

DOI: 10.20103/j.stxb.202210112890

王雪晴, 卜元坤, 魏江涛, 赵鹏祥, 刘顺德. 黄龙山森林植被地上碳储量时空变化及驱动力. 生态学报, 2023, 43(19): 7896-7909.

Wang X Q, Bu Y K, Wei J T, Zhao P X, Liu S D. Spatio-temporal variation and driving forces of forest vegetation aboveground carbon storage in Huanglong Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7896-7909.

黄龙山森林植被地上碳储量时空变化及驱动力

王雪晴¹, 卜元坤¹, 魏江涛¹, 赵鹏祥^{1,*}, 刘顺德²

¹ 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

² 石堡国有生态实验林场, 黄龙 715700

摘要:快速准确地估计植被地上碳储量及其动态变化,对评估森林固碳能力具有重要意义。以陕西省黄龙林区森林为研究对象,基于样地实测和卫星遥感数据,建立黄龙山林区植被地上碳储量模型,实现研究区 2000—2021 年长时间序列的森林植被地上碳储量的反演及时空分异研究。结果表明:(1)黄龙山森林植被地上碳储量平均值总体呈波动上升趋势,碳储量高于全省平均水平。(2)研究区东部、南部、中部及西北部是植被地上碳储量高值分布地区,且呈增加趋势;而东北部、西部和西南部植被地上碳储量较低,且呈减少趋势,研究区 22 年间森林植被地上部分固碳量增加,生产力提升。(3)年均温、年蒸散发量、年降水量和海拔是 2000—2021 年影响研究区森林植被地上碳储量空间分异主要因素;任意两个因子间的交互作用对黄龙山森林地上碳储量影响都大于单个因子,表明黄龙山森林植被地上碳储量在不同时间的空间分布受多种因素共同作用。年降水量对其空间分布影响逐渐减小,森林稳定性提高。研究在信息有限的基础上提出了快速估算地区植被地上碳储量的方法,了解了地区森林植被地上碳储量时空分异情况及其驱动因素,为掌握地区植被地上碳储量信息、评估森林固碳能力提供了重要依据。

关键词:植被地上碳储量;地理探测器;时空分异特征; Landsat

Spatio-temporal variation and driving forces of forest vegetation aboveground carbon storage in Huanglong Mountain

WANG Xueqing¹, BU Yuankun¹, WEI Jiangtao¹, ZHAO Pengxiang^{1,*}, LIU Shunde²

¹ College of Forestry, North West Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

² State-owned Ecological Experimental Shibu Forest Farm, Huanglong 715700, China

Abstract: It is of great significance for evaluating the aboveground carbon (AGC) storage of vegetation and their dynamics changes rapidly and accurately for assessing the carbon sequestration capacity of forests. This study took the forest in Huanglong Mountain of Shaanxi Province as the research object, based on the field measured data of the sample plot and satellite remote sensing data, and established a model of AGC stock of vegetation in Huanglong Mountain Forest District, so the long-term AGC storage model of forest vegetation in the study area was realized from 2000 to 2021. And the model realized the inversion of AGC of forest vegetation in the study area, and based on it, the spatio-temporal research of the AGC from 2000 to 2021 in the study area was carried out. The research results showed that: (1) the average AGC of forest vegetation in Huanglong Mountain had a fluctuating upward trend, and the carbon stock was higher than the average level of the whole province. (2) The eastern, southern, central and northwestern parts of the study area were the areas with high values of AGC and it showed an increasing trend, while the AGC of vegetation in the northeastern, western and southwestern parts of the study area was low, and showed a decreasing trend. The AGC of forest vegetation in the study area had increased in 22 years and the productivity had improved to a certain degree. (3) Annual average temperature, annual evapotranspiration, annual precipitation and elevation were the main factors affecting the spatial variation of AGC of forest

收稿日期:2022-10-11; 网络出版日期:2023-05-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaopengxiang@nwsuaf.edu.cn

vegetation in the study area from 2000 to 2021. The interaction between any two factors had a significant greater impact on the AGC of forest in Huanglong Mountain than the individual factor, which indicating that the spatial distribution of AGC of forest vegetation in Huanglong Mountain was affected by a combination of the factors in different time and space. The influence of annual precipitation on its spatial distribution was gradually decreased and the forest stability was improved during the research period. The study proposed a method for quickly estimating the AGC of regional vegetation on the basis of the limited information, and understood the spatial and temporal variation of the AGC in regional forest vegetation and its driving factors that affecting its change, which provided an important basis for grasping the information of AGC of regional vegetation and assessing the carbon sequestration capacity of forests.

Key Words: aboveground carbon of vegetation; geographic detector; spatiotemporal differentiation characteristics; Landsat

森林固碳是应对气候变化的重要途径之一^[1],在碳中和过程中扮演越来越重要的角色^[2]。森林生态系统碳密度和储量的空间格局评价对碳汇潜力和森林经营实践具有重要作用^[3]。森林碳储量研究的方法多采用森林资源清查数据或结合样地实测数据^[4-6],这种方法费时费力,无法满足快速获得结果的要求。而当掌握信息有限时,如何快速准确地估算森林植被地上碳储量是一个难点。遥感因其实时、动态、大范围等优势成为获取区域碳储量有力的工具,可快速、高效地反映区域碳收支的空间分布及动态变化。因此利用遥感技术进行森林碳储量模拟成为当前研究的热点^[7]。目前对于地区碳储量的研究多集中于空间分布格局分析^[8-9],对其时空变化格局的研究相对较少。此外,目前的研究甚少涉及森林植被地上碳储量的驱动因素。黄土高原生态脆弱,在该地区科学核算、评估森林资源碳储量、提高森林经营管理水平、开展森林健康评价和可持续发展潜力的研究在碳中和背景下具有重要意义^[10]。本研究以黄龙山林区为研究对象,明确 2000—2021 年研究区森林植被地上碳储量时空分布情况,并基于地理探测器,揭示森林植被地上碳储量对各驱动因子的响应,为实现黄土高原森林植被地上碳储量快速、精准监测以及可持续经营管理提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省黄龙县,地处黄土高原丘陵沟壑区,位于陕西省中北部,延安市东南缘。东经 109°38'49"—110°16'49",北纬 35°24'09"—36°02'11"之间,最高海拔 1783.5 m,最低海拔 643.7 m,南北长约 64 km,东西宽约 53 km,总面积约 195009 hm²。黄龙县森林覆盖率较高,达 75.4%。有以油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等为优势的乔木 70 余种,主要森林类型有油松林、辽东栎林和白桦林等,各类灌木 60 多种;有生长在林下、林缘的草本植物 214 种;油松是黄龙山林区的主要优势树种^[11-12]。

1.2 数据来源

样地实测数据来源于 2017 年在黄龙山森林开展的外业调查。选取布设的 48 块 20 m×30 m 固定样地,记录每块样地的 GPS 定位坐标、海拔、坡向、每木检尺和灌草调查等信息。从谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)获取黄龙山森林 2000—2021 年植物生长季(5—9 月)无云拼接卫星遥感影像。其他数据包括年均气温、年总降水量、年总蒸散发量、土壤类型、土壤质地和土地利用类型(Land Use/Land Cover, LULC)数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),人口密度数据来源于 LandScan 人口密度数据集(<https://landscan.ornl.gov/>),海拔、坡度、坡向来自于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

2 研究方法

样地地上碳储量由乔、灌、草地上部分碳储量组成。研究通过单木生物量模型计算单木生物量,利用含碳

率转换系数得出碳储量,相加得到样地乔木碳储量。灌、草采用收割法,烘干后得到生物量,通过碳储量转换系数计算得到灌、草碳储量,将乔、灌、草碳储量相加即为样地植被地上碳储量。利用样地碳储量与卫星遥感数据构建碳储量遥感估测模型,经过精度检验后实现研究区森林碳储量反演。

