

## 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库现状及潜力评估

刘良玉柯<sup>1,2</sup>, 向银川<sup>1,2</sup>, 吴建召<sup>1,2</sup>, 汪晓珍<sup>1,2</sup>, 上官周平<sup>1,2</sup>, 邓蕾<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 评估陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量现状与潜力, 揭示其空间格局的调控因素与提升路径, 为服务区域“双碳”目标的差异化生态管理提供科学依据。[方法] 以陕西省陆地生态系统为研究对象, 基于811个实测样点数据, 结合前向特征选择与随机森林方法估算土壤有机碳储量现状, 并基于地理学第三定律评估其固碳潜力。[结果] 1) 陕西省土壤有机碳储量约为1.3 Pg, 平均碳密度约为(65.8±28.0) t/hm<sup>2</sup>, 而土壤有机碳理论最大储量可达1.6 Pg, 约为现状的1.2倍; 2) 土壤有机碳密度空间异质性显著, 自北向南呈递增趋势, 陕南地区平均碳密度[(88.1±12.3) t/hm<sup>2</sup>]约为陕北地区[(38.7±21.3) t/hm<sup>2</sup>]的2.3倍, 此格局主要由气候、地形和土地利用类型的梯度效应决定; 3) 森林是土壤固碳的主体, 贡献约61.1%的碳储量, 归因于其高植被生产力和稳定的凋落物输入; 4) 草地具有最高的固碳潜力指数(0.33), 主要原因是草地初始碳储量较低且通过植被恢复和土壤改良措施可显著提升其碳汇能力。[结论] 陕西省土壤有机碳储量固碳潜力较大, 受气候、地形与土壤条件等因素影响, 区域固碳能力差异较大, 建议因地制宜制定差异化管理策略, 优先实施草地恢复工程和森林抚育管理, 以提升全省土壤碳汇能力。研究结果可为陕西省生态修复工程实施与碳汇管理提供科学依据和数据支撑。

**关键词:** 陕西省; 土壤有机碳; 碳储量; 固碳潜力; 机器学习

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0436-11

## Evaluation of Soil Organic Carbon Pool and Sequestration Potential in Terrestrial Ecosystems of Shaanxi Province

LIU Liangyuke<sup>1,2</sup>, XIANG Yinchuan<sup>1,2</sup>, WU Jianzhao<sup>1,2</sup>,

WANG Xiaozhen<sup>1,2</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1,2</sup>, DENG Lei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering

(Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to evaluate the current status and carbon sequestration potential of soil organic carbon (SOC) storage in terrestrial ecosystems of Shaanxi Province, and to reveal the controlling factors of its spatial pattern and enhancement pathways, thereby providing a scientific basis for differentiated ecological management to support the region's "dual carbon" goals. [Methods] This study focused on the terrestrial ecosystems of Shaanxi Province. Based on data from 811 measured sampling sites, the current SOC storage was estimated by combining forward feature selection with the random forest algorithm, and the carbon sequestration potential was further assessed based on the Third Law of Geography. [Results] 1) The SOC storage in Shaanxi Province was approximately 1.3 Pg, with an average density of about (65.8±28.0) t/hm<sup>2</sup>, while the theoretical

收稿日期: 2025-11-23

修回日期: 2026-01-05

录用日期: 2026-01-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-02-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243225)

第一作者: 刘良玉柯(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统固碳效益评估研究。E-mail: Liulyk@nwafu.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

maximum SOC storage reached 1.6 Pg, approximately 1.2 times the current level. 2) The spatial heterogeneity of SOC density was significant, showing an increasing trend from north to south. The average carbon density in southern Shaanxi [ $(88.1 \pm 12.3) \text{ t/hm}^2$ ] was about 2.3 times that in northern Shaanxi [ $(38.7 \pm 21.3) \text{ t/hm}^2$ ], a pattern primarily driven by the gradient effects of climate, topography, and land use type. 3) Forests constituted the core of soil carbon sequestration, contributing about 61.1% of the total storage, which was attributed to their high vegetation productivity and stable litter input. 4) Grasslands exhibited the highest carbon sequestration potential index (0.33), mainly because their initial carbon storage was low and their carbon sink capacity could be significantly enhanced through vegetation restoration and soil improvement measures. [Conclusion] The SOC storage in Shaanxi Province demonstrates significant carbon sequestration potential. Due to differences in climate, topography, and soil conditions, regional carbon sequestration capacity differs significantly. It is recommended to develop differentiated management strategies tailored to local conditions, prioritizing the implementation of grassland restoration projects and forest tending management, to enhance the overall soil carbon sink capacity across Shaanxi. The findings can provide a scientific basis and data support for the implementation of ecological restoration projects and carbon sink management in Shaanxi Province.

**Keywords:** Shaanxi Province; soil organic carbon; carbon storage; carbon sequestration potential; machine learning

Received: 2025-11-23

Revised: 2026-01-05

Accepted: 2026-01-25

Online(www.cnki.net): 2026-02-05

工业革命以来,全球社会经济的高速发展依赖于化石能源的大量消耗,导致以二氧化碳( $\text{CO}_2$ )为主的温室气体浓度急剧上升,全球气候变化已成为威胁人类可持续发展的重大挑战<sup>[1]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告<sup>[2]</sup>明确指出,全球气温已较工业革命前上升约 $1.1^\circ\text{C}$ ,未来还将持续上升。由此引发的冰川消融、海平面上升、永久冻土层融化、极端天气频发等一系列连锁效应,正对全球生态系统和人类社会构成严重威胁<sup>[3]</sup>。为应对这一全球性挑战,国际社会正积极采取行动。2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会上郑重宣布:“中国将力争在2030年前实现‘碳达峰’、2060年前实现‘碳中和’(以下简称“双碳”目标)”。相较于已有数十年工业化积累的欧美发达国家,我国的“双碳”进程时间更紧、减排幅度更大。因此,探索行之有效的减排增汇路径已经成为当前国家发展的重大战略需求<sup>[4]</sup>。

在实现“双碳”目标的多种路径中,提升生态系统的固碳能力被视为最具成本和协同效益的自然解决方案。陆地生态系统每年大约能够吸收固定31%人为排放的 $\text{CO}_2$ ,是抵消工业排放不可或缺的缓冲带<sup>[5]</sup>。土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量比大气和生物碳库的总和还要大,其碳储量发生的微小波动即可对大气 $\text{CO}_2$ 浓度产生显著影响,进而影响全球气候变化<sup>[6]</sup>。因此,土壤碳固存在调节全球陆地生态系统的碳源汇功能、减缓全球气候变化中发挥着重要

作用<sup>[7]</sup>。然而,过去一个世纪内,全球陆地生态系统的土壤有机碳储量一直处于下降趋势,进一步加剧气候危机。在此背景下,系统开展不同尺度的土壤有机碳研究,在应对全球气候变化、提升土壤质量及推动农业可持续发展等方面均具有重要的意义。

