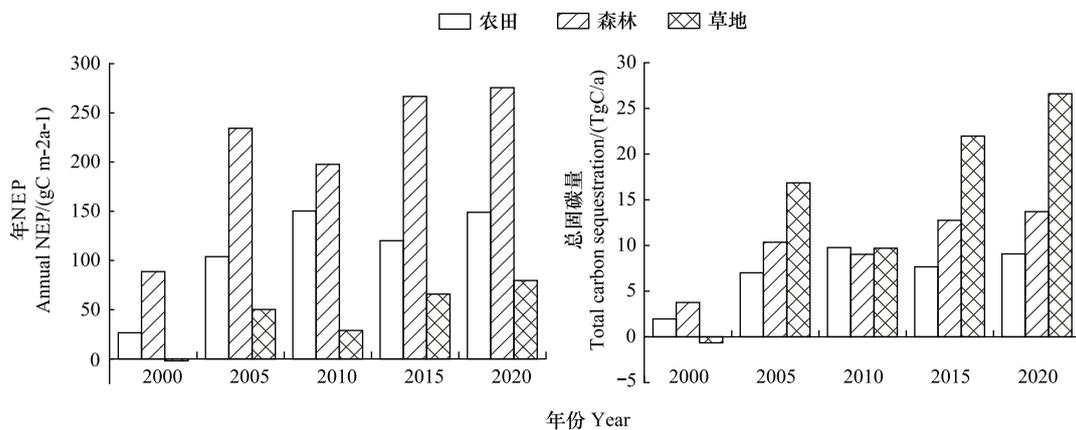


图 7 不同生态系统类型的 NEP 以及总固碳量变化特征

Fig.7 Characteristics of NEP and total carbon sequestration changes in different ecosystem types

2.1.4 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 稳定性分析

2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 整体稳定性低(表 4),不同稳定程度的区域面积占比依次为:稳定性低(53.02%)>稳定性高(28.13%)>稳定性较低(7.41%)>稳定性中等(6.77%)>稳定性较高(4.67%)。研究区 NEP 稳定性较低和稳定性高的区域面积占比较高,NEP 稳定性较低、稳定性较高和稳定性中等的区域面积占比相对较小。

表 4 京津风沙源治理区 2000—2020 年 NEP 稳定性

Table 4 Stability of NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area from 2000 to 2020

稳定性等级 Stability level	面积 Area/km ²	面积占比 Area ratio/%	稳定性等级 Stability level	面积 Area/km ²	面积占比 Area ratio/%
稳定性高 High stability	128216.54	28.13%	稳定性较低 Slightly low stability	33774.78	7.41%
稳定性较高 Slightly high stability	21285.86	4.67%	稳定性低 Low stability	241665.16	53.02%
稳定性中等 Moderate stability	30857.66	6.77%			

从空间分布上看,京津风沙源治理区 NEP 稳定性存在明显差异,总体呈现稳定性由研究区西部和东部地区向中部地区先降低后升高的趋势(图 8)。NEP 稳定性高的区域主要分布在北部干旱草原西部以及农牧交错带东部,结合 NEP 年均分布图(图 4)来看,这些区域主要为碳源区,治理区内碳源区稳定性高。林地分布在 NEP 稳定性较高的地区,表明林地在 21 年间持续且稳定地发挥着碳汇功能。NEP 稳定性中等、较低和低的区域均主要分布在浑善达克沙地区、北部干旱草原东部,该区域 NEP 处于中等水平且其增速较快,因此导致了 NEP 的不稳定。

2.2 京津风沙源治理区 NEP 影响因素分析

2.2.1 各因素对 NEP 的影响程度

通过地理探测器得到京津风沙源治理区 NEP 主要影响因素及其解释力 q 值(表 5),各因素对 NEP 的影响程度不同,具有明显的差异性,解释力 q 值从大到小排序依次为:年降水量(0.615)>人口密度(0.260)>GDP(0.244)>累计造林强度(0.214)>退耕还草强度(0.128)>年均气温(0.123)>高程(0.110)>土壤含水量(0.048)>土壤有机碳密度(0.032)>土壤粘土含量(0.016)。其中,年降水量对 NEP 的影响程度高达 0.615,成为影响该地区 NEP 的主导因子;人口密度、GDP 以及累计造林强度对 NEP 的影响程度大于 0.2,成为主要因子;退耕还草强度、年均气温、高程、土壤含水量、土壤有机碳密度和土壤粘土含量的影响程度较小,为次要驱动因子。整个研究区中的所有影响因素均通过 95%显著性水平检验($P<0.05$)。

