

DOI: 10.20103/j.stxb.202402080332

郭万桂, 张全智, 王传宽, 王燕. 森林管理对东北次生林植被碳密度及其分配的影响. 生态学报, 2024, 44(19): 8651-8660.

Guo W G, Zhang Q Z, Wang C K, Wang Y. Effect of forest management on the secondary forest vegetation carbon density and its distribution in Northeast of China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8651-8660.

森林管理对东北次生林植被碳密度及其分配的影响

郭万桂^{1,2,3}, 张全智^{1,2,3,*}, 王传宽^{1,2,3}, 王 燕^{1,2,3}

1 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

2 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

3 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要: 以东北东部山区 4 种管理梯度下相同演替年龄的森林群落为研究对象, 包括天然次生林(WB)及其冠下人工更新红松(*Pinus koraiensis*)的混交林(MA), 并对 MA 进行透光抚育形成的择伐红松林(SK)和对 SK 适时疏伐形成的疏伐红松林(KT), 其管理程度依次增强。采用样地清查结合异速生长方程法量化植被碳密度(VC)及其各组分碳密度; 测定多样性、针阔比等群落特征和土壤氮、磷等养分特征, 探究森林管理对植被碳密度的影响。结果表明: 演替先锋优势种(PI)、演替后期优势种(LT)和林下植被层(UC)的碳密度在 4 种管理措施间存在显著差异, 其中, LT 由 WB 的 9.39 t/hm² 增加到 KT 的 107.02 t/hm²。但是, 伴生种的碳密度在 4 种管理措施间差异不显著, 其碳密度波动范围为 8.41—14.89 t/hm²。VC 随森林管理强度显著提升, 其波动范围为 96.34—135.40 t/hm², VC 年平均增长量波动范围为 1.50—2.11 t/hm² a⁻¹, 且在管理措施间存在显著差异。PI、LT 和 UC 占植被总碳密度的比例在 4 种管理措施间存在显著差异, 其中 PI 的占比随着上述管理措施逐渐降低, 而 LT 的占比显著升高(由 WB 的 14.0% 提升到 KT 的 82.2%); 植被残体与活体生物量碳密度之比以及地下与地上的生物量碳密度之比在 4 种管理措施间均存在显著差异, 其比值的波动范围依次分别为 0.05—0.13 和 0.24—0.30。乔木层碳密度与树种多样性存在显著负相关, 而林下植被层碳密度与树种多样性呈显著正相关。并且 VC 与土壤氮储量、磷储量无显著相关性。这表明, 在同一气候条件下, 群落特征和树种组成是决定植被碳密度分异的重要因素, 并且通过提升后期优势种占比的积极森林管理提升了东北次生林植被的碳密度和碳固持能力。

关键词: 温带森林; 森林管理; 碳密度; 多样性; 森林碳固持

Effect of forest management on the secondary forest vegetation carbon density and its distribution in Northeast of China

GUO Wangui^{1,2,3}, ZHANG Quanzhi^{1,2,3,*}, WANG Chuankuan^{1,2,3}, WANG Yan^{1,2,3}

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management Ministry of Education, Harbin 150040, China

3 School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: This research focused on four same-succession-age forest communities under different management practices in the Northeast of China, including the natural secondary forests (WB), the mixed forests (MA) that the Korean Pine (*Pinus koraiensis*) was artificially regenerated under the WB canopy, the selective logged Korean Pine forests (SK) were formed by that all the successional pioneer species in MA were selected logging, thinning Korean Pine forests (KT) formed by timely thinning of SK. The management gradient of the four forest communities has gradually increased. To quantify vegetation carbon density (VC) and its distribution pattern, and to explore the effect mechanism of forest management on

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2200401); 国家自然科学基金项目(32071748)

收稿日期: 2024-02-08; **网络出版日期:** 2024-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzhang@nefu.edu.cn

vegetation carbon density and its distribution pattern, we used a combination of site inventory and allometric growth equation method, determined the community characteristics such as biodiversity, the ratio of needle to broadleaf species, and soil nutrient characteristics such as nitrogen and phosphorus density. The results showed that there were significant differences in carbon density among the four management practices for successional pioneer species (PI), the late-successional dominant species (LT), and the understory vegetation (UC). Among them, LT increased from 9.39 t/hm² in WB to 107.02 t/hm² in KT. However, the carbon density of associated species had no significant differences among the four management practices, with a fluctuation range of 8.41 to 14.89 t/hm². The VC was significantly increased with the intensity of forest management, with a fluctuation range of 96.34—135.40 t/hm². The mean annual increment of VC fluctuates between 1.50—2.11 t hm⁻² a⁻¹, and there were significant differences among management practices. There were significant differences in the proportion of PI, LT, and UC to the VC of vegetation among the four management practices. The proportion of PI gradually decreased, while the proportion of LT significantly increased (from 14.0% of WB to 82.2% of KT) with management gradient. There were significant differences in the ratio of vegetation residues to living biomass carbon density (the range was 0.05—0.13), and belowground to aboveground carbon density (the range was 0.24—0.30) among the four management practices. There was significant negative correlation between the carbon density of overstory and tree species diversity, while there was significant positive correlation between the carbon density of understory and tree species diversity. And there was no significant correlation between VC and soil nitrogen and phosphorus storage. These indicated that under the same climatic conditions, community characteristics and tree species composition were important factors determining the differentiation of vegetation carbon density, and active forest management by increasing the proportion of late-successional dominant species significantly enhanced the vegetation carbon density and carbon sequestration of secondary forest in the Northeast China.

