

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.02.009

退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素—以内蒙古大兴安岭为例

何 潇, 李海奎*, 曹 磊, 徐胜林, 刘晓彤

(中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091)

摘要: [目的] 确定退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素, 为其碳汇功能的恢复提供参考。[方法] 基于调查数据, 使用逐步回归的方差分析法和结构方程模型 (SEM) 法, 考虑林分因子和非生物环境因子 (地形、气候), 探究林分碳储量的驱动因素。[结果] 2 种方法得到的结果基本一致: 方差分析法的确定系数为 0.890, 林分因子中的平均胸径和株数密度, 非生物环境中的月平均最高温和月平均最低温以及干扰类型对林分碳储量有显著影响; SEM 中林分碳储量部分的模型确定系数为 0.757, 林分因子中的平均胸径和株数密度对林分碳储量的影响最大, 其中株数密度既有正向的直接作用, 也有负向的间接作用, 而非生物环境中, 月平均最高温对林分碳储量有间接的负向影响, 各变量对林分碳储量的影响大小排序为平均胸径 (0.94) > 月平均最高温 (-0.52) > 株数密度 (0.12)。[结论] 综合 2 种方法得到的结果, 在退化森林生态系统中, 林分因子和气候因子均对林分碳储量有影响, 而地形因子却对其无显著影响。研究结果可为大兴安岭森林碳库探究提供数据参考和借鉴。

关键词: 火烧迹地; 采伐迹地; 碳储量; 驱动因素

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)02-0069-08

森林生态系统在提供人类可以利用的各种产品和服务方面发挥着重要的作用。近年来, 其功能的量化研究受到极大重视^[1-2]。有学者研究多样性与森林生产力之间的关系, 得到的结论却不相同^[3-4], 二者之间的关系仍然存在争议^[5], 导致对生态系统作用机理认识并不完善^[6]。在全球气候变化的背景下, 越来越多的学者期望了解森林生态系统的非生物环境因子 (如气候) 对森林碳汇的作用^[7]。谭珊珊等^[8]研究地上生物量的影响因素时发现, 非生物环境因子会对地上生物量产生间接影响; 相关研究也表明, 地形因素、气候条件、水文条件、土壤资源等非生物环境因素会对生物多样性和空间结构 (垂直结构、水平结构) 有影响, 进而对森林碳汇功能产生间接作用^[9-10]; 张全国和张大勇^[11]认为非生物环境因素是生态系统生产力的主要潜在驱动因

素; Sullivan 等^[12]的研究结果表明, 环境条件对天然林碳库的间接作用更加明显。因此, 在研究森林碳汇功能的驱动因素时, 不能仅限于森林生物量或碳储量与多样性之间的关系, 而是需要在综合考虑地形因子、气候因子、外界干扰等非生物环境因素相互作用的框架中去衡量森林生态系统碳汇功能的多元驱动机制^[13]。

虽然国内外许多研究表明, 森林碳储量受到多种因素影响^[14], 但很少有研究同时考虑非生物因素 (环境条件) 和林分因子对林分碳储量的影响; 国内虽然有不少对大兴安岭林火和采伐干扰后的生物量或碳储量影响及恢复研究^[15-16], 但也很少考虑环境条件的影响。鉴于此, 本研究同时考虑林分因子和非生物因素对林分碳储量的影响, 在退化森林生态系统中评估林分碳储量的驱动因素, 为大兴安岭

收稿日期: 2019-04-23 修回日期: 2019-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504004-3)

* 通讯作者: 李海奎, 研究员。主要研究方向: 林业统计与生物数学模型。E-mail: lihk@ifrit.ac.cn

森林碳汇功能研究提供理论基础。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古牙克石市乌尔旗汗林业局, 地处大兴安岭西坡, 该区为寒温带大陆性季风半湿润森林气候, 森林资源丰富, 总面积 59.36 万 hm^2 , 森林覆盖率为 78.97%, 主要树种有落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 和山杨 (*Populus davidiana* var. *davidiana* f. *pendula* (Skv.) C. Wang et tung) 等。