陕西省地处我国南北之间的过渡地带,南北跨度较大,兼有南北气候特征,横跨5个土壤生物气候带,地貌类型丰富多样,在全国尺度上具有典型的区域代表性。目前,针对陕西省陆地生态系统碳汇的研究主要集中于森林生态系统<sup>[8-10]</sup>或植被碳库<sup>[11-13]</sup>,对于土壤碳库的研究仍较为薄弱<sup>[14-15]</sup>,且多局限于单一生态系统,如农田<sup>[16]</sup>或森林<sup>[17]</sup>。全省尺度上土壤有机碳储量与固碳潜力的综合研究较为匮乏。因此,科学评估陕西省土壤有机碳库现状及潜力对区域生态管理政策的制定具有重要参考价值。基于此,本文的核心科学问题可归纳为2点:1)陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量的现状及其空间分布格局如何? 2)未来区域土壤有机碳库能够达到最大碳储量是多少?不同生态系统类型和地理区域的增长潜力有何差异?为回答上述科学问题,本文通过集成811个土壤有机碳密度实测样点数据和多种环境协变量数据,旨在系统评估全省陆地生态系统土壤有机碳储量现状与固碳潜力。研究结果将为区域碳增汇路径的制定与土地资源可持续管理提供理论依据与数据支撑,同时为其他类似区域的土壤碳汇研究提供参考。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

陕西省(31°42′25″~39°35′06″N, 105°29′18″~111°14′31″E)位于中国内陆腹地,总面积20.6万km<sup>2</sup>。作为中国南北过渡的关键地带,该省南北跨度较大,地势呈现南北高、中间低的特征,地貌类型复杂多样,有高原、山地、平原和盆地等(图1)。其中,黄土高原约占全省土地面积的40%。全省年平均气温8~16℃,多年平均降水量为632.3 mm,降雨量自南向北递减,主要集中在7—9月。土壤类型多种多样,全省共有21个土类。生态系统类型主要为森林(包括乔木和灌木)、草地和农田,分别占全省总面积的44.2%、30.7%和21.6%。根据地理环境和气候特

征等,可将陕西省划分为陕南、关中和陕北3个区域。陕南指陕西省南部秦巴山区,大致包括汉中市、安康市、商洛市等,属北亚热带季风气候,土地利用类型以林地为主,土壤生物气候带属于陕南汉江盆地及低山丘陵的黄棕壤、黄褐土带。关中指陕西省中部关中平原区域,大致包括西安市、咸阳市、渭南市、宝鸡市、铜川市等,属暖温带季风气候,土地利用类型以建设用地、林地和耕地为主,土壤生物气候带属于关中平原褐土带。陕北指陕西北部的黄土高原区域,大致包括榆林市、延安市等,大部属暖温带季风气候,北部长城沿线属中温带季风气候,土地利用类型以草地为主,土壤生物气候带属于陕北黄土高原黑垆土带和长城沿线栗钙土、灰钙土带。

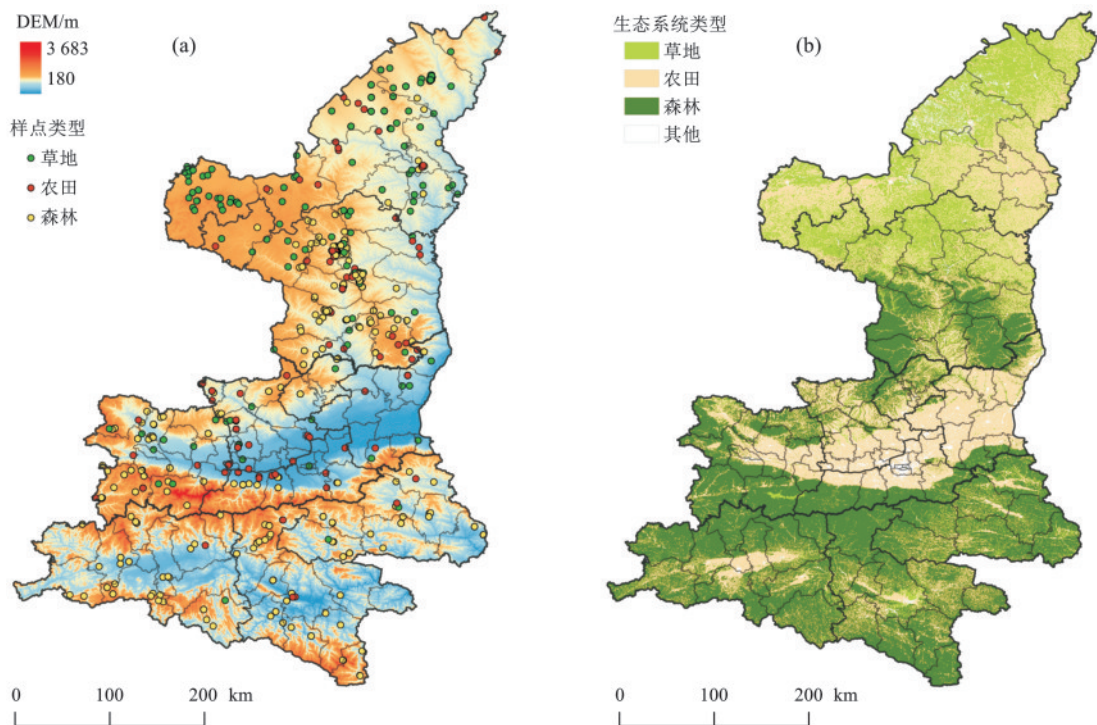


图1 陕西省采样点分布及生态系统空间分布

Fig.1 Spatial distribution of sampling sites and ecosystems in Shaanxi Province

## 1.2 数据来源

1.2.1 土壤有机碳数据库 本文通过整合多源数据并进行标准化处理,构建包含811个样点的土壤有机碳密度数据库。采样时间为2000—2015年,样点覆盖森林(包含灌木)、草地、农田3类生态系统类型,数量分别为435、180、196个。数据来源于2部分:1)发表在中国科学数据的“2010s中国陆地生态系统碳密度数据集”<sup>[18]</sup>,陕西省地区401个样点数据;2)课题组实测的410个样点数据。样地布设遵循生态系统采样原则,每个样点布置3个20 m×20 m样方,在每个样方的4个角和中心使用内径9 cm土钻采集土壤混合样,采用100 cm<sup>3</sup>环刀在土壤剖面采样用于测定

土壤体积质量,共采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5个土层;土壤有机碳实验室测定采用重铬酸钾氧化外加热法<sup>[19]</sup>;最后计算0~100 cm的土壤有机碳密度。

1.2.2 环境协变量及数据来源 本文以影响土壤有机碳的土壤、气候、植被、地形和母质五大要素为核心,选取包含土壤质地等26个环境协变量(表1)。土壤有机碳密度数据主要获取于2000—2015年,故气候数据和归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)采用2000—2015年的平均值代替。高程数据采用GMTED 2010中250 m分辨率数据,坡度、曲率和地形湿度指数等采用SAGA GIS 9.2.0计算。