Key Words: temperate forest; forest management; carbon density; biodiversity; forest carbon sequestration

陆地生态系统植被碳库是全球碳循环的关键组分,其变化将对大气 CO₂ 浓度产生巨大的影响^[1]。作为陆地生态系统碳汇的主要贡献者,森林生态系统在全球碳循环过程中发挥着至关重要的作用,全球森林是一个巨大且持续的碳汇^[2]。森林管理是对森林抚育、林分改造、采伐更新等管理措施的统称。对森林生态系统开展经营管理是提高碳汇及其持续性的一种有效措施^[3]。通过定期的管理,降低林木间的竞争,可以有效地提高森林碳汇^[4-5]。

碳密度是指单位面积的碳储量,是估测区域等大尺度碳储量的重要指标。森林植被碳密度的大小和组成受到立地条件、林龄、树种组成等生物和非生物因素的共同影响^[6-8]。经营和管理措施将改变森林的林龄、树种组成、密度等森林群落参数^[5]。以往针对森林管理对土壤有机碳的影响已经开展了深入研究,结果显示:将原始森林改为次生林通常会减少土壤碳储量,森林采伐会导致土壤碳储量的减少,而林分密度管理和疏伐对森林土壤碳储量的影响较小^[9-10]。然而,对于森林管理对植被碳密度影响的研究报道相对较少,森林管理对碳密度的影响因研究区域和管理强度而异。研究结果显示,低强度的森林管理对毛柞林植被碳储量的变化无显著影响^[11]。而针对寒温带人工林,经过疏伐后的植被在恢复 40 年后总碳储量平均增加了 50%^[12]。此外,通过对寒温带的人工再造林与天然次生林群落碳密度的对比研究结果显示,在 50 年内人工再造林的植被碳密度是天然次生林的两倍^[13]。同时由于森林管理导致植被碳储量估算产生很大的差异和不确定性^[14]。另外,有研究表明移除演替先锋优势种可以显著改变树种组成,增加林冠的开放度,并在间伐强度较低时加速较小的后期树种的生长^[15]。总的来说,通过森林管理改变不同演替时期优势种组成对森林植被碳密度、生产力及其分配格局的影响结果仍不明确,有待于进一步研究。

东北地区的森林面积和林分蓄积量均占全国的 1/3 以上,在区域碳收支平衡中发挥着重要的作用。东北森林由于过度利用形成了大面积的天然次生林,且中幼龄天然林面积占比较大,森林结构不合理,从而导致生态屏障、生物多样性维持、碳汇等功能相对较弱^[16]。“栽针保阔”途径是恢复东北地区顶极群落的重要措施,

经过长期的实施后,与自然演替相比,其对森林碳密度及其分配格局的影响和效果如何,有待于进一步研究。本研究以东北东部山区,立地条件、气候条件一致的天然次生林及其经“栽针保阔”管理所形成的 4 种管理梯度下的森林群落为研究对象,采用清查法量化不同管理方式下的植被碳密度及其分配格局,探索管理方式对森林植被碳密度的影响机制,为东北地区天然次生林尤其是幼龄林的碳汇提升提供理论依据和数据支持。

1 材料与方

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省帽儿山森林生态系统国家野外科学观测研究站(45°20'N,127°30'E)。平均海拔为 400 m,平均坡度为 10—15°。成土母质为花岗岩基岩,土壤类型是典型的暗棕壤。该地区属于温带大陆季风气候,春季季风强烈,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。年降水量在 600—800 mm,年平均气温为 2.8℃,年蒸发量大概为 884 mm。无霜期为 120—140 d。研究区内主要乔木树种有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、山杨(*Populus davidiana* Rupr.)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb.)和落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)。灌木主要有丁香属(*Syringa*)、卫矛属(*Euonymus*)、绣线菊属(*Spiraea*)和五味子(*Schisandra chinensis*)等。草本主要有木贼(*Equisetum hyemale* L.)、狭叶荨麻(*Urtica angustifolia* Fisch. ex Hornem.)等^[6,17]。

1.2 样地设置及测定方法

1.2.1 样地设置

本研究在坡度、坡位等立地条件相对一致的同一个小林班内进行,选择了 4 种经营管理方式形成的同龄林分类型,分别是 20 世纪 50 年代阔叶红松林被皆伐后自然更新,未进行管理所形成的白桦次生林(WB);20 世纪 60 年代初,在 WB 林冠层下人工栽植红松后未进行管理形成的混交林——“栽针保阔”混交林(MA);20 世纪 70 年代将 MA 进行透光抚育,对影响红松生长的白桦、山杨等先锋树种进行择伐,保留全部红松形成择伐林(SK);20 世纪 80 年代为了降低林地乔木个体之间的竞争强度,对 SK 中的红松进行选择疏伐,形成疏伐林(KT)^[18]。由此形成 4 个管理梯度的森林群落,各森林群落特征和立地条件详见表 1。

表 1 4 种管理措施森林群落的乔木层特征和立地条件概况

Table 1 The summary of overstory characteristics and site conditions for the forest communities under four management practices

森林类型 Forest type	代码 Code	坡位 Slope position	坡度 Slope/(°)	林分密度 Stand density/ (trees/hm ²)	断面积 BA/ (m ² /hm ²)	平均胸径 Mean DBH/cm	树种组成 Species composition/1/10
白桦次生林 White birch secondary forest stand	WB	中坡位	9	2667 (294)	27.5 (8.2)	8.74	6PB1PU1FM1AMIUD+QM-OT
“栽针保阔”混交林 Mixed afforestation stand	MA	中坡位	9	2183 (304)	28.6 (1.8)	10.67	2KP2FM1JM1AMIUD1PB1PD-OT
择伐红松林 Selective-logging Korean pine stand	SK	中坡位	8.5	4178 (567)	43.4 (11.8)	9.64	4KP3PB1PU1FM-OT
疏伐红松林 Thinning-logging Korean pine stand	KT	中坡位	12	1811 (195)	44.7 (1.6)	16.73	6KP3FM1BP1+PU-OT

