

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.030; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.030.

张怡, 王志慧, 卢小平, 等. 黄土高原生态系统碳汇时空变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 266-274, 284.

Zhang Yi, Wang Zhihui, Lu Xiaoping, et al. Evolution of ecosystem carbon sink and its driving factors in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 266-274, 284.

黄土高原生态系统碳汇时空变化及其影响因素

张怡^{1,2}, 王志慧², 卢小平¹, 肖培青², 赵广举³

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003;

2.黄河水利委员会 黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土保持重点实验室,

郑州 450003; 3.水利部 交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要:[目的]探究黄土高原生态系统碳汇时空变化特征,可为深入分析和科学评估生态系统固碳能力以及制定应对气候变化的策略提供科学依据。[方法]基于现有长时间序列遥感产品、地形和土壤属性等数据,运用线性趋势分析和地理探测器等工具,计算了 2000—2022 年黄土高原净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP),分析了 NEP 时空变化及其影响因素。[结果]黄土高原 2000—2022 年 NEP 平均值为 33.44 gC/m², 2022 年黄土高原 NEP 现状水平为 39.9 gC/m², 年碳汇总量达到 25.40 Tg C。NEP 年际变化特征表现为显著上升且逐渐趋于稳定, 总体增长速率为 0.70 gC/(m²·a), 每年增加 0.45 Tg C, 其中山西省和陕西省贡献最大。黄土高原森林植被的碳汇能力(NEP)和增汇能力(NEP 趋势)虽最高, 但由于草地面积较大, 因此草地碳汇总量和增汇贡献均高于森林。与草地、农田和裸地相比, 草地—森灌、农田—林草、裸地—林草等生态修复工程能提升原地表覆盖碳汇能力的 83.2%, 14.0% 和 81.1%, 且提升增汇能力 5.6%, 15.8%, 127.7%。单一影响因子中, NDVI 作为植被生物量指标, 是驱动黄土高原生态系统 NEP 时空动态变化的主要因素, 然而 NDVI 与降雨、NDVI 与土壤容重的交互作用对 NEP 空间分异以及 NEP 趋势变化的影响也不可忽视。[结论]结合气候特性和土壤条件的全面考量, 通过调整土地利用结构和增加植物覆盖度等一系列生态恢复措施, 可有效提升黄土高原生态系统碳汇能力。

关键词:黄土高原; 净生态系统生产力; 地理探测器; 影响因素; 碳汇

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)01-0266-09

Evolution of ecosystem carbon sink and its driving factors in the Loess Plateau

Zhang Yi^{1,2}, Wang Zhihui², Lu Xiaoping¹, Xiao Peiqing², Zhao Guangju³

(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

2.Key Laboratory of Soil and Water conservation on the Loess Plateau of ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3.Nanjing Hydraulic Research

Institute of National Energy Administration, Ministry of Water Resources and Transportation, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the temporal and spatial variation characteristics of ecosystem carbon sink in the Loess Plateau, and to provide a scientific basis for in-depth analysis of scientific assessment of ecosystem carbon sequestration capacity and formulation of strategies to cope with climate change. [Methods] Based on the existing long-term series of remote sensing products, topography and soil properties, linear trend analysis and geodetectors were used to calculate the net ecosystem productivity (NEP) of the Loess Plateau from 2000 to 2022, and to analyze the spatial and temporal changes of NEP and its influencing factors. [Results] (1) The average value of NEP in the Loess Plateau from 2000 to 2022 was 33.44 gC/m². The current level of NEP in the Loess Plateau in 2022 was 39.9 gC/m², and the total

收稿日期:2024-03-21

修回日期:2024-04-13

资助项目:黄委优秀青年人才科技项目(HQK-202307);国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC3205200)

第一作者:张怡(1999—),女,河南焦作人,硕士研究生,研究方向:碳循环遥感。E-mail:zy1607299084@163.com

通信作者:王志慧(1985—),男,山西太原人,博士,教授级高级工程师,研究方向:植被遥感监测及其碳水效应。E-mail:wzh8588@aliyun.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

annual carbon sink reached 25.40 Tg C. The interannual variation of NEP showed a significant increase and gradually stabilized. The overall growth rate was $0.70 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, with an annual increase of 0.45 Tg C, among which Shanxi Province and Shaanxi Province contributed the most. Although the forest vegetation in the Loess Plateau has the highest carbon sink capacity (NEP) and sink enhancement capacity (NEP trend), due to the large area of grassland, the total carbon sink and sink enhancement contribution of grassland are higher than those of forest. Compared with grassland, farmland and bare land, grassland-shrub, farmland-forest-grass, bare land-forest-grass and other ecological restoration projects can increase the carbon sink capacity of original surface coverage by 83.2%, 14.0% and 81.1%, and increase the carbon sink capacity by 5.6%, 15.8% and 127.7%. Among the single influencing factors, NDVI, as a vegetation biomass index, is the main factor driving the spatial and temporal dynamic changes of NEP in the Loess Plateau ecosystem. However, the interaction between NDVI and rainfall, NDVI and soil bulk density on NEP spatial differentiation and NEP trend changes can not be ignored. [Conclusion] Combined with the comprehensive consideration of climate characteristics and soil conditions, a series of ecological restoration measures such as adjusting land use structure and increasing plant coverage can effectively improve the carbon sink capacity of the Loess Plateau ecosystem.

Keywords: Loess Plateau; net ecosystem productivity; geographical detector; influencing factors; carbon sink

全球气候变化问题的日益凸显,使得对生态系统碳汇功能的研究变得尤为重要。生态系统作为全球碳循环的重要组成部分^[1],其碳汇能力对维护全球碳平衡和气候稳定起着决定性作用^[2]。在此背景下,净生态系统生产力(NEP)被广泛接受为衡量生态系统碳源或碳汇能力的重要指标^[3],其研究对于全球碳循环的理解和应对全球气候变化具有深远影响。黄土高原是中国重要的生态系统之一,具有独特的地理位置和地貌特征。长期以来,频繁的人类活动致使该区域植被退化严重,水土流失频繁发生,成为国内典型的生态环境脆弱区域^[4]。近年来,在“退耕还林(草)”工程的实施下,黄土高原的植被覆盖率得到提升,生态环境状况逐步好转^[5],但仍存在生态修复空间分布不均衡以及可持续性等问题,因此,亟待对黄土高原的生态系统 NEP 的时空变化特征及其影响因素进行深入分析,为推动黄土高原生态系统的生态环境恢复和可持续发展提供理论依据。