1.2 样地设置与调查

2018 年 7 月, 采用空间代替时间法, 在火烧干扰后恢复 12 a、22 a 和 31 a 以及采伐干扰后恢复 14 a、20 a 和 29 a 的森林生态系统中随机布设样地, 研究区内无人影响, 所有乔木均自然恢复, 样地大小为 20 m×20 m。火烧迹地按照样地内胸径大于 5 cm 且有明显火烧痕迹的枯立木株数来划分火烧程度, 不考虑后期自然恢复的植被由于其他原因导致的死亡。采伐迹地的采伐方式为皆伐。干扰类型一共有 4 种 (轻度火烧迹地、中度火烧迹地、重度火烧迹地和采伐), 每种类型迹地有 3 个重复, 共计 36 块样地, 恢复时间是干扰发生时间距调查时 (2018 年) 的时间间隔。

调查内容包括各样地的 GPS 坐标、海拔、坡度和坡向, 对所有胸径 ≥ 1 cm 的木本植物每木检尺, 记录物种名、胸径、树高和死木信息, 调查数据中共计样木 2 692 株, 其中活立木 2 319 株, 枯立木 373 株, 本研究只针对活立木, 数据处理时剔除了每个样地的枯立木。

1.3 林分因子

利用每木检尺数据, 得到各样地的平均胸径 (d)、平均树高 (h)、株数密度 (N) 和树种组成 (优势树种) 等, 树种组成按样地内某一树种胸高断面面积占样地断面面积的百分比确定, 恢复时间可近似认为是林分的平均年龄 (表 1)。

1.4 非生物因子

非生物因子 (环境条件) 主要包括地形因子、气候因子以及干扰类型。

地形因子包含 3 个变量: 海拔、坡向和坡度。36 个样地的海拔为 782~990 m, 地势较为平坦; 坡

度按定性变量, 划分标准为: I 级为平坡 ($< 5^\circ$), II 级为缓坡 ($5^\circ \sim 14^\circ$), III 级为斜坡 ($15^\circ \sim 24^\circ$), IV 级为陡坡 ($25^\circ \sim 34^\circ$), V 级为急坡 ($35^\circ \sim 44^\circ$), VI 级为险坡 ($\geq 45^\circ$), 其中仅 5 个样地为 III 级 (斜坡), 其余大都为平坡或缓坡; 坡向由 0~360° 转换成 0-1 之间的值, 公式^[17]如下:

$$P = \{1 - \cos[(\pi/180) \cdot (A - 30)]\} / 2 \quad (1)$$

式中: P 为坡向指数, A 为坡向角度, 转换后的数值越小表明生境越湿冷, 反之越干热。

气候数据从 ClimateAP 中提取^[18], 气候因子变量有: 年平均温度、年平均降水、月平均最高温、月平均最低温、近 30 年极端最低气温等, 计算时取干扰发生时间至 2016 年期间的平均值作为各样地的气候因子。1987—2016 年样地的年平均气温和年总降水量变化趋势并不明显, 年平均气温在 -2.3 °C 左右波动, 年总降水量在 430 mm 左右波动。

1.5 碳储量计算

此次调查所涉及的树种有落叶松、白桦、山杨、云杉 (*Picea asperata* Mast.)、柳树 (*Salix matsudana* var. *pseudo-matsudana* (Y. L. Chou et Skv.) Y. L. Chou)、稠李 (*Padus racemosa* (Lam.) Gilib.) 等, 使用相关生物量模型结合各组分含碳系数计算碳储量。对于活立木的碳储量计算原理如下:

$$c = B_{stem} \times P_{stem} + B_{bark} \times P_{bark} + B_{branch} \times P_{branch} + B_{leaf} \times P_{leaf} + B_{below} \times P_{below} \quad (2)$$

式中, c 为单木碳储量; B_i 为第 i 分项的单木生物量, P_i 为第 i 分项的含碳系数, $stem$ 、 $bark$ 、 $branch$ 、 $leaf$ 、 $below$ 分别表示单木干材、树皮、树枝、树叶和地下等组分。(2) 式充分考虑了林木不同器官含碳率的差异, 可以推算单株活立木的碳储量。

