

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.010

汪晓珍, 呼海涛, 吴建召, 等. 2000—2020 年陕西省陆地生态系统 NPP 时空变化与潜力[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

WANG Xiaozhen, HU Haitao, WU Jianzhao, et al. Spatial and temporal variation and potential of NPP in terrestrial ecosystems in Shaanxi province from 2000 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

2000—2020 年陕西省陆地生态系统 NPP 时空变化与潜力

汪晓珍¹, 呼海涛², 吴建召¹, 上官周平^{1,3}, 邓蕾^{1,3}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省林业调查规划院, 西安 710000;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 在“双碳”战略实施背景下, 准确地评估陆地生态系统固碳现状、速率与潜力, 对实现“碳中和”目标意义重大。陕西省横跨 3 个气候带, 南北气候差异大, 植被类型丰富。近年来, 由于多项生态工程(退耕还林还草、三北防护林等)的实施, 陕西省植被覆盖度进一步提升至 60.7%, 固碳能力巨大。陆地生态系统 NPP(植被净初级生产力)是反映植被固碳能力的重要指标, 然而, 关于陕西省 NPP 的时空动态变化, 以及 NPP 未来潜力的空间分布鲜有研究。[方法] 以陕西省陆地生态系统为研究对象, 利用 CASA 模型和邻域相似空间分布法评估陕西省植被 NPP 及其潜力的时空分布特征。[结果] (1) 陕西省植被总固碳量在 2000 年和 2020 年分别为 687 和 1 020 Tg, 增加 333 Tg, 增幅为 48.5%。(2) 陕西省 NPP 呈南高北低, 中间存在最高值或最低值的空间分布态势, 平均值在 2000 年和 2020 年分别为 333.2 和 494.8 (gC)/m², 共增加 161.6 (gC)/m², 增加幅度呈北高南低的分布态势。(3) 陕西省生态系统 NPP 的实际最大潜力为 2 304 Tg, 相比于 2020 年增加 41.3%, 空间分布态势表现为由南到北逐渐降低, 且空间分布特征均表现高度空间自相关特性, 但局部差异较大。[结论] 陕西省植被总固碳量在 2000—2020 年显著增加, 同时, 未来植被固碳潜力巨大。评估和预测陕西省区域尺度生态系统 NPP 时空动态变化及潜力空间分布特征, 可为科学评价提升区域碳汇能力提供一定的评价体系和理论参考。

关键词: 固碳量; 固碳速率; 固碳潜力; 模型模拟

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

Spatial and Temporal Variation and Potential of NPP in Terrestrial Ecosystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020

WANG Xiaozhen¹, HU Haitao², WU Jianzhao¹, SHANGGUAN Zhouping^{1,3}, DENG Lei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Forestry Survey and Planning Institute, Xi'an 710000, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] In the context of the “dual-carbon” goal, accurately assessing the status, rate and potential of carbon sequestration in terrestrial ecosystems is crucial for achieving “carbon neutrality”. Shaanxi Province, which spans three climatic zones and have a large difference in climate between north and south, with abundant vegetation types. In recent years, the vegetation coverage in Shaanxi has been further improved due to the implementation of various ecological projects (Grain for Green, Three-North Shelterbelt, etc.). Its vegetation coverage reaches up to 60.7%, what resulted in huge carbon sequestration capacity. Net primary productivity (NPP), as one of the most important indicators to reflect the carbon sequestration capacity of vegetation, there are few studies on spatial and temporal dynamic changes of NPP and the spatial distribution of NPP potential in the future in Shaanxi province. [Methods] Based on these, we evaluated the temporal and spatial distribution characteristics of vegetation NPP and its potential in Shaanxi

收稿日期: 2023-09-11

修回日期: 2023-12-15

录用日期: 2023-12-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243225)

第一作者: 汪晓珍(1995—), 女, 在读博士研究生, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: wxzbw@nwfau.edu.cn

通信作者: 邓蕾(1986—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域生态恢复及其固碳效应研究。E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

province through the CASA model and the neighborhood similarity spatial distribution method. [Results] (1) Total carbon sequestration by vegetation increased by 333 Tg, with an increase of 48.5% from 2000 to 2020 in Shaanxi province. (2) NPP was higher in the south and lower in the north, with the highest or lowest value in the middle. The average value in 2000 and 2020 were 333.2 g C/m² and 494.8 g C/m², respectively, with a total increasement of 161.6 g C/m², and the increase amplitude showed a distribution trend of high in the north and low in the south in Shaanxi. (3) The carbon sequestration potential was 2 304 Tg which increased by 41.30% compared with the 2020. The spatial distribution trend was gradually decreasing from south to north, and the spatial distribution characteristics showed high spatial autocorrelation characteristics, but the local differences were large. [Conclusion] The total vegetation carbon sequestration in Shaanxi province increased significantly from 2000 to 2020, and there is huge potential for vegetation carbon sequestration in the future. This study calculated the spatial and temporal dynamic changes and predicted potential spatial distribution characteristics of NPP in the regional scale ecosystem in Shaanxi province, which can provide an evaluation systematic and theoretical reference for scientific evaluation and improvement of regional carbon sink capacity.

