

中条山森林碳密度时空变化及其驱动因素分析

段兰兰¹, 刘菊², 贺丽¹, 王琰¹, 严俊霞¹

(1.山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2.山西省林业和草原科学研究院, 太原 030012)

摘要: 森林碳库在全球碳循环中发挥着重要的作用。为深入了解山西省中条山区森林植被碳密度的时空动态变化及其影响因素, 以 2005—2015 年 3 期国家森林资源连续清查数据为基础, 通过随机森林和结构方程模型, 定量研究了森林植被的碳密度以及各驱动因子对碳密度空间分布的贡献度。结果表明: (1) 2005 年、2010 年、2015 年中条山森林植被碳密度和碳储量分别为 24.87, 26.56, 31.42 Mg C/hm² 和 15.89, 16.00, 20.15 Tg C, 二者均呈持续增加趋势, 年均增长率分别为 2.63% 和 2.68%。(2) 植被碳密度空间分布特征为高(>100 Mg C/hm²) 和中高(60~100 Mg C/hm²) 碳密度样地主要分布在中条山中部和西南部, 低碳密度区(<60 Mg C/hm²) 主要在东北部。(3) 林龄和年均降雨量是影响研究区植被碳密度空间格局的重要驱动因子, 林龄对碳密度的直接正向影响最为显著, 年均降雨量通过对林分因子的间接影响进而影响碳密度的空间分布格局。

关键词: 中条山; 碳密度; TWINSpan 分类; 随机森林模型; 结构方程模型

中图分类号: S718.55+4.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0158-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.04.021

Spatio-temporal Variation and Driving Factors of Forest Carbon Density in Zhongtiao Mountains

DUAN Lanlan¹, LIU Ju², HE Li¹, WANG Yan¹, YAN Junxia¹

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006;

2. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Science, Taiyuan 030012)

Abstract: Forest carbon pool plays an important role in the global carbon cycle. In order to understand the temporal and spatial dynamics of carbon density of forest vegetation and its influencing factors in Zhongtiao Mountains region of Shanxi Province, we quantitatively studied the carbon density of forest vegetation and the contribution of each driving factor to the spatial distribution of carbon density by using stochastic forest and structural equation model based on the data of national forest resources continuous inventory from 2005 to 2015. The results showed that: (1) The carbon density and carbon storage of forest vegetation in Zhongtiao Mountains in 2005, 2010 and 2015 were 24.87, 26.56, 31.42 Mg C/hm² and 15.89, 16.00, 20.15 Tg C, respectively, which showed a continuous increasing trend with an average annual growth rate of 2.63% and 2.68%, respectively. (2) The spatial distribution characteristics of vegetation carbon density were as follows: high (> 100 Mg C/hm²) and medium-high (60~100 Mg C/hm²) carbon density plots were mainly distributed in the central and southwest of Zhongtiao Mountains, while low carbon density plots (< 60 Mg C/hm²) were mainly distributed in the northeast. (3) Stand age and average annual rainfall were two important driving factors affecting the spatial pattern of vegetation carbon density in the study area. The direct positive effect of stand age on carbon density was the most significant, and average annual rainfall affected the spatial distribution pattern of carbon density through an indirect effect on stand factors.

Keywords: Zhongtiao Mountains; Carbon density; TWINSpan classification; Random Forest Model; Structural Equation Model

收稿日期: 2022-11-18

资助项目: 山西省自然科学基金项目(20210302123449); 山西省科技厅“山西省森林生态科学数据共享服务平台项目”(201605D121017); 山西省科技创新人才团队专项(202204051001010); 国家自然科学基金项目(41977412)

第一作者: 段兰兰(1998—), 女, 硕士, 主要从事生态系统碳循环研究。E-mail: duano927@163.com

通信作者: 严俊霞(1976—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态系统碳循环研究。E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

为应对全球气候变化,我国政府提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的战略目标。森林固碳是一种经济实惠且环境友好的减缓大气CO₂浓度升高的重要方法,在国际社会中得到广泛认可^[1]。森林是陆地生态系统的核心,其不仅能够有效治理水土流失和改善生态环境,还是碳库中最大的储存器。每年森林固定的碳量占整个陆地生态系统的2/3^[2]。准确估算森林生态系统的碳储量是提高森林管理效率和制定减排措施的关键,并且一直受到国际社会的广泛关注^[3]。

目前,森林碳储量的估算方法主要有直接测量和间接估计法。直接测量精度高,但耗时耗力,对生态系统具有极大的破坏性。间接估计主要包括遥感估算、模型模拟和样地清查法。遥感估算法通过建立植被指数与生物量关系的模型来估算碳储量,其估算精度受变量选择、建模方法等因素影响,预测结果无法推广到其他地方^[4]。模型模拟法通常用于估算国家和全球尺度的森林碳储量,但模型中包含有各种假设,一些生态过程的特征参数不易准确获得,不确定的影响因子太多^[4]。样地调查法是目前应用最为广泛的碳储量估算方法。该方法通过设立固定样地,定期进行抽样调查,得到各类森林林分蓄积量(材积量)。然后根据林分蓄积量和生物量建立回归方程推算森林生物量,乘以碳含量系数即可得到森林碳储量。在推算森林生物量时一般采用平均生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法等^[5-7]。李海奎等^[8]使用多种方法估算了6个省市的乔木林生物量,包括IPCC法、连续函数法和加权生物量回归模型法,结果表明,这些方法都能够得出较为准确的估算结果。因此,本研究选用加权生物量回归模型法对森林碳储量进行估算。

