

DOI: 10.20103/j.stxb.202304270886

赵恒谦, 刘轩琦, 刘 翥, 付含聪, 张宇娇, 杜守航, 蒋金豹, 郭伟, 杨姿涵. 京津风沙源区 NPP 时空变化及其对治理工程实施的响应. 生态学报, 2024, 44(6): 2406–2419.

Zhao H Q, Liu X Q, Liu G, Fu H C, Zhang Y J, Du S H, Jiang J B, Guo W, Yang Z H. Spatio-temporal variation of Net Primary Productivity in the Beijing-Tianjin sandstorm source area and its response to the implementation of control projects. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2406–2419.

京津风沙源区 NPP 时空变化及其对治理工程实施的响应

赵恒谦^{1,2,*}, 刘轩琦¹, 刘 翥¹, 付含聪¹, 张宇娇¹, 杜守航¹, 蒋金豹¹, 郭 伟¹, 杨姿涵¹

1 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2 河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心, 秦皇岛 066000

摘要: 利用遥感大数据对生态治理工程区域的净初级生产力和固碳能力进行长期动态监测可以实现对治理工程的实施效果的评价, 同时为区域“碳中和”目标的实现及可持续发展提供有力支撑。利用 Google Earth Engine (GEE) 云计算平台, 基于改进的 CASA 模型对京津风沙源治理工程区域的 NPP 进行计算。运用 Sen 斜率分析和 MK 趋势分析方法对 2001—2020 年间的 NPP 进行时空变化分析, 并分析 NPP 对京津风沙源治理工程实施的响应。结果表明: 1) 在京津风沙源工程治理期间, 京津风沙源区 NPP 总体呈波动上升趋势, 平均增速为 $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其中极显著增加区域占 38.03%, 说明京津风沙源治理工程对我国“碳中和”任务起到了积极作用, 增加了区域的固碳能力; 2) 空间尺度上, 京津风沙源区 NPP 和固碳量空间异质性较大, 空间分布上主要呈现东部高, 西部低的特点, 其中, 暖温带落叶阔叶林区域最高, 温带荒漠区域最低; 3) 治理工程的实施所带来的 NPP 增长的速度在不同的区域并不一致, 2001—2020 年的 NPP 增速京津冀地区 ($4.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 山西地区 ($4.52 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 陕西地区 ($3.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 内蒙古地区 ($1.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 4) 生态工程实施所带来的生态环境的改善总体呈现先慢后快的特点, 绝大部分区域后十年间的变化速率都显著大于前十年, 而在生态环境较为恶劣、荒漠区域广布的内蒙古地区, 生态环境的改善则具有一定的滞后性, 2001—2010 年 NPP 增速仅为 $0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 直到 2011 年, NPP 才开始有较为明显的增长, 2011—2020 年 NPP 增速为 $1.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。风沙源治理工程需要长期坚持, 才能取得更明显的成效。

关键词: 京津风沙源治理工程; Google Earth Engine 云平台; CASA 模型; 植被净初级生产力; 固碳能力; 时空变化

Spatio-temporal variation of Net Primary Productivity in the Beijing-Tianjin sandstorm source area and its response to the implementation of control projects

ZHAO Hengqian^{1,2,*}, LIU Xuanqi¹, LIU Ge¹, FU Hancong¹, ZHANG Yujiao¹, DU Shouhang¹, JIANG Jinbao¹, GUO Wei¹, YANG Zihan¹

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2 Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China

Abstract: Long-term dynamic monitoring of the Net Primary Productivity (NPP) and carbon sequestration capacity of the ecological management project area using remote sensing data can evaluate the implementation effect of the management project and provide strong support for the realization of the carbon neutrality goal and sustainable development of the area. In this paper, we used Google Earth Engine (GEE) platform to calculate the NPP of the Beijing-Tianjin sandstorm-control project area based on the improved CASA model. The spatial and temporal changes of NPP during 2001—2020 were

基金项目: 国家自然科学基金(41930650); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022JCCXDC01); 河北省海洋岸线生态修复与智慧海洋监测工程研究中心开放基金课题(HBMESO2305)

收稿日期: 2023-04-27; 网络出版日期: 2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaohq@cumt.edu.cn

analyzed using Sen slope analysis and MK trend analysis, and the response of NPP to the implementation of the Beijing-Tianjin sandstorm-control project was analyzed. The results showed that: 1) during the period of the Beijing-Tianjin sandstorm-control project, the NPP in the Beijing-Tianjin sandstorm source area presented an overall fluctuating upward trend with an average growth rate of $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, among which 38.03% was highly significant increase, indicating that the Beijing-Tianjin sandstorm-control project has played a positive role in China's carbon neutral task and increased the carbon sequestration capacity of the area; 2) On the spatial scale, the NPP and carbon sequestration in the Beijing-Tianjin sandstorm source area were spatially heterogeneous, and the spatial distribution was mainly characterized by high in the east and low in the west, among which the warm temperate deciduous broad-leaved forest region was the highest, and the temperate desert region was the lowest; 3) The rate of NPP growth brought by the implementation of the control project was not consistent in different regions, and the rate of NPP growth from 2001 to 2020 in Beijing-Tianjin-Hebei region ($4.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > Shanxi region ($4.52 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > Shaanxi region ($3.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > Inner Mongolia region ($1.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 4) The improvement of the ecological environment brought about by the implementation of ecological projects was generally characterized by slow and then fast changes, with the rate of change in the latter decade being significantly greater than that in the first decade in most regions. In Inner Mongolia, where the ecological environment is relatively harsh and the desert area is widely spread, the ecological environment improvement had a certain lag, with the growth rate of NPP only $0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ from 2001 to 2010, and only in 2011 did the NPP start to increase more significantly, with a growth rate of $1.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ from 2011 to 2020. Therefore, the ecological project needs long-term persistence to achieve more obvious results.

Key Words: Beijing-Tianjin sandstorm-control project; Google Earth Engine; CASA model; NPP; carbon sequestration capacity; spatio-temporal variation

陆地生态系统通过光合作用“吸入”二氧化碳(CO_2),并通过呼吸作用将碳(C)释放到大气中,因此在全球碳循环和地球气候中发挥重要作用^[1-2]。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上所累积的有机物的数量,是光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸部分后的剩余部分^[3]。估算净初级生产力(NPP)及其年际变化对于理解生物圈与大气之间的反馈关系至关重要^[4-6]。在过去的几十年里,陆地碳循环受到了研究界的极大关注。遥感可以定量估算生态系统碳通量和碳储量,因此已被广泛用于研究陆地碳循环^[7]和监测全球变化对碳循环的影响^[8]以及对气候的反馈^[9]。

NPP 空间分布格局可直观反映区域生态系统状况的空间差异,但容易受到气候变化、土地利用以及人为活动的影响。近年来遥感与地理信息技术的快速发展,极大推动了长时间序列 NPP 的动态监测研究^[10-13]。近年来,对于 NPP 监测手段也由样地实测转向遥感模拟,应用较多的模型有 Thornthwaite Memorial^[14]、BIOME-BGC^[15]、CASA^[16]等,其中,光能利用率模型(CASA)综合考虑不同自然因素对植被 NPP 影响,较适用于全球、国家、省域等宏观尺度^[17]。同时,随着 Google Earth Engine 云平台的出现与发展,有越来越多的学者利用 GEE 云平台的优势对 NPP 或其他参量进行长时间序列的研究分析^[18-20]。但是,目前研究多集中在某一行政区或地理区域,应用于生态工程区生态恢复成效监测的案例较少。