目前国内外关于黄土高原碳循环的研究多集中在归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)、植被净初级生产力(NPP)以及碳储量等指标的^[6-8]研究上,而进一步探究黄土高原生态系统碳汇时空分布及其影响因子的研究相对较少。且在研究尺度上主要集中于黄土高原整体或部分区域,却未考虑该地区内部的异质性^[9];研究内容上部分研究仅关注生态系统中单一碳库或特定土地利用类型的 NEP^[10-11],未能揭示黄土高原生态系统整体 NEP 时空分布特征;影响因素上,黄土高原碳汇的研究多着眼于气候或土地利用对

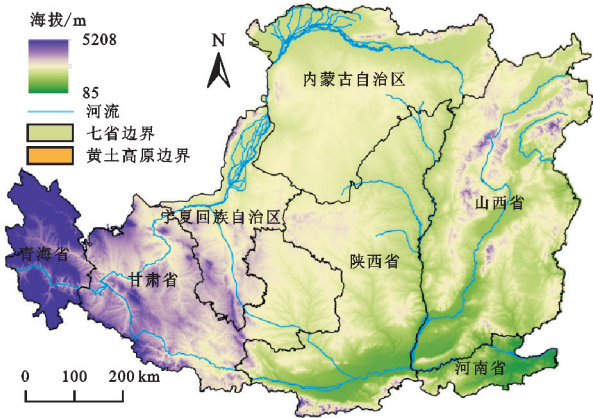
NEP 的影响^[12],对 NEP 空间格局的解释能力有限,且多局限于单一因子对 NEP 的贡献,忽视了不同因子之间的协同作用;在估算方法上,主要包括清查法、涡度相关法、生态系统过程模型和大气反演法^[13]。

针对上述问题,本研究以黄土高原内省级行政区为划分单元,结合长时序遥感数据以及地形和土壤数据,运用土壤呼吸模型、趋势斜率分析和地理探测器等工具,对黄土高原生态系统 NEP 的时空变化特征及其影响因素进行深入分析,进而更全面、深入地理解黄土高原生态系统碳汇功能的演变规律,以及影响其碳汇功能的关键因素,为应对气候变化和推动黄土高原可持续发展提供有力支撑。

1 研究区概况

黄土高原区位见图 1,其位于中国中部偏西北,区域地理位置在 $33^{\circ}41' - 41^{\circ}16' \text{N}$, $100^{\circ}52' - 114^{\circ}33' \text{E}$,是中国面积最大的丘陵沟壑地带之一,跨越了青海、甘肃、陕西、宁夏、山西、内蒙、河南七省(区),占我国陆地总面积约 6.67%,即 64 万 km^2 。该地区地形复杂,海拔高度 1 000~2 000 m,地势呈现出自西北向东南波浪状下降的特点,形成了大量的丘陵和沟壑,因此是全球最严重的水土流失区之一。黄土高原属于干旱少雨的大陆性季风气候,年均降水量 200~700 mm,年均气温 $9 \sim 12^{\circ} \text{C}$,具有昼夜温差大和冬寒夏热的特点。由于人文活动和自然因素的影响,黄土高原地区的生态环境受到了很大的破坏和压力,为了改善其生态环境,自 1999 年开始实施退耕还林(草)等生态恢复和

区域发展项目,导致土地利用类型发生变化,对生态系统的碳储存产生了重要影响。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1819 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区位置

Fig. 1 Study area location map

2 数据和方法

2.1 数据来源与处理

数字高程数据采用日本宇宙航空研究开发机构 AW3 D30 产品,降雨和温度数据分别采用美国气象中心 NCEP 产品和欧洲空间局 ERA5 产品,土壤类型与土壤属性数据采用世界土壤信息中心 SoilGrids 产品,其中物理属性包括土壤容重、沙粒、粉粒和黏粒含量,植被净初级生产力(NPP)采用 MOD17A3 HGF 产品,土壤呼吸(Rs)产品采用中国科学院空天信息创新研究院研发的全球土壤呼吸数据。不同数据产品的详细参数见表 1。同时,利用 ArcGIS 工具提取坡向、坡度等地形特征,利用张宏鸣等开发的 LS_tool 工具计算坡度坡长因子,利用自主研发的 1990—2020 年黄土高原地表覆盖类型产品数据(<https://doi.org/10.5281/zenodo.10225564>)获取研究区地表覆盖变化特征。

表 1 所用数据产品信息介绍

Table 1 The Detailed Information of Data Products

数据集名称	数据来源	空间分辨率	时间范围	时间分辨率
DEM	AW3D30	30 m	—	—
坡度	DEM 坡度分析	30 m	—	—
坡向	DEM 坡向分析	30 m	—	—
土壤容重	SoilGrids	250 m	—	—
土壤沙粒含量	SoilGrids	250 m	—	—
土壤粉粒含量	SoilGrids	250 m	—	—
土壤黏粒含量	SoilGrids	250 m	—	—
土壤侵蚀因子	LS tool 工具	30 m	—	—
NPP	MOD17A3 HGF	500 m	2000—2022	1 a
Rs	中国科学院空天信息创新研究院	1 km	2000—2014	1 a
降雨	NCEP	1 km	2000—2022	6 h
温度	ERA5	1 km	2000—2022	1 d
地表覆盖	黄河水利委员会	30 m	2000—2022	1 a

2.2 研究方法

2.2.1 NEP 估算方法 陆地净生态系统生产力(NEP)可表征陆地与大气之间的净碳通量或碳储量的变化速率,即固碳速率。当 $NEP>0$ 时,生态系统是大气二氧化碳的汇,也就是说生态系统吸收的碳多于释放的碳;当 $NEP=0$ 时,生态系统的二氧化碳排放和吸收达到平衡;当 $NEP<0$ 时,则表明生态系统是大气二氧化碳的源,即释放的碳多于吸收的碳^[14-15]。植被净初级生产力(NPP)的主要部分将形成 NEP,增加生态系统有机碳量,而另一部分则以凋落物的形式进入地表之后,通过微生物分解返回大气或形成土壤有机质被蓄积在土壤中,因此 NEP 为 NPP 和土壤异养呼吸(R_h)的差值。本研究利用 MOD17A3 HGF NPP 产品、中国科学院空天信息创