* BA 和 DBH 分别代表断面积和胸径。括号内数字为标准差($n=3$);PB,UD,PK,PD,PU,FM,QM,AM 和 OT 分别代表白桦、春榆、红松、山杨、大青杨、水曲柳、蒙古栎、五角槭和其他树种(数量极少);树种组成当中的数字代表组成该树种的断面积占总断面积的比例(1/10);“+”和“-”分别代表特定断面积占总断面积的比例<5%和<2%

1.2.2 植被地上碳密度测定

乔木层碳密度:乔木层包括所有高度 ≥ 1.37 m 的乔木。每个管理方式随机设置 3 块固定监测样地,其中,白桦次生林(WB)、栽针保阔混交林(MA)和栽针保阔疏伐林(KT)的样地面积为 20 m \times 30 m,透光抚育林(SK)的样地面积为 15 m \times 15 m。在 2022 年 8 月夏季测量了样地内所有乔木的胸径(DBH,1.3 m 处树干直

径)。利用 DBH 和该区域建立的异速生长方程^[17]估算单个乔木各组分(树干、枝、叶)的生物量,各组分生物量乘以相应的碳含量系数^[19]并求和得到单个乔木的生物量碳,样地内所有乔木的生物量碳之和为碳储量,单位面积的碳储量即为乔木层碳密度(单位:t/hm²)。

林下植被层碳密度:林下植被层包括草本、灌木和树高<1.37 m 的乔木幼苗。于 2022 年 8 月在林下植被生物量达到最大值时,在每个样地内随机选取 5 个 1 m × 1 m 小样方,对样方内所有林下植被进行破坏性全收获法取样,分木质组织和非木质组织,分别称量其总鲜重,采集约 500 g 的鲜样,带回实验室后在 65 °C 下烘干至恒重,再称量其干重,计算干湿比。计算得林下植被的总干重即生物量,再乘以测定的混合样品的碳含量系数,计算出林下植被层的单位面积碳储量,即为林下植被层的碳密度。

1.2.3 植被地下碳密度测定

整个地下根系包括粗根(直径>5 mm)、中根(直径为 2—5 mm)和细根(直径<2 mm)。因本研究以生态系统水平为尺度,灌木和草本的粗根生物量及分配比例很低^[6],因此只估算乔木的粗根碳密度,采用每木检尺数据、异速生长方程和碳含量系数来计算其碳密度。中细根碳密度采用根钻采样法估算,于 2022 年 8 月中旬(生长季旺期)和 9 月下旬(生长季末期)在每个样地内随机选取 5 个样点,采用直径为 5 cm 的土壤钻,以每 10 cm 为一个取样层采集带根系的土壤样品,每个样点的采取深度达到 50 cm(此深度的根系生物量极低^[20])。将采集到的土壤样品进行水洗过筛,挑出根系,并根据根系的形态、颜色和弹性区分死根和活根,然后在 65 °C 下烘干至恒重,称量(精确至 0.001 g)得到各样点各土层的中细根的生物量和死根量,再乘以测定的根系碳含量系数,计算后得到中细根的碳密度。粗根、中根和细根碳密度的总和为植被地下碳密度。

1.2.4 植被残体碳密度测定

植被残体包括枯落物、枯立木和倒木。枯落物采用收获法,于 2022 年 8 月份在样地内随机选取 5 个样方,收获样方内所有枯落物,将其分类为小枝、半分解枯落物和未分解枯落物三种类型,称得总鲜重,取一部分样品称得样鲜重并在 65 °C 烘干至恒重,称得样干重,最后计算出总干重。利用 Multi N/C 2000 分析仪进行样品碳浓度的测定,用总干重和相应碳浓度估算出枯落物碳密度。枯立木碳密度采用每木检尺数据结合异速生长方程和相应的碳含量系数估算木质组织部分碳密度。倒木碳密度采用清查法估算,测定样地内的倒木的两端直径和长度,并采用公式(1)计算单个倒木碳储量,所有倒木碳储量求和后,转换到单位面积则得到样地倒木碳密度。

$$M_i = 1/12 \times \pi \times L_i \times (D_{ai}^2 + D_{ai} \times D_{bi} + D_{bi}^2) \times \rho_i \times C_i \quad (1)$$

式中, M_i 为倒木单木碳储量; L_i 为倒木长度; D_{ai} 和 D_{bi} 为倒木两端的直径; ρ_i 为倒木的密度; C_i 为倒木的 C 浓度

1.2.5 土壤养分测定

于 2022 年 9 月在每个样地内随机选取 5 个样点,利用直径为 5 cm 的土钻,以每 10 cm 为一个取样层采集土壤样品,每个样点的采取深度达到 50 cm。采集后的鲜土取一部分用于测定土壤容重和含水率等基本性质。将剩余的土壤样品风干后,剔除石头和根系,研磨过 100 目筛网,用于土壤化学性质的测定。风干后的土壤样品经浓硫酸消解后,采用 AA3 连续流动分析仪测定氮和磷含量。

1.3 数据处理与分析

人工更新和疏伐改变树种组成,为比较不同管理措施对碳密度的影响,根据各树种在次生演替过程中的优势程度,将其分为演替先锋优势种(演替先锋期乔木层的优势种,包括白桦、山杨)、演替后期优势种(到达演替顶极群落的优势种,包括红松、水曲柳、胡桃楸、蒙古栎、紫椴)、伴生乔木种和林下植被层 4 类,求得各演替优势种样地水平的碳密度,比较不同管理措施下各演替优势种碳密度的差异。植被碳密度年平均增长量(MAI,单位为 t hm⁻² a⁻¹)为植被碳密度除以次生演替年数(64 a)。利用公式(2)计算 Shannon-Wiener 指数(H')。采用公式(3)计算各样地的土壤氮密度和磷密度。

$$H' = \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, $P_i = N_i/N$, S 为样地物种数, N_i 为第 i 个种的个体数, N 为样地总个体数。

$$C_i = O_i \times H_i \times R_i \quad (3)$$

式中, C_i 为土壤各层氮、磷密度, 单位为 t/hm^2 ; O_i 为土壤各层的氮、磷含量, 单位为 g/kg ; H_i 为土壤各层厚度, 单位为 cm ; R_i 为土壤各层的容重, 单位为 g/cm^3 。