京津风沙源治理工程是为改善和优化京津及周边地区生态环境状况、减轻风沙危害而启动实施的一项生态工程。京津风沙源治理区作为我国北方地区重要的生态屏障、国家生态修复环境改善示范区和京津冀协同生态环境治理关键地带,凸显了京津风沙源治理工程的重要性。在过去 20 多年间,先后启动了京津风沙源治理一期(2001—2010 年)和二期工程(2013—2022 年),为了进一步改善京津地区生态环境,解决沙尘策源区风沙危害严重、人工固沙植被退化等问题。其中“二期工程规划”包含 7 大任务,包括加强林草植被保护和建设、提高现有植被质量和覆盖率、加强重点区域沙化土地治理、遏制局部区域流沙侵蚀、稳步推进易地搬迁、降低区域生态压力等^[21]。

同时,对京津风沙源治理区的生态成效或综合效益的研究表明,工程区沙化土地得到一定程度的治理与

修复,生态环境总体有所好转^[22–24]。生态工程具有建设周期长、投资规模大、影响范围广的特点,而生态系统恢复又是一个漫长的演替过程,因此生态工程区的生态系统状况评估与生态恢复成效监测非常重要。有众多学者曾针对此研究区进行过生态监测研究,例如植被覆盖变化特征分析^[25];植被覆盖度变化分析^[26–27];生态修复措施对草地群落及生物量的影响分析^[28]。但是以上研究注重京津风沙源区植被覆盖度的变化和生态系统演化趋势,而对风沙源区植被的生产力及固碳能力的评估研究较少。

因此,本研究基于 Google Earth Engine (GEE) 遥感云平台,利用京津风沙源区域的遥感数据、气象数据、土地利用类型数据等,构建光能利用率 CASA 模型,计算研究区 2001—2020 年的 NPP,并利用 Sen 斜率分析方法和 MK 趋势分析法对 NPP 进行时空变化分析,并计算研究区的固碳能力,从生态系统碳汇角度出发评估京津风沙源治理工程的治理成效。

1 研究区域概况与数据源

1.1 研究区域概况

本研究研究区域包括京津风沙源二期工程的所有建设范围,西起内蒙古乌拉特后旗,东至内蒙古阿鲁科尔沁旗,南起陕西定边县,北至内蒙古东乌珠穆沁旗,东经 105°12′—121°01′,北纬 36°49′—46°40′,包括北京、天津、河北、山西、陕西及内蒙古 6 省(区、市)的 138 个县(旗、市、区),总面积为 $70.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,沙化土地广布,面积大约 $20.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。气候属于干旱半干旱气候,地形总体呈现东南低,西北高的特点。与“一期”工程相比,工程区范围由北京、天津、河北、山西、内蒙古 5 个省(区、市)的 75 个县(旗、市、区)扩大至包括陕西在内 6 个省(区、市)的 138 个县(旗、市、区)(图 1、图 2)。

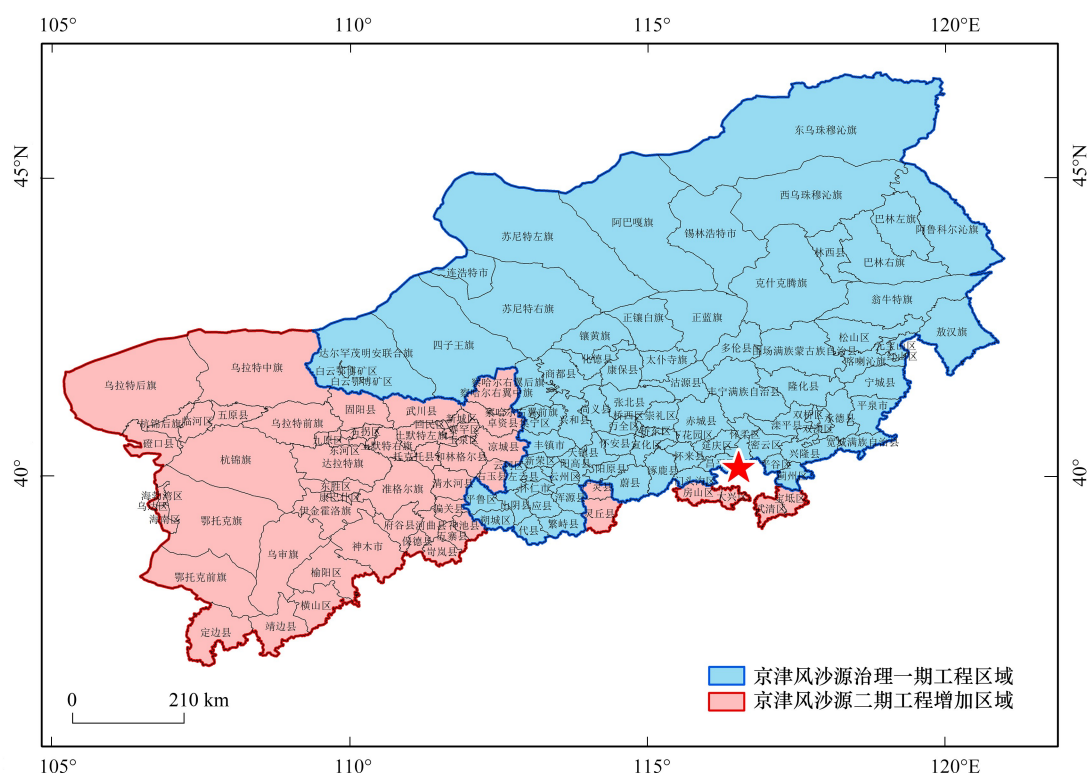


图 1 京津风沙源工程区

Fig.1 Beijing-Tianjin sandstorm-control project area

1.2 数据来源及处理

GEE 是由 Google 提供的基于云计算的行星级地理空间分析平台,存储着海量公开的地理空间数据集。

具有强大的计算力,为较大时空尺度的研究提供便捷。本文所采用的数据均基于 GEE 平台获取。土地利用、气温、降水、光合有效辐射(PAR)、光合有效辐射分量(FPAR)等数据情况如表 1 所示。本研究所使用的土地利用覆盖数据集为 IGBP 分类系统,共有 17 个土地覆盖类型,包括 11 个自然植被类型,3 个人为改变的类型,以及 3 个非植被类型。MODIS FPAR 数据集是具有高时间分辨率、高精度、高质量的数据集产品,能保证在较大的区域内数据集参数的综合质量高于用遥感影像间接计算的参数质量。为了保证不同数据源之间的几何匹配精度,本文在 GEE 平台中对研究区数据进行预处理,利用 Reproject 算法将投影转化为 EPSG:4326,并设置 Scale 为 500。其目的是将影像转换到 WGS 1984 地理坐标系,并采用最邻近插值法对影像进行重采样至 500m 空间分辨率。

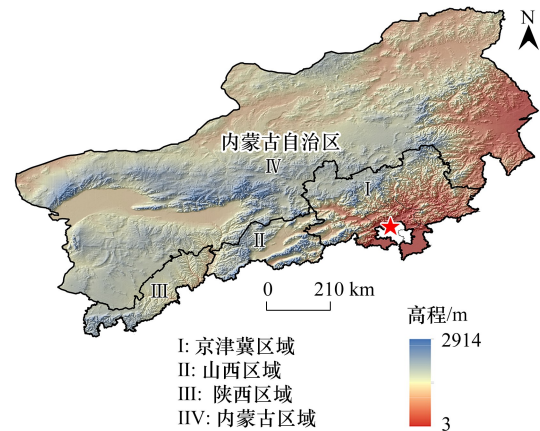


图 2 研究区分省市区域示意图

Fig.2 Schematic representation of the provincial and municipal areas of the study area