基于每木检尺的胸径、树高, 使用二元生物量模型估算单木各组分生物量, 结合各树种不同组分的含碳系数计算单木的碳储量, 其中云杉、落叶松、白桦以及山杨采用行业标准《生物量模型及碳计量参数》中东北和内蒙古东部地区的二元生物量模型以及各组分的含碳系数计算; 柳树和稠李等树种按软阔类, 采用《中国森林植被生物量和碳储量评估》中的全国生物量模型与软阔类全树平均含碳系数计算^[19]。林分碳储量 C 由样地内单木碳储量

表 1 林分基本信息
Table 1 Information of stand

发生时间 Occurrence time	恢复时间 Restoration time/a	干扰类型 Interference type	平均胸径 Average diameter/cm			平均树高 Average tree height/m		
			平均值 Mean	范围 Range	标准差 S.D	平均值 Mean	范围 Range	标准差 S.D
2006	12	轻度火烧	14.2	11.9~15.8	2.1	12.7	11.3~13.6	1.3
		中度火烧	9.8	8.2~11.9	1.9	8.4	7.3~9.8	1.3
		重度火烧	4.5	4.0~5.4	0.8	5.0	4.7~5.6	0.5
1996	22	轻度火烧	18.5	16.4~20.2	1.9	15.9	15.1~17.4	1.3
		中度火烧	20.5	20.4~20.6	0.1	17.0	16.9~17.3	0.2
		重度火烧	18.1	16.7~19.5	1.4	15.7	15.2~16.2	0.5
1987	31	轻度火烧	14.5	13.2~16.5	1.8	11.1	10.8~11.6	0.4
		中度火烧	9.4	7.0~10.8	2.1	9.2	7.7~10.2	1.3
		重度火烧	6.4	6.0~6.9	0.5	8.8	7.8~10.2	1.2
2004	14	采伐	3.9	3.2~4.5	0.7	4.3	3.6~4.9	0.7
1998	20	采伐	7.4	7.3~7.5	0.1	10.9	10.4~11.3	0.5
1989	29	采伐	5.7	5.2~6.5	0.7	8.5	8.1~9.2	0.6
发生时间 Occurrence time	恢复时间 Restoration time/a	干扰类型 Interference type	株数密度 Tree number density/(株·hm ⁻²)			树种组成 Tree composition		
			平均值 Mean	范围 Range	标准差 S.D			
2006	12	轻度火烧	1 450	975~1 950	488	9落1桦		
		中度火烧	1 458	1125~1 925	416	10落-桦		
		重度火烧	925	350~1 575	616	9桦1落		
1996	22	轻度火烧	850	725~925	109	10落+桦-其他软阔		
		中度火烧	658	550~875	188	10落		
		重度火烧	742	600~975	204	10落		
1987	31	轻度火烧	742	600~875	138	10桦		
		中度火烧	1 658	1 150~2 100	478	10桦-落		
		重度火烧	3 350	3 100~3 575	238	10桦+杨+落-其他软阔-云		
2004	14	采伐	983	600~1 550	501	10桦-其他软阔		
1998	20	采伐	5 308	3 975~6 650	1 338	5桦5杨+落		
1989	29	采伐	4 133	2 800~5 625	1 419	8桦2杨		

的结果累加得到。

1.6 方差分析法

使用逐步回归^[20]的方差分析法。具体过程为: 首先将所有因子作为自变量, 以林分碳储量作为因变量, 使用方差分析法得到所有因子的影响, 然后按每个因子 P 值的大小排序, 删除 P 值最大的因子 (即最不显著的因子), 接下来用剩余因子与林分碳储量继续做方差分析, 重复上述步骤, 直至所有影响因子显著 ($P < 0.05$) 为止, 方差分析在 SPSS 软件进行。