2.1 样地森林植被地上生物量计算

森林植被地上碳储量可根据生物量进行估算。本研究对油松生物量的估算采用马钦彦^[13]提出的陕北(桥山)油松单木生物量模型进行计算,具体模型如下:

$$\ln W = a + b \cdot \ln D \quad (1)$$

式中, W 为单位面积的森林生物量(kg); D 为单木胸径(cm); a 、 b 为随单木部位不同而变化的常数,具体数值见表 1。

其他树种的生物量估算采用曾伟生^[14]提出的模型,具体模型如下:

$$W = a \times D^{\frac{7}{3}} \quad (2)$$

式中, W 为林木地上部分生物量(kg); D 为单木胸径(cm); $a = 0.3p$,其中 p 为木材基本密度(g/cm^3),具体参数见表 2。

2.2 样地森林植被地上碳储量计算

根据国家林业局发布的《立木生物量模型及碳计量参数》^[15-17]中树木地上部分含碳系数和杨玉姣等^[5]研究成果中黄土丘陵区油松人工林生态系统灌木和草本的地上部分含碳率转换系数计算研究区森林植被地上碳储量。

$$C = r_j \times W \quad (3)$$

式中, C 为森林碳密度(t/hm^2); r_j 为含碳率转换系数,各系数值如表 3 所示。

表 3 不同植被类型地上含碳率转换系数

Table 3 Conversion coefficient of aboveground carbon content for different vegetation types

植被类型 Vegetation types	含碳系数 r_j (地上) Coefficient of carbon content r_j (aboveground)	植被类型 Vegetation types	含碳系数 r_j (地上) Coefficient of carbon content r_j (aboveground)
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.5184	灌木 Shrub	0.4540
栎树 <i>Quercus L.</i>	0.4827	草本 Herb	0.4520
桦树 <i>Betula L.</i>	0.4897		

2.3 森林植被地上碳储量模型构建

本研究选取 4 类 26 个建模因子,即遥感影像 6 个波段:蓝波段(Blue, B)、绿波段(Green, G)、红波段(Red, R)、近红外波段(Near Infrared, NIR)、短波红外波段 1(Shortwave Infrared 1, SI1)和短波红外波段 2(Shortwave Infrared 2, SI2);9 种植被指数:差值环境植被指数^[18](Difference vegetation index, DVI)、比值植被指数^[19](Ratio vegetation index, RVI)、归一化植被指数^[20](Normalized differential vegetation index, NDVI)、增强型植被指数^[21](Enhanced vegetation index, EVI)、土壤调节植被指数^[22](Soil-adjusted vegetation index, SAVI)、比值植被指数^[23](Ratio vegetation index, PVI)、绿色归一化植被指数^[24](Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI)、修正土壤调节植被指数^[25](Modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI)和重归一化植被指数^[26](Renormalized difference vegetation index, RDVI);3 个地形因子:海拔(Elevation, E)、坡度

表 1 油松单木生物量方程参数

Table 1 Parameters of biomass equation of pine tree single wood

部位 Parts	参数 Parameter	
	a	b
干(带皮) Trunk (including bark)	-2.75731	2.428910
枝 Branch	-3.26935	2.228450
叶 Leaves	-1.31594	1.114210

表 2 研究区涉及各树种(组)的通用性一元地上生物量模型参数值

Table 2 Generalized univariate aboveground biomass model parameters of various tree species (groups) involved in the study area

树种(组) Species (group)	生物量模型参数 a Parameter of biomass model a
栎树 <i>Quercus L.</i>	0.1729
桦树 <i>Betula L.</i>	0.1454
杨树 <i>Populus L.</i>	0.1253
榆树 <i>Ulmus L.</i>	0.1374
其它硬阔 Other Hardwood Species	0.1875
其它软阔 Other Softwood Species	0.1329

(Slope, S)和坡向 (Aspect, A)和 8 个纹理特征:角二阶矩 (Angular Second Moment, ASM)、对比度 (Contrast, Con)、相关性 (Correlation, Corr)、方差 (Variance, Var)、逆差矩 (Inverse Difference Moment, IDM)、平均和 (Sum Average, SA)、信息熵 (Entropy, Ent)和相异性 (Dissimilarity, Diss),对因子进行筛选和相关性分析和逐步回归。

2.4 森林植被地上碳储量时空分异及驱动力分析

基于一元线性回归法逐像元计算研究区 2000—2021 年森林植被地上碳储量随时间变化的趋势,其计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times C_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n C_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{4}$$

式中, n 为时间长度; C_i 为第 i 年森林植被地上碳储量。

利用 F 检验进行显著性检验,其公式如下:

$$F = (n-2) \frac{S}{E} \tag{5}$$

$$P\{F(1, N-2) \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)\} - \alpha \tag{6}$$

式中, $S = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2$ 称为误差平方和; $E = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$ 称为回归平方和; n 为时间长度; x_i 为第 i 年的森林植被地上碳储量; \hat{x}_i 为第 i 年的森林植被地上碳储量拟合值; \bar{x} 为森林植被地上碳储量平均值; α 为显著性水平。变化趋势及显著性检验结果分级见表 4。

表 4 变化趋势及显著性检验结果分级

Table 4 Change trend and classification of significance test results

变化趋势 Change trend	变化率 s Slope s	显著性水平 α Significance level α
极显著减少 Very significantly reduced	$s < 0$	$\alpha < 0.01$
显著减少 Significantly reduced		$0.01 < \alpha < 0.05$
基本无变化 Basically no change	$s > 0$	$\alpha > 0.05$
显著增加 Significant increased		$0.01 < \alpha < 0.05$
极显著增加 Very significant increased		$\alpha < 0.01$

为深入对研究区森林植被地上碳储量变化的驱动因素进行分析,本文选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年研究区 1 km×1 km 网格共 1948 个数据样本,利用地理探测器进行时空分异驱动力分析^[27]。

3 结果与分析

3.1 2017 年黄龙山森林植被地上碳储量反演模型构建与精度验证

3.1.1 模型因子选取

为探究变量对森林植被地上碳储量的贡献率、尽可能消除变量间的多重线性问题,研究采用 Boruta 算法对变量进行筛选和相关性分析。B、G、R、SI1、SI2、RVI、NDVI、GNDVI 和 E 可作为建模的自变量(图 1、图 2)。

3.1.2 黄龙山森林植被地上碳储量反演模型构建

利用相关性分析和变量筛选所选取的因变量进行逐步多元线性回归,构建 2017 年黄龙山林区森林植被地上碳储量模型如下:

$$C = -1578.00 \times B + 571.10 \times R + 6.91 \times RVI - 277.40 \times GNDVI + 0.06 \times E + 141.50 \tag{7}$$