表 1 GEE 云平台选取数据情况
Table 1 GEE platform selection of data

数据 Data	所选产品 Selected product	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率/m Spatial resolution
土地利用数据 Land use data	MCD12Q1 V6.1 IGBP 分类系统	1a	500
PAR 数据 PAR data	MCD18C2 V6.1	3h	500
FPAR 数据 FPAR data	MOD15A2H V6.1	8d	500
气象数据 Meteorological data	ECMWF ERA5-Land	30d	11132
蒸散量数据 Evapotranspiration data	MOD16A2 V6	8d	500
遥感影像 Remote sensing image	MOD09A1 V6.1	8d	500

PAR:光合有效辐射 Photosynthetically active radiation; FPAR:光合有效辐射分量 Fraction of absorbed photosynthetically active radiation

2 研究方法

2.1 CASA 模型反演 NPP

CASA 模型强调气候条件和植被本身的光能利用效率,在估算陆地生态系统 NPP 中得到广泛的应用^[29-30]。计算公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(MJ/m^2), $\varepsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率(gC/MJ)。

(1) APAR 计算

本文对原模型中光合有效辐射 APAR 的计算方式进行了改善,原模型太阳总辐射 SOL 计算较为复杂且在 GEE 中不好实现,因此在本研究中,使用 PAR 和 FPAR 计算得到,公式如下:

$$APAR(x, t) = PAR(x, t) \times FPAR(x, t) \quad (2)$$

式中, $PAR(x, t)$ 表示 t 月在像元 x 处的总光合有效辐射(MJ/m^2); $FPAR(x, t)$ 表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例。

(2) 实际光能利用率计算

实际光能利用率 ε 主要受温度和水分的胁迫作用,计算公式为:

$$\varepsilon(x,t) = W_s \times T_{\varepsilon1} \times T_{\varepsilon2} \times \varepsilon_{\max}$$
 (3)

其中:

$$T_{\varepsilon1} = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times (T_{\text{opt}}(x))^2$$
 (4)

$$T_{\varepsilon2} = \left\{ \frac{C}{[1 + e^{(0.2 \times (T_{\text{opt}} - 10 - T))}]} \right\} \times \left\{ \frac{1}{[1 + e^{(0.3 \times (-T_{\text{opt}} - 10 + T))}]} \right\}$$
 (5)

式中, $T_{\varepsilon1}$ 和 $T_{\varepsilon2}$ 分别为低温和高温胁迫因子。 $T_{\text{opt}}(x)$ 表示植被年内 NDVI 达到最大时当月的平均气温(℃), 当 $T(x,t) < 10^\circ\text{C}$ 时, $T_{\text{opt}}(x)$ 取值为 0。C 是常数, 在本研究中取 1.1814。

$$W_s = 0.5 + 0.5 \times \frac{\text{EET}}{\text{EEP}}$$
 (6)

式中, W_s 为水分胁迫因子, 反映水分条件的影响。EET 表示区域实际蒸散量, EEP 表示区域潜在蒸散量。

$\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下最大光能利用率(gC/MJ), 取值因植被类型而异。本文参考之前的研究^[31], 对原模型中的 $\varepsilon_{\max}$ 统一为 0.389gC/MJ 进行了调整, 如表 2 所示。

表 2 不同土地覆盖类型的最大光能利用率

Table 2 Maximum light energy utilization for different land cover types

土地覆盖类型 Land cover type	最大光能利用率 Maximum utilization of light energy/(gC/MJ)	土地覆盖类型 Land cover type	最大光能利用率 Maximum utilization of light energy/(gC/MJ)
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forests	0.389	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests	0.692
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forests	0.985	灌木 Shrublands	0.429
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forests	0.485	其他 Other	0.542

2.2 变化趋势分析

Sen 斜率是地学领域较为成熟的一种统计方法, 主要用于分析各要素的变化趋势和幅度。该方法以样本在不同长度的变化率构造秩序列, 基于一定显著性水平进行统计量检验, 并以斜率的中值大小判断时间序列变化趋势及幅度。Sen 斜率能降低或避免数据缺失及异常对统计结果的影响, 公式为:

$$\text{Sen}_{ij} = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right], \forall j > i$$
 (7)

式中, Sen_{ij} 为 Sen 斜率; x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 时刻的序列值, $1 < i < j < n$; n 为序列长度。

Mann-Kendall 检验是一种非参数检验法, 其不需要测量值服从正态分布, 不受缺失值和异常值的影响, 适用于长时间序列数据的趋势显著检验, 目前已被广泛应用于气象、水文、植被等研究中^[32-33]。其计算方法如下:

假定 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为时间序列变量, 检验的统计量 S 计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f(x_j - x_i)$$
 (8)

$$f(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$
 (9)

使用检验统计量 Z 进行趋势检验, 计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases}$$
 (10)

式中, S 服从正态分布, $\text{Var}(S)$ 为方差。

本文给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则临界值为 ± 1.96 , 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。趋势显著性的判断方法如表 3。

表 3 Mann-Kendall 检验趋势类别
Table 3 Mann-Kendall test for trend categories

Sen_{ij}	Z	趋势类别 Trend category	趋势特征 Trend feature	Sen_{ij}	Z	趋势类别 Trend category	趋势特征 Trend feature
$\text{Sen}_{ij} > 0$	$2.58 < Z$	4	极显著增加	$\text{Sen}_{ij} < 0$	$Z \leq 1.65$	-1	不显著减少
	$1.96 < Z \leq 2.58$	3	显著增加		$1.65 < Z \leq 1.96$	-2	微显著减少
	$1.65 < Z \leq 1.96$	2	微显著增加		$1.96 < Z \leq 2.58$	-3	显著减少
	$Z \leq 1.65$	1	不显著增加		$2.58 < Z$	-4	极显著减少
$\text{Sen}_{ij} = 0$	$Z \in R$	0	无变化				

2.3 固碳能力估算

固碳功能是生态系统吸收大气中的二氧化碳合成有机质, 将碳固定在植物或土壤中, 降低大气中二氧化碳浓度, 减缓温室效应的功能。以固碳量作为生态系统固碳功能的评估指标, 由净初级生产力 (NPP) 减去异养呼吸 (即土壤呼吸) 消耗得到。

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_c} \times \text{NEP} \times A \quad (11)$$

$$\text{NEP} = \text{NPP} - \text{RS} \quad (12)$$

$$\text{RS} = 0.22 \times [\exp(0.0913T) + \ln(0.3145R + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (13)$$

式中, Q_{CO_2} 为固碳量, A 为面积, $\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_c}$ 为 C 转换为 CO_2 的系数, 即 44/12, NEP 为净生态系统生产力, RS 为土壤呼吸消耗碳量 ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$), T 为月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), R 为月累计降水量 (mm)。

3 结果

3.1 时间变化分析

京津风沙源治理二期工程区 2001 年—2020 年间 NPP 年内及年际变化趋势如图 3 所示, 由图 3 看出, NPP 的年内变化有明显的季节变化趋势, 最大值发生在 7—8 月, 平均 NPP 为 $35.82 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$, 最大可达 $44.05 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$ (2013 年 7 月), 最小值发生在 12 月—次年 1 月, 平均 NPP 仅为 $0.08 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$, NPP 多年月均值为 $11.16 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$ 。

就年际特征来看, 京津风沙源治理二期工程区 2001 年—2020 年 NPP 二十年的平均值为 $133.93 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 2019 年最大为 $160.96 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 2001 年最小为 $102.00 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。其中前十年 (2001—2010 年) NPP 年平均值为 $121.85 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 后十年 (2011—2020 年) NPP 年平均值为 $146.02 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。对于一期工程区域, 月 NPP 值比二期工程区域略大, 而二期工程增加区域的月 NPP 值比二期工程区略小。总体上看, 在 2001—2020 年里, 由于京津风沙源治理工程的实施, 无论是一期、二期工程区域还是二期增加的工程区域内的 NPP 总体都呈现增加趋势。