新研究院黄妮等(2 020)研发的全球土壤呼吸产品和经验转化公式计算年尺度时间序列 NEP^[16-17],具体计算过程如公式(1—2):

$$NEP=NPP-R_h \tag{1}$$

$$\ln(R_h)=0.22+0.87\ln(R_s) \tag{2}$$

式中:NPP 为植被净初级生产力; R_h 为土壤异养呼吸; R_s 为土壤呼吸。

2.2.2 趋势斜率分析法 基于时间序列 NEP 数据集,利用趋势斜率分析法计算黄土高原 2000—2022 年 NEP 变化趋势,线性斜率的计算公式如下:

$$\text{Slope}=\frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{3}$$

式中: X_i 为第 i 年黄土高原 NEP 的值; n 为总年数。

当 $Slope > 0$ 时, NEP 呈增加趋势; 当 $Slope < 0$ 时, NEP 呈减小趋势。

2.2.3 地理探测器 地理探测器一种空间统计分析方法, 旨在探索某一地理现象与其影响因素之间的关联关系^[18]。本研究使用分异及因子探测器和交互作用探测器揭示黄土高原 NEP 时空变化关键影响因素。解译因子对黄土高原 NEP 的解释力可以通过因子探测器的 Q 值来代表, Q 值范围为 $-1 \sim 1$, 对 NEP 空间分异的解释力越强则 Q 值越大。表达式如下:

$$Q = 1 - \frac{\sum_{c=1}^L N_c D_c}{ND} \quad (4)$$

式中: $C = 1, 2, 3 \dots, L$ 为解释变量 X 的分区; N_c 和 N 分别代表分区 L 和全区的单元数; D_c 和 D 分别代表分区 L 和全区 Y 值的方差。

交互探测器是一种强大的分析工具, 用于确定不同驱动因子之间是否存在相互作用的影响。具体来说, 交互探测器通过比较两个独立因素 X_1 和 X_2 空间解释力与 X_1 和 X_2 的交互作用的解释力的大小, 即比较 $Q(X_1)$, $Q(X_2)$ 与 $Q(X_1 \cap X_2)$ 的值来确定这两个驱动因素的影响是增强、减弱还是相互独立的。如果 $Q(X_1 \cap X_2) > Q(X_1) + Q(X_2)$, 表明两个驱动因子同时作用时, 对结果的影响大于单一因子作用之和,

即存在协同效应。

本研究选取 11 个影响 NEP 的潜在因子, 包括高程、坡度、坡向、温度、降雨、土壤侵蚀坡度坡长因子、容重、土壤粉粒含量、土壤沙粒含量、土壤黏粒含量和归一化植被指数 (NDVI), 利用地理探测器计算了各因子单一及其交互作用对 NEP 多年平均值的解释能力, 同时计算温度趋势、降雨趋势、NDVI 趋势以及其他 8 个因子对 NEP 时间变化斜率空间分异的解释能力, 从而解释黄土高原生态系统碳汇时空变化的影响因素。

3 结果与分析

3.1 2000—2022 年多年平均 NEP 空间分异特征

黄土高原多年平均 NEP 整体上呈现出自东南向西北递减的空间分布特征, 其中 NEP 低值主要集中在黄土高原的西北地区, 高值主要分布于甘肃省和陕西省南部。黄土高原 2000—2022 年 NEP 平均值为 33.44 gC/m^2 , 除内蒙古自治区和宁夏回族自治区以外, 其他各省 NEP 均高于黄土高原 NEP, 其中河南省最高, 为 43.81 gC/m^2 , 内蒙古自治区 NEP 最低, 为 16.64 gC/m^2 。黄土高原多年平均碳汇总量为 21.27 Tg C , 山西省多年平均碳汇总量最高, 为 6.41 Tg C , 河南省多年平均碳汇总量最低, 为 0.80 Tg C (图 2)。

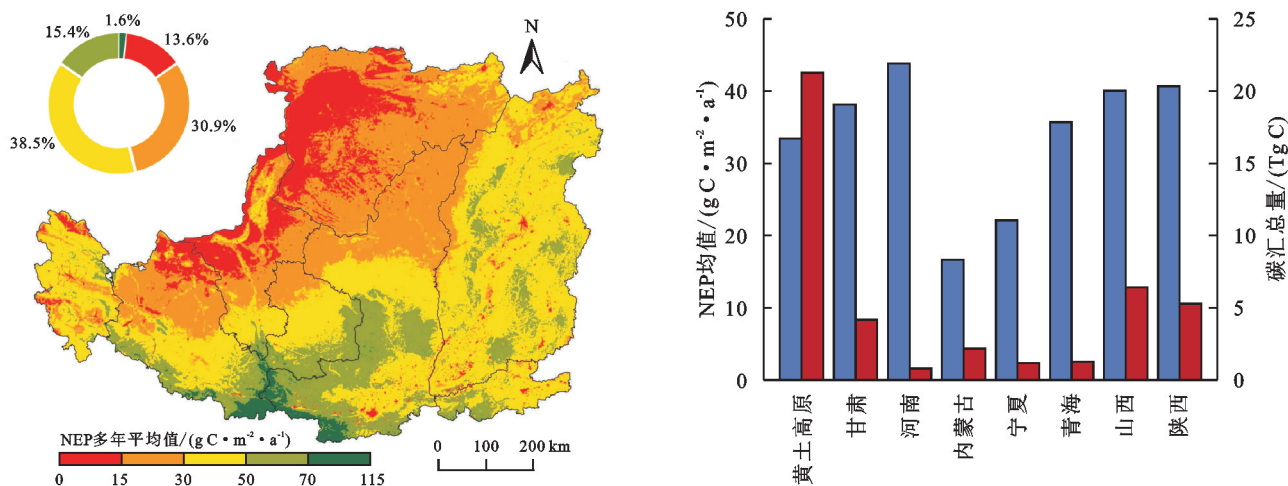


图 2 2000—2022 年多年平均 NEP 空间分布与统计特征

Fig. 2 Spatial distribution and statistical characteristics of multi-year average NEP from 2000 to 2022

3.2 2000—2022 年 NEP 时空变化特征

2000 年黄土高原历史 NEP 空间平均值为 23.4 gC/m^2 , 其中 $NEP < 15 \text{ gC/m}^2$ 的区域占比高达 35.3%, 主要分布在黄土高原的西北地区, $NEP > 70 \text{ gC/m}^2$ 的区域占比仅为 0.1%, 分布于甘肃省和陕西省南部 (图 3)。2022 年黄土高原 NEP 现状空间平均值为 39.9 gC/m^2 , 碳汇总量达到 25.40 Tg , 其中 $NEP < 15 \text{ gC/m}^2$ 的区域面积占比下降到 10.4%, 且 $NEP > 70 \text{ gC/m}^2$ 的区域占比上升为 6%。

NEP 在 2000—2022 年期间发生了显著的变化。2022 与 2000 年的 NEP 差值 > 0 区域占据 95.4%, NEP 差值 < 0 区域仅占 4.6%, 且零星分布在各省中心城市及其附近, NEP 变化介于 $0 \sim 10 \text{ gC/m}^2$ 的区域多集中在黄土高原的西北地区, NEP 变化介于 $10 \sim 25 \text{ gC/m}^2$ 的区域占比最大, 为 46.2%。NEP 年际变化增加的区域占整个黄土高原的 95.4%, 且增加最为显著的区域主要分布在甘肃省东部和陕西省中部地区。