运用 R 4.1.3 软件进行数据处理和分析, 利用 ANOVA 和 LSD 对植被密度进行差异显著性检验, 利用 “ggplot2” 包进行作图, “vegan” 包进行多样性指数计算, “corrplot” 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 植被碳密度

演替先锋优势种 ($F_{3,12} = 7.51, P < 0.01$)、演替后期优势种 ($F_{3,12} = 34.56, P < 0.001$) 和林下植被层 ($F_{3,12} = 5.57, P < 0.05$) 的碳密度在 4 种管理措施间存在显著差异, 各演替优势种碳密度的波动范围依次分别为 $15.85\text{—}61.41 t/hm^2$ 、 $9.39\text{—}107.02 t/hm^2$ 和 $0.55\text{—}1.96 t/hm^2$, 演替后期优势种的碳密度随着管理强度而增加。但伴生种的碳密度在 4 种管理措施间差异不显著 ($P > 0.05$), 其碳密度波动范围为 $8.41\text{—}14.89 t/hm^2$ (图 1)。

植被总碳密度 ($F_{3,12} = 4.33, P < 0.05$) 和植被地上碳密度 ($F_{3,12} = 4.70, P < 0.05$) 在 4 种管理措施间存在显著差异, 其波动范围为 $96.34\text{—}135.40 t/hm^2$ 和 $79.34\text{—}123.81 t/hm^2$; 而植被地下碳密度 ($P = 0.15$) 和植被残体碳密度 ($P = 0.25$) 在 4 种管理措施间并未存在显著差异, 其碳密度波动范围为 $18.39\text{—}25.36 t/hm^2$ 和 $7.05\text{—}11.41 t/hm^2$ (图 2)。4 种管理措施间的植被碳密度年平均增长量的波动范围为 $1.50\text{—}2.11 t\text{ }hm^{-2}\text{ }a^{-1}$, 且在不同管理措施间存在显著差异性 ($F_{3,12} = 4.66, P < 0.05$, 图 3)。

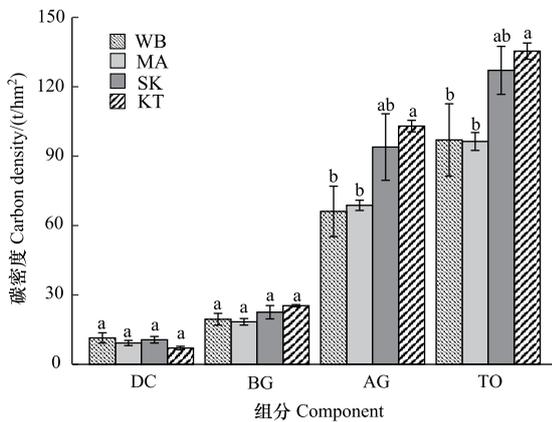


图 2 4 种管理措施下森林群落的植被碳密度

Fig.2 The vegetation carbon density of the forest communities under four management practices

DC、BG、AG 和 TO 分别表示植被残体、地下生物量、地上生物量和植被总碳密度, 以下图表中出现相同代码的含义均与此处相同

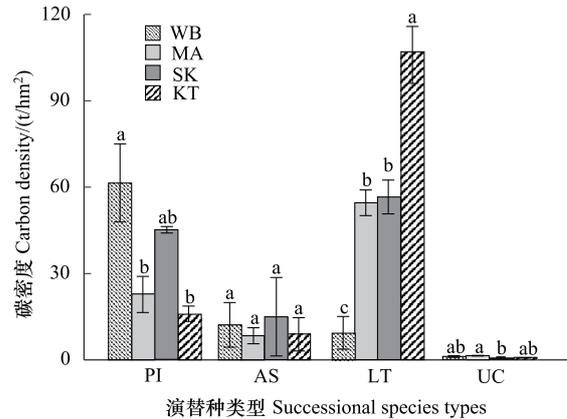


图 1 4 种管理措施森林群落的不同演替阶段优势种碳密度

Fig.1 The carbon density of dominant species in different succession stages of the forest communities under four management practices

PI、AS、LT、UC 分别表示演替先锋优势种、伴生种、演替后期优势种和林下植被; WB、MA、SK、KT 分别为白桦次生林、“栽针保阔”混交林、透光抚育择伐红松林、疏伐红松林; 误差线为标准差 ($n = 3$), 小写字母 a、b 和 c 表示同一组分在不同处理间基于 LSD 检验的显著性分组 ($\alpha = 0.05$), 以下图表中出现相同代码的含义均与此处相同

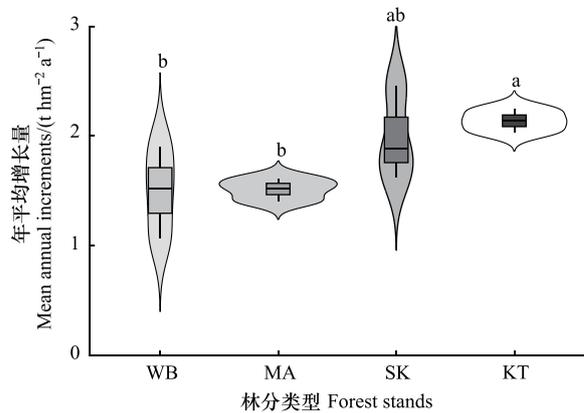


图 3 4 种管理措施下森林群落碳密度年平均增长量

Fig.3 The mean annual increments of the forest communities carbon density under four management practices