同时,地上生物量(AGB)和土地覆盖类型(LC)等 250 m(分类数据采用最邻近法,连续数据采用双线性法)。均统一采用 2010 年的数据。所有数据均重采样至

表 1 环境协变量数据及来源  
Table 1 Environmental covariate data and sources

分类	协变量(英文缩写)	空间分辨率	数据来源
土壤	土壤类型(SO)	30"	Harmonized World Soil Database v 1.2
	黏粒(Clay)	1 000 m	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	粉粒(Silt)	1 000 m	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	砂粒(Sand)	1 000 m	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	土壤和沉积物厚度(SSDT)	1 000 m	<a href="https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1304">https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1304</a> <sup>[20]</sup>
	排水等级(DC)	30"	<a href="http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soilw">http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soilw</a> <sup>[21]</sup>
气候	地下水深度(WTB)	1 000 m	<a href="http://thredds-gfml.usc.es">http://thredds-gfml.usc.es</a> <sup>[22]</sup>
	年平均温度(Temp)	30"	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
	年降雨量(Pre)	30"	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
植被	年平均潜在蒸散发量(Pet)	30"	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
	年平均归一化植被指数(NDVI)	250 m	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
	年平均增强型植被指数(EVI)	250 m	<a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a>
	净初级生产力(NPP)	30 m	<a href="https://www.scidb.cn/en">https://www.scidb.cn/en</a> <sup>[23]</sup>
	地上生物量(AGB)	300 m	<a href="https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763">https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763</a> <sup>[24]</sup>
	地下生物量(BGB)	300 m	<a href="https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763">https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763</a> <sup>[24]</sup>
地形	土地覆盖类型(LC)	30 m	<a href="http://www.globeland30.org/">http://www.globeland30.org/</a>
	海拔(DEM)	250 m	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
	坡度(Slope)	250 m	根据 DEM 计算
	坡向(Aспект)	250 m	根据 DEM 计算
	平面曲率(PLC)	250 m	根据 DEM 计算
	剖面曲率(PRC)	250 m	根据 DEM 计算
	地形湿度指数(TWI)	250 m	根据 DEM 计算
母质	垂直河道距离(VDCN)	250 m	根据 DEM 计算
	地形类别(LFC)	1 000 m	<a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	岩性(Li)	250 m	<a href="https://csdms.colorado.edu/wiki/Alldata;GLiM">https://csdms.colorado.edu/wiki/Alldata;GLiM</a> <sup>[25]</sup>
	基岩深度(DTB)	100 m	<a href="http://globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp">http://globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp</a> <sup>[26]</sup>

### 1.3 研究方法

1.3.1 土壤有机碳储量估算 本文采用前向特征选择(forward feature selection, FFS)与随机森林(random forest, RF)相结合的方法评估陕西省土壤有机碳储量<sup>[27]</sup>。为克服冗余变量对预测的影响,利用CAST程序包中的FFS算法进行特征降维。该算法以随机森林为基学习器,以五折交叉验证的决定系数( $R^2$ )为评价指标。从 2 个变量的最优组合开始,逐一迭代引入剩余变量,仅当新变量能显著提高  $R^2$  时方可保留,直至模型精度( $R^2$ )不再提升,从而锁定最优特征子集。将筛选后的特征输入随机森林模型。数据集按 8:2 比例划分为训练集与验证集。在训练阶段,采用十折交叉验证进行超参数调优;在验证阶段,通过验证集计算决定系数( $R^2$ )、均方根误差

(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和林氏相关系数( $\rho_c$ )以定量评估模型预测精度。最后基于优化后的模型对研究区域进行土壤有机碳密度空间预测,基于筛选出的最优变量,进行 10 次独立的随机森林模拟(每次重新划分训练/验证集),以 10 次预测结果的标准差表征空间分布的不确定性。

1.3.2 土壤固碳潜力评估 本文根据地理学第三定律,即地理相似性定律,是指不同空间位置在地理环境(包括空间和非空间要素)上的综合相似性。本文选取土地利用类型、坡度、坡向、土壤类型、干旱指数等可综合反映陕西省陆地生态系统土壤固碳差异的环境因子,通过叠加分析,共形成 2 276 种不同的类型区(图 2),每个类型区内均有相似的环境条件。假设陕西省土地利用和环境条件在未来不发生明显变化,

在对土地进行合理地保护和管理的条件下,每种类型区内的土壤有机碳密度理论上可以达到同一水平。为排除异常高值干扰并估算理论最大碳储量,本文分别对每种类型区的像元值进行分组统计,以各类型区碳密度的 98% 分位数作为该类别的理论最大阈值。对于碳密度低于该阈值的栅格,统一采用该 98% 分位数进行替换,从而得到理论最大碳储量空间分布图(空间分辨率为 250 m)。采用区域分析工具,对各生态系统、各分区、各地市进行分区统计。固碳潜力值

和固碳潜力指数计算方法为:

$$C_p = C_{\max} - C_o \quad (1)$$

$$C_{\text{index}} = \frac{C_{\max} - C_o}{C_{\max}} \quad (2)$$

式中: $C_o$ 为区域现状碳储量, $Tg$ ; $C_{\max}$ 为该区域的理论最大碳储量, $Tg$ ; $C_p$ 为该区域固碳潜力值, $Tg$ ; $C_{\text{index}}$ 为该区域的固碳潜力指数(无量纲)。固碳潜力指数介于 0~1,其大小表示在外界环境条件限制下,与现状相比,碳储量可以增大的潜力大小,越接近于 1,表示潜力越大,越接近于 0,表示潜力越小。