式中, C 为碳储量 (t/hm^2); B 、 R 分别为蓝光、红光波段地表反射率; E 为海拔 (m)。

由于 Landsat 系列卫星采用的传感器类型不同,所以长时间序列的图像波段需要根据表 5 进行校正^[28]。

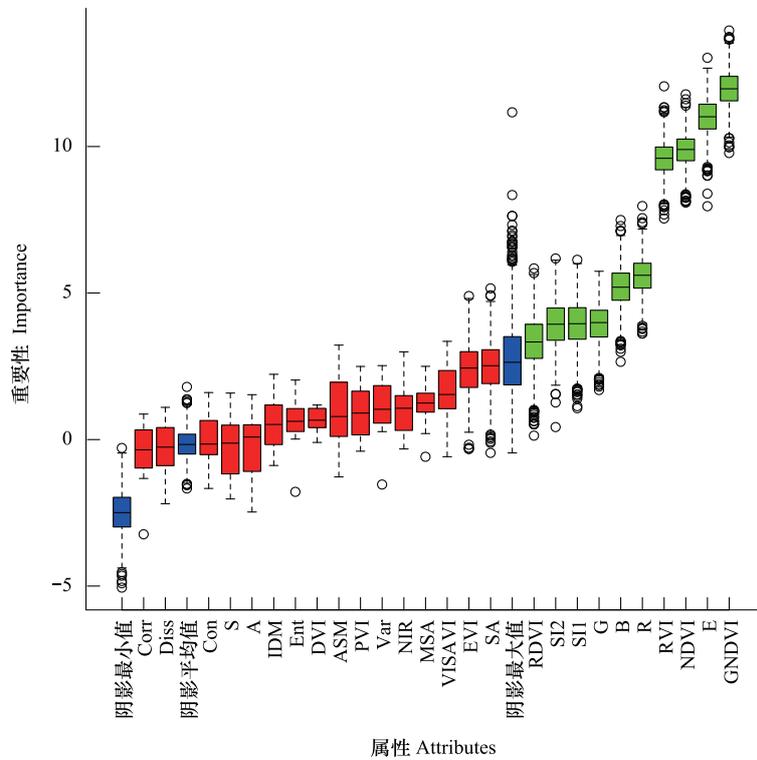


图 1 不同因子对黄龙山森林植被地上碳储量的重要性分析

Fig.1 Significance of different factors on AGC of forest vegetation in Huanglong mountain

B: 蓝光波段; G: 绿光波段; R: 红光波段; NIR: 近红外波段; SI1: 短波红外波段 1; SI2: 短波红外波段 2; DVI: 差值环境植被指数; RVI: 比值植被指数; NDVI: 归一化植被指数; EVI: 增强型植被指数; SAVI: 土壤调节植被指数; PVI: 垂直植被指数; GNDVI: 绿色归一化植被指数; MSAVI: 修正土壤调节植被指数; RDVI: 重归一化植被指数; S: 坡度; E: 海拔; A: 坡向; ASM: 角二阶矩 t; Con: 对比度; Corr: 相关性; Var: 方差; IDM: 逆差矩; SA: 平均和; Ent: 信息熵; Diss: 相异性; AGC: 地上碳储量

表 5 OLI 与 ETM+传感器波段校正变换系数

Table 5 OLI and ETM+ sensor band correction transformation coefficients

波段 Band	回归关系 Regression relationship	波段 Band	回归关系 Regression relationship
蓝光波段 Blue	OLI=0.0003+0.8474×ETM+	红光波段 Red	OLI=0.0061+0.9047×ETM+
绿光波段 Green	OLI=0.0088+0.8483×ETM+	近红外波段 NIR	OLI=0.0254+0.8937×ETM+

得出 2000—2012 年黄龙山森林植被地上碳储量反演模型如下:

$$C = -1337.1972 \times B + 516.6742 \times R + (0.1755 + 6.1755 \times NIR) / (0.0061 + 0.9047 \times R) - (4.6048 + 247.9124 \times NIR - 235.3184 \times G) / (0.0342 + 0.8937 \times NIR + 0.8483 \times G) + 0.06 \times E + 144.5103 \quad (8)$$

式中, C 为碳储量(t/hm²); B、R、NIR、G 分别为蓝光、红光、近红外、绿光波段地表反射率; E 为海拔(m)。

3.1.3 黄龙山森林植被地上碳储量模型精度验证

采用留一法(Leave-one-out, LOO)对模型进行检验,调整后 R²为 0.68, RMSE 为 8.19 t/hm², MAE 为 7.13 t/hm²。表明模型满足精度要求,结果可信度较强。

3.2 黄龙山森林植被地上碳储量的时间变化

黄龙山森林植被地上碳密度平均值总体波动上升,由 2000 年的 66.02 t/hm²增加至 2021 年的 75.84 t/hm²,年均增加 0.45 t/hm²(图 3)。其中,研究区森林植被地上碳储量从 2000—2014 年基本以 5 年为一个周期规律性下降后增加,并于 2011 年达到最低值。从 2017 年来,逐渐趋于平稳,在 75 t/hm²附近波动,并在 2020—2021 年略有上升。结合 NDVI(图 4)可知,2011 年 NDVI 下降较多,导致 2011 年碳储量明显降低,2016

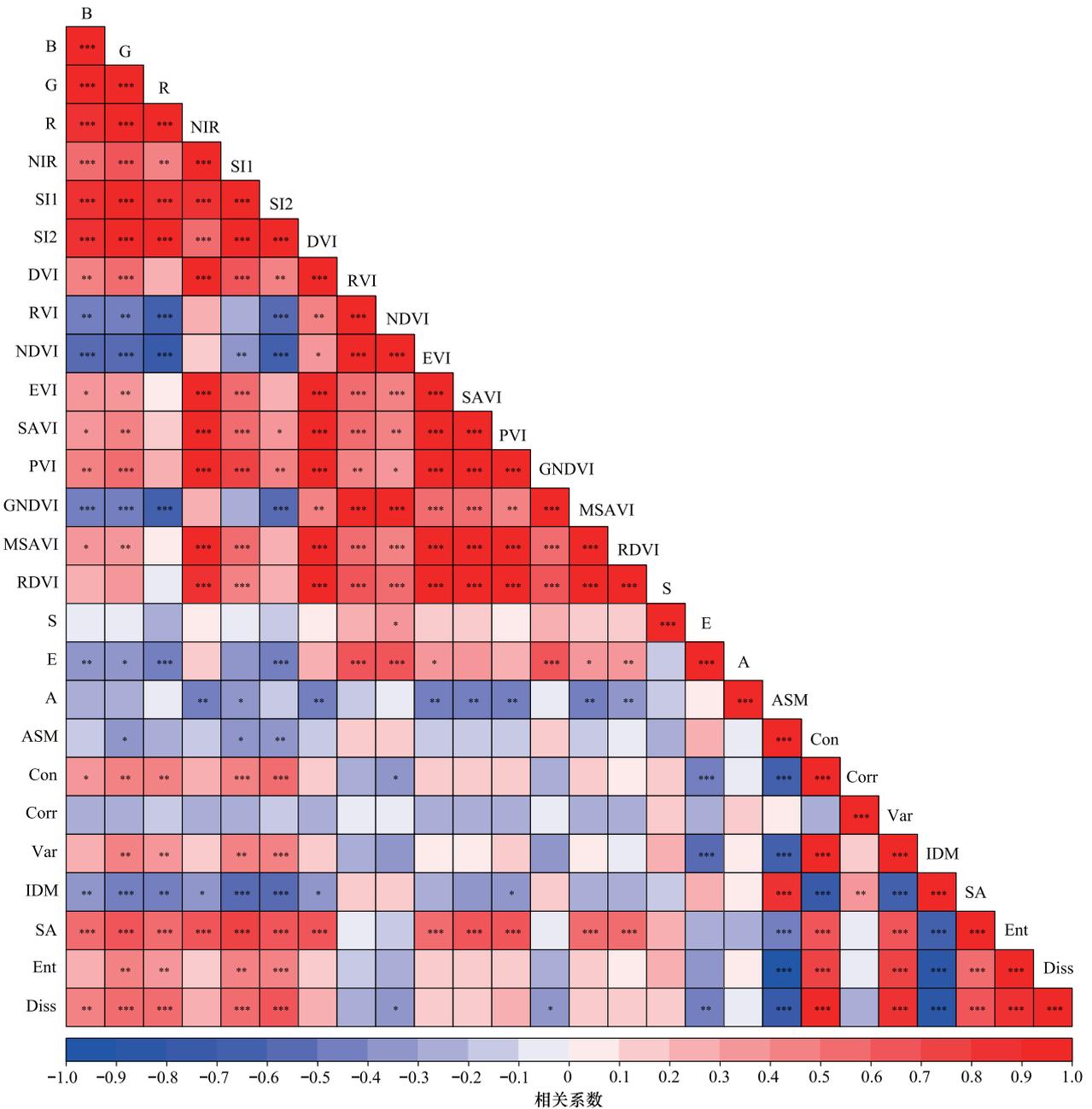


图 2 不同因子与黄龙山森林植被地上碳储量的相关性分析

Fig.2 Correlation of different factors on AGC of forest vegetation in Huanglong mountain

*** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

年起 NDVI 逐渐下降,2018 年开始保持上升趋势。总体看来该地区碳储量波动较为平稳,森林质量较为稳定,但固碳能力仍有上升空间。

3.3 黄龙山森林植被地上碳储量的空间变化

为进一步了解 2000—2021 年黄龙山森林植被地上碳储量空间分布,根据区域碳储量数值分布范围,将碳密度划分为 $<25 \text{ t/hm}^2$ 、 $25\text{—}50 \text{ t/hm}^2$ 、 $50\text{—}75 \text{ t/hm}^2$ 、 $75\text{—}100 \text{ t/hm}^2$ 、 $>100 \text{ t/hm}^2$ 五个范围,将研究区森林植被地上碳储量的分布进行展示(图 5)。研究区东部、南部及中部成为植被地上碳储量高值分布地区,西北方向的植被地上碳储量也较高,而东北部、西部和西南部植被地上碳储量较低。

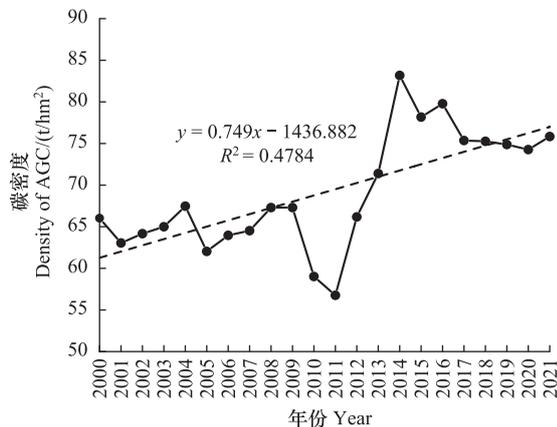


图3 2000—2021年黄龙山森林植被地上碳密度年均值

Fig.3 Annual mean AGC density of forest vegetation in Huanglong Mountain from 2000 to 2021

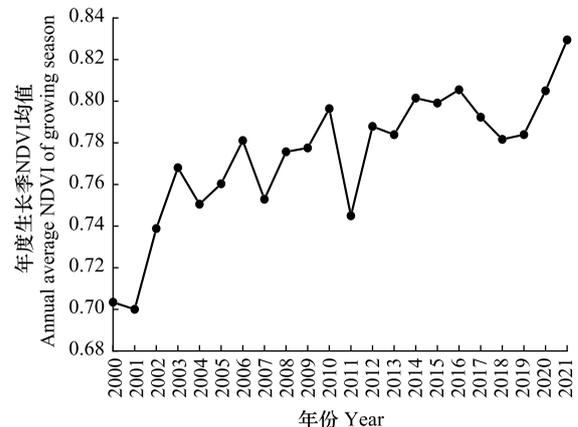


图4 2000—2021年黄龙山森林 NDVI 生长季均值

Fig.4 Average NDVI growth season of forest vegetation in Huanglong Mountain from 2000 to 2021

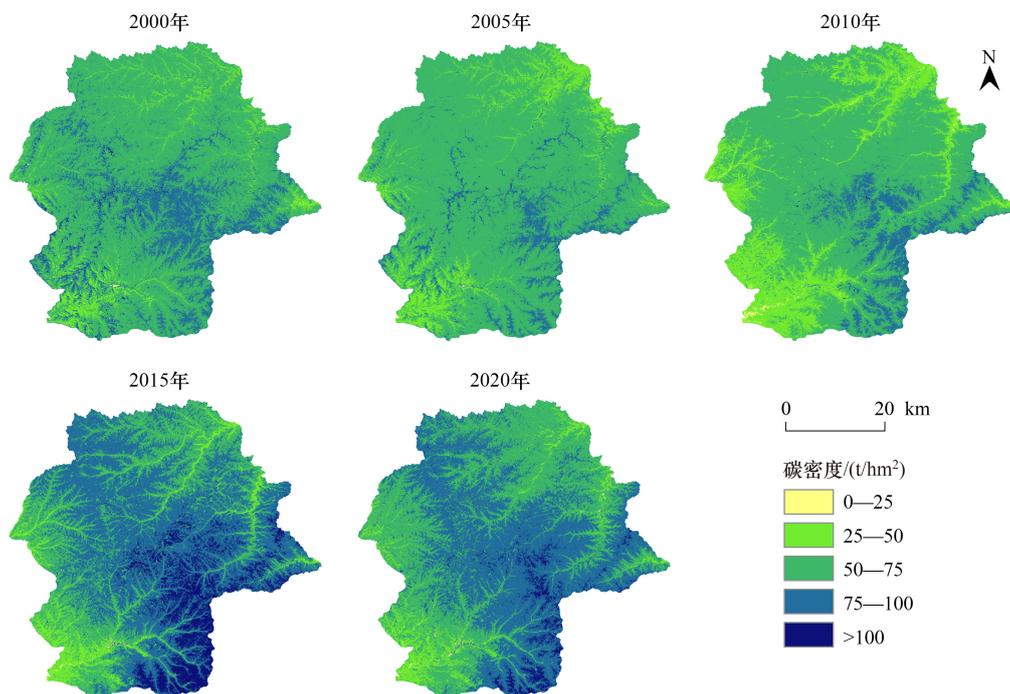


图5 2000—2021年黄龙山森林植被地上碳储量分布

Fig.5 AGC distribution of forest vegetation in Huanglong Mountain from 2000 to 2021

进一步对22年来年研究区各范围森林植被地上碳密度面积进行统计,结果如图6所示。在2000—2021年,0—25 t/hm²面积变化甚微,>100 t/hm²面积在2013年前变化不大,在2014年迅速增加了15%,随后逐渐下降并趋于平稳;25—75 t/hm²面积在2008—2009年迅速增加至20%左右,维持了近3年,在2011年达到该范围面积占比最大后又急剧下降,近年来与>100 t/hm²面积占比相近;50—75 t/hm²面积比例整体呈下降趋势,而75—100 t/hm²面积比例整体呈上升趋势。

研究区森林植被地上碳密度范围在0—25 t/hm²的面积基本不变,25—50 t/hm²和50—75 t/hm²面积分别减少了3189.88 hm²和63453.33 hm²,占研究区面积的1.64%和32.54%;75—100 t/hm²和>100 t/hm²面积分别