Keywords: carbon sequestration amount; carbon sequestration rate; carbon sequestration potential; model simulation

Received: 2023-09-11

Revised: 2023-12-15

Accepted: 2023-12-27

工业革命后,化石燃料的大量燃烧导致全球变暖,引起干旱、冰川融化、海平面上升等一系列环境问题^[1],其中,CO₂ 过量排放引起的气候变暖不容忽视。为减少大气 CO₂ 排放,缓解全球变暖趋势,各国达成共识,纷纷提出“碳中和”目标^[2]。为更好地应对全球气候变化,2019 年,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的承诺^[3],随后,“碳达峰、碳中和”上升为国家战略。根据 IPCC 最新报告^[4],陆地生态系统碳汇是制约大气 CO₂ 升高的主要因素,其年固碳量约占全球碳排放总额的 31%,因此,陆地生态系统固碳被认为是全球气候变化背景下抵消“碳排放”,实现“碳中和”的重要手段^[5]。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)反映植物群落在自然环境中的生产能力,是陆地生态系统碳储量的重要组成部分和决定生态系统碳源和碳汇功能的重要因素,也是表示植被固碳能力最显著的变量^[6]。土地利用是影响植被固碳速率和固碳能力的直接人为驱动因素之一,在人们对土地の利用方式发生改变后,生态系统的结构(物种组成、生物量)和功能(生物多样性、碳、氮平衡等)也随之发生变化,进而影响生态系统的碳循环^[7]。生态系统的固碳能力在不同的土地利用方式和植被恢复阶段的差别很大。例如,森林的固碳潜力远大于草地和耕地,

同时,幼龄林的固碳能力增长潜力巨大,但老龄林的固碳能力则处于相对稳定的阶段^[8]。由于不同生态系统固碳能力的限制及不同植被类型所处的生长阶段和区域不同,其固碳潜力的可增长范围也存在较大的不确定性^[9]。多位学者对陕西省 NPP 的研究主要集中在 NPP 的时空分布、驱动因素、优先区识别、固碳潜力等方面,但是在模型参数的本地化还存在问题。王钊等^[10]利用 MOD17A3 NPP 时间序列数据对陕西省的 NPP 时空变化特征和驱动因素进行分析表明,陕西省 NPP 在 2000—2015 年整体呈增长趋势,且人类活动对 NPP 的影响逐渐显著;徐干君等^[11]基于实测生物量和 NPP 数据,借助地统计学方法,研究陕西黄河湿地植被固碳潜力表明,草本沼泽的固碳潜力最大。以上研究^[12]在对 NPP 量化时,未考虑参数的本地化;在构建 NPP 潜力模型时,忽略 NPP 潜力的空间异质性,同时,综合区域尺度生态系统固碳现状、速率和潜力的研究鲜有报道。在当前 CO₂ 浓度持续增加背景下,估算生态系统固碳现状、速率和潜力对了解区域固碳家底,指导生态系统碳汇管理,进而实现“碳中和”目标具有重要的指导意义^[9]。

陕西省地貌类型复杂,气候类型多样,跨中温带、暖温带和北亚热带 3 个气候带,植被类型丰富^[13],加上我国在陕西省实施大规模的退耕还林还草、天然林保护、退牧还草等生态工程,使得该区的生态环境发生巨变,植被覆盖度进一步提升到 60.7%,显著影响陆地生态系统的植被固碳量。然而,目前尚缺少关于

陆地生态系统植被固碳现状、速率和潜力的研究。因此,选取陕西省为研究区域,通过对该区域植被NPP及其潜力的时空变化特征定量分析,探讨不同地区生态系统植被年固碳现状和潜力变化特征,以为生态系统碳汇能力评估和固碳潜力预测提供数据参考,更好地服务我国“碳达峰、碳中和”战略。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

陕西省(31°42′—39°35′N,105°29′—111°15′E)位于我国西北部,下辖10个地级和69个县级行政单位,全省总面积约为20.56万km²(图1)。气候类型为大陆性季风气候,年均降水量为676 mm,年均温度为13.3℃;地势呈现南北高,中间低的分布态势,海拔为199~3665 m,包括高原、山地、平原和盆地等地貌类型^[14]。根据陕西省的地形地貌和气候特征,可将其分为陕北(榆林,延安)、关中(宝鸡,西安,咸阳,铜川,渭南)和陕南(商洛、汉中、安康)3个区域(图1)。全省森林覆盖率41%,活立木蓄积量4.24亿m³,省内主要土地利用类型为林地、草地和耕地,其中,陕北地区的土地利用类型以草地为主,关中地区的土地利用类型以建设用地、林地和耕地为主,陕南地区的土地利用类型则以林地为主。近年来,退耕还林(草)、三北防护林、天然林资源和自然生态建设等工程的实施,使得当地天然林面积显著增加,是陕西碳汇的主要来源^[15]。

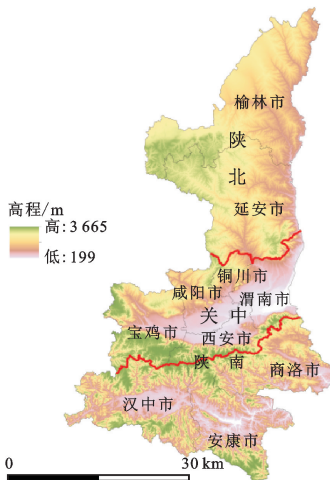


图1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

所用到的数据主要包括土地利用数据、NDVI数据、气象数据、地形数据、行政区划数据等。各数据的空间分辨率最后统一为250 m,时间段为2000年、2005年、2010年、2015年和2020年。土地利用数据来自中国土地覆盖数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591>),空间分辨率为30 m,数据的总体精

度为80%^[16]。按照中国土地资源分类系统标准^[16]和研究需要,将该数据重分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。

NDVI数据(归一化植被指数)来源于美国国家航空和宇宙航行局(NASA, <https://lpdaac.usgs.gov>),空间分辨率为250 m,时间分辨率为逐月。

气象数据包括降水、温度和太阳辐射数据,均来自于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn>),利用ANUSPLIN软件插值为时空分辨率分别为1月和250 m×250 m的数据。干旱指数基于降雨和温度数据利用他们之间的函数关系进行计算^[15]。

地形数据(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m;坡度和坡向基于DEM数据通过ArcGIS中的空间分析工具计算得到。

行政区划数据包括陕西省分区、市级和县级边界,均来自陕西省人民政府网站(<https://www.shaanxi.gov.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 植被净初级生产力估算—CASA模型 CASA模型是一种基于植被生理过程估算植被NPP,通过输入气象数据(月降雨量、月均温度、月太阳辐射量)和遥感数据(月NDVI、最大光能利用率)估算植被NPP(植被净初级生产力)。采用改进的CASA模型,具体的NPP计算方法引用朱文泉等^[17]关于最大光能利用率的研究成果。