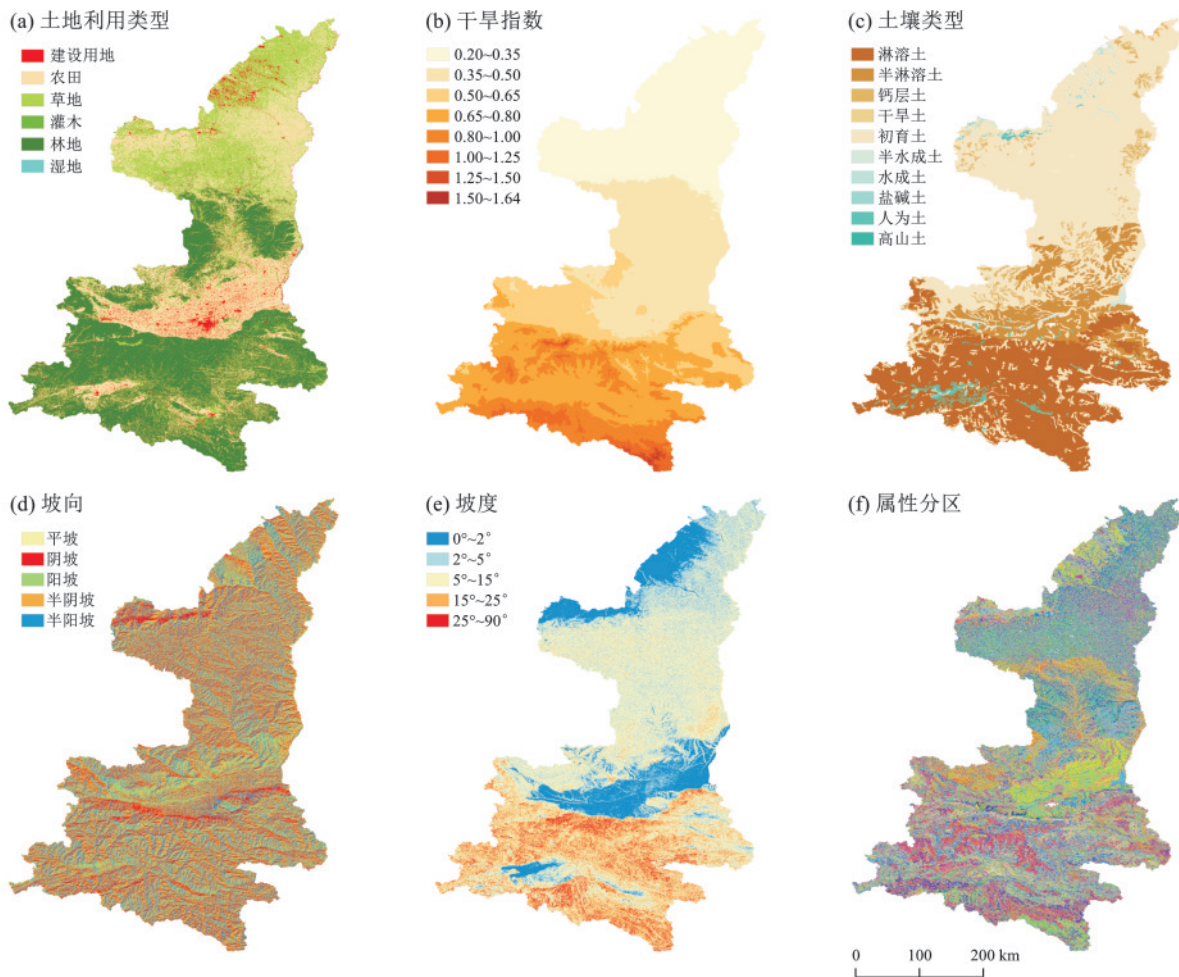


图 2 陕西省环境因子属性分区

Fig.2 Zoning of environmental factors in Shaanxi Province

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳密度预测模型构建与评估

利用前向特征选择(FFS)算法对环境协变量进行迭代筛选(图 3a)。结果显示,在初始迭代阶段(2 个变量组合),模型性能较低且波动较大;随着关键环境变量的逐一引入,预测精度稳步提升。当特征数量达到 10 个时,FFS 模型的五折交叉验证  $R^2$  达到峰值( $R^2=0.60$ ),此后继续增加变量对精度的提升不再显著。因此,最终筛选出 EVI、NPP、Pre 等 10 个变

量作为最优特征子集。基于上述特征子集构建随机森林预测模型(图 3b),结果表明模型具有良好的性能与稳健性。训练集的  $R^2=0.71$ ,  $RMSE=20.6 \text{ t/hm}^2$ ,  $MAE=14.9 \text{ t/hm}^2$ , 验证集的  $R^2=0.62$ ,  $RMSE=24.9 \text{ t/hm}^2$ ,  $MAE=17.9 \text{ t/hm}^2$ 。从 1:1 散点图可见,观测值与预测值紧密分布在回归线两侧。尽管在土壤有机碳密度极高值区( $>150 \text{ t/hm}^2$ )存在一定程度的低估,但边缘密度图显示二者分布频率高度一致,表明模型能够客观、准确地刻画陕西省土壤有机碳密度的空间分异特征。

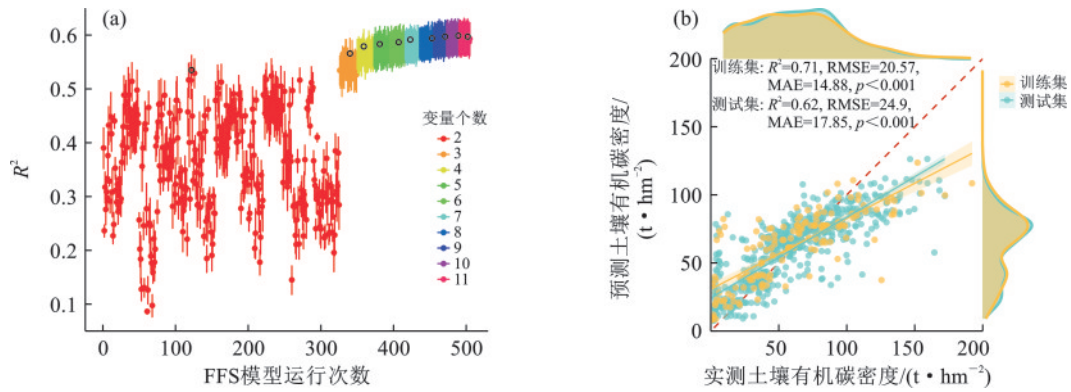


图3 前向特征选择变量筛选及随机森林模型验证评估

Fig.3 Forward feature selection for variable screening and validation and evaluation of random forest model

2.2 陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量现状

陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量约为 1.3 Pg, 碳密度为 7.1~126.6 t/hm<sup>2</sup>, 平均值为 (65.8±28.0) t/hm<sup>2</sup>。在各分区中, 陕北、关中、陕南各区土壤有机碳储量分别为 301.4、394.1、614.0 Tg, 平均碳密度分别为 (38.7±21.3)、(76.6±15.2)、(88.1±12.3) t/hm<sup>2</sup>, 空间异质性较高, 但从整体上看自北向南呈明显递增趋势(表 2)。

森林生态系统、农田生态系统、草地生态系统的土壤有机碳储量分别为 803.7、351.8、153.9 Tg, 约占

总量的 61%、27% 和 12%; 平均碳密度分别为 (86.9±14.3)、(55.7±21.8)、(35.4±21.2) t/hm<sup>2</sup>, 森林生态系统因凋落物输入量大而表现出较高的碳密度。不同生态系统土壤有机碳储量的整体分布规律均表现为自北向南呈递增趋势, 与总体一致(图 4)。

在各地市中, 汉中、安康和延安的土壤有机碳储量最高, 分别为 235.0、212.2、205.3 Tg; 铜川最低, 约为 27.0 Tg。安康、汉中的平均碳密度最高, 分别为 (90.9±12.6)、(87.6±13.0) t/hm<sup>2</sup>; 榆林最低, 约为 (23.4±7.5) t/hm<sup>2</sup>(图 4)。

表 2 陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量现状

Table 2 Current soil organic carbon storage in terrestrial ecosystems of Shaanxi Province