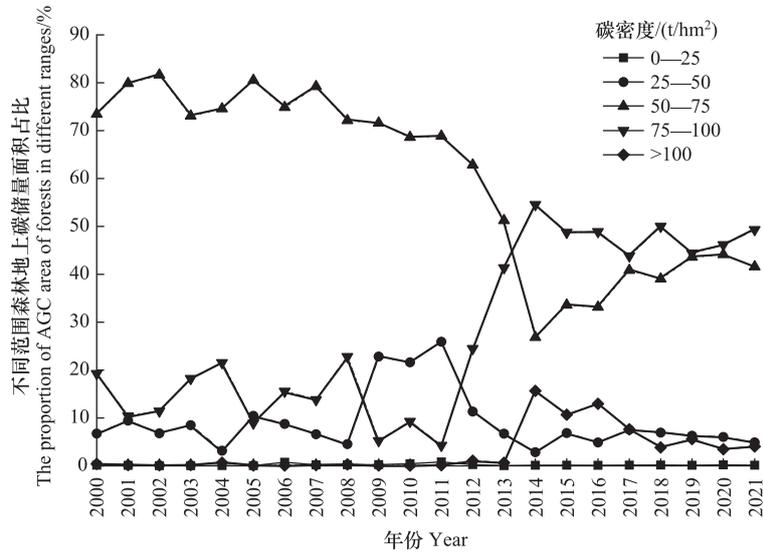


图 6 2000—2021 年森林植被地上碳密度各范围面积占比图

Fig.6 Plot of proportion of each area of AGC density of forest vegetation from 2000 to 2021

增加了 59726.73 hm²和 6914.40 hm², 占研究区面积的 30.63%和 3.55% (表 6), 表明研究区森林植被地上碳密度目前多处于 75—100 t/hm²范围内, 22 年来固碳量增加, 固碳功能提升。

表 6 2000—2021 年研究区森林植被地上碳密度转换矩阵

Table 6 Transformation matrix of AGC density of forest vegetation in the study area from 2000 to 2021

地上碳储量 AGC/(t/hm ²)		2021 年 Year 2021					总计 Total	转出 Transfer out	
		0—25	25—50	50—75	75—100	>100			
2000 年 Year 2000	0—25	面积/hm ²	20.26	48.94	124.55	53.72	17.57	265.04	244.78
		百分比/%	0.01	0.03	0.06	0.03	0.01	0.14	0.13
	25—50	面积/hm ²	32.52	2552.17	9412.26	475.41	19.34	12491.70	9939.53
		百分比/%	0.02	1.31	4.83	0.24	0.01	6.41	5.10
	50—75	面积/hm ²	138.59	5461.20	65242.68	71803.41	2144.36	144790.25	79547.57
		百分比/%	0.07	2.80	33.46	36.82	1.10	74.25	40.79
	75—100	面积/hm ²	70.72	1193.10	6248.29	23880.69	5339.68	36732.48	12851.78
		百分比/%	0.04	0.61	3.20	12.25	2.74	18.84	6.59
	>100	面积/hm ²	5.03	46.40	309.14	245.98	122.91	729.46	606.55
		百分比/%	0.00	0.02	0.16	0.13	0.06	0.37	0.31
总计 Total		面积/hm ²	267.12	9301.81	81336.92	96459.21	7643.85	195008.91	
		百分比/%	0.14	4.77	41.71	49.46	3.92	100	
转入 Transfer in		面积/hm ²	246.86	6749.64	16094.24	72578.52	7520.95		
		百分比/%	0.13	3.46	8.25	37.22	3.86		
净增值 Net added value		面积/hm ²	2.08	-3189.88	-63453.33	59726.73	6914.40		
		百分比/%	0	-1.64	-32.54	30.63	3.55		

3.4 黄龙山森林植被地上碳储量的变化趋势

为了更连续地判断森林植被地上碳储量变化, 对研究区 2000—2021 年森林植被地上碳储量的变化进行趋势分析。研究区西南部、西部和东北部部分地区植被地上碳储量呈现减少的趋势; 植被地上碳储量基本不变的地区分布于上述植被地上碳储量减少的区域附近; 其余部分为植被地上碳储量增加的地区, 主要分布在研究区东南部、中部部分地区和西北部部分地区 (图 7)。Slope 高低值的分布区域与 2015—2021 年的碳储量

的高低值分布在很大程度上相似,进一步说明了研究区东南部、中部部分地区和西北部部分地区经过碳储量的累积,是植被地上碳储量高值聚集地。

对 2000—2021 年研究区森林植被地上碳储量变化趋势进行 *F* 检验,其中植被地上碳储量减少的面积为 9118.54 hm²,占研究区面积的 4.67%,主要分布于研究区东北部、西南部和西部;植被地上碳储量基本无变化的地区主要分布在极显著减少和显著减少的地区周围,面积为 52945.91 hm²,占总体 27.15%;植被地上碳储量增加的面积为 132944.55 hm²,所占面积达到了 68.17%,主要分布在研究区东南部、中部和西北偏中部地区,其中极显著增加的比例占总体 45.20%(图 8 和表 7)。表明 22 年来研究区森林植被地上碳储量增加的区域中,超过 2/3 的地区植被地上碳储量极显著增加。

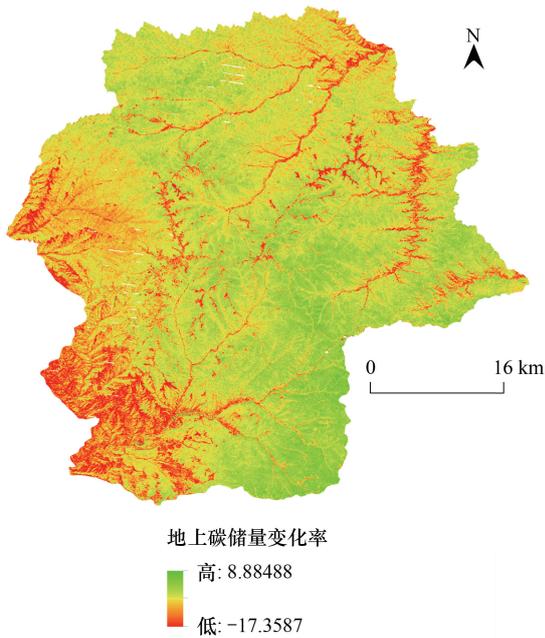


图 7 2000—2021 年研究区森林植被地上碳储量变化趋势
Fig.7 Trend of AGC of forest vegetation in the study area from 2000 to 2021

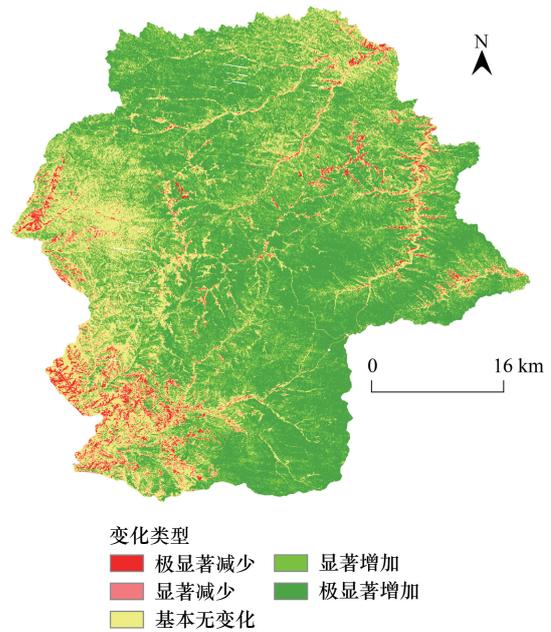


图 8 2000—2021 年研究区森林植被地上碳储量变化显著性检验
Fig.8 Significance test of AGC of forest vegetation in the study area from 2000 to 2021

表 7 研究区森林植被地上碳储量变化类型面积

Table 7 AGC change type area of forest vegetation in the study area

面积及占比 Area and proportion	植被地上碳储量变化类型 Types of AGC Changes					总计 Total
	极显著减少	显著减少	基本无变化	显著增加	极显著增加	
面积 Area/hm ²	5313.11	3805.43	52945.91	44794.21	88150.34	195009
百分比 Proportion/%	2.72	1.95	27.15	22.97	45.20	100