1.3.2 植被固碳潜力评估

(1)植被固碳潜力空间分布—领域相似空间分布法 根据我国生态系统仍以保护为主的大背景,假设各土地利用类型不发生较大改变。根据“相似相容”原则,即在自然环境相似的区域,植被所能固定的最大固碳量相同。相关方法也应用到短期内区域自然条件和管理政策不发生较大改变的地区固碳潜力评估^[18]。基于此,选取可反映区域生态系统固碳差异的土地利用类型、干旱指数、土壤类型、坡度、坡向等影响因子,通过叠加分析,将研究区划分为条件相似的50772个亚区。通过提取每个亚区内NPP的最大值,得到研究区的植被固碳能力增长潜力指数的空间分布。具体计算公式为:

$$C_{index} = \frac{C_{poten} - C_{origi}}{C_{origi}} \quad (1)$$

式中: C_{index} 为固碳潜力指数(无量纲),取值范围为0~1,越接近1,表示该区域的固碳潜力越强; C_{origi} 为每个亚区碳储量现状值(Tg); C_{poten} 为对应区域内所能固定的最大固碳量(Tg)。

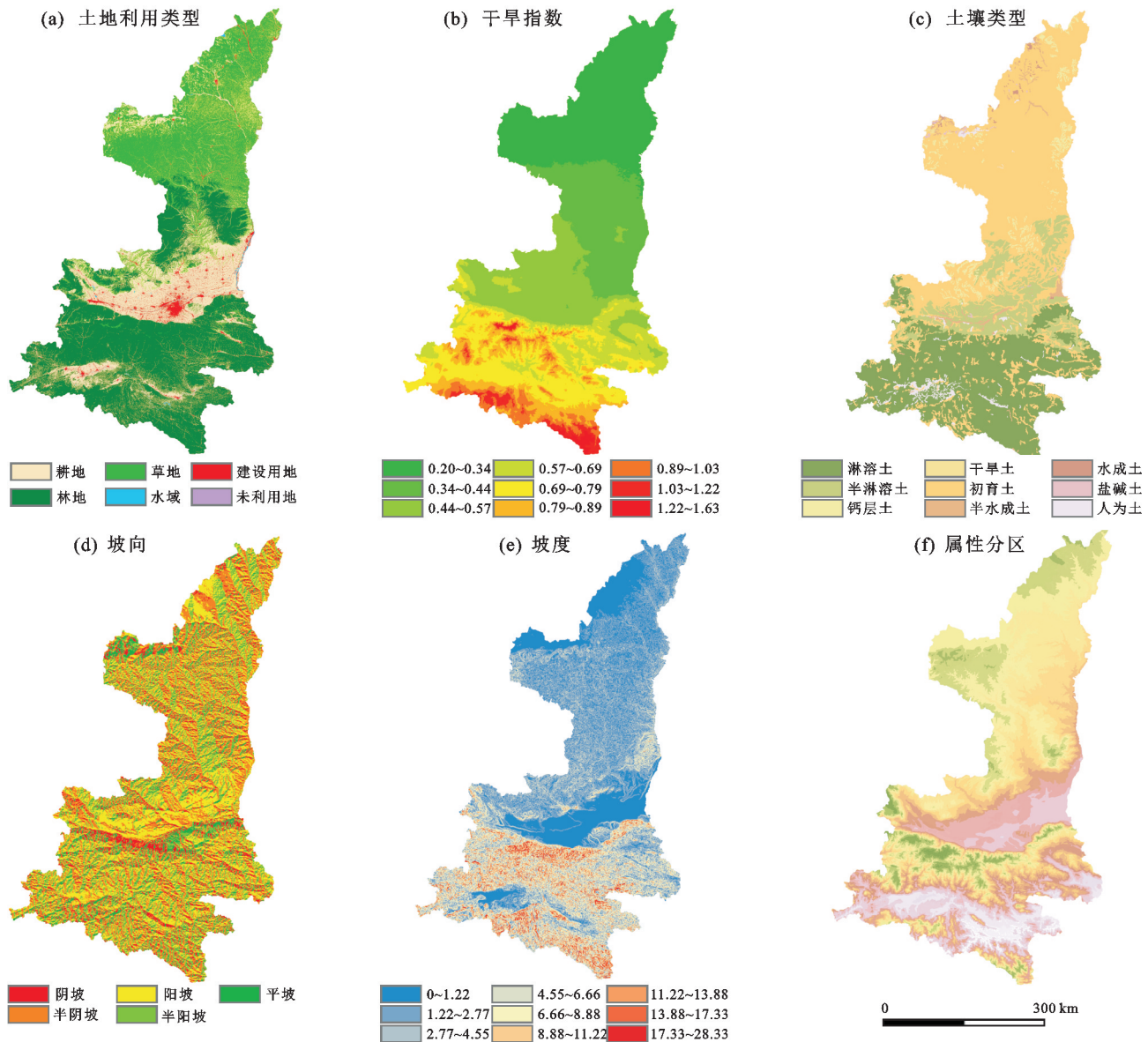


图 2 陕西省因子叠加分区

Fig. 2 The subregion of influencing factors in Shaanxi

(2)植被 NPP 的现状与潜力的空间特征

为进一步探究植被 NPP 及其潜力的高值和低值在空间上的分布特征和聚集情况,采用 Getis—Ord G_i^* (G_i^*)统计指数来对其空间的冷热点分布进行划分。通常基于 ArcGIS 软件中的热点分析实现研究区冷 G_i^* 指数的计算^[19], G_i^* 的统计学意义则基于 Z 值来检验^[19], Z 值为正,表示是高值(热点)聚集,为负则表示负值(冷点)聚集, Z 值的大小为热(冷)点的聚集程度, Z 值越大,聚集程度越紧密。 G_i^* 和 Z 值的计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{xj} \cdot x_j}{\sum_j^n x_j}$$

(2)