近年来,已有学者^[9-11]从不同空间尺度对森林碳储量/碳密度与林分因子、生境条件的关系进行了研究。林分因子(森林类型、林分年龄、林分密度、郁闭度以及基底面积等)是森林碳储量的重要决定因素^[12-13]。已有研究^[13]表明,森林固碳速率和林龄构成有很强的关系。气候变化可以改变物种组成和迁移模式,从而改变森林组成并影响碳的吸收速率^[10]。优化的森林管理模式可提高碳储量,而其分配策略与环境变化密切相关^[11,14]。人类的有效干预可以提高陆地生态系统的碳固定能力,通过保护天然林、实施退耕还林和退耕还草等重大生态工程,已经为中国陆地生态系统的碳固定贡献了36.8%^[15]。在山区复杂的森林生态系统中,海拔梯度是物种多样性空

间分布格局的决定性因素,各种环境因素如温度、降水、光照等都随着海拔高度呈现出规律性的变化^[10]。通常在高海拔区树木生长主要受气温影响,而低海拔区对降水的响应更明显^[16-17]。目前的研究多采用线性回归、相关分析等方法来反映环境因子对森林碳储量/碳密度的影响,然而这些传统的单变量统计方法很难系统揭示自然界中复杂的多变量关系。结构方程模型可以同时量化多个变量间的直接和间接因果关系,已成为当前生态学研究的多变量统计方法的主要工具之一^[18]。

中条山位于山西省南部,地处亚热带和暖温带的过渡地带,区内植物资源丰富,有木本植物478种^[19]。近20多年来,随着天然林保护、退耕还林(草)等工程的实施,中条山的森林覆盖率2022年达到82.3%,在水源涵养、水土保持、净化空气、改善小气候方面发挥了极其重要的作用。同时,其森林的碳汇功能及其时空格局也随着森林经营活动的实施而发生变化。然而,目前对中条山森林的研究主要集中在林分质量、树种资源多样性和土壤养分等方面^[20-21],对中条山森林碳储量的时空动态及环境驱动机制尚不清楚。因此,本文利用3期国家森林资源连续清查数据,采用加权生物量经验回归模型法估算中条山森林碳储量和碳密度,对比分析不同起源、林龄和群系的森林碳密度差异,借助随机森林和结构方程模型分析立地、林分和气候因子对森林碳密度空间格局的影响,以期为实现“双碳”目标,为中条山森林生态系统经营管理提供理论依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

中条山(34°37'15"—35°39'30"N,110°15'00"—112°17'30"E)位于山西省南部,横跨临汾、运城、晋城三市,呈西南—东北走向,长约160 km,宽10~15 km,海拔1 200~2 300 m。中条山属于暖温带半湿润季风气候区,年均气温10~14℃,年均降水量500~900 mm,土壤类型垂直分异明显,自下而上分别为山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤和山地草甸土。地带性植被为暖温带落叶阔叶林,研究区内分布有针叶纯林、阔叶纯林、针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林等多种林相^[22]。

1.2 数据来源

本研究利用中条山国有森林管理局18个林场的第7期(2000—2005年)、第8期(2006—2010年)和第9期(2011—2015年)3期国家森林资源清查数据进行,数据由山西省林业和草原科学研究院提供。按

照国家林业和草原局森林资源调查项目规定^[23],每隔 4 km 随机选取样地,每个样地面积为 667 m²,共 573 个样地,其中有林样地 323 个,研究区总面积为 9.97×10^5 hm²(图 1)。样木胸径 5 cm 起测,在每个样地内,记录立地因子(坡度、坡向、海拔、土层厚度等)和林分因子(胸径、树高、郁闭度、林龄等)。年均气温和年均降水量来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>),土壤数据来自于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans>)。

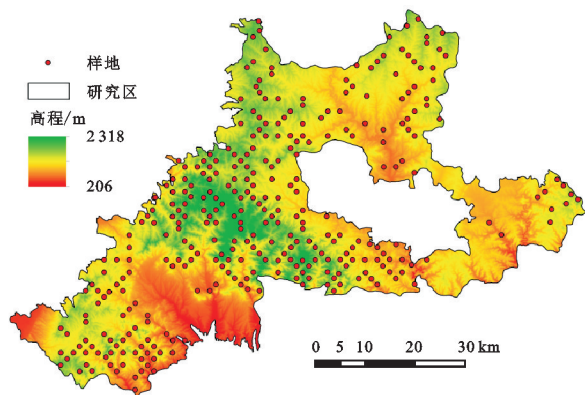


图 1 研究区样地布设

1.3 研究方法

1.3.1 生物量估算 采用加权生物量经验回归模型法来估算单木生物量,计算公式^[24]为:

$$W = a \times (D^2 H)^b$$

式中: W 为单木生物量(kg); a 、 b 为常数,本文采用李海奎等^[24]基于第七次全国森林资源连续清查调查成果中的相关参数; D 为样木胸径(cm); H 为样木树高(dm);将样地内所有样木的生物量求和得到样地总生物量。本研究中,林分生物量仅包括乔木层的生物量(包括活立木地上和地下部分生物量),未包括灌木层、草本层、凋落物层和枯死木等的生物量。

1.3.2 森林碳密度估算 森林碳储量为生物量乘以含碳系数,本研究含碳系数采用国际上普遍用的乔木含碳率转换系数 0.5 来估算森林碳储量^[25]。森林碳密度为单位面积的碳储量。