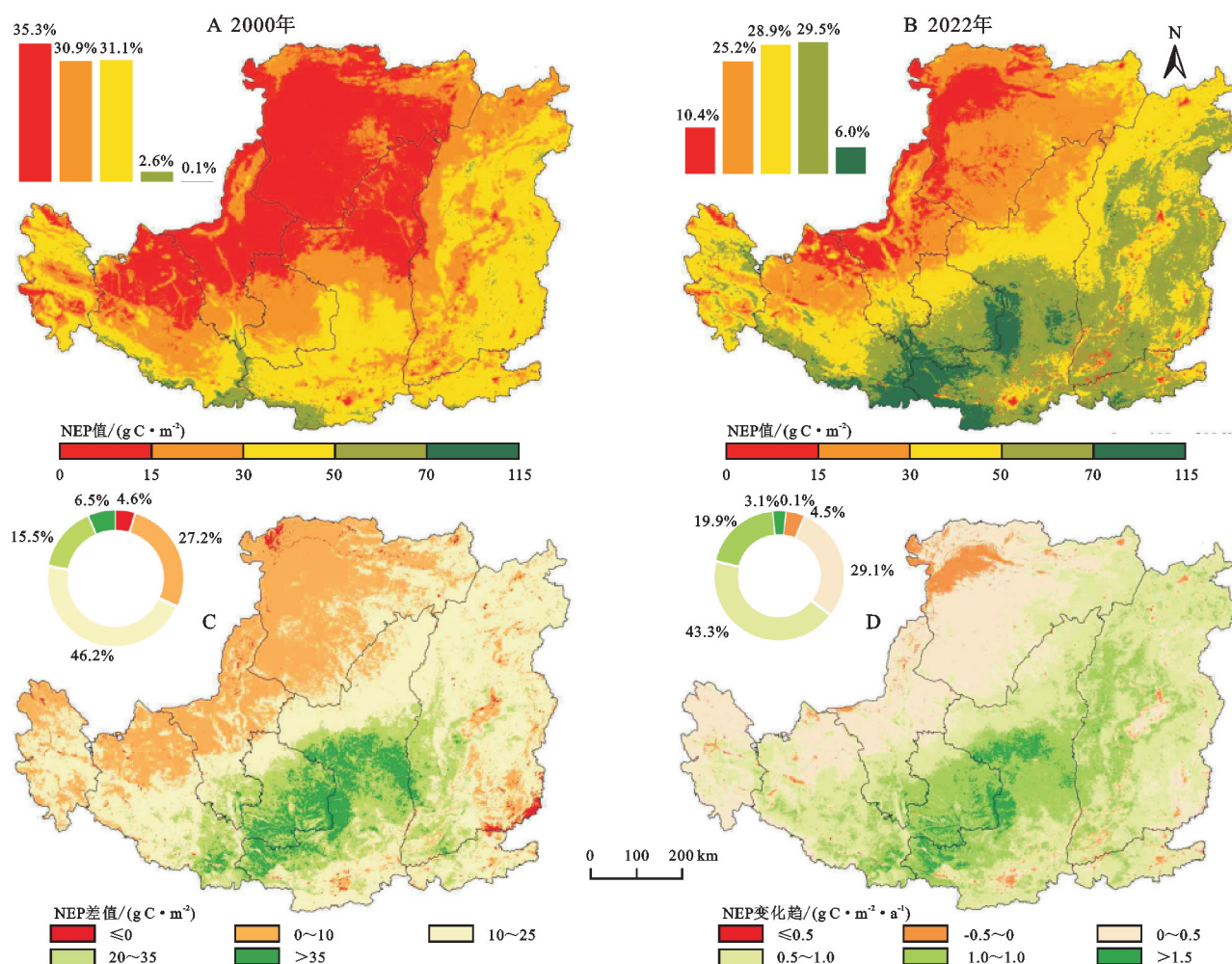


图 3 黄土高原 NEP 空间分布、差异分析与趋势分析

Fig. 3 Spatial distribution, difference analysis and trend analysis of NEP Loess Plateau.

由图 4 可知,黄土高原 NEP 年际变化特征总体表现为明显上升且逐渐趋于稳定,增长速率为 $0.70 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中 2001 年出现最小值,约 $22.21 \text{ gC}/\text{m}^2$,2018 年出现最大值,约为 $41.19 \text{ gC}/\text{m}^2$ 。陕西省和山西省 NEP 上升趋势最为明显,增长速率分别为 $0.98, 0.80 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,相比之下,内蒙古自治区和青海省上升幅度较小,增长速率分别为 $0.35, 0.38 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。从图中可知,黄土高原陆地生态系统碳汇能力每年增加 0.45 Tg C ,其中山西省和陕西省贡献最大,河南省贡献最小。

针对黄土高原 NEP 的时空变化特征,未来应进一步加强生态恢复工程的实施力度,提高植被覆盖度,特别是在西北部地区加大生态恢复投入,促进区域生态环境的整体改善。对生态脆弱区的保护和修复,如黄土丘陵沟壑区、黄土丘陵残塬沟壑区等,采取水土保持、植被恢复等措施,提高生态系统的碳汇功能。同时,应加强对重点生态功能区的保护和管理,维持其生态系统的稳定性。

3.3 地表覆盖类型对生态系统碳汇的影响

基于黄土高原 2000—2020 年地表覆盖产品,分

析了研究时段地表覆盖变化情况(图 5)。经统计,在地表覆盖不变化类型中,农田、草地和森林的面积占比分别为 $30.25\%, 29.23\%$ 和 12% 。在地表覆盖变化类型中,农田转变为林草类型的面积占比最大,达到 12.72% ,裸地转变为林草和草地转变为森灌的面积占比分别为 4.82% 和 1.84% 。

基于 2000—2022 年 NEP 多年平均值,时间变化斜率和地表覆盖类型产品,得到不同地表覆盖类型碳汇能力与增汇能力统计表,由表 2 可知地表覆盖不变类型的 NEP 均值 (gC/m^2) 排序为森林 (54.47) > 农田 (33.41) > 草地 (27.72) > 裸地 (7.50),生态系统碳汇总量 (Tg C) 排序为农田 (7.25) > 草地 (4.79) > 森林 (3.83) > 裸地 (0.20)。地表覆盖变化类型的 NEP 均值 (gC/m^2) 排序为草地转变森灌 (50.78) > 农田转变林草 (38.08) > 裸地转变林草 (13.58),生态系统碳汇总量 (Tg C) 排序为农田转变林草 (3.0) > 草地转变森灌 (0.66) > 裸地转变林草 (0.46)。与草地、农田和裸地相比,草地—森灌、农田—林草,裸地—林草可分别提升碳汇能力 $83.2\%, 14.0\%$ 和 81.1% 。