2.2.2 因素间两两交互作用对 NEP 的影响

在对单因素进行识别后,本研究又对因素间的交互作用进行了探讨,用以识别不同影响因素之间共同作用是否增加或减弱对植被固碳的解释力,结果表明(表 6),交互作用后因素的影响强度明显提升,表现为双因子增强和非线性增强两种关系,表明各因子对 NEP 影响彼此相互联系并相互协同。植被固碳能力受年降水量与年均气温的交互影响最强,影响力为 0.801,年降水量与各因素的交互作用均在 0.6 以上,进一步说明年降水量是影响京津风沙源治理区植被固碳能力的主导因素。

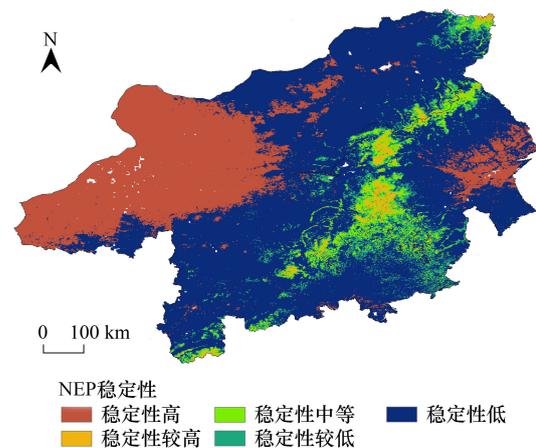


图 8 京津风沙源治理区 2000—2020 年 NEP 稳定性分布图

Fig.8 Stability distribution map of the NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area from 2000 to 2020

表 5 京津风沙源治理区各因素对 NEP 的影响程度

Table 5 Contribution of various factors to NEP

影响因素 Influencing factors	影响程度(q) Influence(q)	排序 Ordination
年降水量 Annual precipitation	0.615	1
年均气温 Annual temperature	0.123	6
土壤粘粒含量 Soil clay	0.016	10
土壤有机碳含量 Soil organic carbon	0.032	9
土壤含水量 Soil moisture	0.048	8
高程 Elevation	0.110	7
GDP	0.244	3
人口密度 Population density	0.260	2
累计造林强度 Cumulative afforestation intensity	0.214	4
退耕还草强度 Intensity of returning farmland to grassland	0.128	5

表 6 京津风沙源治理区影响 NEP 的双因素交互探测结果

Table 6 Interaction detection results of driving factors for spatial differentiation of NEP in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area

影响因素 Factors	年降水量	年均气温	土壤粘粒 含量	土壤有机 碳含量	土壤 含水量	高程	GDP	人口密度	累计造 林强度	退耕还 草强度
年降水量 Annual precipitation	0.615									
年均气温 Annual temperature	0.801 **	0.123								
土壤粘粒含量 Soil clay	0.627 **	0.161 *	0.016							
土壤有机碳含量 Soil organic carbon	0.625 **	0.160 *	0.049 *	0.032						
土壤含水量 Soil moisture	0.636 **	0.216 *	0.161 *	0.095 *	0.048					
高程 Elevation	0.724 **	0.330 *	0.147 *	0.153 *	0.178 *	0.110				
GDP	0.672 **	0.536 *	0.274 *	0.276 **	0.316 *	0.353 **	0.244			
人口密度 Population density	0.688 **	0.613 *	0.301 *	0.297 *	0.321 *	0.405 *	0.319 **	0.260		
累计造林强度 Cumulative afforestation intensity	0.687 **	0.511 *	0.244 *	0.251 *	0.281 *	0.366 *	0.336 **	0.337 **	0.214	
退耕还草强度 Intensity of returning farmland to grassland	0.717 **	0.492 *	0.155 *	0.164 *	0.233 *	0.307 *	0.428 *	0.50 *	0.483 *	0.128