1.3.3 样地群系分类 在 323 个有林样地中,共记录 41 个树种,通过计算各树种的重要值,排列成 41×323 (物种 $\times$ 样方)的重要值矩阵,利用 PC-ord 软件对所有树种进行 TWINSpan 分类。

重要值计算公式为:

重要值 = 相对密度 + 相对优势度 + 相对频度

式中:相对密度为某一树种在整个样地中的数量占比;相对优势度为某一树种在整个样地中的胸径面积占比;相对频度为某一树种所占的样地数占所有样地数的百分比。

1.3.4 统计分析 使用随机森林(random forest, RF)算法来识别立地因子、林分因子和气候因子的重要性。RF 算法是一种集成方法,它通过创建一个具有二叉划分的分类树集合来扩展标准的分类回归树(CART)方法^[26]。RF 算法不能控制模型的内部运行,但其结果能有效解决过度拟合和多重共线性的问题。RF 在运算过程中,有 2 个关键的参数: $ntree$ 和 $mtry$ 。 $ntree$ 表示决策树的数量,而 $mtry$ 用于确定每个树节点上的变量个数。在本研究中, $ntree$ 为 1 000, $mtry$ 为 3。本研究利用 R 4.2.1 中的 RandomForest 包执行 RF 算法评估各驱动因子的重要性。

在确定主要驱动因子后,利用结构方程模型(structural equation model, SEM)对主要驱动因子的直接和间接效应进行标准化评价。首先,对所有驱动因子进行共线性检验,消除共线性。其次,基于已有知识和影响因子与碳密度之间的关系,建立植被碳密度的初始模型。检验变量的正态性,对变量进行自然对数转换和标准化。数据转换后,对模型进行参数化检验,使用卡方检验、拟合优度指数(GFI)和比较拟合指数(CFI)检验其拟合优度。最后采用卡方检验不显著统计量($p > 0.05$), $GFI > 0.95$, $RMSEA < 0.08$,以确定碳密度的最优模型。SEM 分析使用 AMOS 25.0 进行。

2 结果与分析

2.1 中条山森林植被碳密度的动态变化

研究区 3 期森林的碳密度分别为 24.87, 26.56, 31.42 Mg C/hm²,呈持续增加趋势。2005—2010 年和 2010—2015 年碳密度年均增加量分别为 0.34, 0.97 Mg C/hm²(表 1),表明 2010—2015 年研究区的碳密度增加速度快于 2005—2010 年。3 期碳密度小于 45 Mg C/hm²范围内的样地个数分别占总样地个数的 81.93%, 79.73%, 73.83%; 45~75 Mg C/hm²的样地个数所占比例分别为 11.76%, 13.18%, 14.64%; 高于 75 Mg C/hm²的样地占比分别为 6.30%, 7.09%, 11.53%。2005 年、2010 年、2015 年研究区植被碳储量分别为 15.89, 16.00, 20.15 Tg C,呈逐渐增加趋势;2005—2015 年植被碳储量年均增加 4.26×10^5 Mg C,年均增长率为 2.68%;平均碳密度年均增加 0.65 Mg C/hm²,年均增长率为 2.63%。

森林年龄结构组成与森林碳密度密切相关,研究区天然林碳密度以成熟林最高,人工林以近熟林最高,二者均以幼龄林碳密度最低,研究区无过熟林(图 2),且 2005 年、2010 年、2015 年天然林、人工林的平均碳密度均呈逐渐增加趋势。通过 TWINSpan 分

类并依据植物群落分类和命名原则,结合调查结果的生态分析和群落生境特征的优势树种命名群落类型,将研究区的植物群落分成 8 个群系(表 2)。从表 2 可以看出,除群系 V 和Ⅷ碳密度呈先减少后增加的趋势外,其他所有群系 2005—2015 年的碳密度均呈持续增加趋势,其中群系Ⅱ的碳密度增加最多,为 14.14 Mg C/hm²;其次是群系Ⅲ,增加 13.85 Mg C/hm²;群系Ⅶ增加最少,为 2.48 Mg C/hm²。从林分起源来看,3 期天然林群系碳密度平均值显著高于人工林群系。在人工林中,各群系碳密度平均值从低到高依次为群系Ⅷ[(6.94±10.62),(5.52±6.56),(9.30±9.82) Mg C/hm²]<群系Ⅶ[(9.36±9.31),(9.69±12.63),(11.83±15.25) Mg C/hm²]<群系Ⅵ[(29.09±35.72),(35.14±

42.88),(40.65±48.75) Mg C/hm²];在天然林中,群系 V 的碳密度最低,3 期分别为(10.85±16.43),(10.03±16.70),(12.34±18.60) Mg C/hm²,群系Ⅲ碳密度平均值最高,分别为(37.26±42.67),(42.50±44.30),(51.11±48.40) Mg C/hm²。

表 1 不同时期森林清查样地碳密度描述性统计分析

参数	碳密度/(Mg C·hm ⁻²)		
	2005 年	2010 年	2015 年
最小值	0.05	0.04	0.03
最大值	196.79	198.29	213.21
平均值	24.87	26.56	31.42
标准差	30.90	33.47	37.44
变异系数	1.24	1.26	1.19