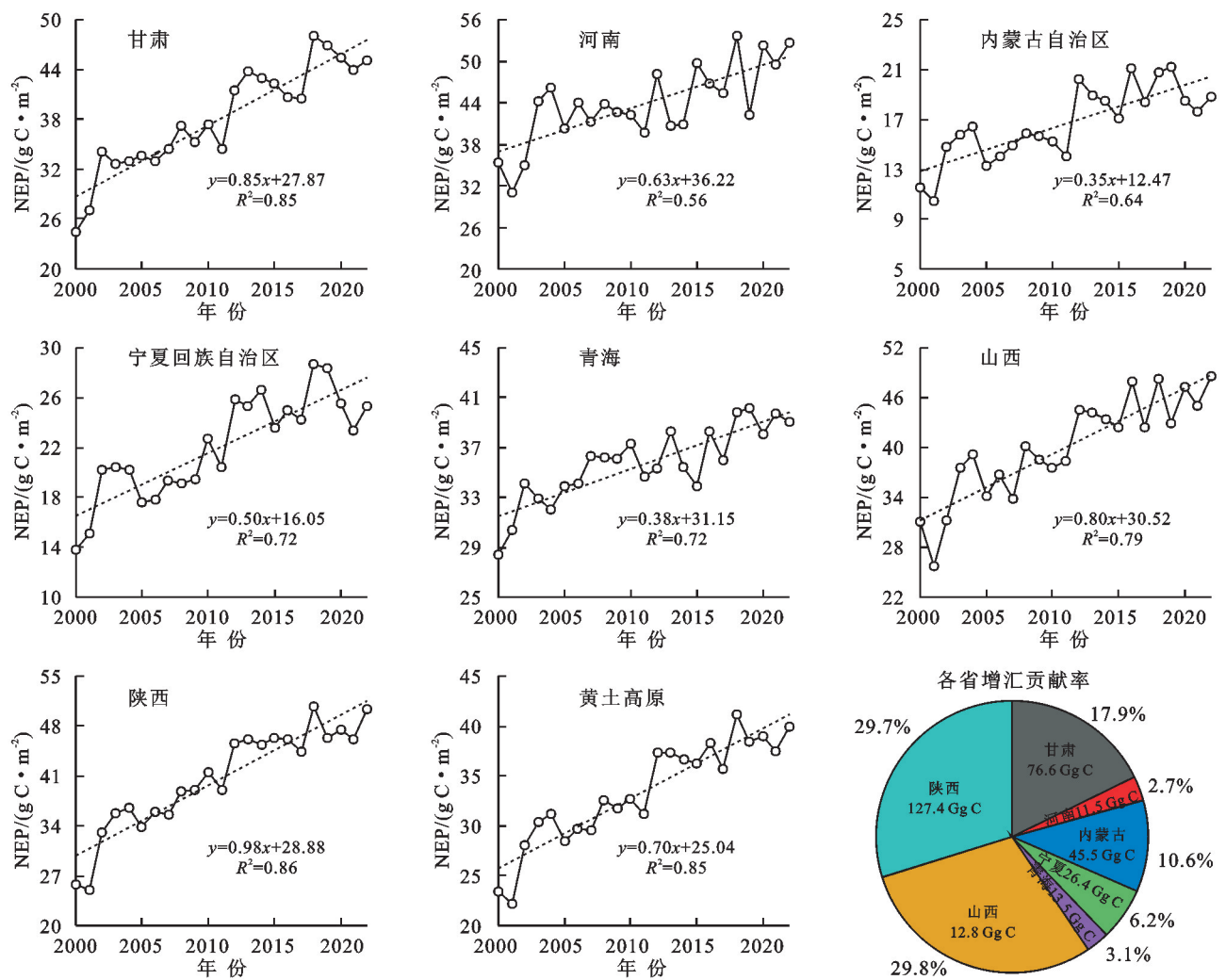


图 4 2000—2022 年黄土高原 NEP 时间变化

Fig. 4 Temporal variation of NEP in the Loess Plateau from 2000 to 2022

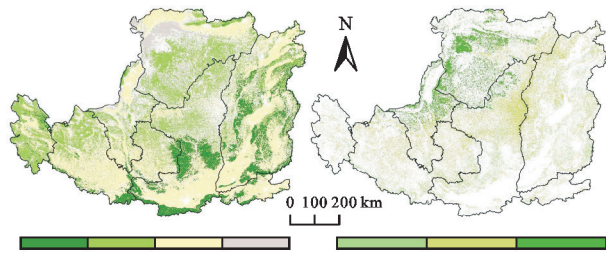


图 5 黄土高原土地利用类型与统计

Fig. 5 Land use types and statistics of the Loess Plateau

基于 NEP 时间变化斜率和地表覆盖产品,得到地表覆盖不变类型中 NEP 上升趋势最大的为森林,增长速率为 $0.90 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,农田增汇速率最大,为 143.84 GgC/a ,地表覆盖变化类型中草地转变森灌类型 NEP 上升趋势最大,增汇速率最大为农田转变为林草类型,为 79.32 GgC/a 。与草地、农田和裸地相比,草地—森灌、农田—林草,裸地—林草可分别提升增汇能力 5.6% , 15.8% , 127.7% 。黄土高原生态系统中农田和草地增汇贡献率最大,为 33.67% 和 26.42% 。

综上可知,通过科学的土地管理措施,比如合理植

被恢复和土地利用结构优化,可以有效地提高黄土高原 NEP,实现生态环境的可持续发展。未来,黄土高原地区应继续加强退耕还林(草)生态恢复工程的实施力度,加强对林草资源的保护和恢复,通过合理调整土地利用结构,探索其他类型土地向林草转变的可行路径,有效提高黄土高原生态系统的增汇速率。