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{VAR(G_i^*)}} = \frac{\sum_j W_{ij-x} \sum_j^n W_{xj}}{\sqrt{\frac{n \sum_j^n W_{ij}^2 - (\sum_j^n W_{ij})^2}{n-1}}}$$

(3)

式中: W_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵; x_j 为斑块 j 的属性值; x 为所有属性的平均值; n 为总斑块数。根据前人^[19]研究,冷热点的划分标准为:若 $Z(G_j^*) > 2.58$,则定为极显著热点区域; $1.65 < Z(G_j^*) \leq 2.58$,则定为显著热点区; $1 < Z(G_j^*) \leq 1.65$,则定为热点区域; $-1 \leq Z(G_j^*) \leq 1$,则定为不显著区域; $-1.65 \leq Z(G_j^*) < -1$,则定为冷点区域;在 $-2.58 \leq Z(G_j^*) < -1.65$,则定为显著冷点区域; $Z(G_j^*) < -2.58$,则定为极显著冷点区域。

2 结果与分析

2.1 陕西省土地利用时空变化特征

陕西省土地利用类型主要以林地、耕地和草地为主,其中,林地主要分布在陕南地区,耕地主要分布在关中地区,草地则主要分布在陕北地区,3 类土地利用类型面积占全省面积的 95% 以上(图 3)。从土地利用类型间的转换来看,由耕地转换为林地主要分布

在陕北黄土高原和陕南的安康河谷等地,由其他土地利用类型转换为建设用地则主要分布在关中地区和陕南汉江流域(图 4)。从时间变化来看,2000—2020 年陕西省土地利用类型的变化主要以耕地(−17.2%)、未利用地(−92.8%)的减少和林地(+10.8%)、草地(+1.3%)、建设用地(+107.2%)的增加为主。

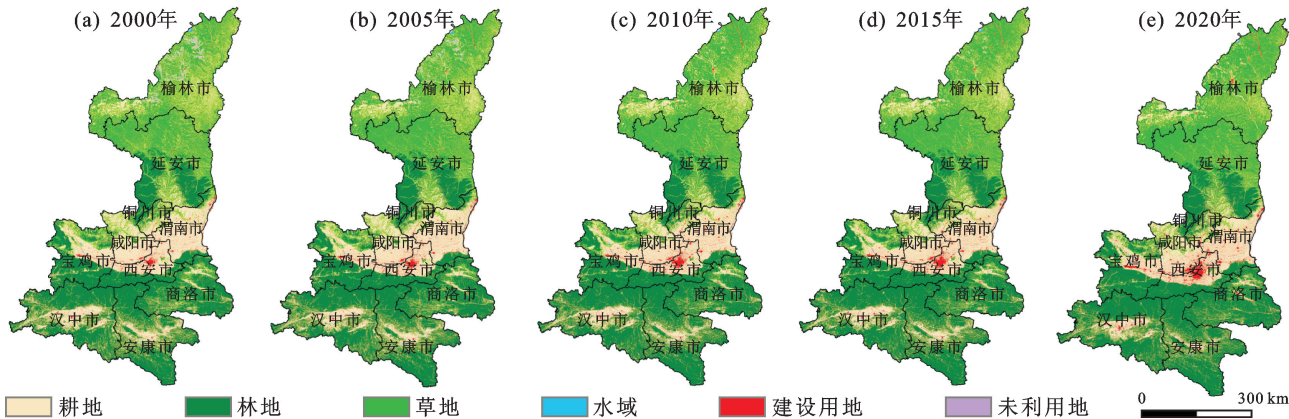


图 3 2000—2020 年陕西省土地利用类型空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of land use type from 2000 to 2020 in Shaanxi

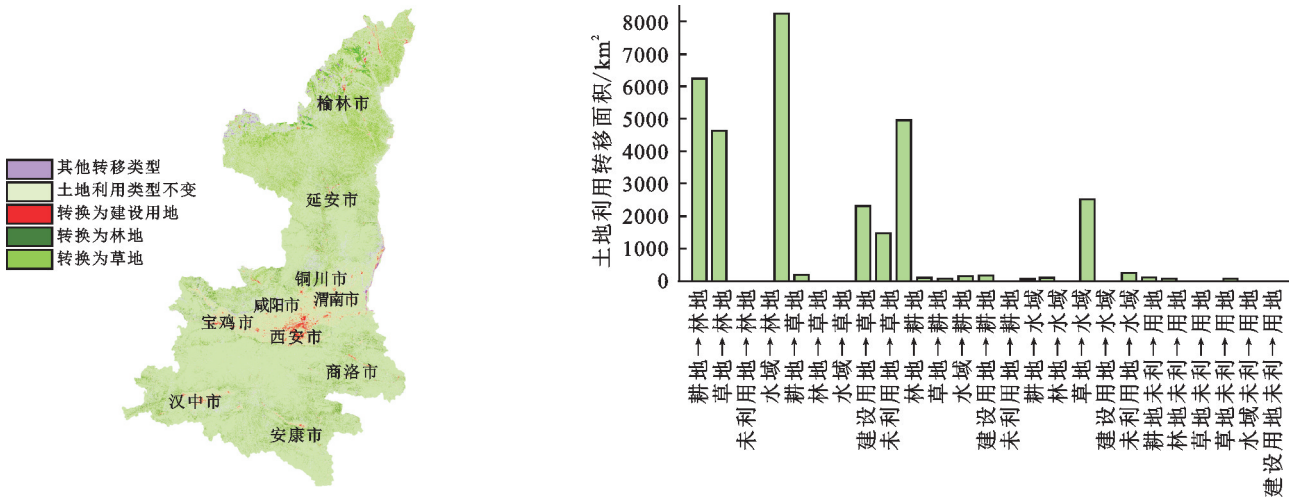


图 4 2000—2020 年陕西省土地利用类型转移

Fig. 4 The land use type change from 2000 to 2020 in Shaanxi

2.2 陕西省生态系统 NPP 时空变化特征

陕西省 NPP 空间分布具有明显的空间异质性,呈现由南到北逐渐增减,中间存在部分低值或高值的分布态势(图 5)。NPP 高值区主要分布在植被覆盖度较高的宝鸡、安康以南,汉中、安康以北的秦巴山区,低值区则主要分布在榆林市和关中经济较发达的西安、咸阳等地(图 5)。从 NPP 变化的空间分布来看,陕北地区 NPP 增加明显,尤其是延安北部(图 5)。