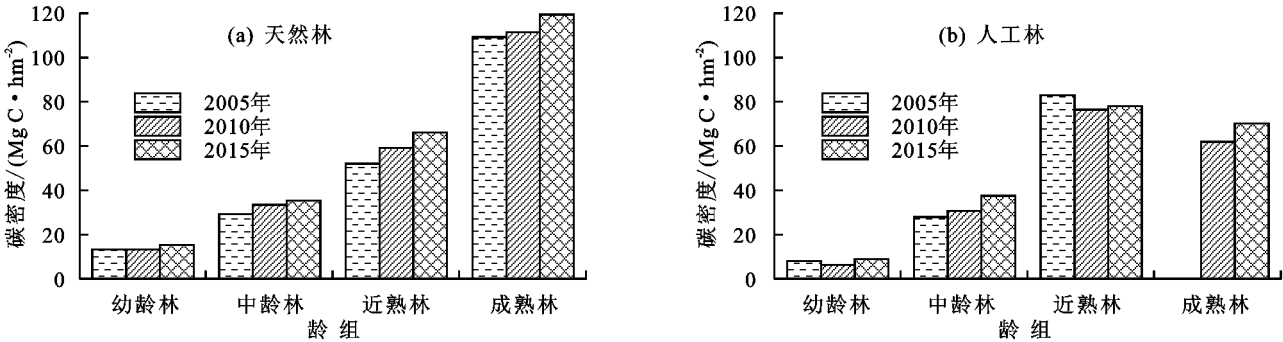


图 2 不同时期天然林和人工林各龄组植被碳密度

表 2 中条山主要植物群系分类及各群系碳密度

分组	群系名称	起源	样地数	碳密度/(Mg C·hm ⁻²)		
				2005 年	2010 年	2015 年
I	油松	天然林	29	20.44±18.52	25.98±24.45	29.40±28.60
II	油松+辽东栎(<i>Quercus wutaishansea</i> Mary)	天然林	31	29.70±20.82	35.14±26.64	43.85±30.80
III	辽东栎+千金榆(<i>Carpinus cordata</i> Bl.)+栓皮栎(<i>Quercus variabilis</i> Bl.)	天然林	79	37.26±42.67	42.50±44.30	51.11±48.40
IV	栓皮栎+青檀木(<i>Form. Pteroceltis turczaninowii</i>)	天然林	62	20.75±22.17	21.41±24.26	25.64±27.89
V	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco)+橐子栎(<i>Quercus baronii</i> Skan)	天然林	43	10.85±16.43	10.03±16.70	12.34±18.60
VI	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i> Carriere)	人工林	31	29.09±35.72	35.14±42.88	40.65±48.75
VII	核桃(<i>Juglans regia</i> L.)+柿树(<i>Diospyros kaki</i> Thunb.)	人工林	25	9.36±9.31	9.69±12.63	11.83±15.25
VIII	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)+杨树(<i>Populus</i> L.)	人工林	23	6.94±10.62	5.52±6.56	9.30±9.82

注:表中数据为平均值±标准差。

2.2 中条山森林植被碳密度空间分布

由图 3 可知,2005 年、2010 年、2015 年高碳密度区(>100 Mg C/hm²)大量集中在研究区中部,少部分集中在研究区西南部;中高碳密度区(60~100 Mg C/hm²)也多集中在研究区中部;低碳密度区(< 60 Mg C/hm²)大量分布在研究区的东北部;并且 2005—2015 年碳密度大于 60 Mg C/hm²的样地个数有明显增加趋势。

分时间段来分析中条山森林碳密度变化趋势,由图 4 可知,2005—2010 年和 2010—2015 年研究区东

北部碳密度增加量均小于 10 Mg C/hm²,研究区中部和西南部样地碳密度增加量基本大于 10 Mg C/hm²;2005—2015 年碳密度增加量大于 25 Mg C/hm²的样地数量明显增加,占总样地的 16.10%,且多分布在研究区的中部,西南部也有少量分布。2005—2010 年和 2010—2015 年研究区样地碳密度平均年增加速率分别为 0.34,0.97 Mg C/hm²,2005—2015 年为 0.65 Mg C/hm²。

2.3 中条山森林植被碳密度空间分布的主要驱动因子

利用随机森林模型揭示影响中条山森林植被碳

密度变化的主要驱动因子,2005 年、2010 年、2015 年 RF 模型分别解释了研究区森林植被碳储量空间分布的 45.6%,52.10%和 55.92%。随机森林分析(图 5)表明,林龄、郁闭度、坡度、年均降雨量和群系是植被碳密度最重要的预测因子。本研究发现,林分结构因子(林龄、郁闭度、群系)对植被碳密度影响最大,其次为气候因子(年均降雨量、年均气温),土壤物理化学属性(土壤质地、土壤容重、土壤有机质、pH、K、P 等)对植被碳密度影响较小。

结构方程模型结果反映生物和非生物因子对植被

碳密度空间分布的直接和间接影响(图 6),模型分别解释 3 期植被碳密度变化的 49.4%,53.7%,54.7%。从直接影响来看,群系、坡度、郁闭度、林龄和年均降雨量对碳密度均有直接作用。其中林龄对碳密度的正向影响最为显著,3 期的路径系数分别为 0.58,0.61,0.58;坡度对其有显著的负向影响,其路径系数分别为-0.19,-0.19,-0.20。从间接影响来看,气候和地形因子主要通过林分因子来影响森林固碳(图 6)。3 期驱动因子的标准化总效应表明林龄是影响植被碳密度变化最重要的驱动因子(图 7)。