此外, 由于不同省份地区先天地理条件不同, 导致不同省份地区的年 NPP 值有显著差异 (图 4), 其中二期治理工程区域中京津冀地区的 NPP 最大, 2001—2020 年平均年 NPP 为 $267.8429 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 其中, 最大月 (7—8 月) 平均 NPP 可达 $67.72 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$, 山西其次, 平均年 NPP 为 $168.57 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最大月平均 NPP 为 $46.17 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$, 内蒙古和陕西最小, 平均年 NPP 分别为 $110.10 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $112.19 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最大月平均 NPP 分别为 $30.19 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$ 和 $27.49 \text{ gC m}^{-2} \text{month}^{-1}$ 。

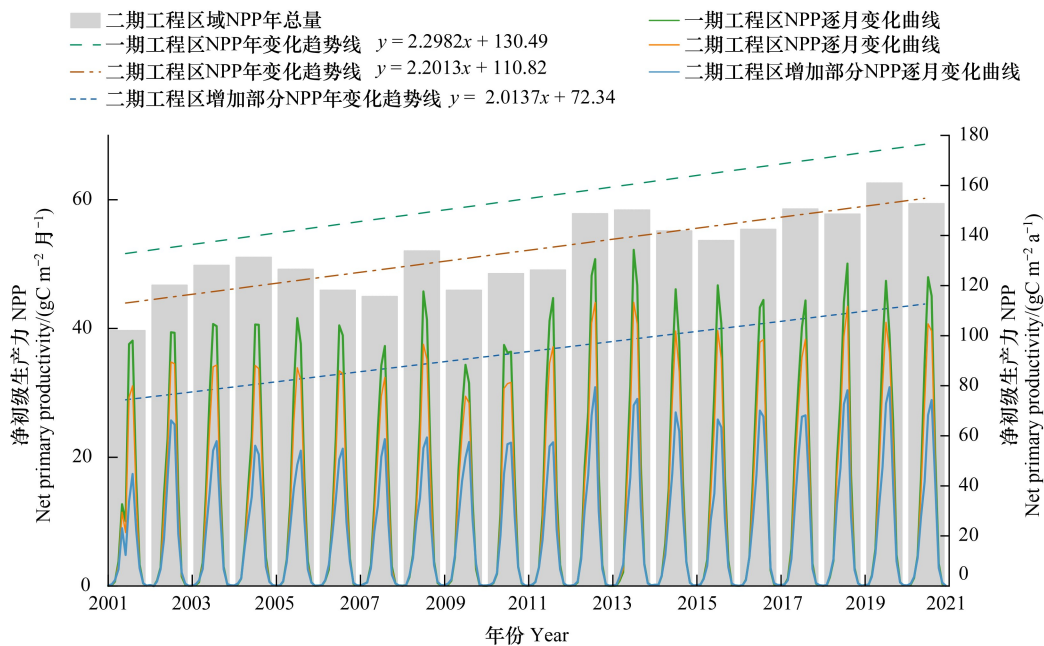


图3 2001—2020 年研究区 NPP 逐月变化及趋势图

Fig.3 Monthly changes and trends of NPP in the study area from 2001 to 2020

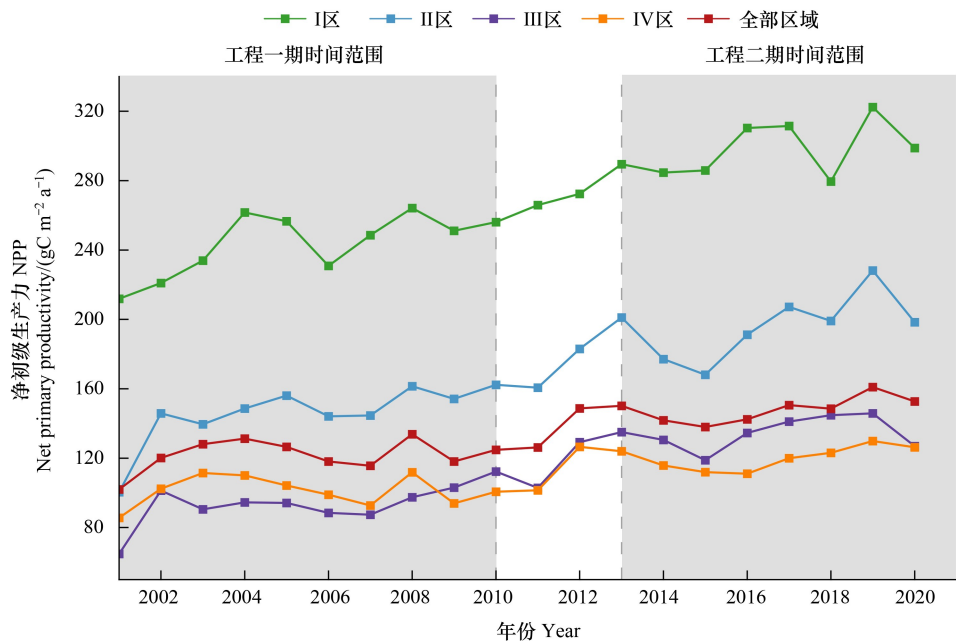


图4 2001—2020 年 NPP 年际变化

Fig.4 Interannual changes in NPP from 2001 to 2020

I 区为京津冀区域, II 区为山西区域, III 区为陕西区域, IV 区为内蒙古区域

3.2 空间变化分析

3.2.1 NPP 空间分布特征分析

京津风沙源治理二期工程区 2020 年 NPP 分布情况如图 5 所示。由图可以看出,京津风沙源治理二期工程区 2020 年 NPP 平均值大多分布在 50—450 gC m⁻² a⁻¹之间,空间分布上主要呈现东南部高,西北部低的特

点。其中 NPP 高值区主要分布在东南部京津冀区域,大兴安岭山脉南部地区,以及研究区西部内蒙古河套平原,这些区域的水热条件较好,植被覆盖度较高,此外,由于黄河的灌溉作用,研究区西部内蒙古河套平原 NPP 明显高于其周边地区。NPP 低值则主要分布在区域西北部,包括陕西北部毛乌素沙漠,库布齐沙漠,浑善达克沙地与科尔沁沙地,这些地区沙化土地广布,植被覆盖度较低,治理难度大,气候干旱少雨,水分不足,对于这些地方的生态环境改善具有较大的挑战。

对于“二期”工程治理区中的 5 个建设区来说,乌兰察布高原退化荒漠草原治理区的 NPP 最低,鄂尔多斯高原沙化土地治理区,浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区,锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区的 NPP 较低,坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区的 NPP 最高。

3.2.2 NPP 变化速率及变化趋势空间分布特征分析

京津风沙源治理二期工程区 2001—2020 年 NPP 的变化速率空间分布图如图 6 所示,NPP 变化速率整体呈现东南高、西北低的分布特征。由图可以看出,除了京津风沙源治理二期工程区的内蒙古地区中部及北部偏东的地区变化较慢,且有一定程度的负增长之外,大部分区域的 NPP 变化较快。二期治理工程区域平均 NPP 变化速率为 $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

京津风沙源治理二期工程区 2001—2020 年 NPP 的变化趋势空间分布图如图 7 所示,NPP 变化趋势以极显著增加和不显著增加为主,分别占二期工程区总面积的 38.03% 和 34.59%,有减少趋势的地方面积占 3.93%,其中不显著减少占 3.34%。NPP 变化趋势整体呈现南部极显著增加,北部不显著增加的特征。由图可以看出,内蒙古地区中部及东部的地区有一定程度的不显著减少与微显著减少,陕西、山西、京津冀地区均为显著与极显著增加。