“*”表示非线性增强,“**”表示双因子增强

3 讨论和结论

3.1 讨论

(1) NEP 时空变化分析

2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 区间位于 $0-170 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 而张梅等人^[39]发现在 2000—2015 年京津风沙源治理区 NEP 范围主要在 $-125-125 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 两者在数量级上保持了一致, 产生差异的主要原因是两者的研究时段不一致, 本研究时段(2000—2020 年)相较于文献(2000—2015 年)研究时段更长, 更能科学地反映京津风沙源治理区 NEP 的最新变化情况, 且 2015 年后 NEP 呈升高趋势, 导致本研究 NEP 相对

更高。研究时段 NEP 整体均呈现上升趋势,碳汇功能增强,NEP 多年均值总体呈现中间高两边低,由南部以及中部向两边逐步减少趋势,这与 Zhou 等人^[32]、张梅等人^[39]和戴尔阜等人^[28]研究结果一致。但在部分时段(如 2004—2007 年和 2012—2015 年)NEP 出现较大幅度的下降,可能和该区域干旱事件有关^[40],植被固碳能力随之减弱,因此 NEP 呈下降趋势。研究区南部及中部地区主要生态系统为林地,且该地区水热光条件较好,土壤养分充足,有利于植被生长发育,因此 NEP 较高。而北部干旱草原沙地和浑善达克沙地位于干旱半干旱地区,水分的缺乏不利于植被生长和有机物质积累,并且高温导致植被与土壤呼吸作用增强,加速有机物质分解,因此限制 NEP 的积累。

(2) NEP 影响因素空间分异分析及修复建议

京津风沙源治理区气候复杂、地形地貌多变、人类活动影响差异大,内部不同区域的影响因素也有差异。因此本研究在整体研究基础上,进一步深入分析区域内部影响 NEP 的因素,有助于决策者根据不同区域特征进行分区精准恢复。北部干旱草原年均气温 0—3.5℃,年降水量 150—250 mm,蒸发量 1800—2700 mm,降雨较少且蒸发量大进而影响其固碳能力,因此年降水量($q=0.704$)与年均气温($q=0.67$)是影响北部干旱草原沙化治理区 NEP 的首要因素。该区域植被生长受水热条件限制,生境环境脆弱,以碳源区为主,有必要加强放牧管理以减轻草原压力。浑善达克沙地区域对 NEP 影响最大的因素为年均气温($q=0.393$),高程($q=0.377$)紧随其后,该地区最低处华北平原海拔仅有 50 m,最高处大兴安岭南端海拔 1725 m,气温随海拔起伏而急剧变化,因此年均气温与高程对该区域 NEP 的影响力最明显。干旱半干旱条件极大地限制了浑善达克沙地区域林冠的生长,导致在一期工程结束时林下和行间植被演替还处于初期^[41],魏兴琥等人^[42]指出,极端干旱遏制了胡枝子等草地物种的生长,但对于耐旱的山杏、黄蒿等人工林的影响较小,因此,生态治理过程中要因地制宜地选择适宜该地的人工植被,增加存活率,提升植被固碳水平。在农牧交错地带中对 NEP 影响最大的因素为退耕还草强度($q=0.335$),南部燕山丘陵山地中对 NEP 影响最大的因素为累计造林强度($q=0.275$),这两个区域年降雨量较高且气候较为稳定,有利于林草建设,生态工程对区域 NEP 影响较大。因此在修复措施方面则需进一步规范人类活动,农牧交错带需要强化限制开垦的政策,通过退耕还草措施实现人工绿化,增加植被固碳能力;南部燕山丘陵山地人口密度高,开发建设活动相对明显,加强土地利用管理并且减少人为干扰是增加植被固碳能力的有效途径。