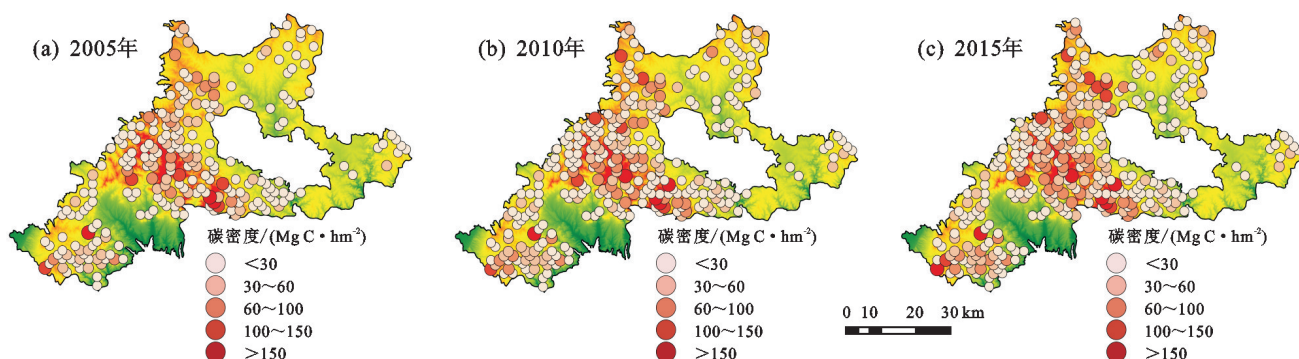
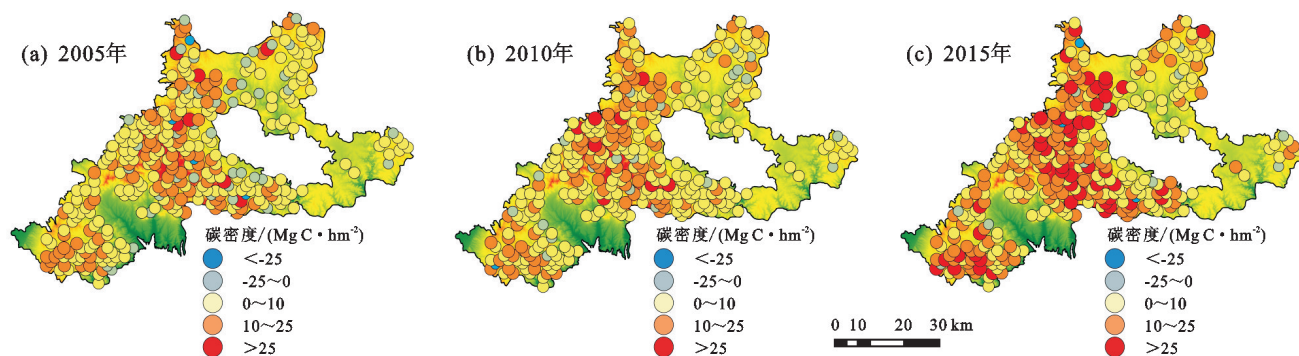
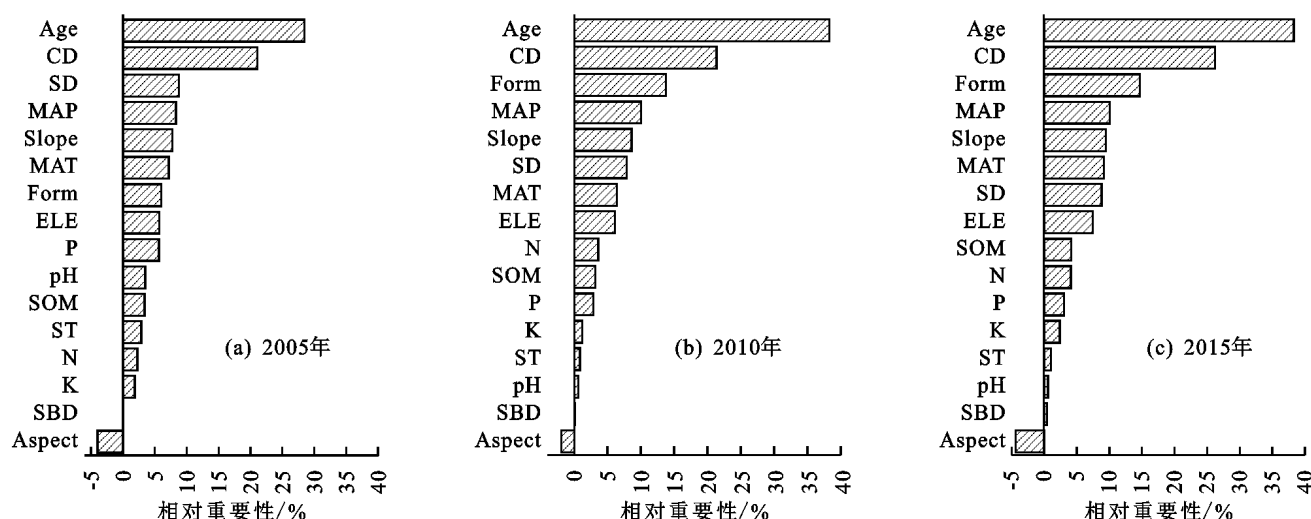