3.4 NEP 空间分异的环境影响因素分析

单一因子对 NEP 空间分异的解释力排序为 $\text{NDVI}(0.667) > \text{降雨}(0.338) > \text{容重}(0.277) > \text{粉粒含量}(0.22) > \text{沙粒含量}(0.219) > \text{坡向}(0.179) > \text{黏粒含量}(0.126) > \text{土壤侵蚀坡度坡长因子}(0.107) > \text{温度}(0.102) > \text{坡度}(0.067) > \text{高程}(0.052)$ 。双因子探测结果显示,NDVI 和降雨两者的交互作用对黄土高原 NEP 空间分布解释力最高。单一因子对 NEP 趋势的解释力排序为 $\text{NDVI}(0.281) > \text{容重}(0.265) > \text{坡度}(0.245) > \text{温度}(0.09) > \text{粉粒含量}(0.084) > \text{土壤侵蚀坡度坡长因子}(0.072) > \text{沙粒含量}(0.053) > \text{黏粒含量}(0.048) > \text{高程}(0.035) > \text{降雨}(0.023) > \text{坡向}(0.014)$ 。在双因子交互作用中,NDVI 与土壤容重的组合对黄土高原 NEP 趋势的解释力最高,达到了 0.46 (图 6)。

表 2 不同地表覆盖类型碳汇能力与增汇能力统计

Table 2 Carbon sink capacity and increasing sink capacity of different land cover types

用地类型	面积/ km ²	NEP 均值/ (gC · m ⁻²)	碳汇总量/ Tg C	NEP 斜率/ (gC · m ⁻² · a ⁻¹)	增汇速率/ (GgC · a ⁻¹)	增汇 贡献率/%
森林	70283.5	54.47	3.83	0.90	63.45	14.85
草地	172831.4	27.72	4.79	0.65	112.87	26.42
农田	190367.2	33.41	6.36	0.76	143.84	33.67
裸地	26964.3	7.50	0.20	0.15	3.93	0.92
草地—森灌	12990.6	50.78	0.66	0.95	12.33	2.89
农田—林草	89866.5	38.08	3.42	0.88	79.32	18.57
裸地—林草	34068.2	13.58	0.46	0.34	11.43	2.67

综上所述,地表覆盖、植被、降雨和土壤属性共同影响了 2000—2022 年黄土高原生态系统碳汇及其变化趋势空间分布特征。通过科学的土地管理措施,比如合理植被恢复和土壤保护,可以有效地提高黄

土高原NEP,实现生态环境的可持续发展。因此在黄土高原生态恢复和土地管理中,需要重点关注提高植被覆盖和改善土壤物理性质,以实现区域生态平衡。

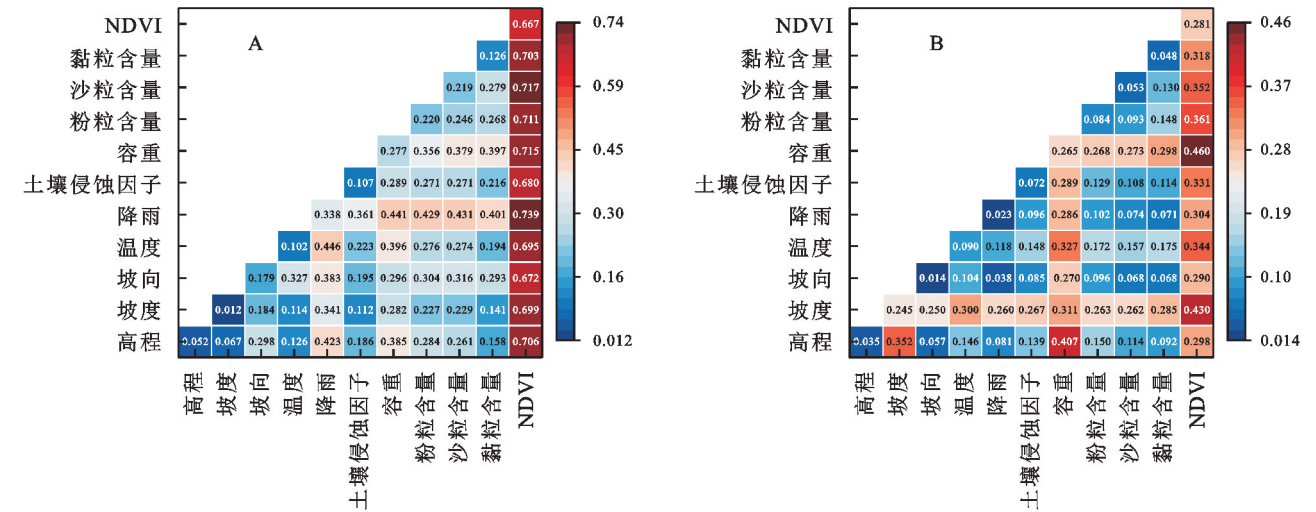


图 6 黄土高原 NEP 均值与变化趋势交互作用探测结果

Fig. 6 The detection results of the interaction between NEP mean and change trend on the Loess Plateau

4 讨论和结论

4.1 讨论

4.1.1 NEP 估算结果的不确定性 在 NEP 的遥感估算领域,精度评估一直以来都充满了挑战。实地测量数据的缺乏、不同类型数据产品的多样性、产品精度水平的不一致性,以及估算 NEP 方法多样性增加了 NEP 估算结果的不确定性^[19-20]。例如本研究使用 MODIS NPP 数据和气候因子数据的精度水平和利用土壤呼吸模型对 NEP 进行估算的方法都会对 NEP 估算结果产生影响,从而影响其可信度。但通过与现有研究结果比较发现,本研究 NEP 呈现东南高西北低的空间格局与 Zhang 等^[21]的研究结果相同,NEP 在 2001 年最低,在 2011 年突增,在 2018 年达到最高值后逐渐下降的时间变化趋势与周怡婷等^[22]的研究结果相吻合,NEP 差异及其趋势变化的空间分异结果与裴宏泽等^[23]的研究结果相似,说明本研究方法计算结果具有一定的可信度。

总的来说,NEP 遥感估算面临诸多挑战,需要进一步完善实地观测数据、提高产品精度、优化模拟方法等,以此更准确地评估 NEP 的时空动态,为生态系统管理提供可靠依据。

4.1.2 NEP 时空变化影响因素分析 近年来,黄土高原实施了大规模退耕还林还草、天然林保护等生态恢复工程,显著提高了区域植被覆盖度,增强了生态系统碳汇功能^[24-25]。NEP 增加最为明显的区域集中在陕西、山西两省,特别是陕甘交界地区。这主要是因为该区域水土流失较为严重,因此生态恢复工程实施力度较大,造林覆盖范围广^[26-27]。由退耕还林(草)等生态修复工程所引起的地表覆盖变化对 NEP 增加产生了积极影响,例如裸地和农田向林草转变均可有效提升碳汇能力^[28]。因此,在土地利用管理方面,应合理规划土地利用布局,科学实施退耕还林还草等生态恢复工程,提高林草植被占比。