3.5 森林植被地上碳储量时空分异驱动力分析

本研究基于地理探测器,探究了年均温、年降水量、年蒸散发量、土壤类型、土壤质地、海拔、坡度、坡向、人口和 LULC 对黄龙山森林植被地上碳储量时空变化的影响,对引起植被地上碳储量时空分布差异的驱动因子的解释力进行了定量分析,并对驱动因子间交互作用的解释力及其显著性进行分析。

3.5.1 因子影响力探测分析

不同驱动因素在不同时间对森林植被地上碳储量的影响程度不同,年均温、年蒸散发量、年降水量和海拔是森林植被地上碳储量的主要驱动因子(表 8)。2000 年和 2005 年海拔和年均温是引起研究区森林植被地上碳储量空间分异的主要因素;2010 年解释力最高的因子是年均温,海拔和年蒸散发量解释力也较强,三者是影响研究区森林植被地上碳储量空间变化的因素。2015 年和 2020 年年降水量的 *q* 值明显下降,年均温、年蒸

散发量和海拔的 q 值仍然保持在较高水平, 年降水量对研究区森林植被地上碳储量空间分异的影响力明显比前三个年份的小, 年均温、年蒸散发量和海拔仍然是影响研究区森林植被地上碳储量空间分异的主要自然因子。

表 8 不同时期各驱动因子对森林植被地上碳储量的 q 值

Table 8 The q value of each driving factor on the AGC of forest vegetation in different periods in the study area

探测指标 Detection index	年份 Year				
	2000	2005	2010	2015	2020
年均温 Average annual temperature	0.6428 ***	0.7741 ***	0.8399 ***	0.8106 ***	0.8240 ***
年蒸散发量 Annual evapotranspiration	0.5716 ***	0.7395 ***	0.8056 ***	0.8197 ***	0.8188 ***
年降水量 Annual precipitation	0.5075 ***	0.6747 ***	0.5167 ***	0.1893 ***	0.0888 ***
人口密度 Population density	0.0434	0.0321	0.0397	0.0502	0.0809
土地利用类型	0.0815	0.0318	0.1343 ***	0.1564 ***	0.1885 ***
海拔 Elevation	0.7179 ***	0.8590 ***	0.8260 ***	0.7786 ***	0.8017 ***
坡度 Slope	0.0974 ***	0.0542	0.0280	0.0047	0.0243
坡向 Aspect	0.0133	0.0094	0.0028	0.0053	0.0058
土壤类型 Soil type	0.0576	0.0488	0.0275	0.0174	0.0208
粘粒含量 Clay content	0.1646 ***	0.1686 ***	0.2358 ***	0.2164 ***	0.2434 ***
粉粒含量 Silt content	0.1596	0.1937 ***	0.2375 ***	0.2355 ***	0.2460 ***
砂粒含量 Sand content	0.1751 ***	0.1997 ***	0.2596 ***	0.2505 ***	0.2691 ***

*** 表示 $P < 0.001$

3.5.2 因子交互作用探测分析

交互探测器研究结果表明, 任意两个因子间相互作用可增强对研究区森林植被地上碳储量空间分异的驱动(图 9), 表明影响因子对森林地上碳储量影响的过程都不是孤立的, 而是彼此相互联系并相互协同作用的。2000—2010 年人口密度、LULC、坡向和土壤类型与其它大部分因子间为非线性增强其余因子之间多为双因子增强。2000、2005 和 2010 年年均温、年均蒸散发量、年降水量和海拔与其它因子之间的双因子增强作用对森林植被地上碳储量的空间变化影响程度较大, 特别是海拔与年均温和年蒸散发量的双因子增强作用, 可达 0.88, 这与海拔、年均温、年均蒸散发量、年降水量对研究区森林植被地上碳储量空间分布单因子解释力较强有关。海拔与其它因子的交互作用 q 值均较高, 表明海拔的变化影响了年均温、年蒸散发量和年均降水量, 导致了不同海拔的温度和水分平衡的差异, 从而对研究区森林植被地上碳储量解释力最高。

年均温和年均蒸散发量与其它因子的交互作用在 2015 年和 2020 年仍具有较大影响, 而年降水量与其它因子的交互作用对森林植被地上碳储量的解释程度减小了。这与年降水量在 2015 和 2020 年的单因子解释力下降有关, 同时表明这两个年份年降水量的变化对引起其它因子的变化的影响减小。年均温、年均蒸散发量和海拔与其它因子的交互作用仍有力地影响着该地区森林植被地上碳储量空间分布。

4 讨论

4.1 黄龙山森林植被地上碳储量水平分析

本研究估算的研究区森林植被地上碳密度平均值由 2000 年的 66.02 t/hm^2 增加至 2021 年的 75.84 t/hm^2 , 高于郝丽^[29]等基于陕西省第 1—7 次森林资源清查资料估算的陕西省平均碳密度 33.73 t/hm^2 和李海奎等^[30]利用第七次全国森林资源连续清查数据估算的陕西省乔木林碳密度 37.98 t/hm^2 以及全国乔木林碳密度 42.82 t/hm^2 , 这是由于陕西省森林碳储量主要分布在秦巴山林区、关山林区、黄龙山林区和桥山林区, 其中黄龙山林区和桥山林区, 对应碳储量占全省碳储量的 17.66%, 研究区位于黄龙山林区, 所以碳储量高于全省平均水平。王天福等^[31]利用 InVEST 模型定量评估陕西省植被碳储量的结果也表明, 黄龙山林区的植被碳储量在全省分布中明显偏高, 并且由于退耕还林和天保工程的实施, 林地面积增加, 促使黄龙山林区森林植被层碳储量的增加。以上表明研究区的碳密度高于陕西省和全国的平均水平, 地区植被具有较好的碳汇能力。