图 3 中条山 3 期清查期间碳密度



注:(a)为 2005—2010 年碳密度的变化;(b)为 2010—2015 年碳密度的变化;(c)为 2005—2015 年碳密度的变化。

图 4 2005—2015 年中条山森林植被碳密度分段时间变化特征



注:Age、CD、Slope、SD、MAT、MAP、ELE、SOM、N、pH、P、ST、SBD、K、Aspect 和 Form 分别为林龄、郁闭度、坡度、土层厚度、年均气温、年均降雨量、海拔、土壤有机质、全氮、酸碱度、全磷、土壤质地、土壤容重、全钾、坡向和群系。下同。

图 5 不同时期各影响因子对森林植被碳密度的相对重要性分析

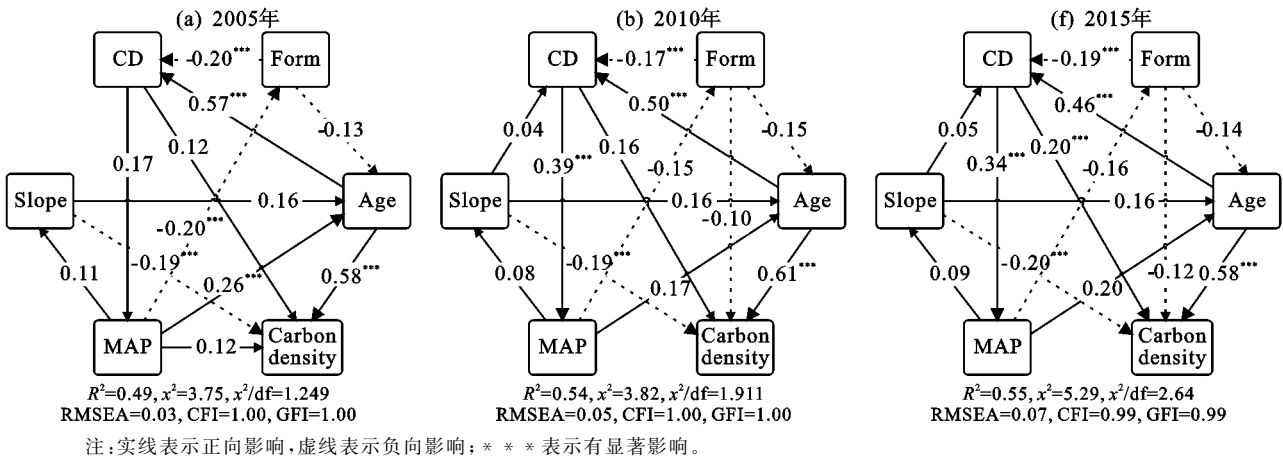


图 6 不同时期森林植被碳密度驱动力结构模型

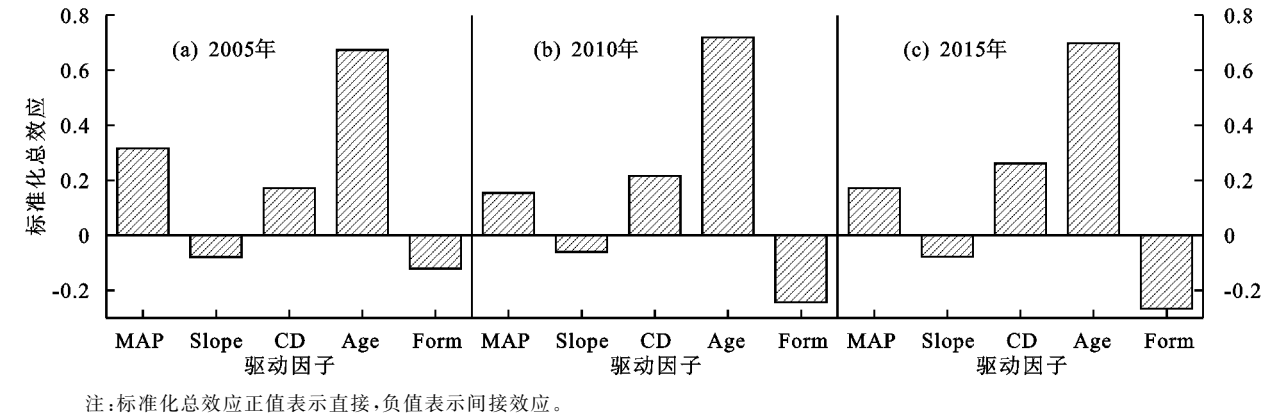


图 7 不同时期 SEM 模型各驱动因子标准化总效应值

3 讨论

3.1 中条山森林植被碳密度时间动态变化

本研究估算出 2005 年、2010 年、2015 年中条山森林植被碳储量分别为 15.89, 16.00, 20.15 Tg C, 平均碳密度分别为 24.87, 26.56, 31.42 Mg C/hm², 与山西省[23.89~26.37 Mg C/hm² (2005 年)]^[27]和山东省[22.26 Mg C/hm² (2004—2008 年)、27.24 Mg C/hm² (2009—2013 年)]^[28]的森林平均碳密度^[28]基本一致, 低于山西太岳山[37.22 Mg C/hm² (2010 年)]^[29]和全国森林植被碳密度的平均值[41.32 Mg C/hm²]^[30]。这种估算结果的差异, 可能是由于: (1) 研究区年均降水量(470~630 mm)较少; (2) 碳密度计算方法不同, 本研究使用的是加权生物量回归模型法, 而其他研究采用的是改进的蓄积推导法^[30]或生物量转换因子连续函数法; (3) 中条山地区森林林龄较小, 幼龄林和中龄林占比大, 成熟林占比小。有研究^[27, 29]表明, 在不同时期, 中国成熟林面积仅占同期森林总面积的 19%~33%, 但其碳储量在整个森林碳储量中占到 40%~60%, 而幼龄林和中龄林则恰好相反, 这也说明中条山森林碳储量有很大的增长空间, 固碳潜力较大。2005—2015 年中条山森林植被碳储量呈逐渐增加趋