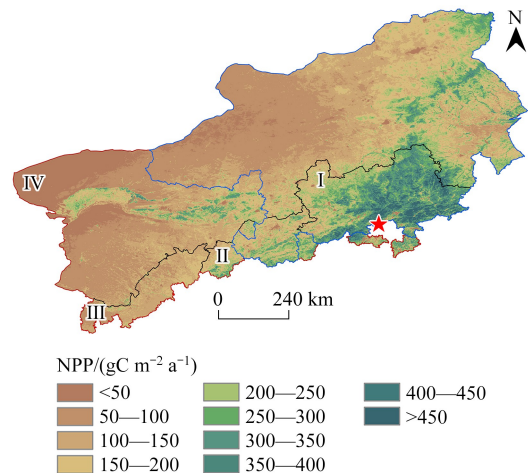


图 5 2020 年 NPP 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of NPP in 2020

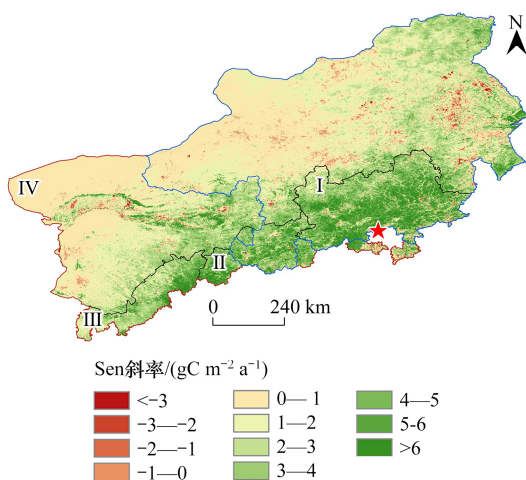


图 6 2001—2020 年 NPP 变化速率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the rate of change of NPP from 2001 to 2020

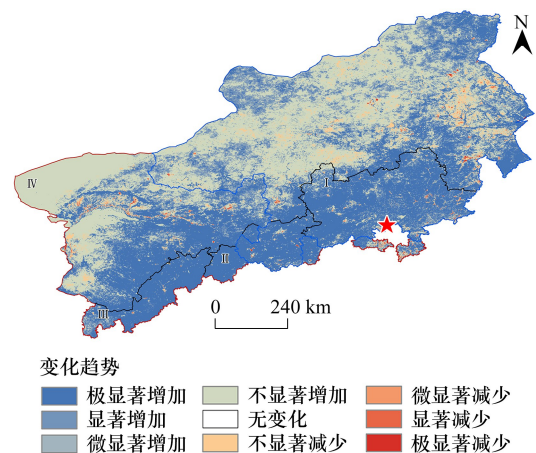


图 7 2001—2020 年 NPP 变化趋势空间分布

Fig.7 Spatial distribution of NPP trends from 2001 to 2020

由于二期工程区内涵盖多个省级行政区,各个行政区所实施的治理方案不相同,因此导致每个行政区域的 NPP 变化速率也有显著差异,如图 8 所示。对于京津冀和山西地区,本身生态环境较好,治理难度较小,变化速率快,20 年间变化速率为 $4.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而内蒙古地区范围广,且本身生态环境恶劣,治理难度大,变化速率较慢,20 年间变化速率仅为 $1.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

通过对一期工程区域、二期工程区域以及二期相比一期增加的区域的 NPP 变化速率进行对比分析,发现一期工程区域在 20 年内的变化速率要略大于二期工程区域以及二期工程增加区域,但差异不大,三个区域 NPP 变化速率分别为 $2.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

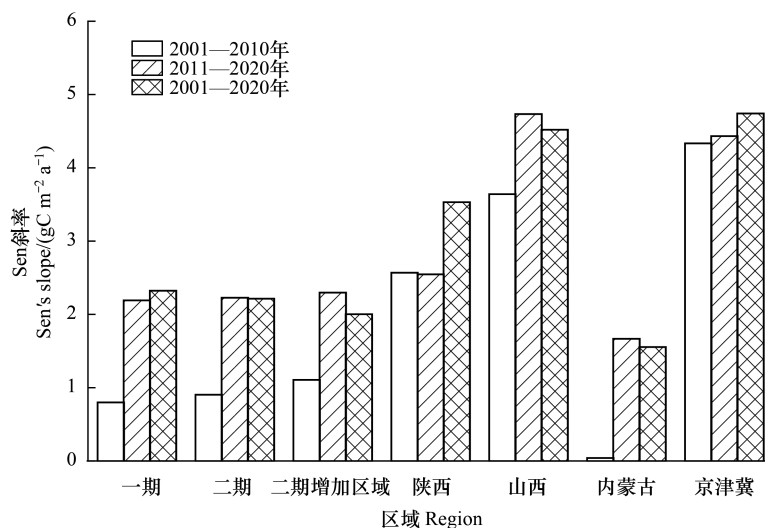


图 8 不同区域、不同时间段内 NPP 变化速率

Fig.8 NPP change rate in different regions and different time periods

3.3 NPP 对京津风沙源治理工程实施的响应

研究发现,京津风沙源治理工程的实施和 NPP 的变化并不同步(图 3、图 4)。即使是在一期工程开始实施前十年间,一期工程区域的年 NPP 值也没有特别明显的增加。而在 2011 年左右,年 NPP 值开始有了比较明显的增加。这说明了生态环境的改善具有滞后性。

根据《京津风沙源治理工程规划(2001—2010 年)》和《京津风沙源治理二期工程规划(2013—2022 年)》,京津风沙源治理一期工程时间为 2001—2010 年,二期工程时间为 2013—2022 年,为了保持对比研究的时间跨度一致且覆盖所有研究时间,因此在直观对比 NPP 对京津风沙源治理两期工程实施的响应时,对研究时间段前十年和后十年分别计算 NPP 的变化速率及变化趋势。2001—2010 年可以看成是受京津风沙源治理一期工程的影响,2011—2020 年看成是受京津风沙源治理二期工程的影响。

由图 8 可以看出,在前十年间,绝大部分区域变化速率都显著小于后十年间,除了陕西地区前十年的变化速率($2.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)略大于后十年的变化速率($2.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。其中,内蒙古地区两个不同时间段内的 NPP 变化速率差距最大,前十年仅为 $0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而后十年则提升到 $1.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在二期工程新增区域内,前十年(工程未实施期)和后十年(工程实施期)NPP 变化速率分别为 $1.10 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $2.29 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,由此可以看出工程实施显著提高了 NPP 增速,有效改善了当地生态环境。

通过对两个不同时间段内的 NPP 的变化速率(图 9)以及变化趋势(图 10)的空间分布进行分析,发现在一期工程实施期间,有较大范围的减少趋势,其中不显著减少的范围占二期工程范围的 30.49%。特别是在内蒙古地区的中部及东部,由于其本身生态环境恶劣,即使从 2001 年就已经开始实施风沙源治理一期工程,但是在一期工程实施期间还是呈现明显的 NPP 减小的趋势。这说明对于生态环境恶劣的地区,治理工程对生态环境改善的滞后性更强。

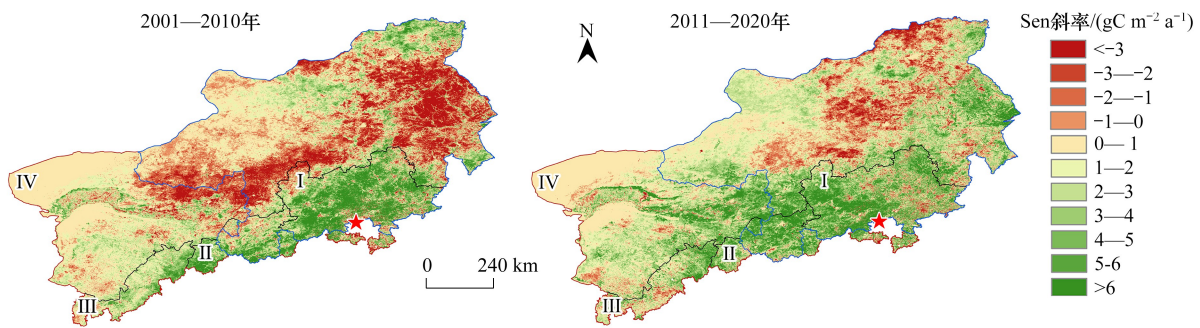


图 9 不同时间段内 NPP 变化速率空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of NPP change rate in different time periods