2.2 植被碳密度分配格局

总体而言,植被地上碳密度、植被地下碳密度和植被残体碳密度分别占植被总碳密度的 72.2%、19.0% 和 8.8%。其中,植被地上碳密度($F_{3,12}=7.75, P<0.01$)和植被残体碳密度($F_{3,12}=4.80, P<0.05$)的分配比例在 4 种管理措施间存在显著差异,而植被地下碳密度的分配比例在管理措施间不存在显著差异($P=0.17$,图 4)。

此外,演替先锋优势种($F_{3,12}=15.77, P<0.001$)、演替后期优势种($F_{3,12}=19.82, P<0.001$)和林下植被($F_{3,12}=4.79, P<0.05$)碳密度的分配比例在 4 种管理措施间存在显著差异,且其占植被总碳密度的范围依次分别为 12.3—71.2%、14.0—82.2% 和 0.4—1.2%;但伴生种碳密度的分配比例在 4 种管理措施间不存在显著差异,约占植被总碳密度的 9.3%(图 5)。

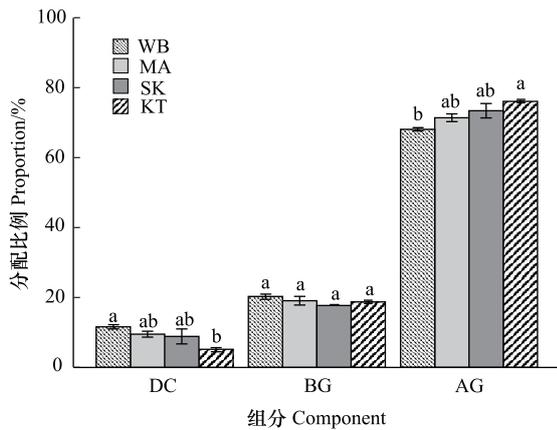


图 4 4 种管理措施下森林群落各组分碳密度的分配比例

Fig.4 Proportions of each component carbon density in the forest communities under four management practices

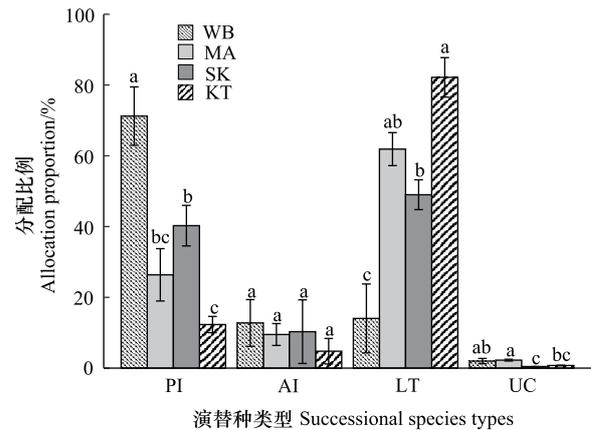


图 5 4 种管理措施下森林群落不同演替阶段优势种碳密度的分配比例

Fig.5 The carbon density proportions of dominant species in different successional stages of the forest communities under four management practices

植被残体碳密度与活体生物量碳密度之比($F_{3,12}=4.82, P<0.05$)和地下生物量碳密度与地上生物量碳密度之比($F_{3,12}=4.43, P<0.05$)在 4 种管理措施间均存在显著差异,其比值的波动范围依次分别为 0.05—0.13 和 0.24—0.30(图 6)。

2.3 植被碳密度的影响因素

通过整合样地的数据,发现乔木层碳密度与样地的 Shannon-Winner 多样性指数呈显著负相关($R^2=0.65, P=0.002$,图 7);而林下植被层的碳密度与样地的 Shannon-Winner 多样性指数呈显著正相关关系($R^2=0.60, P=0.003$,图 7);植被碳密度与平均胸径、针叶树与阔叶树断面积比值呈显著相关,但是与土壤氮储量、磷储量无显著相关性(图 8)。

3 讨论

3.1 森林管理对植被碳密度的影响

本研究结果显示,增加后期树种的比例(表 1),提升后期树种碳密度(图 1),显著提升了东北东部森林的植被碳密度(图 2)。本研究中的森林管理主要是基于东北东部山区次生演替过程,为加速顶极群落形成,在以白桦、山杨为主要组成树种的软阔叶次生林冠下人工栽植红松,通过适时择伐白桦等先锋树种,提升寿命长、体型大的后期树种的比例,属于积极的森林管理。随着管理措施的加强,4 种管理措施森林群落的红松占比逐渐提升,先锋树种占比逐渐降低(表 1),植被总碳密度从 96.34 t/hm^2 显著提升到 135.40 t/hm^2 (图 2),其波动范围处于东北地区森林生物量碳密度的估算范围($5.5\text{—}216 \text{ t/hm}^2$)^[21]。经过“栽针保阔”适时疏伐的各种管理措施下,森林群落(MA、SK、KT)的植被碳密度(图 2)和碳固持速率即年均植被碳密度增长量(图 3)均