势, 可能与该区域实施退耕还林及生态重建工程有关^[31]。15 年间, 中条山森林面积逐渐增加, 从 6.39 × 10⁵ hm² 增加到 6.41 × 10⁵ hm², 森林在陆地生态系统中发挥着重要的碳汇功能。

3.2 中条山森林植被碳密度影响因子分析

本研究通过分析生物和非生物因子对中条山植被碳密度的影响发现, 森林碳密度与林龄、起源、群系和年均降雨量等条件密切相关, 而且这些因子的作用程度也不相同。其中林龄是影响中条山植被碳密度变化的主导因子, 碳密度随林龄的增加而增加, 主要是因为林分在不同生长阶段其生物量不同; 林龄可以反映林分的生长发育阶段, 在一定阶段上也可以反映森林生物量的多少, 这也与张绘芳等^[32]的研究结果一致。除林龄外, 不同起源也影响植被的碳密度, 有研究^[33]表明, 天然林的碳密度高于人工林, 这可能是因为二者的生物量分配模式不同。随着植物的生长, 植物通常将更多的生物量分配给根系, 而不是叶片。人工林通常是有较多速生树种的幼龄林, 它们将更多的生物量分配给树叶, 以竞争光照的可用性, 而天然林通常是林龄较大的森林, 其必须分配更多的生物量给根和茎, 以支持其生存^[34]。这导致天然林的植被碳周转时间相对于人工林更长, 从而使天然林的植被

碳密度更大,并且本研究结果也再次证明天然林的碳密度水平较高。另外,本研究通过对优势树种进行划分发现,不同群系的碳密度存在差异,其中以栎类为主要优势树种的阔叶林对碳储量的贡献最大,且已有研究^[35]表明,不同林型的蓄积量和生物量碳汇功能存在差异。除林分因子外,本研究发现,气象因子(年均降雨量)与植被碳密度呈正相关关系,这主要是因为适宜的降水可以影响光合酶活性和土壤有机质等多种因素来提高植被生长速率和生物量碳密度^[36],这也与辛晓平等^[37]的研究结果相一致。总体来看,森林植被碳密度受其林分因子(生长特性、起源、龄组结构、郁闭度)、气象因子、地形因子和土壤因子的综合影响,地理环境条件和人为干扰是导致植被碳密度分布差异的重要原因。在本研究中植被碳密度空间分布呈现出区域不均匀现象,表现为中部和西南部碳密度较高,东北最低。这主要是由水热分布不均导致的,研究区中部海拔高、坡度缓、水热环境好,植被类型多为碳密度水平较高的落叶阔叶林和混交林,生物多样性丰富,固碳能力强^[38];而东北部年均降雨量较少、海拔较低,容易受到人类活动干扰,因此碳密度水平较低^[39]。其次,天然林大量分布在研究区中部和西南部,而天然林的平均碳密度高于人工林^[33]。

3.3 对中条山地区森林碳密度综合管理的启示

研究区位于北方土石山区,区内土层薄,水土流失危害大。随着天然林保护工程的实施,中条山林区正在经历一个重要的转型时期,从以木材生产为主向保护天然林和建设生态公益林转变。根据第九次森林资源清查结果^[40],研究区生态公益林面积占乔木林的95.95%,公益林是中条山国有林管理局经营的主体。公益林中,防护林(水源涵养林和水土保持林)的面积占到总蓄积的76.79%。森林的固碳能力是评价森林生态系统服务价值的重要内容,本文利用3期森林资源清查数据^[41]发现,中条山森林植被碳密度随着林龄的增加而逐渐增大,天然林群系的碳密度显著高于人工林群系。根据中条山林区“中幼林面积大,占总面积的94.5%;在人工林中,纯林与混交林的面积比例高达8:2,而天然林中,纯林与混交林的面积比例仅为5:5;树种结构不合理,人工林中针叶树面积占79.61%,针阔比例为8:2”^[42]的实际情况,在今后的森林经营管理过程中,应加大中幼龄林抚育力度,加大树种结构调整,坚持混交、针阔并举、以阔为主、乡土优先的原则,使生态公益林更好地发挥生态和环境保护功能。

4 结论

(1)2005年、2010年、2015年中条山森林植被碳

密度和碳储量分别为24.87,26.56,31.42 Mg C/hm²和15.89,16.00,20.15 Tg C,二者均呈持续增加趋势,年均增长率分别为2.63%和2.68%。3期天然林群系碳密度均显著高于人工林群系,分别以成熟林和近熟林碳密度最高,幼龄林最低。

(2)研究区高(>100 Mg C/hm²)和中高(60~100 Mg C/hm²)碳密度样地主要分布在中部和西南部,低碳密度区(<60 Mg C/hm²)主要在东北部。15年间,16.10%的样地碳密度增加量大于25 Mg C/hm²,中部和西南部样地碳密度增加量大于东北部。