1.7 结构方程模型法

结构方程模型 (SEM) 方法中, 首先假设所有因子均对林分碳储量有影响, 并考虑变量间可能出现的相互影响来建立初始结构方程模型, 然后估计模型中的路径系数, 其显著性用 t 检验判断, 若路径系数不显著, 则删除该条路径, 重新拟合模型, 再根据模型修正指数 (M.I) 优化模型。使用卡方检验、渐进残差均方和平方根 (RMSEA)、适配度指数 (GFI)、规准适配指数 (NFI)、Akaike 讯息效标 (AIC) 等评价指标判断结构方程模型的拟

合优度，SEM 估计在 Amos 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 方差分析法结果

表 2 所示，平均胸径和株数密度对林分碳储量的影响最显著 ($P < 0.001$)，平均树高对林分碳储量没有显著影响，使用 d 和 N 即可很好的描述林分碳储量；月平均最高温和月平均最低温对林分碳储量有影响 ($P < 0.05$)，表明林分碳储量对极端气候敏感；干扰类型对林分碳储量有影响，比较不同干扰类型下林分碳储量的差异 (表 3) 发现，采伐迹地、中度火烧迹地和重度火烧迹地的林分碳储量没有显著性差异，而轻度火烧迹地的林分碳储量与它们有显著性差异；地形因子 (海拔、坡向、坡位) 和恢复时间在逐步回归的过程中被剔除，其对林分碳储量没有影响，地形因子无显著影响的主要原因是各样地的地势比较平坦，生境条件较为相似；至于恢复时间，由于不是连续观测的数据以及样本数量的限制，可能导致恢复时间对林分碳储量没有显著性影响。

建立林分碳储量的通用模型时，参考林分碳储量多重比较的结果，将干扰类型 (I) 设置为 2 个

表 2 林分碳储量与各因子的方差分析

Table 2 Variance analysis result of stand carbon with other's factor

影响因子 Effect factor	平方和 Sum Sq.	自由度 Df	均方 Mean Sq.	F值 F-value	显著性 Sig.
平均胸径 Average diameter	3 074	1	3 074	39.87	<0.001***
株数密度 Tree number density	3 777	1	3 777	48.99	<0.001***
月平均最高温 Mean warmest month temperature	673	1	673	8.73	0.006**
月平均最低温 Mean coldest month temperature	561	1	561	7.27	0.012*
干扰类型 Interference type	921	3	307	3.98	0.018*
残差Error	2 159	28	77		
校正的模型 Corrected model	18 843	7	2 692	34.91	<0.001***
校正后的变异 Corrected total	21 002	35			
截距Intercept	56 667	1			
合计Total	77 669	36			

注：***表示在0.001水平下影响显著，**表示在0.01水平下影响显著，*表示在0.05水平下影响显著。

Notes: *** indicates significant impact at 0.001 level, ** indicates significant impact at 0.01 level, * indicates significant impact at 0.05 level.

表 3 不同干扰类型下的林分碳储量

Table 3 Stand carbon result in difference interference types ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)

干扰类型 Interference type	林分碳储量 Stand carbon
采伐 Cutover	27.08±21.92 ^b
轻度火烧 Light burned	64.89±15.50 ^a
中度火烧 Middle burned	38.07±14.85 ^b
重度火烧 Severe burned	28.66±25.51 ^b

注：小写字母不同表示不同干扰类型下林分碳储量差异显著 ($P < 0.05$)。
Notes: Different lowercase letters indicated stand carbon of different interference types were significantly different ($P < 0.05$).