NDVI 作为衡量植被活力和生长状况的指标,能够很好地反映植被的光合作用能力,且该指标与植被

生产力直接相关,因此 NDVI 是影响黄土高原 NEP 及其变化趋势时空变化的最关键因素。黄土高原植被的生长和分布受水分条件的限制,而降雨量的高低则直接决定了土壤湿度和植被可利用的水分,进而影响了植被光合作用能力,最终作用于 NEP 时空分布及其变化^[29]。另外,土壤容重不仅反映了土壤结构紧实程度,还与土壤通气性、保水性和养分状况等密切相关,因此合适的土壤容重更有利于根系生长、养分吸收和土壤有机质积累,良好的土壤结构更能促进根系发展和水分利用,从而提高植被 NDVI 值^[30],反过来又增强了土壤的碳储存能力,形成了一个正向的反馈循环,从而促进 NEP 增加。因此,地表覆盖、植被、降雨和土壤属性共同影响了 2000—2022 年黄土高原生态系统碳汇时空分布变化。

4.2 结论

(1) 黄土高原 2000—2022 年 NEP 呈现出自东南向西北递减的空间分布特征,平均值为 33.44 gC/m^2 ,年均碳汇总量为 21.27 Tg C ,其中山西省年均碳汇总量最高,为 6.41 Tg C ,河南省年均碳汇总量最低,为 0.80 Tg C 。2022 年黄土高原 NEP 现状水平为 39.9 gC/m^2 ,年碳汇总量达到 25.40 Tg C 。

(2) 黄土高原 NEP 年际变化特征总体表现为明显上升后逐渐趋于稳定,增长速率为 $0.70 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中,碳汇能力上升趋势最明显的为陕西省和山西省,增长速率分别为 $0.98, 0.80 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,黄土高原陆地生态系统碳汇能力每年增加 0.45 Tg C ,其中山西省和陕西省贡献最大,河南省贡献最小。

(3) 在研究时段内,黄土高原森林植被的碳汇能力和增汇能力最高,分别为 $54.47, 0.90 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。但由于草地面积较大,因此草地碳汇总量和增汇贡献均高于森林。与草地、农田和裸地相比,草地—森灌、农田—林草、裸地—林草提升原地表覆盖碳汇能力 $83.2\%, 14.0\%$ 和 81.1% ,且提升增汇能力 $5.6\%, 15.8\%, 127.7\%$ 。

(4) 单一影响因子中,NDVI 作为植被生物量指标,是驱动黄土高原生态系统 NEP 时空动态变化的主要因素。双因子相互作用时对碳汇能力的解释力更强,因此 NDVI 与降雨和土壤容重的交互作用对 NEP 空间分异以及 NEP 趋势变化的影响也不可忽视。

参考文献(References):

- [1] Lei T J, Feng J, Zheng C Y, et al. Review of drought impacts on carbon cycling in grassland ecosystems[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14(2): 462-478.
- [2] 张莉,郭志华,李志勇.红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J].应用生态学报,2013,24(4):1153-1159.
Zhang L, Guo Z H, Li Z Y. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: research progress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1153-1159.
- [3] 曹云,张称意,孙应龙,等.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[J].生态学报,2023,43(9):3488-3499.
Cao Y, Zhang C Y, Sun Y L, et al. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration and their responses to climatic factors in North China from 2000 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3488-3499.
- [4] Zhang R, Zhao X Y, Zuo X A, et al. Drought-induced shift from a carbon sink to a carbon source in the grasslands of Inner Mongolia, China[J]. *Catena*, 2020, 195: 104845.
- [5] 杨欣,薛华柱,董国涛,等.1982—2022 年祁连山植被变化及其驱动因子[J].生态学报,2024,43(6):1576-1586.
Yang X, Xue H Z, Dong G T, et al. Vegetation changes and driving factors in the Qilian Mountains during 1982—2022[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1576-1586.
- [6] 方德昆,闫小月,张学珍,等.1982—2022 年黄土高原归一化植被指数变化的时空特征[J].中国环境监测,2023,39(5):13-20.
Fang D K, Yan X Y, Zhang X Z, et al. Temporal and spatial characteristics of normalized difference vegetation index (NDVI) changes in the Loess Plateau from 1982 to 2022[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(5): 13-20.
- [7] 王一,郝利娜,许强,等.2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J].生态学报,2023,43(6):2397-2407.
Wang Y, Hao L N, Xu Q, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2397-2407.
- [8] 吕文宝,徐占军,郭琦,等.黄土高原陆地生态系统碳储量的时间演进与空间分异特征[J].水土保持研究,2024,31(2):252-263.
Lü W B, Xu Z J, Guo Q, et al. Research on the temporal evolution and spatial differentiation characteristics of carbon storage in terrestrial ecosystems on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2): 252-263.
- [9] 刘春雨,董晓峰,王春燕,等.甘肃省县级行政单元 NEP 的时空异质性[J].兰州大学学报:自然科学版,2018,54(1):82-89.
Liu C Y, Dong X F, Wang C Y, et al. Time and space variability of the county level administrative unit to NEP in Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2018, 54(1): 82-89.
- [10] 王菲,曹永强,周姝含,等.黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J].生态学报,2023,43(6):2501-2514.
Wang F, Cao Y Q, Zhou S H, et al. Estimation of vegetation carbon sink in the Yellow River Basin ecological function area and analysis of its main meteorological factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2501-2514.