高于次生林(WB)的碳密度,且随着管理程度呈增加的趋势,其中,KT 是经过透光抚育和后期降低竞争的管理措施,其碳密度量高于未经管理的次生林(WB)植被碳密度的 43%。此结果与瑞典樟子松林疏伐 40 年后碳密度平均增加 50%^[12]较一致。但是与小兴安岭的天然次生林冠下栽植红松,经不同透光抚育强度降低了植被碳密度^[22]的研究结果相悖。森林管理中,疏伐强度和恢复时间是决定对碳密度影响效应的关键,管理后短期内对植被碳储量有一定的减弱^[23]。森林管理仅是针对降低林木间的竞争强度,而进行疏伐和择伐,其采伐林木的数量或强度相对较少(表 1),且恢复时间已经长达 30 余年,是属于积极的森林管理。此结果与积极的森林管理提升了亚热带人工林的碳储量的研究结论一致^[24]。另外,森林管理的过程中,通过降低演替先锋优势乔木种,增加后期优势种的比例,会改变优势树种组成,促进森林树干断面积的增长,进而提升植被碳储量^[15],4 种管理措施的森林群落演替后期优势种碳密度随着管理强度呈现出显著增加趋势,由次生林的 9.39 t/hm²增加到疏伐林的 107.02 t/hm²。择伐后森林群落(KT,135.40 t/hm²)的植被碳密度均高于未经过择伐的森林群落(SK,图 2)。这意味着,通过积极的森林管理可以显著提升森林的植被碳密度^[25]。

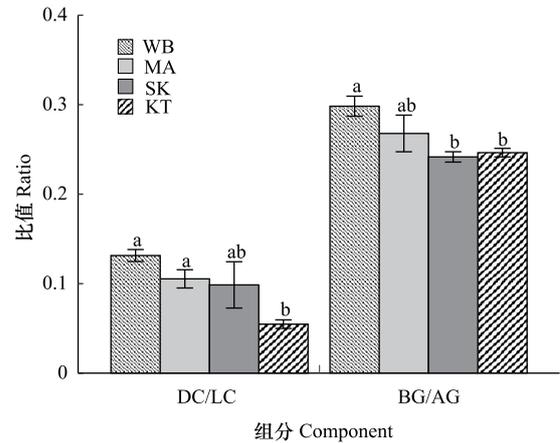


图 6 4 种管理措施下枯死残体与森林群落生物量(DC/LC)和地下与地上(BG/AG)碳密度比值

Fig.6 The ratio of carbon density for dead residues and biomass (DC/LC), and belowground-aboveground (BG/AG) in forest communities under four management practices

DC/LC 和 BG/AG 分别表示植被枯死残体碳密度与活体生物量碳密度之比和地下生物量碳密度与地上生物量碳密度之比

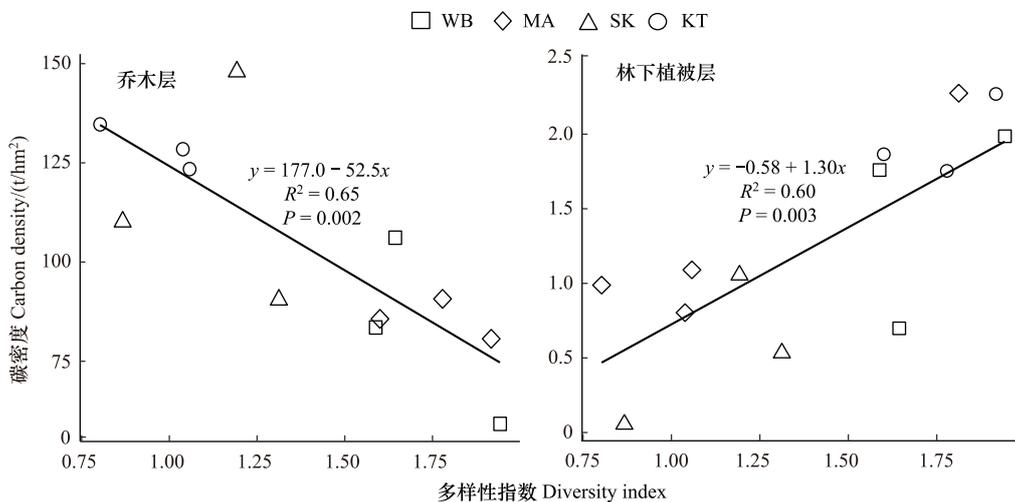


图 7 4 种经营管理措施森林群落乔木层和林下植被层碳密度与多样性指数的相关关系

Fig.7 The correlation between carbon density of the overstory, understory and biodiversity index for forest communities under four management practices

3.2 森林管理对植被碳密度分配格局的影响

量化碳分配格局是理解森林生态系统碳循环过程的重要基础^[26]。根冠比(地上与地下生物量的比)是利用容易测定的地上生物量来估算地下生物量重要的方法,其受到植被类型、气候因素等影响^[27-28]。利用该区域建立的特定立地条件异速生长方程^[17]估算了植被的地下与地上碳密度比(BG/AG),结果显示,4 种管理

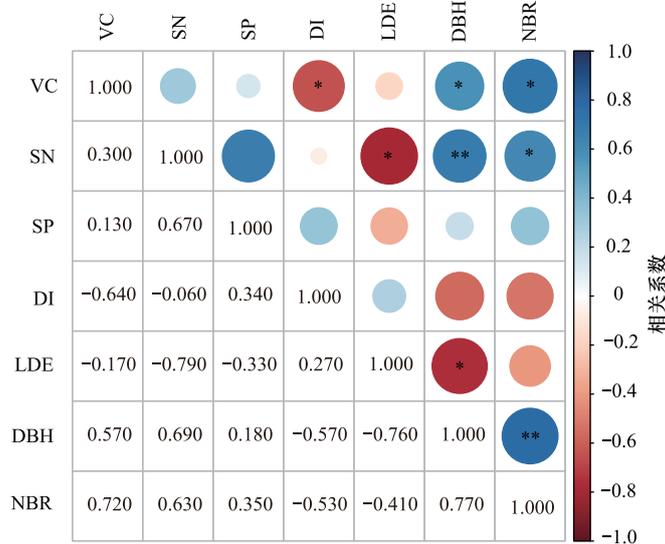


图8 植被碳密度、群落特征、土壤养分特征的相关系数矩阵

Fig.8 The correlation coefficient matrix of vegetation carbon density, community characteristics, and soil nutrient characteristics