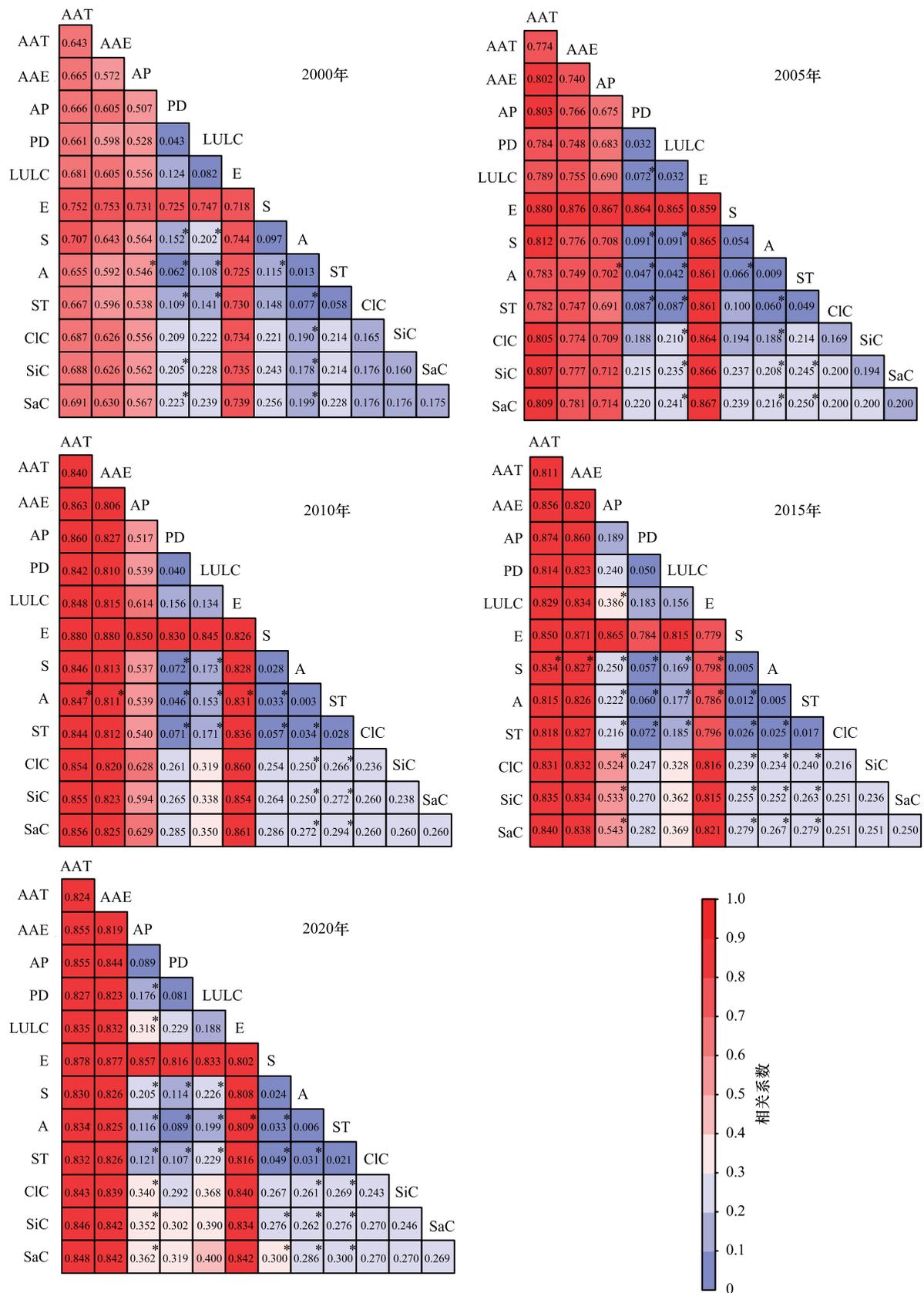


图9 不同年份因子间的交互作用

Fig.9 Interaction between factors of different years

AAT:年均温; AAE: 年均蒸散发量; AP: 年降水量; PD: 人口密度; LULC: 土地利用/土地覆盖; E: 海拔; S: 坡度; A: 坡向; ST: 土壤类型; CIC: 粘粒含量; SiC: 粉粒含量; SaC: 砂粒含量; * 为非线性增强; 除 * 以外的为双因子增强

研究区东部、南部、中部及西北部是碳储量高值分布地区,而东北部、西部和西南部碳储量较低。由于碳储量于生物量正向线性相关^[32-33],因此对比翟晓江等^[34]对黄龙山林区 2011 年生物量反演的空间分布,其生物量高值分布区与本研究碳储量高值分布区基本一致。

4.2 2011—2014 年黄龙山森林植被碳储量变化分析

2000 年来研究区实施天保工程,全面禁伐,导致森林无法进行定株抚育,造成林分过密过稠,自然稀疏分化等现象,导致林分生产力低下,平均碳储量水平不高^[35]。2004 年,黄龙山林业局引进近自然经营理念,对林分进行间伐抚育^[36]。2010 年,延安市黄龙山林业局充分重视近自然经营理念,与延安市林业局森林经营方案“十二五”规划相结合进行抚育,疏伐、间伐等营林措施实施力度较大^[35-37],植被覆盖指数 NDVI 迅速下降(图 4),导致森林碳储量在短期内快速下降。由于研究采用年度生长季 5—9 月的遥感图像叠加的平均值,2004 年和 2010 年采取抚育措施可能处于生长季内,因此碳储量的变化在第二年的变化更为明显,因此表现为 2005 年和 2011 年碳储量下降,其中 2011 年碳储量下降较多,与抚育措施实施力度有关。近自然林经营也导致了 2011—2014 年碳储量 50—75 t/hm² 面积比例和 75—100 t/hm² 面积比例发生较大变化,由表 9 的 2011—2014 年森林植被地上碳密度转换矩阵可知,2011—2014 年 50—75 t/hm² 范围转为 75—100 t/hm² 范围内面积的占比为 44.68%,波动较大,导致了 2011—2014 年间 50—75 t/hm² 面积比例和 75—100 t/hm² 面积比例发生突变。这是由于经营后经植被恢复,植被覆盖指数波动上升,林分质量提升、林分生产力增强,碳储量随之增加。

表 9 2011—2014 年研究区森林植被地上碳密度转换矩阵

Table 9 Transformation matrix of AGC density of forest vegetation in the study area from 2011 to 2014

碳储量 AGC/(t/hm ²)		2014 年					总计 Total	转出 Transfer out	
		0—25	25—50	50—75	75—100	>100			
2011 年	0—25	面积/hm ²	69.33	198.13	472.25	570.88	202.30	1512.88	1243.55
		百分比/%	0.04	0.10	0.24	0.29	0.10	0.77	0.73
	25—50	面积/hm ²	28.74	3695.99	30211.15	15872.66	531.91	50340.44	46644.45
		百分比/%	0.01	1.89	15.47	8.13	0.27	25.77	23.88
	50—75	面积/hm ²	95.75	1405.68	20253.33	87264.16	26383.78	135402.70	115149.37
		百分比/%	0.05	0.72	10.37	44.68	13.51	69.33	58.96
	75—100	面积/hm ²	27.48	51.44	1418.90	3108.92	3205.28	7812.01	4703.09
		百分比/%	0.01	0.03	0.73	1.59	1.64	4.00	2.41
>100	面积/hm ²	4.77	0.11	36.36	137.16	64.92	243.32	178.40	
	百分比/%	0.00	0.00	0.02	0.07	0.03	0.12	0.09	
总计 Total	面积/hm ²	226.06	5351.34	52391.99	106953.76	30388.19	195311.35		
	百分比/%	0.14	4.77	41.71	49.46	3.92	100		
转入	面积/hm ²	156.73	1655.35	32138.66	103844.84	30323.27			
Transfer in	百分比/%	0.08	0.85	16.46	53.17	15.53			
净增值	面积/hm ²	-1086.82	-44989.10	-83010.71	99141.75	30144.87			
Net added value	百分比/%	-0.56	-23.03	-42.50	50.76	15.43			

4.3 黄龙山森林地上碳储量驱动力分析

在不同时期,年均温是气候因子中对森林植被地上碳储量空间分布最具解释力的因子,这一结果与赵敏和周广胜^[38]分析气候因子对森林植被碳贮量的影响结论一致;海拔是解释力较强的立地因子,与以往研究中海拔是植被碳储量的影响因素观点一致^[39-41]。在驱动黄龙山森林植被地上碳储量的主要因子中,年降水量的解释力在 2015 年和 2020 年大幅下降,同时年降水量与其它因子间的交互作用影响也变弱。通过对研究区不同时期的区域降水量方差进行对比(表 10),2015 年地区降雨较 2005 年和 2010 年均匀,2020 年方差更小,表明该年份降水十分均匀,不足以成为驱动森林植被地上碳储量空间分异的因素,同时降雨对其它因子带来

的影响减小。2000 年降雨虽然较 2015 年均匀,但其对森林植被地上碳储量空间变化的解释力大,表明森林生产力对降水的依赖程度降低,森林质量更加稳定,这是天保工程、近自然林经营等措施的又一作用体现。

表 10 不同时期年降水量方差

Table 10 Variance of annual precipitation in different periods

年份 Year	年降水量方差/mm ² Variance of annual precipitation	年份 Year	年降水量方差/mm ² Variance of annual precipitation
2000	16.5362	2015	20.1256
2005	23.9461	2020	4.4726
2010	23.7506		