水平，模型如 (3) 式所示，确定系数为 $R^2=0.890$ (调整后的 $R^2=0.872$)。林分碳储量随 d 和 N 的增加而增加，月平均最高温和月平均最低温均对林分碳储量分别为负相关和正相关的影响，林分碳储量随温度的变化说明在极端气温范围内，有着林分碳储量的适宜生长区间，与轻度火烧迹地相比，采伐迹地、中度和重度火烧迹地的林分碳储量要小，恢复起来更加困难。

$$C = 4.28 \times d + 0.008 \times N - 31.47 \times Te_{\max} + 35.61 \times Te_{\min} + 1486.73 + \begin{cases} -14.96 & I = \text{采伐中度火烧重度火烧} \\ 0 & I = \text{轻度火烧} \end{cases} \quad (3)$$

上式中， C 为林分碳储量， d 为林分平均胸径， N 为株数密度， Te_{\max} 为月平均最高温度， Te_{\min} 为月平均最低温度， I 为干扰类型。

2.2 结构方程模型法结果

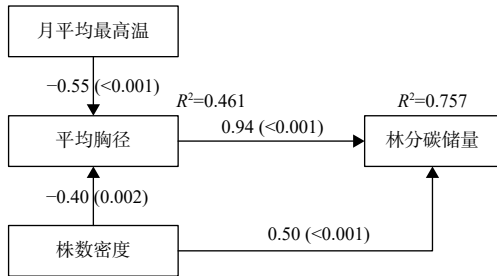
SEM 最终模型的拟合结果很好 (表 4)，模型经卡方检验，显著性概率 $p > 0.05$ ，未达显著水平，接受虚无假设，表明该模型能够契合样本数据的结构，其余适配指标均达到适配标准，AIC 的结果表明模型没有出现过拟合现象，各变量间的路径系数通过了 t 检验，可以使用该模型的结果探究林分碳储量的驱动因素。

SEM 的结果反映了林分因子和非生物环境因子对林分碳储量的关系 (图 1)，模型的拟合优度略低于多元线性回归的结果 (SEM 中林分碳储量部分的模型确定系数为 0.757)。SEM 的结果可以进一步解析为各因素对林分碳储量的直接影响、间接影响和总影响： d 和 N 对林分碳储量有直接正向影响， N 还对林分碳储量有负向间接影响，通过影响 d 间接影响林分碳储量，而月平均最高温只对 d 有负向的直接影响，对林分碳储量只有负向的间

表4 结构方程模型评价结果

Table 4 Evaluated results of structural equation model

	统计指标 Statistics	适配标准 Evaluation standard	拟合结果 Fitting results
绝对适配度指数 Absolute fitness statistics	卡方自由比	1~3之间	1.596
	显著性概率(P)	显著性概率>0.05	0.45
	渐进残差均方和平方根(RMSEA)	<0.05(适配良好) <0.08(适配合理)	<0.001
增值适配度指数 Value-added fitness statistics	适配度指数(GFI)	>0.9	0.978
	规准适配指数(NFI)	>0.9	0.979
简约适配统计量 Simple fitness statistics	Akaike 讯息效标(AIC)	理论模型小于独立模型和饱和模型	理论模型(17.586) < 饱和模型(23.333) < 独立模型(82.744)



箭头表示直接的线性影响, 箭头中的值是标准化路径系数 (P 值)
The arrow represents the direct linear effect, and the value in the arrow is the normalized path coefficient (P -value).

图1 林分碳储量结构方程模型

Fig. 1 Result of structural equation model for stand carbon

接影响 (-0.52), 表5是各因素对林分碳储量的影响汇总, d 对林分碳储量的影响最大(0.94), 而 N 对林分碳储量的影响最小(仅0.12), 月平均最高温对林分碳储量的影响介于平均胸径和株数密度之间。

表5 各因素对林分碳储量的标准化直接、间接和总影响

Table 5 Standardized direct, indirect and total effects of factors on stand carbon

影响 Effects	平均胸径 Average diameter	株数密度 Tree number density	月平均最高温 $T_{e_{max}}$
总影响 Total Effects	0.94	0.12	-0.52
直接影响 Direct Effects	0.94	0.50	0
间接影响 Indirect Effects	0	-0.38	-0.52

3 讨论

3.1 方差分析法与结构方程模型

本研究分别使用方差分析法和结构方程模型法判断了退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素。从研究方法上来看, 方差分析容易实现, 很多