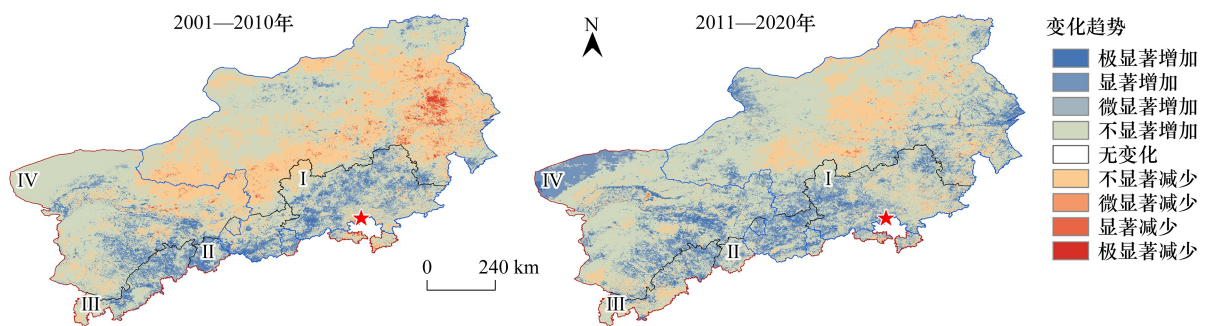


图 10 不同时间段内 NPP 变化趋势空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of NPP variation trend in different time periods

3.4 不同植被分区 NPP 分布特征分析

为了探究植被覆盖类型对研究区 NPP 分布及变化情况的影响,本研究根据《中华人民共和国植被图(1:100 万)》^[34–35],对研究区进行了植被区划分区分析。植被区划在一定地区依据植被类型及其地理分布特征划分出彼此有区别,但内部有相对一致性的植被组合的分区。植被分区在空间上是完整的、连续的和重复出现的植被类型或其组合的地理单位。研究区植被区划图如图 11 所示,研究区所涵盖的区域及地带类型如表 4 所示。京津风沙源二期工程的新增区域包括了更大面积的荒漠草原亚地带、半荒漠亚地带、荒漠亚地带,可以看出京津风沙源治理二期工程的造林难度增加,开始向土壤更加贫瘠、水源更加缺乏的地区进军。

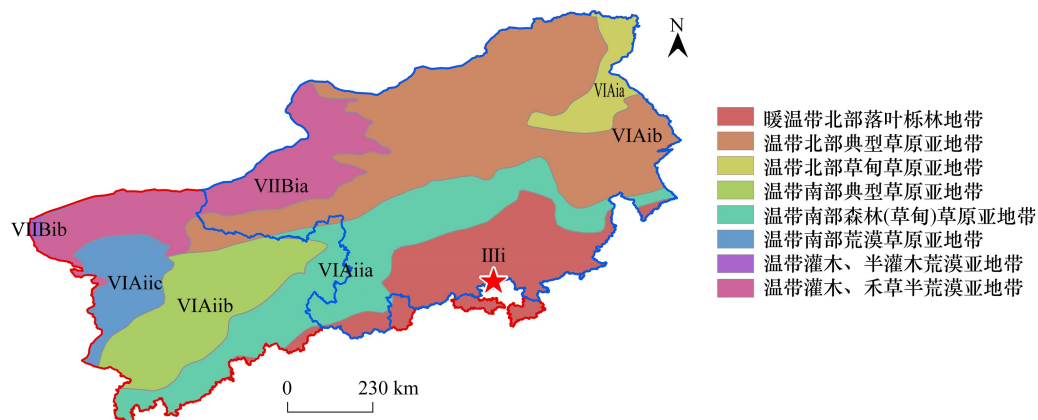


图 11 研究区植被区划示意图

Fig.11 Vegetation zoning map of the study area

表 4 植被区划区域及地带类型

Table 4 Vegetation zoning area and zone type

代码 Code	区域 Region	地带 Zone	代码 Code	区域 Region	地带 Zone
Ⅲi	暖温带落叶阔叶林区域	暖温带北部落叶栎林地带	ⅥAib	温带草原区域	温带南部典型草原亚地带
ⅥAia	温带草原区域	温带北部草甸草原亚地带	ⅥAic	温带草原区域	温带南部荒漠草原亚地带
ⅥAib	温带草原区域	温带北部典型草原亚地带	ⅦBia	温带荒漠区域	温带灌木、禾草半荒漠亚地带
ⅥAiaa	温带草原区域	温带南部森林(草甸)草原亚地带	ⅦBib	温带荒漠区域	温带灌木、半灌木荒漠亚地带

本研究以 2020 年 NPP 为例,分析不同植被区划的 NPP 分布情况。如图 12 所示,暖温带落叶阔叶林区域的暖温带北部落叶栎林地带 NPP 平均值最大,其次是温带草原区域的温带北部草甸草原亚地带和温带南部森林(草甸)草原亚地带,再次是温带北部典型草原亚地带、温带南部典型草原亚地带和温带南部荒漠草原亚地带,NPP 平均值最低的地带为温带荒漠区域的温带灌木、半灌木荒漠亚地带和温带灌木、禾草半荒漠亚地带。

此外,研究以 2001 年—2020 年 NPP 变化速率为例,分析不同植被区划的 NPP 20 年间的变化速率分布情况。如图 12 所示,8 个地带的 NPP 变化速率分布特征和 NPP 平均值分布基本相似,暖温带落叶阔叶林区域的暖温带北部落叶栎林地带的 NPP 变化速率最大,温带荒漠区域的温带灌木、禾草半荒漠亚地带和温带灌木、半灌木荒漠亚地带的 NPP 变化速率最小。研究从植被类型的角度出发,说明了京津风沙源治理工程对不同生态系统本底的治理效果并不一致,在生态更加脆弱的荒漠草原、半荒漠、荒漠亚地带,治理的难度更大,更加需要治理工程长久的坚持。

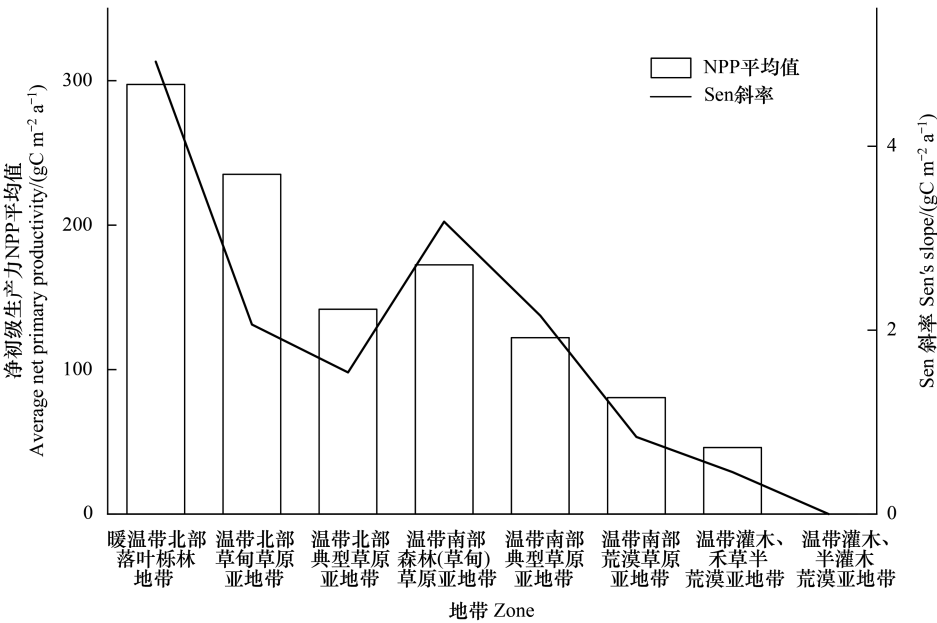


图 12 2001—2020 年不同植被分区 NPP 平均值及变化速率统计

Fig.12 Average NPP and change rate statistics of different vegetation zones from 2001 to 2020