(3) 不确定性分析和未来展望

本研究受数据获取和数据时间尺度的限制,难以实地验证数据准确性,因此参照前人研究结果以保证数据真是可靠。在自然影响因素方面,选取了与植被固碳能力最为相关的气候因子、土壤条件以及高程,但影响植被固碳能力的自然因子还包括大气成分(如 CO₂浓度、氮沉降)、水文条件等因素,在后续的相关研究中可以考虑加入更多自然因子探讨其对植被固碳能力的影响机制。本研究虽然从林草建设的角度分析了生态工程对植被固碳能力的影响,但未能考虑生态工程中的水利项目、灌溉的影响,也未涉及过度放牧、水资源不合理利用等因素,后续可以将生态工程的具体形式进行划分,进一步精准探究生态工程对植被固碳能力的影响。本研究探讨了不同影响因素两两交互作用对植被固碳能力的影响,但实际情况往往更复杂,因此多种因素的综合影响更能为植被固碳能力变化提供科学见解,但地理探测器模型无法对三个及以上的因素做交互探测,未来可以通过引入其他多因素分析法(如层次分析法和主成分分析法),从而对多个因素的交互作用进行分析。

3.2 结论

本论文以京津风沙源治理区为研究区,利用趋势分析、稳定性分析以及空间分析等方法探究了 2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 的空间分布特征及其变化规律,并利用地理探测器定量分析了自然因素与人类活动因素对京津风沙源治理区 NEP 的影响。主要结论如下:

(1) 2020 年,京津风沙源治理区 NEP 均值为 110.09 gC m⁻²a⁻¹,空间分布以碳汇区为主,面积约为 3.591×10⁵ km²,约占研究区总面积的 78.80%。2000—2020 年京津风沙源治理区 NEP 平均值为 77.54 gC m⁻²a⁻¹,年

NEP 均值总体呈增加趋势,年际变化率为 $4.118 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。NEP 呈增加趋势地区占总面积的 74.91%,其中明显增加区占比 55.16%,主要分布研究区南部;NEP 呈降低趋势区域的面积仅占总面积的 0.15%,呈斑块状分布在北部干旱草原区。整个区域 NEP 稳定性较低。林地发挥了较强固碳作用,且其单位 NEP 呈现上升趋势,说明随着生态工程的实施及林地的扩张,未来林地固碳潜力较大。此外,草地作为京津风沙源治理区内面积 70%的重要生态系统,其固碳总量远超其他类型且呈增加趋势,未来仍需加强对草地固碳能力的关注。

(2) 年降水量对 NEP 的影响程度显著大于其他驱动因素,同时年均气温对 NEP 影响程度在各因素中居于前列,说明在研究区的干旱半干旱背景下,气候因素是影响京津风沙源治理区及其子治理区的首要因素。除气候因素外,生态工程因素也占据了重要地位。NEP 受生态工程与自然、社会、经济等要素相互交互的影响,不同因素对京津风沙源治理区 NEP 的影响不是独立的,而是表现为双因子增强或非线性增强。

参考文献 (References):

- [1] 刘晓曼,王超,高吉喜,袁静芳,黄艳,王斌,彭阳. 服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径. 生态学报, 2023, 43(14): 5662-5673.
- [2] Jiao K W, Liu Z H, Wang W J, Yu K L, McGrath M J, Xu W R. Carbon cycle responses to climate change across China's terrestrial ecosystem: sensitivity and driving process. *Science of The Total Environment*, 2024, 915: 170053.
- [3] 刘凤,曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [4] 周广胜,周梦子,周莉,汲玉河. 中国陆地生态系统增汇潜力研究展望. 科学通报, 2022, 67(31): 3625-3632.
- [5] 吴艳艳,吴志峰,余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2535-2544.
- [6] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 49-66.
- [7] 巩杰,张影,钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化. 生态学报, 2017, 37(15): 5121-5128.
- [8] Zhao J F, Liu D S, Cao Y, Zhang L J, Peng H W, Wang K L, Xie H F, Wang C Z. An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China. *The Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152480.
- [9] 周立华,刘洋. 中国生态建设回顾与展望. 生态学报, 2021, 41(8): 3306-3314.
- [10] 孔凡婓,应凌霄,文雯,梁梦茵. 基于国土空间生态修复的固碳增汇探讨. 中国国土资源经济, 2021, 34(12): 70-76.
- [11] 邵全琴,刘树超,宁佳,刘国波,杨帆,张雄一,牛丽楠,黄海波,樊江文,刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [12] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [13] 张逸如,刘晓彤,高文强,李海奎. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [14] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [15] 张楨祺,蔡惠文,张平平,王泽琳,李婷婷. 基于 GEE 遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 231-242.
- [16] 鲁绍伟,李少宁,刘逸菲,徐晓天,赵娜. 北京市退耕还林生态效益评估. 生态学报, 2021, 41(15): 6170-6181.
- [17] 蔡丽莎,陈先刚,郭颖,殷瑶. 贵州省退耕还林工程碳汇潜力预测. 浙江林学院学报, 2009, 26(5): 722-728.
- [18] 王艳芳,刘领,悦飞雪,李冬,上官周平. 退耕还林工程对河南省森林地上碳储量的影响. 浙江农林大学学报, 2019, 36(3): 507-514.
- [19] Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J G, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Lu F, Wang X K, Daily G C, Ouyang Z Y. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(7): 1601-1606.
- [20] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *The Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 967-980.
- [21] 朱文博,张静静,崔耀平,郑辉,朱连奇. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [22] 徐勇,黄雯婷,郭振东,郑志威,李欣怡,盘钰春,戴强玉. 2000—2020 年我国西南地区植被 NEP 时空变化及其驱动因素的相对贡献. 环境科学研究, 2023, 36(3): 557-570.