- logical elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6):2501-2514.
- [11] 何源,李星锐,杨晓帆,等.内蒙古锡林郭勒盟典型草原固碳量及固碳潜力估算[J].*草地学报*, 2021, 29(10): 2274-2285.
- He Y, Li X R, Yang X F, et al. The estimation of actual and potential carbon sequestration in typical steppe in xilingol county, Inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10):2274-2285.
- [12] 孙倩,张美玲,王鑫婧,等.不同气候情景下甘肃草地碳收支时空模拟与预测[J].*环境科学*, 2023, 44(10): 5842-5851.
- Sun Q, Zhang M L, Wang X J, et al. Spatiotemporal simulation and prediction of grassland carbon budget in Gansu under different climate scenarios[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10):5842-5851.
- [13] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].*中国科学:地球科学*, 2022, 52(6):1010-1020.
- Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: method, progress and prospect[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4):641-651.
- [14] 赵宁,周蕾,庄杰,等.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J].*生态学报*, 2021, 41(19):7648-7658.
- Zhao N, Zhou L, Zhuang J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [15] Zhao J F, Ma J Y, Zhu Y J. Evaluating impacts of climate change on net ecosystem productivity (NEP) of global different forest types based on an individual tree-based model FORCCHN and remote sensing[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 182:103010.
- [16] Huang N, Wang L, Song X P, et al. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.
- [17] 刘凤,曾永年.2000—2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].*生态学报*, 2021, 41(14):5792-5803.
- Liu F, Zeng Y N. Analysis of the spatio-temporal variation of vegetation carbon source/sink in Qinghai Plateau from 2000—2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14):5792-5803.
- [18] 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 J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [19] 秦云,肖凤劲,於琍,等.碳中和评估与预测预估方法研究进展[J].*中国环境管理*, 2024, 16(1):63-72.
- Qin Y, Xiao F J, Yu L, et al. Advances in the methodologies on carbon neutrality assessment, prediction and projection[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2024, 16(1):63-72.
- [20] 王楠楠,刘耀林,尹峰,石永阁,刘艳芳.顾及地形校正的生态系统碳汇估算与分析[J].*武汉大学学报:信息科学版*. DOI:10.13203/j. whugis20230174
- Wang N N, Liu Y L, Yin F, et al. Estimation and analysis of net ecosystem carbon sink considering the topographical correction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. DOI: 10.13203/j. whugis20230174
- [21] Zhang D N, Zhao Y H, Wu J S. Assessment of carbon balance attribution and carbon storage potential in China's terrestrial ecosystem[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189:106748.
- [22] 周怡婷,严俊霞,刘菊,等.2000—2021年黄土高原生态分区 NEP 时空变化及其驱动因子[J].*环境科学*, 2024, 45(5):2806-2816.
- Zhou Y T, Yan J X, Liu J, et al. Spatio-temporal variation in NEP in ecological zoning on the Loess Plateau and its driving factors from 2000 to 2021[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5):2806-2816.
- [23] 裴宏泽,赵亚超,张廷龙.2000—2020年黄土高原 NEP 时空格局与驱动力[J].*干旱区研究*, 2023, 40(11): 1833-1844.
- Pei H Z, Zhao Y C, Zhang T L. Analysis of spatial and temporal patterns and drivers of local regional NEP in the Loess Plateau from 2000 to 2020[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(11):1833-1844.
- [24] 徐铭璟,冯强,吕萌.生态系统服务权衡及其影响因素:以黄河流域山西段为例[J].*干旱区研究*, 2024, 41(3):467-479.
- Xu M J, Feng Q, Lü M. Tradeoffs of ecosystem services and their influencing factors: a case study of the Shanxi Section of the Yellow River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(3):467-479.
- [25] 张杰铭,赵广举,金秋,等.水土保持植物措施碳汇研究综述[J].*中国水土保持*, 2024(2):6-12, 75.
- Zhang J M, Zhao G J, Jin Q, et al. A review of carbon sink research on vegetable measures of soil and water conservation[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(2):6-12, 75.
- [26] 王丽蓉,石培基,尹君锋,等.碳中和视角下甘肃省县域碳收支时空分异与国土空间分区优化[J].*环境科学*: 2024, 45(7):4101-4111.
- Wang L R, Shi P J, Yin J F, et al. Spatio-temporal Differentiation of County Carbon Budget and Territorial Space Optimization Zoning Strategy in Gansu Province from the Perspective of Carbon Neutrality[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7):4101-4111.

- 2011,66(10):1379-1389.
- [21] 程宪波,陶宇,欧维新.江苏省乡村三生功能耦合协调时空变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(1):222-233.
- Cheng X B, Tao Y, Ou W X. Spatio-temporal characteristics and evolutions of rural production-living-ecological function and coupling coordination in Jiangsu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(1):222-233.
- [22] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(6):1100-1114.
- Wang C, Tang N. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural productionliving-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality [J]. Geographical Research, 2018,37(6):1100-1114.
- [23] 程佳琦,林伊琳,赵俊三,等.昆明市“三生空间”功能耦合协调时空特征与影响因素[J].水土保持研究,2024,31(3):299-310,319.
- Cheng J Q, Lin Y L, Zhao J S, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of functional coupling and coordination of ‘ProductionLiving-ecological’ spaces in Kunming city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):299-310,319.
- [24] 纪璇,李琳娜,程明洋.安徽省县域乡村“三生”功能及耦合协调时空格局分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(10):150-161.
- Ji X, Li L N, Cheng M Y. The spatio-temporal pattern of rural “production-living-ecological” function and coupling coordination at county level of Anhui Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(10):150-161.

~~~~~  
(上接第 265 页)

- [27] 韩苗,王瑾,赵辰,等.基于用地竞争的潜在土地利用冲突权衡分区研究:以山西省晋中市为例[J].湖北农业科学,2022,61(9):66-73.
- Han M, Wang J, Zhao C, et al. Research on trade-off regionalization of potential land use conflicts based on land use competition: a case study of Jinzhong city in Shanxi Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022,61(9):66-73.
- [28] 龙花楼.中国乡村转型发展与土地利用[M].北京:科学出版社,2012.
- Long H L. Land use and rural transformation development in China[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [29] 蒋万芳,肖大威.农村住宅建设管理的思考与探讨:以广东省增城市为例[J].规划师,2011,27(2):83-87,92.
- Jiang W F, Xiao D W. Countryside residential building management: zengcheng example[J]. Planners, 2011, 27(2):83-87,92.
- [30] 程新艳,王坤鹏,欧名豪.家庭生命周期视角下农村居民点整理的农户意愿影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(9):81-89.
- Cheng X Y, Wang K P, Ou M H. Research on influencing factors of farmers’ willingness of rural settlements consolidation from the perspective of family life cycle[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(9):81-89.

~~~~~  
(上接第 274 页)

- [27] 张伟,龙闹,李盛港,等.基于生态本底-格局-潜力框架的国土空间生态修复分区研究:以粤港澳大湾区为例[J].热带地理,2024,44(2):212-225.
- Zhang W, Long N, Li S G, et al. Zoning of territorial space for ecological restoration based on potential ecological background pattern framework: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao creater bay area [J]. Tropical Geography, 2024,44(2):212-225.
- [28] Yang H F, Zhong X N, Deng S Q, et al. Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River Basin, China[J]. Catena, 2021,206:105542.
- [29] 王进,周广胜,何奇瑾,等.内蒙古克氏针茅草原净生态系统碳交换的物候特征及遥感监测[J].应用生态学报,2024,35(3):659-668.
- Wang J, Zhou G S, He Q J, et al. Phenological characteristics of net ecosystem carbon exchange of *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China and its remote sensing monitoring [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(3):659-668.
- [30] 黄奇,于冯,权伟,等.温州城市绿地的土壤呼吸特征及影响因素[J].山西农业大学学报:自然科学版,2024,44(1):79-88.
- Huang Q, Yu F, Quan W, et al. Soil respiration characteristics and influencing factors in urban green spaces of Wenzhou, China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2024,44(1):79-88.