软件都可以完成, 也是大多数学者比较熟悉的方法, 而 SEM 通常需要有理论支撑、经验法则或实验基础, 从而得到合理的假设模型, 最后才能进行模型参数的估计。方差分析对数据的要求比较高(如独立性、正态性), 而 SEM 不对数据有任何分布假设的限制。关于样本数量, 张璇和王嘉宇^[21]认为线性模型中, 样本数量取 30 就可以得到较为可靠的估计值, SEM 模型的估计允许样本少于 60 个^[22]。本研究有 36 个样本, 2 种方法的估计结果均良好。其中多元线性回归模型的 R^2 为 0.890, SEM 方法的 R^2 为 0.757(以林分碳储量作为因变量), SEM 略低于多元线性回归模型, 但是 SEM 能够考虑变量间的相互作用, 并解析为直接影响和间接影响, 更能体现林分碳储量的驱动因素, 方差分析则得到各变量对林分碳储量产生的独立影响, 没有考虑变量间的相互作用。

从研究结果上看, 方差分析和 SEM 的结果均表明林分因子对林分碳储量的影响最大, 其中起主要作用的变量为平均胸径和株数密度, 气候因子对林分碳储量有影响, 但两种方法挑选出的变量有所不同。对于不同的干扰类型, 方差分析的结果显示不同干扰类型对林分碳储量有影响, 而 SEM 的结果显示干扰类型对林分碳储量没有影响。两种方法均表明地形因子和恢复时间对林分碳储量没有显著性影响。虽然两种方法的计算原理并不相同, 但结果相似。方差分析法操作简单, 精度较高, 但缺乏对多元驱动机制的深入解释, SEM 方法更能揭示多变量间的结构关系, 但需要有理论支撑或经验基础才能得到结果。

3.2 林分碳储量的驱动因素

从林分因子上看, 平均胸径是一个重要的林分特征指标, 也是野外调查中较为容易且测量准确的

因子,许多研究均表明其与林分碳储量间有良好的统计关系^[23-24],在本研究结果中也得到了进一步印证。干扰主要导致森林郁闭度降低,产生林间空隙或形成林窗,林窗的形成则是因为原林分的大树倒下,极大地降低了生态系统中乔木层的生物量^[25],进而影响林分碳储量,林窗大小影响了光照条件,使得迹地内林木的萌发数量(即林分密度)有所不同,影响了林分碳储量的积累,李海奎等^[26]的研究结果表明株数密度对碳计量参数有显著影响,进而影响林分碳储量,与本研究2种方法得到的株数密度对林分碳储量有正向影响的结果一致。Fan等^[27]的认为阔叶树的生物量大于针叶树的生物量;由针叶林向针阔混交林转变时,碳储量平均增加16.8%^[28],这说明不同林分类型的碳储量的累积能力有所不同^[29],然而本研究的研究结果表明优势树种对林分碳储量没有显著影响,但质量比假说(Mass Ratio Hypothesis)则认为生态系统的功能是由群落中优势物种的特征驱动的^[30],也就是说优势树种能决定林分碳储恢复量的大小。但在大兴安岭的退化森林生态系统中,白桦是先锋树种,干扰后的萌生种多为丛生白桦,林分属性发生改变,萌发的白桦长得快,老化得也快,萌生白桦林寿命短,形成许多小老树,进而导致林分优势树种以及恢复时间对林分碳储量没有显著影响。

在非生物环境因子中,许多学者研究了气候因子与林分生物量(碳储量)的关系,Condes等^[31]在月平均气温和月平均降水等10个生物气候指标中挑选出了对林分生长有显著影响的变量,最后的结论认为气象因子对林分生长的影响效果不明显,但在本研究中,气候因子对林分碳储量的标准化影响达50%以上,气候对林分碳储量有较大的影响,这与气候数据的来源、挑选的气候变量以及样本数量有关。在地形因子中,谭珊珊等^[8]的研究结果表明海拔对林分地上生物量有负向影响,王轶夫^[32]的研究结果也认为森林生物量跟海拔、坡度和坡向之间存在明显的相关性,这与本研究结果并不相同,其原因是本研究区的地势都比较平坦,地形差异并不大。但值得注意的是,地形与气候之间也有十分紧密的关系,比如随着海拔的升高,气温会逐渐降低,所以气候信息也代表了的部分地形信息,鉴于36块样地的地理位置较为接近,气候差异、空间差异可能未得到充分体现。从干扰类型上看,