其中 VC、SN、SP、DI、LDE、DBH、NBR 分别为植被碳密度、土壤氮储量、土壤磷储量、多样性指数、林分密度、平均胸径、针叶树与阔叶树断面面积比值;蓝色表示正相关,红色表示负相关,圆形大小表示相关性系数大小; ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

措施森林群落中,植被地上碳密度占了主要部分(占植物碳密度的70%以上,图4),次生林的BG/AG为最高(0.30),经过透光抚育与疏伐结合管理KT的BG/AG为最低(0.24,图6),BG/AG的范围处于温带森林(地上生物量碳 $>75 \text{ t/hm}^2$)的研究范围内(0.172—0.435)^[28],而低于温带森林BG/AG的平均值(0.386)^[27]。通过不同的森林管理梯度,从天然次生林中没有红松,到红松占6成的透光抚育与疏伐结合管理的KT,逐步提升了裸子植物—红松的占比,增加演替后期优势树种的碳密度(图5),BG/AG呈显著的递减趋势,这也印证了被子植物的根冠比要高于裸子植物的^[27]的结论。此外,森林生态系统中凋落物、粗木质残体是生态系统碳释放的重要组分,枯死植被残体的量是影响碳平衡和准确评价森林碳汇强弱的重要指标^[29—30],枯死植被残体碳密度与生物量碳密度的比值(DC/LC)可以反映碳固持的活力状况,当其值越低,表明该森林群落具有更多的碳固持组织,更少的碳释放组织。植被残体碳密度在4种管理措施森林群落间虽未呈现显著的差异(图2),但是其分配系数和DC/LC却存在显著差异(图4,图6)。4种管理措施森林群落,次生林(WB)作为未经管理的对照处理,其演替时间长达64年,已经处于次生演替的过渡期;MA为在林下栽植红松管理措施森林群落、SK为MA措施下对冠层先锋树种伐除,让林冠下的红松充分获得光照,而KT是为了降低林木的竞争强度,对SK中的红松进行疏伐,减少了竞争导致林木的枯死量,4森林群落的管理强度依次增加,从而导致DC/LC随其呈逐渐降低趋势。这表明,通过积极的森林管理,提高演替后期优势种—红松的占比,增加演替后期优势种碳密度及其分配比例,同时降低植被残体与生物量、地上与地下的碳密度分配格局,进而提升植被的碳固持能力。

3.3 森林管理提升森林植被碳密度的机制

森林植被碳密度由群落结构复杂性、功能多样性、树种组成等共同决定,且林分结构的复杂性的决定作用超过了生物多样性的贡献^[7]。森林群落中,大径级个体是决定森林植被碳储量的重要因素^[31]。演替后期树种具有个体大、寿命长等特性^[32—33],只有演替先锋优势种和演替后期优势种碳密度在不同管理方式的森林群落间存在显著差异,植被碳密度随着后期树种碳密度的增加而增加(图1),森林管理提升演替后期优势种的比例,增加了森林植被碳密度(图2)。且针对东北自然演替的不同林龄次生林的研究显示,植被碳密度的变化主要取决于演替过程中先锋树种和后期树种的更替,其中后期树种在次生林植被碳密度差异起主导作

用^[8],此与本研究结果一致。原始阔叶红松林森林皆伐利用后,演替初期形成以白桦、山杨等阳性树种,其年龄相对均一。而通过森林管理形成异龄复层林。森林管理使得林木年龄的趋异化,可提升植被的碳密度^[34]。此外,森林管理改变林分密度、多样性等群落特征。林分密度是显示林木间竞争程度的重要因子。未发现植被碳密度与林分密度具有显著的相关性(图 8),但是排除择伐红松林外,呈现出植被碳密度随林分碳密度降低而增加的趋势。这可能与各管理措施样地中林木竞争强度有关,其结果有待于进一步研究。然而,植物多样性与碳密度相关关系的研究存在一定的相悖性^[35]。针对亚热带森林的研究结果显示,碳储量与生物多样性呈正相关,即多样性对碳储存具有正的促进作用^[36]。而本研究,多样性对乔木层和林下植被层的碳密度的影响呈完全相反的关系;其中,乔木层植被的碳密度与群落多样性呈显著负相关关系(图 7),此研究结果与半干旱森林生态系统的研究结论一致,碳密度与多样性呈负相关关系^[37];而林下植被层碳密度与群落多样性呈显著正相关关系(图 7)。多样性对森林生产力、碳密度的影响具有选择效应、互补效应、保险效应和超产效应等多种机制^[38]。森林管理属于轻度干扰,即对森林群落中林木有目的的选择性采伐,即保留森林演替的后期树种,同时又择伐了生长不良和对后期树种造成竞争压力的林木,降低了群落的多样性,尤其在 KT 中,其后期树种(红松和水曲柳)占了 9 成,群落多样性为最低;但是,选择保留了生长良好的林木,且随着竞争减弱,导致生长释放,加速林木的生长,从而提升了植被碳密度。各群落的坡向、坡位等立地条件相对一致(表 1),植被碳密度与土壤养分储量无相关性(图 8)。综上,针对相同的气候和演替年龄、立地条件相似条件下的森林群落,群落结构是决定植被碳密度分异的主控因素,通过增加演替后期优势种、年龄结构和冠层结构趋异化的森林管理提升植被碳密度。