区域	森林		草地		农田		陆地生态系统		
	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以 C 计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以 C 计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以 C 计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以 C 计)	碳储量/ Tg	
陕南	安康	93.8±11.2	167.6	79.1±12.9	9.6	81.9±11.6	35.0	90.9±12.6	212.2
	汉中	91.0±11.1	192.9	75.8±12.5	5.5	74.8±11.1	36.7	87.6±13.0	235.0
	商洛	86.9±8.9	132.3	80.7±10.4	13.5	79.0±12.4	21.0	85.3±10.0	166.8
关中	宝鸡	91.0±12.1	107.7	76.6±15.2	5.2	69.7±8.6	35.7	84.3±14.9	148.7
	铜川	77.0±6.9	13.6	65.7±11.0	2.9	66.3±9.7	10.4	71.2±10.2	27.0
	渭南	81.2±12.8	19.1	62.7±13.0	4.1	63.6±6.1	55.4	67.1±11.0	78.6
	西安	96.2±9.3	46.0	80.0±13.1	1.5	70.6±6.7	27.4	84.6±15.2	74.9
陕北	咸阳	75.0±9.5	18.4	62.2±8.3	4.3	67.2±7.2	42.2	68.8±8.8	64.9
	延安	72.0±12.3	104.6	42.6±12.4	56.4	48.8±14.4	44.3	55.7±18.6	205.3
	榆林	25.9±8.2	1.5	21.3±7.4	50.9	26.2±6.6	43.7	23.4±7.5	96.1

注: 表中数据为平均值±标准差。下同。

2.3 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库固碳潜力

陕西生态系统土壤有机碳储量可达到的最大值为 1.6 Pg, 约为现状 (1.3 Pg) 的 1.2 倍, 增长潜力约为 0.3 Pg。其中, 陕北、关中、陕南地区土壤有机碳库的理论最大碳储量分别为 430.0、451.8、715.7 Tg, 表现为陕南地区>关中地区>陕北地区, 整体分布格局与现状一致, 但与现状相比, 土壤有机碳

储量空间分布预测图所表现出的连续性更好(图 5)。陕北、关中和陕南地区的固碳潜力值分别为 128.7、57.7、101.7 Tg。

森林生态系统的土壤有机碳库的理论最大碳储量为 926.0 Tg, 比草地 (229.2 Tg) 和农田 (442.3 Tg) 的总和还大(表 3)。森林、草地、农田生态系统的固碳潜力值分别为 122.3、75.4、90.4 Tg(表 4)。

在各地市中,汉中、延安的土壤有机碳库未来能达到的最大碳储量最高,分别为 276.7、260.0 Tg;铜川最低,为 31.7 Tg。安康、汉中未来能达到的平均碳密度最大,分别为  $(106.2 \pm 8.5)$ 、 $(103.2 \pm 11.4)$  t/hm<sup>2</sup>;榆林最小,为  $(41.4 \pm 8.2)$  t/hm<sup>2</sup>。榆林、延安的固碳潜力值最大,分别为 74.0、54.7 Tg,两市均位于

陕北,潜力值合计 128.7 Tg,约占全省总潜力值的 44.7%,其潜力主要来源于大面积覆盖草地和旱作农田,是全省固碳潜力最集中的地区;铜川、西安最小,分别为 4.7、6.9 Tg,这些区域城市化水平较高或面积较小,可提升的固碳绝对量有限,应该侧重于精细化管理和城区生态碳汇补充。

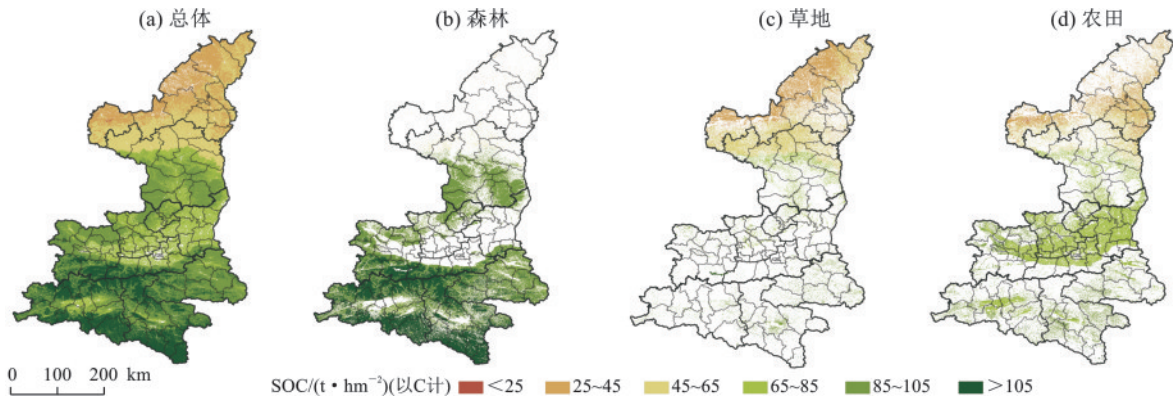


图 4 陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量现状空间分布

Fig.4 Spatial distribution of current soil organic carbon storage in terrestrial ecosystems of Shaanxi Province

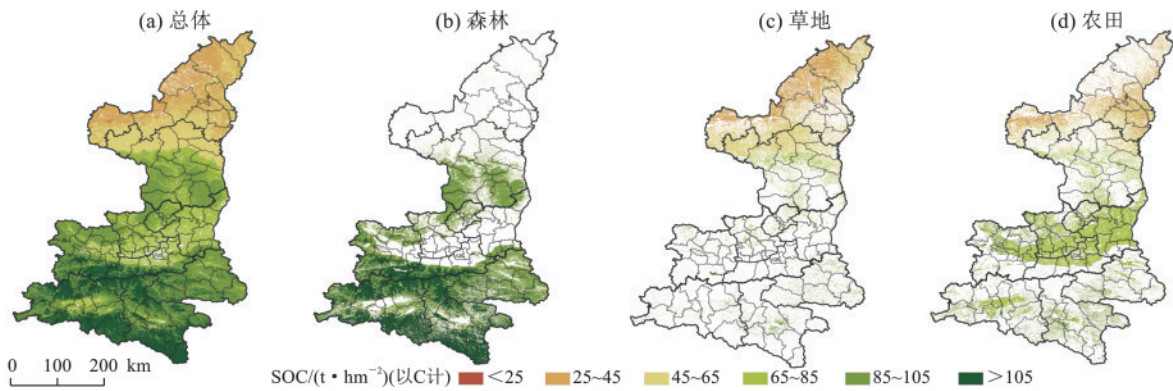


图 5 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库理论最大碳储量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of theoretical maximum carbon storage of soil organic carbon pool in terrestrial ecosystems

表 3 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库理论最大碳储量

Table 3 Theoretical maximum carbon storage of soil organic carbon pool in terrestrial ecosystems of Shaanxi Province