张玉红等^[33]的研究结果认为林分生物量随着火烧程度的增加而降低,陈永富等^[34]的研究结果表明过度采伐不利于森林碳储量的积累,与本研究结果有所不同,这与萌生白桦的生长习性、干扰前的林分状态以及样本数量有很大关系,同时考虑到退化森林生态系统功能恢复机制的复杂性,最终导致了非生物环境因子对林分碳储量的驱动因素与其他研究结果的不同。

3.3 研究局限性

由于不同研究的样地布设方法^[37]、单木生物量模型形式和适用地区以及含碳系数有所差异,导致林分碳储量推算的精度有所不同,单木生物量模型的精度则对林分碳储量的估算有着最直接的影响,而使用0.5作为“生物量—碳储量转化系数”则会进一步影响林分碳储量估算的精度。因为林分碳储量估算方法的差异,也会导致林分碳储量驱动因素的不同,虽然本研究得到了不错的模型拟合效果,但受到数据获取方面的困难,样本数量仍然偏少,结果还需要进行验证,若增加样本数量应该能进一步改善模型拟合效果,深入探究退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素。

4 结论

方差分析法和SEM法都可以对林分碳储量的驱动因素做出有效判断,2种方法的结果基本一致:退化森林生态系统中,林分因子和气候因子是林分碳储量的主要影响因素,而地形因子则无显著影响,平均胸径、株数密度和月平均最高温是2种方法都挑选出的对林分碳储量有显著影响的变量。

参考文献:

- [1] De Deyn G B, Cornelissen J H C, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 516-531.
- [2] Isbell F, Calcagno V, Hector A, *et al.* High plant diversity is needed to maintain ecosystem services[J]. *Nature*, 2011, 477(7363): 199-202.
- [3] Tilman D, Reich P B, Knops J, *et al.* Diversity and productivity in a long-term grassland experiment[J]. *Science*, 2001, 294(5543): 843-845.
- [4] Huang Y Y, Chen Y X, Castro-Izaguirre N, *et al.* Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment[J]. *Science*, 2018, 362(6410): 80-83.
- [5] Zhang Y, Chen H Y H, Reich P B. Forest productivity increases with

- evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(3): 742-749.
- [6] Malhi Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(1): 65-75.
- [7] 吴建平,刘占锋. 环境因子对森林净生态系统生产力的影响[J]. *植物科学学报*, 2014, 32(1): 97-104.
- [8] 谭珊珊,王忍忍,龚筱玲,等. 群落物种及结构多样性对森林地上生物量的影响及其尺度效应:以巴拿马BCI样地为例[J]. *生物多样性*, 2017, 25(10): 1054-1064.
- [9] McEwan R W, Lin Y C, Sun I F, *et al.* Topographic and biotic regulation of aboveground carbon storage in subtropical broad-leaved forests of Taiwan[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(9): 1817-1825.
- [10] 郭屹立,王斌,向悟生,等. 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面面积分布格局及其对地形因子的响应[J]. *生物多样性*, 2016, 24(1): 30-39.
- [11] 张全国,张大勇. 生物多样性与生态系统功能:最新的进展与动向[J]. *生物多样性*, 2003, 11(5): 351-363.
- [12] Sullivan M J P, Talbot J, Lewis S L, *et al.* Diversity and carbon storage across the tropical forest biome[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39102.
- [13] Grace J B, Anderson T M, Seabloom E W, *et al.* Integrative modeling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness[J]. *Nature*, 2016, 529(7586): 390-393.
- [14] Fotis A T, Murphy S J, Ricart R D, *et al.* Above-ground biomass is driven by mass-ratio effects and stand structural attributes in a temperate deciduous forest[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(2): 561-570.
- [15] 罗旭,贺红土,梁宇,等. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1104-1114.
- [16] 牟长城,卢慧翠,包旭,等. 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5286-5298.
- [17] Roberts D W, Cooper S V. Concepts and techniques of vegetation mapping[R]. General Technical Report INT-US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station (USA), 1989.
- [18] Wang T, Wang G, Innes J L, *et al.* ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, 4(4): 448-458.
- [19] 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.
- [20] Darlington R B. Regression and Linear Models[M]. New York:McGraw-Hill, 1990.
- [21] 张璇,王嘉宇. 关于分层线性模型样本容量问题的研究[J]. *统计与决策*, 2010, (15): 4-8.
- [22] Tabachnick B G, Fidell L S, Ullman J B. Using multivariate statistics[M]. Boston, MA:Pearson, 2007.
- [23] 黄贤松,吴承祯,洪伟,等. 杉木人工林碳收获预估技术研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 349-359.
- [24] Navar J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 427-434.
- [25] Slik J W F, Paoli G, McGuire K, *et al.* Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(12): 1261-1271.
- [26] 李海奎,欧强新,赵嘉诚,等. 模型和林分因子对区域尺度碳计量参数的影响——以杉木为例[J]. *林业科学*, 2017, 53(9): 55-62.
- [27] Fan H B, Liu W F, Wu J P, *et al.* Ecosystem carbon pools in mixed stands of hardwood species and masson pine[J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2013, 25(2): 154-165.
- [28] Jiang L, Chen H, Xian F. Carbon stock and rate of carbon sequestration assessment of hardwood plantations in tropical Yunnan China[J]. *Guihaia*, 2003, 23(4): 294-298.
- [29] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 140-158.
- [30] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects[J]. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 902-910.
- [31] Condes S, Roberedo F G. An empirical mixed model to quantify climate influence on the growth of *Pinus halepensis* Mill. stands in South-Eastern Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 284(15): 59-68.
- [32] 王轶夫. 基于神经网络的森林生物量估测模型研究[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [33] 张玉红,覃炳醒,孙铭隆,等. 林火对大兴安岭典型林型林下植被与土壤的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(2): 7-13.
- [34] 陈永富,乔婷,雷渊才,等. 采伐对海南霸王岭热带山地雨林乔木碳储量影响初步研究[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(3): 337-343.

The Factors Affecting Carbon Storage in Degraded Forest Ecosystem: A Case Study from Daxing'anling Areas of Inner Mongolia

HE Xiao, LI Hai-kui, CAO Lei, XU Sheng-lin, LIU Xiao-tong

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To determine the factors affecting carbon storage in degraded forest ecosystem and provide references for the restoration of carbon sink function. [Method] Based on the survey data, and considering the stand factor and abiotic environmental factors (terrain factors and climatic factors), the variance analysis of stepwise regression and structural equation model method (SEM) were used to study the factors of carbon sequestration. [Result] Two methods obtained basically consistent results: R^2 from the variance analysis method was 0.890. The average diameter at breast height (DBH) and tree number density among the stand characteristics, the monthly mean maximum temperature and monthly mean minimum temperature among the abiotic environment and the disturbance type had significant effects on the stand carbon storage. The stand carbon of R^2 derived from SEM was 0.757. For the stand characteristics, the average DBH and tree density affected the stand carbon the most. Tree density had directly positive and indirectly negative effects while among abiotic environment factors, the monthly mean maximum temperature had the indirectly negative effects on the carbon storage of stand. The impact of each variable on stand carbon followed the order of average DBH (0.94) > the monthly mean maximum high temperature (0.52) > tree density (0.12). [Conclusion] Combining the results of the two methods, it is concluded that in the degraded forest ecosystems, both stand factors and climatic factors have significant impact on stand carbon storage while terrain factor has no significant impact. The results of this study could provide references for studying the carbon storage in Daxing'anling forest area.

Keywords: burned area; cutover land; stand carbon storage; impact factor

(责任编辑: 彭南轩)