4.4 不足与改进

本研究基于样地实测数据和卫星遥感数据估算黄龙山 2000—2021 年森林植被地上碳储量,并对其时空分异驱动力进行分析,其中存在一定不足。首先,本文仅以 2017 年样地实测数据为基础,初步估算了 2000—2021 年份碳储量水平,虽然模型具有一定准确性,但模型对其他年份的碳储量预测准确度需进一步探究。其次,本研究探讨了影响黄龙山森林植被地上碳储量的因子解释力以及因子间交互作用的解释力,但尚未明确森林地上碳储量与环境因素间的作用机理,需进一步探索研究。

5 结论

本研究基于样地实测和卫星遥感数据,建立黄龙山林区植被地上碳储量模型,并对 22 年间碳储量分布的时空变化及其驱动力进行分析,得到以下结论:

(1) 黄龙山森林植被地上碳储量平均值在 2000—2004 年呈上升趋势,在 2005 年下降后继续上升,在 2011 年下降到最低值后迅速增加,于 2017 年后逐渐稳定,2000—2021 年总体呈波动上升趋势,由 66.02 t/hm² 增加至 75.84 t/hm²,年均增加 0.45 t/hm²,碳储量高于全省平均水平。

(2) 研究区东部、南部、中部及西北部是植被地上碳储量高值分布地区,且呈增加趋势;而东北部、西部和西南部植被地上碳储量较低,且呈减少趋势。研究区森林植被地上碳储量增加的面积为 132944.55 hm²,所占面积达到了 68.17%,其中极显著增加占总体 45.20%。从 2000 年到 2021 年 75—100 t/hm² 范围和 >100 t/hm² 范围面积分别增加了 59726.73 hm² 和 6914.40 hm²,占研究区面积的 30.63% 和 3.55%。研究区森林植被地上碳储量目前多处于 75—100 t/hm² 范围。其中因为近自然经营和森林经营方案的实施,2011—2014 年碳储量水平变化较大,总体来说 22 年间研究区森林植被地上部分固碳量增加,生产力提升。

(3) 年均温、年蒸散发量、年降水量和海拔是 2000—2021 年影响研究区森林植被地上碳储量空间分异主要因素;任意两个因子间的交互作用对黄龙山森林地上碳储量影响都大于单个因子,其中 2000 年、2005 年和 2010 年解释力较大为年均温、年蒸散发量、年降水量和海拔与其它因子的交互作用,2015 和 2020 年,年降水量与其它因子交互作用的解释程度下降。表明黄龙山森林植被地上碳储量在不同时间空间分布受多种因素共同作用,年降水量对其空间分布影响逐渐减小,森林稳定性提高。

参考文献(References):

- [1] 崔高阳, 陈云明, 曹扬, 安淳淳. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析. 植物生态学报, 2015, 39(4): 333-342.
- [2] 邓茗文. 碳达峰、碳中和目标下林业碳汇发展机遇与企业行动选择. 可持续发展经济导刊, 2021(S1): 26-29.
- [3] Dai W, Fu W J, Jiang P K, Zhao K L, Li Y H, Tao J X. Spatial pattern of carbon stocks in forest ecosystems of a typical subtropical region of southeastern China. Forest Ecology and Management, 2018, 409: 288-297.
- [4] 雷海清, 孙高球, 郑得利. 温州市森林生态系统碳储量研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(5): 20-26.
- [5] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配. 生态学报, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [6] 张峰, 彭祚登. 北京市森林碳储量和碳汇经济价值研究. 林业资源管理, 2021(6): 52-58.

- [7] 刘腾艳. 遥感结合过程模型的浙江省森林碳储量时空演变研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [8] 任德智, 廖兴勇, 肖前刚, 赖长鸿, 宋放, 孟思森, 彭雪芹. 成都市森林植被碳储量及空间分布格局. 西部林业科学, 2021, 50(3): 74-81.
- [9] 张桂莲. 基于遥感估算的上海城市森林碳储量空间分布特征. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1777-1786.
- [10] 张颖, 李晓格. 碳达峰碳中和目标下北京市森林碳汇潜力分析. 资源与产业, 2022, 24(1): 15-25.
- [11] 强建华. 基于 RS 技术的黄龙山林区天然林资源时空变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [12] 李卫忠, 赵鹏祥, 贾生平. 陕西延安黄龙山褐马鸡自然保护区综合科学考察, 陕西延安黄龙山褐马鸡自然保护区综合科学考察, 2008.
- [13] 马钦彦. 中国油松生物量的研究. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 1-10.
- [14] 曾伟生. 基于木材密度的 34 个树种组一元立木生物量模型建立. 林业资源管理, 2017(6): 41-46.
- [15] 国家林业局调查规划设计院, 国家林业局西北林业调查规划设计院, 国家林业局华东林业调查规划设计院, 中国林业科学研究院资源信息研究所. 立木生物量模型及碳计量参数——油松. 国家林业局, 2014, Vol. LY/T 2260-2014, 1-16.
- [16] 国家林业局调查规划设计院, 国家林业局西北林业调查规划设计院, 国家林业局中南林业调查规划设计院. 立木生物量模型及碳计量参数——桦树. 国家林业局, 2016, Vol. LY/T 2659-2016, 1-32.
- [17] 国家林业局调查规划设计院, 国家林业局华东林业调查规划设计院, 国家林业局中南林业调查规划设计院, 国家林业局西北林业调查规划设计院. 立木生物量模型及碳计量参数——栎树. 国家林业局, 2016, Vol. LY/T 2658-2016, 1-32.
- [18] Richardsons A J, Wiegand A. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43: 1541-1552.
- [19] Pearson R. L., Miller L. D. Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of Productivity of the Shortgrass Prairie. Remote Sensing of Environment, 1972.
- [20] Rouse J, Haas R H, Schell J A, Deering D. Monitoring vegetation systems in the great Plains with ERTS. 1973.
- [21] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [22] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- [23] Jackson R D. Spectral indices in N-space. Remote Sensing of Environment, 1983, 13(5): 409-421.
- [24] Kauth R, Thomas G. The tasseled cap-A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. The Laboratory for Applications of Remote Sensing Symposia, 1976, 159.
- [25] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, Kerr Y H, Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119-126.
- [26] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [28] Roy D P, Kovalskyy V, Zhang H K, Vermote E F, Yan L, Kumar S S, Egorov A. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 57-70.
- [29] 郝丽, 徐娟娟, 翟园, 张文静. 陕西省森林植被碳储量时空动态变化. 陕西气象, 2018(3): 25-28.
- [30] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [31] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 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. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [32] 杜红梅, 王超, 高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 756-759.
- [33] 孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 王雪军, 王新杰. 兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 幼中龄林的生物量与碳汇功能. 生态学报, 2007, 27(5): 1756-1762.
- [34] 翟晓江, 郝红科, 麻坤, 李鹏, 杨延征. 基于 TM 的陕北黄龙山森林生物量模型. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 41-45.
- [35] 李玉侠, 王海东. 黄龙山林业局森林资源的现状及经营对策探讨. 陕西林业, 2010(1): 33.
- [36] 高云昌, 张文辉, 何景峰, 王晋堂. 黄龙山油松人工林间伐效果的综合评价. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1313-1319.
- [37] 卢志伟, 曹旭平. 黄龙山林业局近自然森林经营策略与措施. 西南林学院学报, 2010, 30(2): 7-10, 15.
- [38] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [39] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 张国庆. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征. 生态学报, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [40] 巫明焱, 董光, 王艺积, 熊瑞东, 李悦, 程武学, 付志玺, 范曙峰. 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算. 生态学报, 2020, 40(2): 621-628.
- [41] 宋洁, 刘学录. 祁连山国家公园森林地上碳密度遥感估算. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1045-1057.