近 20 年(2000—2020),陕西省及其所辖各地区 NPP 单位面积平均值均呈增加趋势,其中,陕西省生态系统 NPP 平均值在 2000 年和 2020 年分别为 333.21 和 494.81 gC/m²,共增加 161.60 gC/m²;2000 年和 2020 年植被总固碳量分别为 687 和 1 020 Tg,

共增加 333 Tg,增幅为 48.5%。从分区变化来看,陕西省 3 个区域的变化为陕北(+185.91 gC/m²)>关中(+152.15 gC/m²)>陕南(+92.78 gC/m²/年);从各市变化来看,延安市(+236.73 gC/m²)和汉中市(+210.68 gC/m²)的增加尤为显著(图 6)。

2.3 陕西省生态系统植被 NPP 提升潜力的空间分布特征

陕西省植被 NPP 的增长潜力值分布呈较强的空间异质性,整体呈由北到南逐渐增减,中间存在部分最高值或者最低值的分布趋势(图 7)。植被 NPP 增长潜力值的高值区主要分布在延安市的中南部、汉中、安康和商洛等地,低值区则主要分布在榆林市、西安市和渭南市(图 8)。

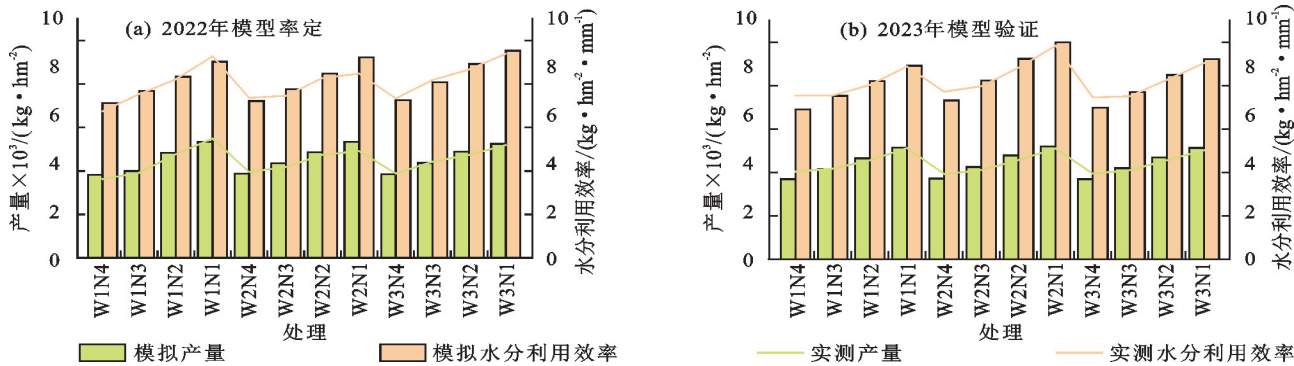


图 5 2000—2020 年陕西省生态系统 NPP 空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of NPP from 2000 to 2020 in Shaanxi