区域	森林		草地		农田		陆地生态系统		
	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以C计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以C计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以C计)	碳储量/ Tg	碳密度/ (t·hm <sup>-2</sup> ) (以C计)	碳储量/ Tg	
陕南	安康	109.3±5.8	195.2	98.0±8.3	11.9	95.5±7.5	40.8	106.2±8.5	247.9
	汉中	107.2±7.0	227.3	95.3±9.9	6.9	86.8±11.6	42.6	103.2±11.4	276.7
	商洛	99.5±6.4	151.4	93.1±6.5	15.6	90.5±7.8	24.1	97.7±7.4	191.0
关中	宝鸡	100.2±8.1	118.6	92.7±11.7	6.3	83.0±6.8	42.6	94.9±11.1	167.4
	铜川	87.2±2.3	15.4	82.0±2.8	3.6	80.4±4.2	12.7	83.7±4.6	31.7
	渭南	91.6±6.8	21.6	83.2±7.0	5.4	77.0±3.9	67.1	80.3±7.6	94.1
	西安	103.5±7.1	49.5	92.0±10.7	1.7	78.7±4.4	30.6	92.4±13.7	81.8
陕北	咸阳	89.0±4.7	21.8	82.7±5.1	5.8	78.2±4.7	49.1	81.4±6.7	76.7
	延安	84.4±6.8	122.5	58.4±16.4	77.3	66.3±17.0	60.1	70.6±17.9	260.0
	榆林	47.1±11.7	2.7	39.7±9.2	94.8	43.6±5.5	72.6	41.4±8.2	170.1

固碳潜力指数的空间分布与土壤有机碳储量现状的空间分布刚好相反,土壤现状碳储量越大的地区固碳潜力值越低,且固碳潜力指数在整体上自北向南呈递减趋势(图 6)。森林生态系统土壤固碳潜力指数最小,为 0.13;其次是农田生态系统,为 0.20;草地生态系统最大,为 0.33,具有较大的提升空间。土壤固碳潜力指数表现为森林<农田<草地,与土壤有机碳储量现状相反(图 6)。

陕北的固碳潜力指数最高,为 0.30,尤其是陕北长城沿线风沙区,固碳潜力指数多>0.5,陕北地区土地利用类型主要为草地,降水稀少,蒸发量大,植被覆盖度较低,说明在合理的保护和管理措施下,该区域土壤有机碳储量有较大提升空间;陕南和关中的固碳潜力指数接近,分别为 0.14 和 0.13。在各地市中,榆林固碳潜力指数最大,为 0.44;西安固碳潜力指数最小,仅为 0.08(表 4)。

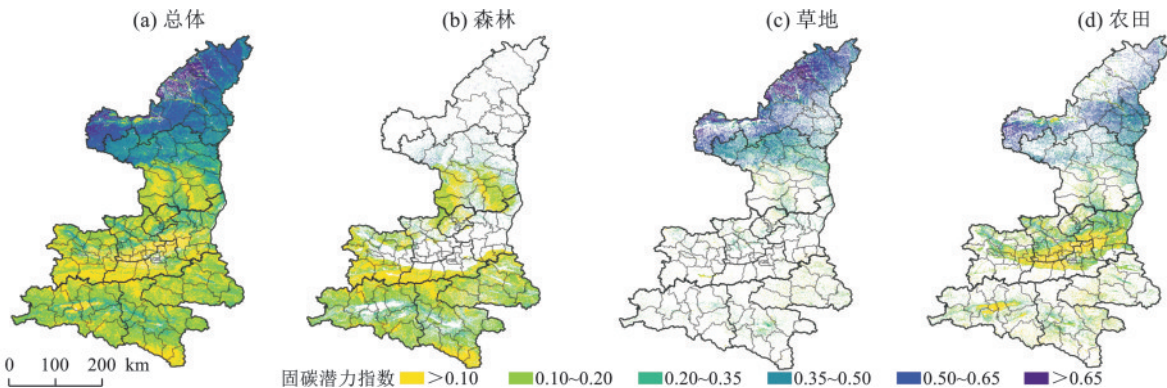


图 6 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库固碳潜力指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of carbon sequestration potential index of soil organic carbon pool in terrestrial ecosystems

表 4 陕西省陆地生态系统土壤有机碳库固碳潜力

Table 4 Carbon sequestration potential of soil organic carbon pool in terrestrial ecosystems of Shaanxi Province

区域	森林		草地		农田		陆地生态系统		
	固碳潜力/Tg	固碳潜力指数	固碳潜力/Tg	固碳潜力指数	固碳潜力/Tg	固碳潜力指数	固碳潜力/Tg	固碳潜力指数	
陕南	安康	27.6	0.14	2.3	0.19	5.8	0.14	35.7	0.14
	汉中	34.4	0.15	1.4	0.20	5.9	0.14	41.7	0.15
	商洛	19.1	0.13	2.1	0.13	3.1	0.13	24.3	0.13
关中	宝鸡	10.9	0.09	1.1	0.17	6.8	0.16	18.8	0.11
	铜川	1.8	0.12	0.7	0.19	2.2	0.17	4.7	0.15
	渭南	2.5	0.12	1.3	0.24	11.7	0.17	15.5	0.16
	西安	3.5	0.07	0.2	0.12	3.2	0.10	6.9	0.08
陕北	咸阳	3.4	0.16	1.4	0.24	6.9	0.14	11.8	0.15
	延安	18.0	0.15	20.9	0.27	15.8	0.26	54.7	0.21
	榆林	1.2	0.45	43.9	0.46	28.9	0.40	74.0	0.44

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机碳空间格局及成因分析

本文估算的陕西省土壤有机碳储量(1.3 Pg)与已有研究<sup>[14]</sup>结果(1.4 Pg)接近。陕西省陆地面积约占全国陆地面积的 2.1%,而土壤有机碳储量仅占全国(86.5 Pg<sup>[28]</sup>)的 1.5%,表明其土壤有机碳储量低于全国平均水平。在碳密度水平上,本文估算得到的陕西省土壤平均碳密度[(65.8±28.0) t/hm<sup>2</sup>]与刘京等<sup>[14]</sup>(68.7 t/hm<sup>2</sup>)、冯晓琳等<sup>[15]</sup>(69.0 t/hm<sup>2</sup>)的研究结果基本一致,但显著低于全国平均水平(93.4 t/

hm<sup>2</sup>)<sup>[28]</sup>。因此,提升陕西省土壤固碳功能对于平衡区域碳收支具有重要的现实意义。

土壤有机碳密度呈“南高北低”的分布格局,空间异质性显著,不同地市、不同分区的土壤有机碳储量和碳密度分布存在明显差异。这种空间格局与陕西省独特的自然地理条件和人类活动模式密切相关。全省南北跨度较大,导致陕北、关中、陕南等地区在气候、地形与土壤条件方面存在显著差异。从气候条件来看,陕西省横跨中温带、暖温带气候、北亚热带 3 个气候带,这种气候梯度直接影响植被类型

与土壤形成过程的分异<sup>[9]</sup>。陕南地区气候湿润,植被覆盖度高,土壤有机碳储量显著高于陕北干旱地区。从地形和土壤类型来看,自北向南依次为陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山区,土壤类型横跨5个生物气候带,这些地理梯度进一步塑造土壤有机碳储量的空间异质性。陕北地区的黄土高原土壤贫瘠,初始碳储量较低;而陕南地区的秦巴山区土壤肥沃,碳储量较高。