- [23] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. *生态学报*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [25] Zhang D J, Jia Q Q, Xu X, Yao S B, Chen H B, Hou X H, Zhang J T, Jin G. Assessing the coordination of ecological and agricultural goals during ecological restoration efforts: a case study of Wuqi County, Northwest China. *Land Use Policy*, 2019, 82: 550-562.
- [26] 曹云, 张称意, 孙应龙, 刘昌义, 胡琦, 赵子健, 王晓晨, 潘学标, 王世坤. 2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析. *生态学报*, 2023, 43(9): 3488-3499.
- [27] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [28] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 赵东升. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系. *地理学报*, 2016, 71(1): 21-34.
- [29] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [30] 李润东, 范雅倩, 冯沛, 宋泽, 李鑫豪, 闫惠娟, 马莉, 查天山. 北京松山天然落叶阔叶林生态系统净碳交换特征及其影响因子. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3621-3630.
- [31] Sui X H, Zhou G S. Carbon dynamics of temperate grassland ecosystems in China from 1951 to 2007: an analysis with a process-based biogeochemistry model. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(2): 521-533.
- [32] Zhou W, Yang H, Zhou L, Chen Y Z, Huang L, Ju W M. Dynamics of grassland carbon sequestration and its coupling relation with hydrothermal factor of Inner Mongolia. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 1-11.
- [33] 袁换欢, 王智, 徐网谷, 游广永, 张建亮. 林草交错区植被动态变化及其影响因子——以中国东北大兴安岭为例. *生态学报*, 2022, 42(18): 7321-7335.
- [34] 王思, 张路路, 林伟彪, 黄秋森, 宋亦心, 叶脉. 基于 MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究. *生态学报*, 2022, 42(6): 2149-2163.
- [35] Gu Z N, Zhang Z, Yang J H, et al. Quantifying the influences of driving factors on vegetation EVI changes using structural equation model: A case study in Anhui Province, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4203.
- [36] 元志辉, 池勇峰, 雷军, 包刚, 包玉海, 萨楚拉, 咏梅. 2000—2013 年浑善达克沙地植被净初级生产力变化研究. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 185-199.
- [37] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [38] Dong Y, Yin D Q, Li X, Huang J X, Su W, Li X C, Wang H S. Spatial-temporal evolution of vegetation NDVI in association with climatic, environmental and anthropogenic factors in the Loess Plateau, China during 2000-2015: quantitative analysis based on geographical detector model. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4380.
- [39] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 解宪丽, 朱振宇, 汪煜. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 69-74.
- [40] Wu Z T, Wu J J, He B, Liu J H, Wang Q F, Zhang H, Liu Y. Drought offset ecological restoration program-induced increase in vegetation activity in the Beijing-Tianjin Sand Source Region, China. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 12108-12117.
- [41] 刘拓, 李忠平. 京津风沙源治理工程十年建设成效分析. 北京: 中国林业出版社, 2010: 37-91.
- [42] 魏兴琥, 雷俐, 邹学勇, 严平, 张春来. 京津风沙源浑善达克沙地治理区退耕还林地的植被变化. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 604-612.