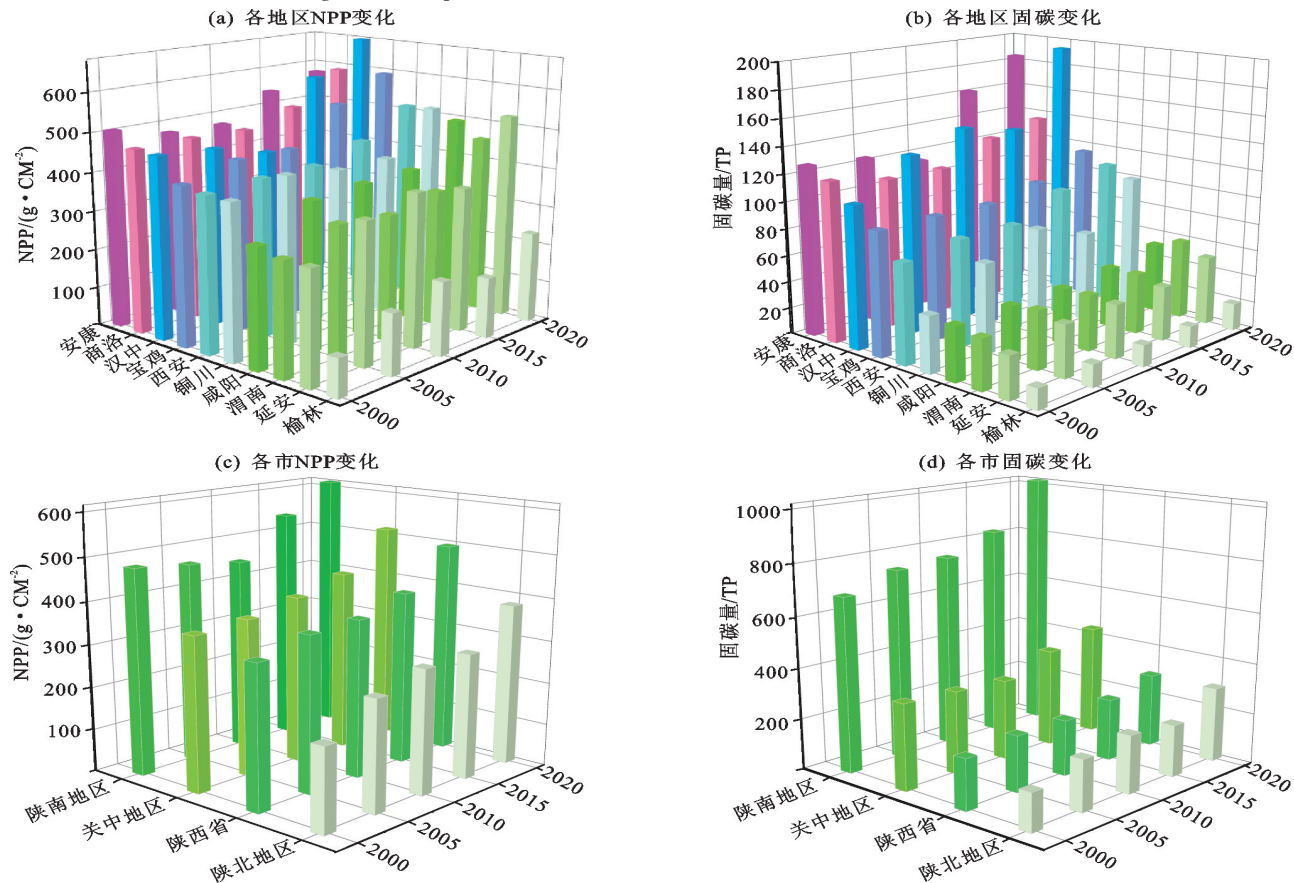


图 6 2000—2020 年陕西省生态系统 NPP 时间变化

Fig. 6 The temporal variation of NPP from 2000 to 2020 in Shaanxi

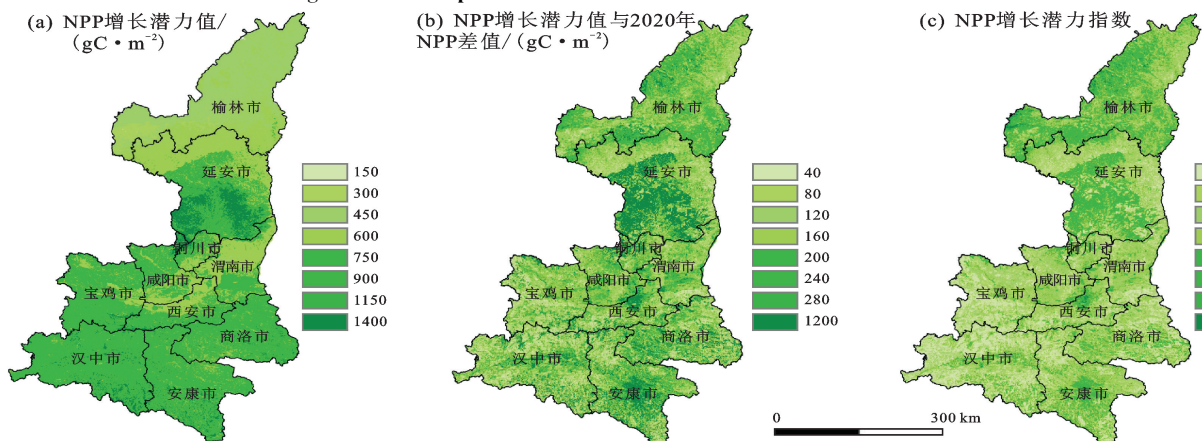


图 7 陕西省植被 NPP 增长潜力空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of NPP potential in Shaanxi

由图 7 可知,陕西省各市的植被 NPP 存在很大的增长潜力,尤其是榆林市、延安市、安康市、商洛市。整体来看,陕西省的植被 NPP 最高可达 2 305 Tg,可增加率为 41.3%;陕北、关中和陕南的植被 NPP 分别可达 751, 609, 939 Tg,可增长率分别为 60.0%, 31.4%, 35.4%(表 1)。

表 1 陕西省植被生态系统固碳潜力总值
Table 1 The carbon sequestration potential by vegetation in Shaanxi Tg

		2020 年 固碳量	NPP 潜力	可增加植被 固碳量	可增加率
陕北	陕西	1 020	2 304	673	41.3%
	榆林	194	272	113	71.1%
	延安	100	478	168	54.4%
	咸阳	51	111	30	36.5%
	宝鸡	52	212	40	23.4%
关中	铜川	20	46	13	41.4%
	渭南	59	125	31	32.9%
	西安	52	115	31	37.2%
	商洛	115	251	67	36.7%
陕南	汉中	184	374	80	27.4%
	安康	136	313	98	45.3%

2.4 陕西省生态系统 NPP 提升潜力热点分析

陕西省 NPP 增长潜力值、增长潜力差值、增长潜力指数均在空间上呈高度聚合状态(表 2)。以 > 90%的置信区间为评判标准,NPP 增长潜力的热点区主要位于延安、汉中和安康市,冷点则主要分布于榆林和渭南市;NPP 增长潜力与当前 NPP 的差值的热点区主要分布于陕北大部分区域及安康市,冷点则主要分布于宝鸡市和渭南市(图 8)。

表 2 陕西省 NPP 潜力全局自相关分析
Table 2 The results of global autocorrelation analysis of NPP potential in Shaanxi province

	增长潜力	增长潜力差值
Moran's 指数	0.43	0.37
预期指数	-0.01	-0.01
方差	0.003	0.003
Z 得分	7.89	6.87
p	0	0

3 讨论

3.1 陕西省生态系统 NPP 的现状 & 速率时空变化分析

陕西省面积为 20.56 万 km²,约占我国国土面积的 2.1%,其中,林地约占我国林地面积的 3.1%,草地约占我国草地面积的 1.6%,生态系统总碳储量约占全国碳储量的 3.8%^[19],有较大的固碳能力。

近 20 年(2000—2020),陕西省年固碳量整体呈增加趋势(图 5,图 6),增幅为 48.5%,与现有研究^[10]

结果基本一致,但存在部分差异,输入数据来源、处理方法、模型参数和分析方法的不同是造成差异的主要原因。陕西省植被覆盖度呈由北至南逐渐增加的空间分布格局,其中,陕北北部的植被覆盖度大部在 60%以内,陕北南部的植被覆盖度平均在 50%~90%,关中城市区域的植被覆盖度在 30%左右,陕南的植被覆盖度在 70%~90%左右^[14],与 NPP 的空间分布格局基本一致。已有研究^[20]表明,植被覆盖度对 NPP 有较好的指示作用,二者相关系数>0.9,植被覆盖度的空间分布差异性造成 NPP 空间分布异质性的主要原因。此外,陕西省基础自然条件(温度、降雨、土壤水热条件等)和人类活动(人为干扰、环境修复工程等)的空间异质性也是形成当地 NPP 空间分布格局的主要因素^[18]。