人类活动对土壤有机碳储量空间格局的影响也不可忽视。农田开垦和森林砍伐显著降低初始土壤有机碳储量,尤其是在生态脆弱的陕北地区,由土地利用变化造成的土壤有机碳损失更为严重。近年来实施的生态修复工程,如退耕还林(草)等,使得陕北地区的草地和人工林碳库得到初步恢复,提升局部地区的植被覆盖和土壤固碳能力,但其对土壤碳库的长期、深层影响仍需持续观测与评估。总体而言,自然环境条件和人类活动的综合作用共同决定陕西省土壤有机碳储量的空间分布特征。

### 3.2 固碳潜力空间分异的生态学内涵及管理建议

陕西省陆地生态系统土壤有机碳储量理论最大值可达1.6 Pg,约为当前储量(1.3 Pg)的1.2倍,占我国土壤总碳储量的比例可由当前的1.5%提升至1.8%,接近于陕西省在全国土地面积占比(2.1%)。同时,全省土壤有机碳密度平均值有望提升至 $(80.3 \pm 25.8) \text{ t/hm}^2$ ,更接近当前全国平均水平 $(93.4 \text{ t/hm}^2)$ <sup>[28]</sup>。

固碳潜力指数空间分布格局与碳储量现状分布格局大致相反,呈“北高南低”的趋势。此趋势主要与初始土壤有机碳储量的空间分布有关。陕北地区初始储量较低,但其生态修复工程,如退耕还林(草)工程等,显著提升植被覆盖度,因此其固碳潜力指数较高。相比之下,陕南地区初始储量较高,但由于其碳库接近饱和状态,固碳潜力指数较低。潜力指数本质上是度量当前碳库水平与其自然气候潜力或最优管理状态下碳库水平之间的差距。

从生态系统类型来看,森林生态系统土壤有机碳库的理论最大碳储量为926 Tg,占全省总量的58%,与现状占比(61%)相比略低,但仍为全省土壤固碳的主体,表明其不仅在当前具有重要碳汇功能,未来仍具可观的固碳潜力。草地生态系统的固碳潜力指数为0.33,远高于森林(0.13)和农田(0.20),说明尽管其当前固碳能力相对较弱,但通过植被恢复和土壤改良措施可显著提升其碳汇能力。

针对不同区域和生态系统类型应当因地制宜,分区施策,以全面提升全省土壤碳汇功能。陕南地区以森林为主,受人为干扰较轻,土壤有机碳储量现状值

和理论最大值均最高,可以加强森林抚育管理,实施封山育林等生态保护措施,还可通过引入高固碳树种和优化森林结构来提高森林生态系统的碳汇能力。关中地区以农田和城镇为主,人为干扰强烈,应推广秸秆还田<sup>[29]</sup>、保护性耕作<sup>[30]</sup>等农田管理措施,这些措施不仅能提高土壤有机碳含量,还能改善土壤结构和肥力。此外,可通过优化农田管理措施,如轮作和间作等,进一步挖掘农田生态系统的固碳潜力。陕北地区以草地为主,大部分处于黄土高原区,随着退耕还林还草工程的实施,林草覆盖度与碳汇能力有所提高,但与陕南和关中地区相比仍有差距,应持续推进植被恢复,合理利用水土资源,并采取植被、土壤、微生物复合配置技术等提高区域的土壤固碳能力。

### 3.3 不确定性分析

本文利用前向特征选择(FFS)与随机森林(RF)耦合模型构建陕西省土壤有机碳密度的空间分布格局。评价指标显示模型具备良好的拟合性能( $\rho_c=0.72$ ),但在特定生境与极端值区间仍存在不确定性。模型对土壤有机碳密度高值区( $>150 \text{ t/hm}^2$ )的预测存在明显偏差(图3b),即印证其对特殊生境下极高碳库的“平滑”效应。采样点的空间代表性和密度是影响预测精度的核心因素,陕北黄土高原区采样点相对密集,而陕南秦巴山区因地形破碎、森林覆盖导致样点可达性差、分布稀疏,使得模型对复杂地形下高碳密度森林土壤的刻画能力不足,可能导致对该区域碳储量的系统性低估。此外,受数据精度限制,250 m分辨率的协变量在捕捉由微地貌(如坡位分异)和局部水文过程诱发的土壤有机碳异质性方面存在局限。

在固碳潜力的评估中,基于“地理空间相似性”的潜力估算方法本身存在前提假设。本文通过识别环境相似单元内最优管理样点(以98%分位数为阈值)来定义潜力上限。然而,阈值提取的代表性受到样点分布影响,若某类型区缺乏处于最优固碳状态的样点,则98%分位数可能低估其实际潜力。环境分区的精细度也受协变量选择的限制,忽略微地形水文或母质差异会导致类内异质性,从而引入表征误差。此外,静态环境假设还忽略未来气候变化(如温度升高)对土壤有机碳分解速率的动态扰动,可能导致长期尺度下固碳上限的估算偏离实际。

综上所述,本文的结果是在当前数据条件与方法框架下得出的最佳估算。未来研究可通过构建更均衡的野外监测网络,融合更高分辨率的遥感与地理数据,以及尝试耦合过程模型与空间外推模型,来动态评估气候变化下的固碳潜力,从而降低不确定性,提升预测的稳健性与决策支撑价值。

## 4 结论

1)陕西省土壤有机碳库固碳潜力较大。全省土壤有机碳储量约为1.3 Pg,土壤有机碳密度约为(65.8±28.0) t/hm<sup>2</sup>。未来理想条件下,土壤有机碳储量最大可达1.6 Pg,约为现状的1.2倍,在全国土壤碳库中的占比可由当前的1.5%提升至1.8%。表明陕西省通过生态修复和科学管理具有较大的固碳潜力。

2)森林是陕西省土壤固碳的核心组成部分。森林生态系统覆盖全省44.2%的土地,其土壤有机碳储量占全省总量的61.1%,在当前碳汇功能中贡献最大,未来仍将发挥主体作用。此现象主要归因于森林生态系统的高植被生产力和稳定的凋落物输入,使其成为土壤有机碳积累的主要来源。

3)草地具有最高的单位固碳提升潜力。草地生态系统土壤的固碳潜力指数达0.33,显著高于森林(0.13)和农田(0.20)。这种高潜力主要源于草地生态系统的初始碳储量较低,且通过植被恢复和土壤改良措施(如退耕还草、减少过度放牧等)能够显著提升其碳汇能力。

4)固碳潜力指数空间分布与现状储量格局相反,呈现“北高南低”的趋势。陕北地区因初始碳储量低且生态修复工程显著提升植被覆盖度,固碳潜力指数较高;而陕南地区因初始碳储量大且碳库接近饱和状态,固碳潜力指数较低。此分布格局主要受初始碳储量及区域自然条件的影响,表明固碳潜力本质上反映当前碳库水平与自然气候潜力或最优管理状态下碳库水平之间的差距。