(3)林龄和年均降雨量是影响研究区植被碳密度空间格局的重要驱动因子,林龄对碳密度的直接正向影响最为显著,年均降雨量通过对林分因子的间接影响进而影响碳密度的空间分布格局。

参考文献:

- [1] 朴世龙,岳超,丁金枝,等.试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J].中国科学:地球科学,2022,52(7):1419-1426.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J].Science, 1994,263(5144):185-190.
- [3] Mc Kinley D C, Ryan M G, Birdsey R A, et al. A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States [J].Ecological Applications, 2011,21:1902-1924.
- [4] Li T, Li M Y, Tian L. Dynamics of carbon storage and its drivers in Guangdong Province from 1979 to 2012 [J].Forests,2021,12(11):e1482.
- [5] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J].Science,2001,292(5525):2320-2322.
- [6] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学D辑:地球科学,2007,37(6):804-812.
- [7] Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods [J].Forest Ecology and Management,2010,259:1225-1231.
- [8] 李海奎,赵鹏祥,雷渊才,等.基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较[J].林业科学,2012,48(5):44-52.
- [9] Wang S Q, Zhou L, Chen J M, et al. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance [J].Journal of Environmental Management, 2011, 92(6):1651-1662.

- [10] Sharma C M, Tiwari O P, Rana Y S, et al. Elevational behaviour on dominance-diversity, regeneration, biomass and carbon storage in ridge forests of Garhwal Himalaya, India[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 424: 105-120.
- [11] Peng W, Pukkala T, Jin X J, et al. Optimal management of larch (*Larix olgensis* A. Henry) plantations in Northeast China when timber production and carbon stock are considered [J]. Annals of Forest Science, 2018, 75(63): 1-15.
- [12] Yang Y H, Luo Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: A global synthesis[J]. New Phytologist, 2011, 190: 977-989.
- [13] Xu L, Shi Y J, Fang H Y, et al. Vegetation carbon stocks driven by canopy density and forest age in subtropical forest ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 619-626.
- [14] Zhou R W, Li W J, Zhang Y P, et al. Responses of the carbon storage and sequestration potential of forest vegetation to temperature increases in Yunnan Province, SW China [J]. Forests, 2018, 9(5): 1-15.
- [15] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [16] 陈力,尹云鹤,赵东升,等.长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异[J].生态学报, 2014, 34(6): 1568-1574.
- [17] 赵学鹏,白学平,李俊霞,等.气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J].生态学报, 2019, 38(3): 637-647.
- [18] 石亚飞,石善恒,黄晓敏.基于 R 的结构方程模型在生态学中的应用[J].生态学报, 2022, 41(5): 1015-1023.
- [19] 梁爱军,孙朝升,闫彩云,等.中条山林区人工林林分质量评价[J].西北林学院学报, 2017, 32(6): 203-209.
- [20] 裴顺祥,法蕾,杜满义,等.中条山油松人工林下物种对群落物种丰富度分布格局的贡献[J].西北植物学报, 2021, 41(8): 1409-1416.
- [21] 廉凯敏,段福军,苗科,等.中条山油松人工林胸径分布规律研究[J].陕西林业科技, 2020, 48(5): 12-15.
- [22] 上官铁梁,张峰,樊龙锁.中条山木本植物区系地理成分分析[J].植物研究, 2000, 20(2): 143-155.
- [23] 国家林业和草原局. GB/T 38590—2020 森林资源连续清查技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [24] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 13-25.
- [25] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [26] Manuel D B, Maestre F T, Reich P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): e10541.
- [27] 俞艳霞,张建军,王孟本. 山西省森林植被碳储量及其动态变化研究[J]. 林业资源管理, 2008(6): 35-39.
- [28] 张春华,居为民,王登杰,等. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [29] 伊锋,韩有志,贺自书,等. 山西太岳山森林生物量与碳密度研究[J]. 山西农业科学, 2017, 45(4): 599-602.
- [30] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors[J]. Climatic Change, 2006, 74: 175-189.
- [31] Piao S L, Fang J Y, Ciais P. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458: 1009-1013.
- [32] 张绘芳,张景路,侯晓巍,等. 新疆天山山区乔木林碳密度变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 122-127.
- [33] Shipley B, Meziane D. The balanced-growth hypothesis and the allometry[J]. Functional Ecology, 2002, 16(3): 326-331.
- [34] Peichl M, Arain M A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3): 68-80.
- [35] Zhang X P, Wang M B, Liang X M. Quantitative classification and carbon density of the forest vegetation in Lüliang Mountains of China[J]. Plant Ecology, 2009, 201(1): 1-9.
- [36] Wen D, He N P. Forest carbon storage along the north-south transect of eastern of China: Spatial patterns, allocation, and influencing factors[J]. Ecological Indicators, 2015, 61(61): 960-967.
- [37] 辛晓平,丁蕾,程伟,等. 北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2757-2768.
- [38] 曹扬,陈云明,晋蓓,等. 陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 69-73.
- [39] 潘帅,于澎涛,王彦辉,等. 六盘山森林植被碳密度空间分布特征及其成因[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6666-6677.
- [40] 孙拖焕,梁守伦,樊兰英,等. 山西省森林生态连清与生态系统服务功能研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [41] 梁守伦,刘菊,孙拖焕,等. 山西省森林经营规划与全周期森林经营模式[M]. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [42] 赵海燕. 中条山林区森林健康经营分析[J]. 山西林业, 2014(4): 35-36.