本研究表明,近 20 年(2000—2020),陕西省各分区 NPP 明显增加,但增长率差异显著(图 5)。近年来,西北地区的气候变化(温度和湿度增加)改善当地较恶劣的自然环境^[21],同时,陕西省开展一系列的生态修复工程,如退耕还林、小流域治理、矿山修复和天然林保护等,使得当地的植被覆盖条件大大改善^[10]。植被覆盖度的增加及自然条件的改善是陕西省近 20 年来生态系统碳储量和 NPP 显著增加的主要原因^[10,22]。研究^[14]表明,自退耕还林(还草)实施后,陕北林地和草地面积大幅度增加,且增加幅度大于陕南和关中,林地和草地的固碳量远大于其他土地利用类型^[9],使得陕北地区 NPP 增长率均高于其他 2 个区域。

(a) NPP增长潜力热点 (b) NPP增长潜力绝对值增长潜力热点

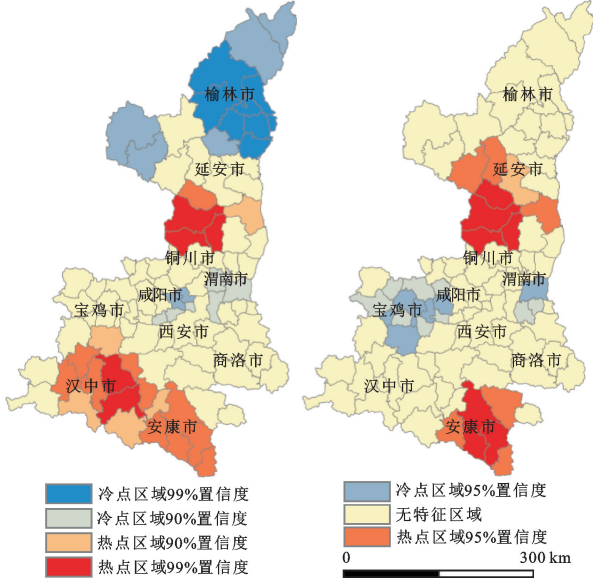


图 8 陕西省 NPP 增长潜力冷热点分布

Fig. 8 The spatial distribution of hot and cold spots of growth potential of NPP in Shaanxi

3.2 陕西省生态系统 NPP 提升潜力的空间分布特征

固碳潜力的低值主要分布在陕北黄土高原和关中平原,高值则主要分布在陕南秦巴山区和陕北洛河两侧,主要受土地利用类型的影响。陕西省林草地主要分布在陕南南部和陕北洛河两侧,森林资源丰富,植被固碳能力较强,而陕北黄土高原的生态环境脆弱,植被以耕地和草地为主,植被固碳能力也较弱(图 3)。此外,NPP 潜力值的空间分布特征与区域的自然环境(降雨、温度、植被覆盖度等)也有很强的相似性(图 7),已有研究^[23]表明,西北干旱地区的 NPP 主要受 NDVI、年均降水量、温度和坡度等的影响。适宜的水热条件、植被覆盖度、坡度可为植被生长提供良好的自然条件,进而形成陕西省 NPP 潜力值的空间分布格局^[24]。相比于当前阶段,陕北、关中和陕南地区的植被固碳量分别可增加 60.0%,31.4%,35.4%(表 1),可增长率存在明显的区别,主要是受区域植被恢复阶段和土地利用类型的影响^[7]。当前植被生态系统固碳量较高地区主要位于陕南等地,生态系统处于植被恢复的后期阶段,龄组属于近成熟或者过成熟林,年固碳量基本接近于峰值,故植被固碳量潜力的可增长值较小^[9];而陕北当前的植被固碳量较低、且在退耕还林还草等工程实施影响下,生态系统多以中幼林或者封育时间相对较短为主,植被生长还没有达到峰值,固碳速率较大,故该地区的植被固碳潜力较大^[10];关中地区的建筑用地占比较大,故该地区的植被固碳潜力也较小^[12]。

相比于当前阶段,陕西省植被固碳能力还有很大的增长空间,表明陕西省可固定更多的碳,为“碳中和”做出更大的贡献。已有研究^[13,25]表明,土地利用变化和森林部分为全球净减排潜力的贡献超过 20%,而且,土地利用优化管理可以减少目前全球超过三分之一的化石燃料排放^[23,25]。由此可见,优化土地利用结构是增加固碳量的主要途径。陕北地区气候干旱,降水量较少,植被覆盖度较低,且林草保护政策的实施显著的增加当地碳汇,因此,应在原先政策的基础上加大当地的还林(草)力度,探索适宜不同立地条件的造林模式,加大对黄土高原沟壑地带立地造林的基础设施项目建设和资金,重点关注幼龄林,提高该地区植被固碳能力^[24]。陕南地区的生态系统处于植被恢复的后期阶段,林地多属于近成熟或过成熟林,固碳能力几近饱和,改造次生林、修复退化或过密(过疏)的天然林是提高当地碳汇能力的主要途径^[12]。关中地区的建筑用地扩张迅速,碳汇能力受

人为影响较大,因此,应保障该地区的生态用地以实现“双碳”目标^[14,25]。

3.3 不确定性分析

本研究在基于人为和自然条件将研究区划分为不同亚区时,由于数据精度或分辨率不足,可能导致分区不均匀或不足够表达区域内的空间异质性,进而导致所得的固碳潜力偏大的问题,因此,需要通过提高数据质量和分辨率来提高估算精度。其次,在估算区域固碳潜力时,基于目前的固碳速率,事实上陕北等地的植被目前尚处于恢复阶段,未来的植被固碳能力还有增长空间,因此,可能造成区域固碳潜力被低估。最后,虽然可通过优化土地利用结构来提高生态系统碳储量和固碳量,但也意味着更多的经济投入,与其他的社会经济需求(如提高粮食产量)相矛盾,因此,需要制定合理的政策以最大限度地降低他们之间的权衡。