5)区域固碳能力差异显著,应实施分区管理策略。陕西省各区域土壤固碳能力存在显著空间分异,这种差异主要受气候、地形、土壤类型及土地利用类型的综合影响。因此,建议根据不同区域特点制定针对性保护与管理措施,以全面提高全省土壤碳固存能力。

### 参考文献:

- [1] 李紫晶,高翠萍,王忠武,等.中国草地固碳减排研究现状及其建议[J].草业学报,2023,32(2):191-200.  
LI Z J, GAO C P, WANG Z W, et al. Research status and suggestions for grassland carbon sequestration and emission reduction in China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 191-200.
- [2] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: IPCC, 2023.
- [3] 洪增林,成星,张瑜,等.黄土高原碳汇系统研究展望

- [J].西北地质,2023,56(3):39-50.  
HONG Z L, CHENG X, ZHANG Y, et al. Key issues of earth system science in the study of carbon sinks in the Loess Plateau [J]. Northwest Geology, 2023, 56(3): 39-50.
- [4] 严丽萍,刘睿,杨利伟.可持续发展背景下不同土地利用类型的土壤固碳能力[J].长江大学学报(自然科学版),2023,20(4):133-142.  
YAN L P, LIU R, YANG L W. Soil carbon sequestration capacity of different land use types in the context of sustainable development [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2023, 20(4): 133-142.
- [5] 方精云.碳中和的生态学透视[J].植物生态学报,2021,45(11):1173-1176.  
FANG J Y. Ecological perspectives of carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [6] YU H, SONG W. Research progress on the impact of land use change on soil carbon sequestration [J]. Land, 2023, 12(1): e213.
- [7] PADARIAN J, MINASNY B, MCBRATNEY A, et al. Soil carbon sequestration potential in global croplands [J]. PeerJ, 2022, 10: e13740.
- [8] 王倩倩.陕西省森林生态系统碳储量及碳汇潜力研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2024.  
WANG Q Q. Research on carbon storage and carbon sink potential of forest ecosystems in Shaanxi Province [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [9] 郝丽,徐娟娟,翟园,等.近30年陕西省森林植被碳储量及其动态变化[J].干旱区研究,2017,34(5):1056-1062.  
HAO L, XU J J, ZHAI Y, et al. Forest carbon storage and its dynamic change in Shaanxi Province in recent 30 years [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1056-1062.
- [10] 岳程瑜.陕西省森林碳储量及其碳汇潜力估算研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.  
YUE C Y. Estimation study of forest carbon storage and carbon sequestration potential in Shaanxi Province [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [11] 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):325-334.  
WANG X Z, HU H T, WU J Z, 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): 325-334.
- [12] 赵雪瑞,韩玲,刘明,等.基于改进CASA模型的陕西省植被NPP遥感估算[J].水土保持研究,2024,31(3):247-256.  
ZHAO X R, HAN L, LIU M, et al. Remote sensing estimation of vegetation NPP in Shaanxi Province based on improved CASA model [J]. Research of Soil and

- Water Conservation, 2024, 31(3):247-256.
- [13] 姚遥, 梁一萱. 2002—2021年陕西省NPP变化趋势及空间分异特征研究[J]. 陕西林业科技, 2022, 50(4):20-28.  
YAO Y, LIANG Y X. Analysis of the trend of NPP and its spatial discrepancy in Shaanxi Province from 2002 to 2021[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2022, 50(4):20-28.
- [14] 刘京, 常庆瑞, 陈涛, 等. 陕西省土壤有机碳密度空间分布及储量估算[J]. 土壤通报, 2012, 43(3):656-661.  
LIU J, CHANG Q R, CHEN T, et al. Spatial distribution characteristics and estimation of soil organic carbon density and storage in Shanxi Province, in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3):656-661.
- [15] 冯晓琳. 陕西省土壤无机碳和有机碳的时空分布及驱动因素[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2024.  
FENG X L. Spatial-temporal distribution and driving factors of soil inorganic and organic carbon in Shaanxi Province[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [16] 李彦娥, 王化齐, 马红娜. 陕西省农田土壤生态系统碳汇时空演变特征[J]. 北方园艺, 2024(3):63-70.  
LI Y E, WANG H Q, MA H N. Spatial-temporal evolution characteristics of carbon sink in farmland soil ecosystem in Shaanxi Province[J]. Northern Horticulture, 2024(3):63-70.
- [17] 李茜, 王芳, 曹扬, 等. 陕西省森林土壤固碳特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9):953-963.  
LI X, WANG F, CAO Y, et al. Soil carbon storage and its determinants in the forests of Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(9):953-963.
- [18] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1):90-96.  
XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(1):90-96.
- [19] 张杰, 周佳, 王永敏, 等. 不同有机肥对酸性土壤团聚体形成稳定及周转的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(5):1353-1367.  
ZHANG J, ZHOU J, WANG Y M, et al. Effects of different organic fertilizers on the formation, stabilization, and turnover of aggregates in acidic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5):1353-1367.
- [20] PELLETIER J D, BROXTON P D, HAZENBERG P, et al. Global 1-km gridded thickness of soil, regolith, and sedimentary deposit layers[DB/OL]. ORNL Distributed Active Archive Center, 2016.
- [21] SHANGGUAN W, DAI Y J, DUAN Q Y, et al. A global soil data set for earth system modeling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2014, 6(1):249-263.
- [22] FAN Y, LI H, MIGUEZ-MACHO G. Global patterns of groundwater table depth[J]. Science, 2013, 339(6122):940-943.
- [23] LIU Y, ZHAO W W, ZHANG Z J, et al. A high spatial resolution dataset of ecosystem services of 2000—2020 in China[J]. Earth System Science Data Discussions, 2025, 18(2):1519-1540.
- [24] SPAWN S A, SULLIVAN C C, LARK T J, et al. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010[J]. Scientific Data, 2020, 7:e112.
- [25] HARTMANN J, MOOSDORF N. The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the earth surface[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2012, 13(12):e2012GC004370.
- [26] YAN F P, SHANGGUAN W, ZHANG J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J]. Scientific Data, 2020, 7:e2.
- [27] WU J Z, LIU S R, PENG C H, et al. Future soil organic carbon stocks in China under climate change[J]. Cell Reports Sustainability, 2024, 1(9):e100179.
- [28] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. 地理学报, 2018, 73(11):2150-2167.  
XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(11):2150-2167.
- [29] 张婧婷, 石浩, 田汉勤, 等. 1981—2019年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变化及影响机制[J]. 生态学报, 2022, 42(23):9560-9576.  
ZHANG J T, SHI H, TIAN H Q, et al. Spatial-temporal changes in and influencing mechanisms for cropland soil organic carbon storage in the north China Plain from 1981 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9560-9576.
- [30] 王浩成, 杨滨娟, 梁效贵, 等. 中国农田土壤有机碳库及其影响因素研究述评[J]. 生态科学, 2024, 43(2):260-270.  
WANG H C, YANG B J, LIANG X G, et al. A review of researches on cropland soil organic carbon pool and its influencing factors in China[J]. Ecological Science, 2024, 43(2):260-270.