3.5 固碳服务能力评估分析

京津风沙源治理二期工程区 2020 年单位面积固碳量如图 13 所示。由图可以看出,京津风沙源治理二期工程区 2020 年单位面积固碳量空间异质性较大,空间分布上与 NPP 分布情况相似,主要呈现东部高,西部低的特点,其中东南部最大处大于 750 g m⁻² a⁻¹,而西北部最小处小于-450 g m⁻² a⁻¹。进一步对二期工程区域各区县的总固碳量进行统计分析(图 14),总固碳量较小(<-10000 T/a)的区县共 20 个,总固碳量略小的区县

($-10000—50000$ T/a)的区县共 52 个,总固碳量略大的区县($50000—150000$ T/a)共 36 个,总固碳量较大的区县(>150000 T/a)的区县共 32 个。总体来看,二期工程区东部的区县面积较大且单位面积固碳量较大,因此拥有更强的固碳服务能力,而西部的区县由于单位面积固碳量较小,因此其固碳服务能力较弱。

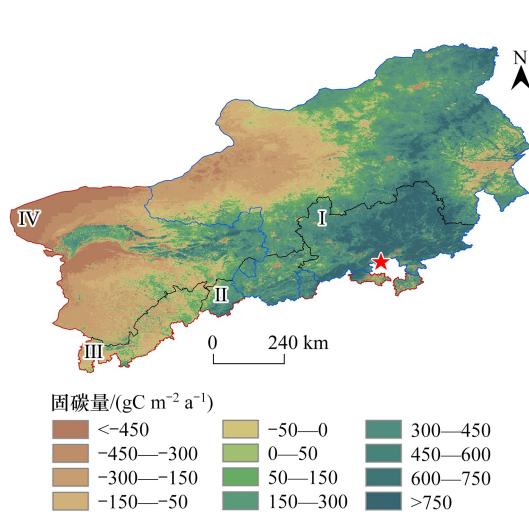


图 13 2020 年单位面积固碳量

Fig.13 Carbon sequestration per unit area in 2020

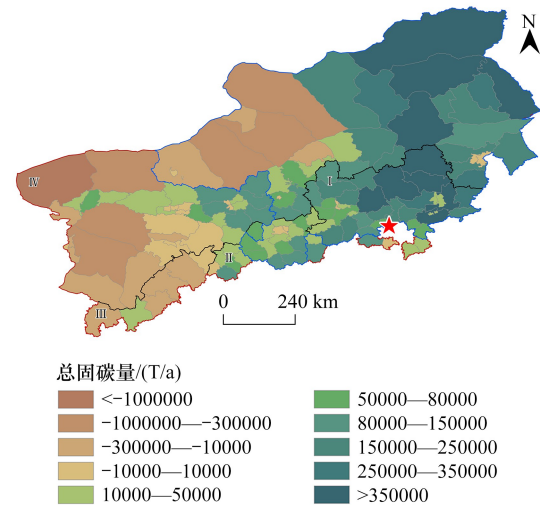


图 14 2020 年各区县的总固碳量

Fig.14 Total carbon sequestration by district and county in 2020

4 讨论

目前在京津风沙源区已有较多针对植被覆盖的相关研究,但是缺少不同时空尺度下的植被净初级生产力变化研究,京津风沙源区治理工程对植被净初级生产力及固碳能力的影响尚不清楚。本研究基于京津风沙源区的气象数据、蒸散量数据、辐射数据等,估算了区域 NPP,结果发现在京津风沙源治理工程实施期间,NPP 整体呈波动上升趋势,而 NPP 与植被覆盖特征显著相关,因此,本研究的结果与滑永春等^[36]、严恩萍等^[25]、李庆旭等^[26]、吴丹等^[37]、张彪等^[24]的研究结果一致。

已有研究表明,全球气候变化背景下水热条件对植被乃至生态系统的胁迫更加明显,气候变化对 NPP 的影响存在区域差异^[38—39],而在京津风沙源区的不同区域,影响植被覆盖的驱动因子也并不相同^[40]。因此,本研究为了进一步探讨京津风沙源治理工程对植被 NPP 的影响,计算了研究区 2001—2020 年逐年的平均气温及平均降水量(图 15),并与 NPP 进行了相关性分析,发现在研究时段内,研究区的年平均气温和年平均降水量与 NPP 的相关系数仅为 0.119 和 0.185。因此,总体上看,在本文研究区域内,气象因子与 NPP 呈现不显著相关性,这说明由于京津风沙源治理工程的实施带来的 NPP 增长的主要原因并不是气候变化,也间接证明了该区域 NPP 增长主要是京津风沙源治理工程植树造林、防风治沙等人类活动的影响。

不过需要说明的是,光能利用率模型本身具有极大的不确定性^[41—43],虽然本文使用的 CASA 模型为经过简单改进后的 CASA 模型,但计算得到的 NPP 结果仍然存在不确定性。本研究为了得到研究区综合情况较好的参数结果,直接使用了 GEE 云平台中的多个 MODIS 数据集产品,如果需要得到更精确的 NPP 结果,首先可以针对研究区的实际情况对光能利用率模型进行改进,得到适用于研究区的改进的 CASA 模型,其次可以使用空间分辨率更高的遥感影像,通过计算得到相关参数结果,再代入模型中进行计算。本研究所使用的模型方法是综合考虑了计算效率和数据质量的情况下选择的较优方法,本研究也证明了 GEE 云平台在计算长时间序列时空数据时具有强大的优势。

5 结论

本研究为了对京津风沙源治理工程的实施效果进行动态监测,利用 GEE 遥感云平台实现了对京津风沙

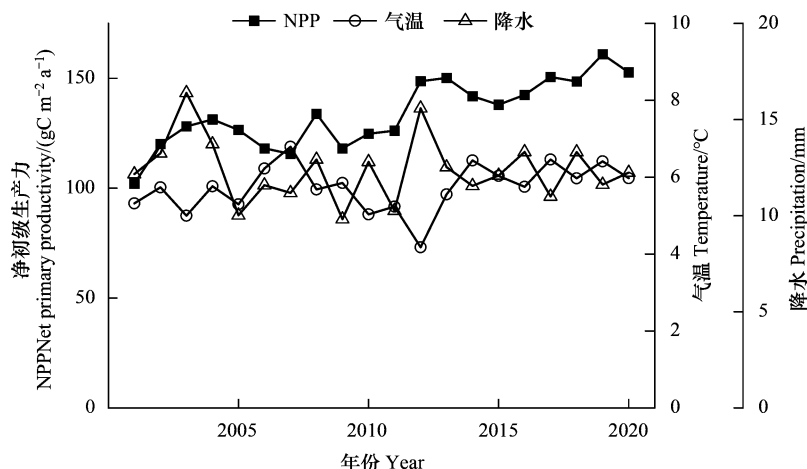


图 15 2001—2020 年 NPP 与气象数据变化情况

Fig.15 Changes in NPP and meteorological data from 2001 to 2020

源治理二期工程区域的净初级生产力的长时序监测及时序变化趋势分析,并计算了区域固碳能力。主要结论如下:

(1) 在京津风沙源区治理期间(2001—2020 年)京津风沙源区 NPP 总体呈波动上升趋势,平均增速为 $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中极显著增加区域占 38.03%,说明京津风沙源治理工程对我国“碳中和”任务起到了积极作用,增加了区域的固碳能力。

(2) 京津风沙源治理二期工程区的 NPP 和固碳量空间异质性较大,空间分布上主要呈现东部高,西部低的特点,其中,暖温带落叶阔叶林区域最高,温带荒漠区域最低。以 2020 年 NPP 为例,京津冀地区($298.84 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 山西地区($198.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 陕西地区($126.95 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 内蒙古地区($126.31 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

(3) 治理工程的实施带来了区域 NPP 的增长,但在京津冀、内蒙古、陕西、山西地区,增长的速度并不一致,2001—2020 年的 NPP 增速京津冀地区($4.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 山西地区($4.52 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 陕西地区($3.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > 内蒙古地区($1.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。京津冀、山西和陕西地区水热条件好,植被覆盖度高,NPP 的增长趋势较为明显,且增速较大。而内蒙古地区由于其沙化土地广布,植被覆盖度低,治理难度大,气候干旱少雨,NPP 的增速明显低于其它地区。

(4) 生态工程实施所带来的生态环境的改善总体呈现先慢后快的特点,绝大部分区域后十年间的变化速率都显著大于前十年。在本身生态环境较为良好的地区,生态工程的实施所带来的环境改善是立竿见影的,而在生态环境较为恶劣、荒漠区域广布的内蒙古地区,生态环境的改善则具有一定的滞后性,2001—2010 年 NPP 增速仅为 $0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,直到 2011 年,NPP 才开始有较为明显的增长,2011—2020 年 NPP 增速为 $1.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

利用遥感技术结合云计算平台可以对生态工程区域实现长时序的动态监测,有助于对治理工程的成效进行监测评估。京津风沙源治理工程对 2001—2020 年的京津风沙源区 NPP 增加起到了积极作用,但部分本底环境较差的地区 NPP 仍然呈减少趋势。因此,京津风沙源治理应当持续推进,并对环境恶劣的地区加大实施力度。

参考文献(References):

- [1] Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, Guanter L, Hicke J A, Huete A R, Ichii K, Ni W J, Pang Y, Rahman A F, Sun G Q, Yuan W P, Zhang L, Zhang X Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111383.
- [2] 朴世龙,岳超,丁金枝,郭正堂. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(7): 1419-1426.

- [3] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [4] Cao S, Sanchez-Azofeifa G A, Duran S M, Calvo-Rodriguez S. Estimation of aboveground net primary productivity in secondary tropical dry forests using the Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model. Environmental Research Letters, 2016, 11(7): 075004.
- [5] Bulut S, Günlü A, Şatır O. Estimating net primary productivity of semi-arid Crimean pine stands using biogeochemical modelling, remote sensing, and machine learning. Ecological Informatics, 2023, 76: 102137.
- [6] Xiao F J, Liu Q F, Xu Y Q. Estimation of terrestrial net primary productivity in the Yellow River Basin of China using light use efficiency model. Sustainability, 2022, 14(12): 7399.
- [7] 陶波, 葛全胜, 李克让, 邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究, 2001, 20(5): 564-575.
- [8] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 净汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594-602.
- [9] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175-188.
- [10] 穆少杰, 周可新, 齐杨, 陈奕兆, 方颖, 朱超. 内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素. 植物生态学报, 2014, 38(1): 1-16.
- [11] 郭连发, 来全, 伊博力, 银山. 2000—2014 年呼伦贝尔沙地河流湿地植被 NPP 时空变化及驱动力分析. 水土保持研究, 2017, 24(6): 267-272.
- [12] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 李建龙. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374.
- [13] 潘竟虎, 李真. 2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333-3340.
- [14] 李颜颜, 康国华, 张鹏岩, 何坚坚, 闫宇航. 基于 Thornthwaite Memorial 模型的近 54 年河南省农业气候生产力时空变化特征分析. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 287-293.
- [15] Li C H, Sun H, Wu X D, Han H Y. An approach for improving soil water content for modeling net primary production on the Qinghai-Tibetan Plateau using Biome-BGC model. Catena, 2020, 184: 104253.
- [16] Potter C, Randerson J, Field C, Matson P, Vitousek P, Mooney H, Klooster S. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [17] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [18] 张祯祺, 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.
- [19] 郭睿妍, 田佳, 杨志玲, 杨泽康, 苏文瑞, 刘文娟. 基于 GEE 平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征. 生态学报, 2022, 42(13): 5437-5445.
- [20] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 郭伟, 王科雯, 乔建. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-1450.
- [21] 刘彦平, 张国红, 杨跃军, 杨晓玲, 冯岩. 《京津风沙源治理工程二期规划》战略调整. 林业调查规划, 2013, 38(6): 92-95.
- [22] 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.
- [23] 王亚明. 京津风沙源治理工程效益分析. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2010, 9(3): 81-85.
- [24] 张彪, 李庆旭, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1041-1053.
- [25] 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.
- [26] 李庆旭, 张彪, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖状况的区域差异研究. 地学前缘, 2018, 25(5): 298-304.
- [27] 卫洁, 雷添杰, 孔冬梅, 王红岩, 武志涛. 基于遥感的京津风沙源区植被覆盖变化监测. 山西大学学报: 自然科学版, 2019, 42(1): 242-252.
- [28] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. 草业学报, 2018, 27(5): 1-14.
- [29] Wu C Y, Chen K L, Chongyi E, You X N, He D C, Hu L B, Liu B K, Wang R K, Shi Y Y, Li C X, Liu F M. Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake Basin alpine grassland. Geoscientific Model Development, 2022, 15(17): 6919-6933.
- [30] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, Xin X P, Bao Y L, Bayarsaikhan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 46: 84-93.
- [31] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [32] Tian H W, Ji X J, Zhang F M. Spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity and its response to meteorological factors across the Yellow River Basin during the period 1981—2020. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 949564.
- [33] Xuan W X, Rao L Y. Spatiotemporal dynamics of net primary productivity and its influencing factors in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1043807.
- [34] 《中华人民共和国植被图(1:1000000)》及其说明书出版. 生态学报, 2008, 28(3): 1337.
- [35] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1 000 000): 地质出版社, 2007.
- [36] 滑永春, 彭道黎, 陈鹏飞. 基于 MODIS NDVI 的京津风沙源工程治理区荒漠化动态监测. 西北林学院学报, 2010, 25(6): 210-215.
- [37] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 曹巍. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.
- [38] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [39] 贾路, 于坤霞, 邓铭江, 李鹏, 李占斌, 时鹏, 徐国策. 黑河流域年 NPP 时空变化及其对气候因子的响应. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 523-540.
- [40] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 张红. 京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2895-2905.
- [41] He P X, Ma X L, Han Z M, Meng X Y, Sun Z J. Uncertainties of gross primary productivity of Chinese grasslands based on multi-source estimation. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 928351.
- [42] Xiao J F, Davis K J, Urban N M, Keller K. Uncertainty in model parameters and regional carbon fluxes: a model-data fusion approach. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 175-186.
- [43] Liu L Q, Gao X, Cao B H, Ba Y J, Chen J M, Cheng X F, Zhou Y, Huang H, Zhang J S. Comparing different light use efficiency models to estimate the gross primary productivity of a cork oak plantation in northern China. Remote Sensing (Basel, Switzerland), 2022, 14(22): 5905.