4 结论

2000—2020 年,陕西省植被 NPP 均呈显著增加趋势,2000 年和 2020 年植被年固碳量分别为 687,1 020 Tg,20 年共增加 333 Tg,增长率为 48.49%。陕西省 3 个分区植被年固碳量的变化为陕北(+145 Tg)>陕南(+96 Tg)>关中(+90 Tg)。

受自然和人类活动影响,植被单位面积 NPP 呈南高北低的变化趋势,且变化稳定性呈自北向南增加的趋势。陕西省植被 NPP 的潜力为 2 305 Tg,相比于 2020 年可增加 675 Tg。3 个分区固碳潜力增长率为陕北(62.7%)>陕南(36.5%)>关中(+34.3%)。陕西省植被 NPP 的空间分布表现为由南到北逐渐降低,且空间分布特征均表现出高度空间自相关特性(空间正相关性),但局部差异较大。

综上,要结合不同地区的自然条件和生态恢复效果,制定合理的土地优化措施,以提升植被固碳能力的“质”,最大限度地增加不同地区地植被固碳潜力,为“双碳”目标作出贡献。

参考文献:

- [1] GERBER S, JOOS F, PRENTICE I C. Sensitivity of a dynamic global vegetation model to climate and atmospheric CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10 (8): 1223-1239.
- [2] VAN SOEST H L, DEN ELZEN M G J, VAN VUUREN D P. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the paris agreement [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: e2140.
- [3] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话

- [N].中华人民共和国国务院公报,2020(28):5-7.
- XI J P. Statement at the general debate of the 75th session of the united nations general assembly[N].Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28):5-7.
- [4] O'NEILL B C, KRIEGLER E, RIAHI K, et al. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways[J].Climatic Change,2014,122(3):387-400.
- [5] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J].Nature,2000,404:858-861.
- [6] SONG L Y, LI M Y, XU H, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation net primary productivity in a typical karst area in China from 2000 to 2010[J].Ecological Indicators,2021,132:e108280.
- [7] DENG L, SHANGGUAN Z P, SWEENEY S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China[J].Scientific Reports, 2014,4:e7039.
- [8] HE N P, WEN D, ZHU J X, et al. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050[J].Global Change Biology,2017,23(4):1575-1584.
- [9] ZHANG X M, BRANDT M, YUE Y M, et al. The carbon sink potential of Southern China after two decades of afforestation[J].Earth's Future,2022,10(12):e2022EF002674.
- [10] 王钊,李登科.2000—2015年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].应用生态学报,2018,29(6):1876-1874.
- WANG Z, LI D K. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(6):1876-1874.
- [11] 徐干君,吴胜义,马浩,等.基于植被净初级生产力(NPP)的陕西黄河湿地植被固碳潜力研究[J].湿地科学与管理,2023,19(1):15-19.
- XU G J, WU S Y, MA H, et al. Carbon sequestration Potential of Shaanxi Yellow River Wetland Vegetation Based on NPP Data[J].Wetland Science and Management,2023,19(1):15-19.
- [12] 吴普侠,汪晓珍,吴建召,等.中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算[J].水土保持学报,2022,36(4):342-349.
- WU P X, WANG X Z, WU J Z, et al. Estimation of carbon stock and carbon sequestration potential for China's grain for green project[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):342-349.
- [13] WEI X D, YANG J, LUO P P, et al. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions[J].Ecological Indicators,2022,138:e108834.
- [14] 王天福,龚直文,邓元杰,等.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J].自然资源学报,2022,37(5):1214-1232.
- WANG T F, GONG Z W, DENG Y J, et al. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change[J].Journal of Natural Resources,2022,37(5):1214-1232.
- [15] FENG Y J, CHEN X J, GAO F, et al. Impacts of changing scale on Getis-Ord G_i^* hotspots of CPUE: A case study of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific Ocean[J].Acta Oceanologica Sinica,2018,37(5):67-76.
- [16] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.
- [17] 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[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J].Journal of Plant Ecology, 2007,31(3):413-424.
- [18] SHA Z Y, BAI Y F, LI R R, et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management[J].Communications Earth and Environment,2022,3:e8.
- [19] TANG X L, ZHAO X, BAI Y F, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4021-4026.
- [20] 宋艺,李小军,江涛,等.2008—2014年植被覆盖变化对黑河流域净初级生产力的影响研究[J].水土保持研究, 2017,24(4):204-218.
- SONG Y, LI X J, JIANG T. Effects of vegetation coverage change on net primary productivity of Heihe river basin during 2008-2014[J].Research of Soil and Water Conservation,2017,24(4):204-218.
- [21] 杨强,王涛.榆林地区土地利用/覆盖时空变化及其对生态脆弱性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2015,39(2):79-83.
- YANG Q, WANG T. Spatial-temporal variation of land use/cover and the analysis of its effect on ecological vul-

- nerability in Yulin city of Shaanxi province[J].Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2015,39(2):79-83.
- [22] LIU Y X, LYU Y H, BAI Y F, et al. Vegetation mapping for regional ecological research and management: A case of the Loess Plateau in China [J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(3): 410-426.
- [23] 于贵瑞,王秋凤,刘迎春,等.区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J].地理科学进展,2011,30(7):771-787.
- YU G R, WANG Q F, LIU Y C, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication[J].Progress in Geography, 2011, 30(7): 771-787.
- [24] WANG X Z, WU J Z, LIU Y L, et al. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau [J].Journal of Environmental Management, 2022, 311: e114835.
- [25] DENG L, KIM D G, LI M Y, et al. Land-use changes driven by “Grain for Green” program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J].Global and Planetary Change, 2019, 177: 101-115.