4 结论

通过“栽针保阔”管理途径,增加群落种演替后期树种的组成比例和碳密度,显著提升东北天然次生林的植被碳密度(从次生林的 96.34 t/hm²增加到栽针保阔疏伐林的 135.40 t/hm²)和碳固持速率(从次生林的 1.50 t hm⁻² a⁻¹提升到栽针保阔疏伐林的 2.11 t hm⁻² a⁻¹)。同时降低了植被地下碳密度和植被残体碳密度,改变了地下与地上、残体与活体的碳密度分配比例。森林管理导致群落结构改变是影响植被碳密度的主控因素,乔木层碳密度与群落多样性呈显著负相关,而林下植被层碳密度与群落多样性呈显著正相关;植被碳密度与土壤氮磷储量无显著相关性。积极的森林管理提升了东北天然次生林的植被碳密度。

参考文献 (References):

- [1] Houghton R A. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 313-347.
- [2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] Islam M R, Jönsson A M, Bergkvist J, Lagergren F, Lindeskog M, Mölder M, Scholze M, Kljun N. Projected effects of climate change and forest management on carbon fluxes and biomass of a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 349: 109959.
- [4] Birdsey R, Pan Y D. Trends in management of the world's forests and impacts on carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 2015, 355: 83-90.
- [5] Noormets A, Epron D, Domec J C, McNulty S G, Fox T, Sun G, King J S. Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 2015, 355: 124-140.
- [6] Zhang Q Z, Wang C K. Carbon density and distribution of six Chinese temperate forests. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 831-840.
- [7] Yuan Z Q, Wang S P, Ali A, Gazol A, Ruiz-Benito P, Wang X G, Lin F, Ye J, Hao Z Q, Loreau M. Aboveground carbon storage is driven by functional trait composition and stand structural attributes rather than biodiversity in temperate mixed forests recovering from disturbances. *Annals of Forest Science*, 2018, 75(3): 67.
- [8] 蔺佳玮, 张全智, 王传宽. 帽儿山干扰系列次生林碳密度恢复. *生态学报*, 2023, 43(21): 8793-8802.
- [9] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, Augusto L, Cécillon L, Ferreira G W D, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf J A, Vanguelova E I, Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [10] Leuschner C, Feldmann E, Pichler V, Glatthorn J, Hertel D. Forest management impact on soil organic carbon: A paired-plot study in primeval

- and managed European beech forests. *Forest Ecology and Management*, 2022, 512: 120163.
- [11] Bouriaud O, Don A, Janssens I A, Marin G, Schulze E D. Effects of forest management on biomass stocks in Romanian beech forests. *Forest Ecosystems*, 2019, 6: 19.
- [12] Jörgensen K, Granath G, Lindahl B D, Strengbom J. Forest management to increase carbon sequestration in boreal *Pinus sylvestris* forests. *Plant and Soil*, 2021, 466(1): 165-178.
- [13] Thibault M, Thiffault E, Bergeron Y, Ouimet R, Tremblay S. Afforestation of abandoned agricultural lands for carbon sequestration: how does it compare with natural succession? *Plant and Soil*, 2022, 475(1): 605-621.
- [14] Erb K H, Kastner T, Plutzer C, Bais A L S, Carvalhais N, Fetzel T, Gingrich S, Haberl H, Lauk C, Niedertscheider M, Pongratz J, Thurner M, Luysaert S. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 2018, 553(7686): 73-76.
- [15] Swinfield T, Afriandi R, Antoni F, Harrison R D. Accelerating tropical forest restoration through the selective removal of pioneer species. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 209-216.
- [16] 国家林业和草原局编制. 中国森林资源报告-2014-2018. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [17] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/2/3): 9-16.
- [18] 陈大珂, 周晓峰, 丁宝永, 胡正昌, 祝宁, 王义弘, 赵惠勋, 鞠永贵, 金永岩. 黑龙江省天然次生林研究(II)——动态经营体系. *东北林学院学报*, 1985, 13(1): 1-18.
- [19] Zhang Q Z, Wang C K, Wang X C, Quan X K. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(5): 722-727.
- [20] Quan X K, Wang C K, Zhang Q Z, Wang X C, Luo Y Q, Bond-Lamberty B. Dynamics of fine roots in five Chinese temperate forests. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(4): 497-507.
- [21] Wang X P, Fang J Y, Zhu B. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(12): 4007-4020.
- [22] 王亚辉, 牟长城, 杨智慧, 刘珽, 李轩男. 透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林碳储量的影响. *北京林业大学学报*, 2021, 43(10): 54-64.
- [23] Keith H, Lindenmayer D, Mackey B, Blair D, Carter L, McBurney L, Okada S, Konishi-Nagano T. Managing temperate forests for carbon storage: impacts of logging versus forest protection on carbon stocks. *Ecosphere*, 2014, 5(6): 1-34.
- [24] Diao J J, Liu J X, Zhu Z L, Wei X Y, Li M S. Active forest management accelerates carbon storage in plantation forests in Lishui, southern China. *Forest Ecosystems*, 2022, 9: 100004.
- [25] Zhu B, Wang X P, Fang J Y, Piao S L, Shen H H, Zhao S Q, Peng C H. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(4): 439-452.
- [26] Litton C M, Raich J W, Ryan M G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2089-2109.
- [27] Qi Y L, Wei W, Chen C G, Chen L D. Plant root-shoot biomass allocation over diverse biomes: A global synthesis. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 18: e00606.
- [28] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [29] Ohtsuka T, Mo W H, Satomura T, Inatomi M, Koizumi H. Biometric based carbon flux measurements and net ecosystem production (NEP) in a temperate deciduous broad-leaved forest beneath a flux tower. *Ecosystems*, 2007, 10(2): 324-334.
- [30] Gough C M, Vogel C S, Kazanski C, Nagel L, Flower C E, Curtis P S. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2007, 244(1/2/3): 60-67.
- [31] Yuan Z Q, Ali A, Sanaei A, Ruiz - Benito P, Jucker T, Fang L, Bai E, Ye J, Lin F, Fang S, Hao Z Q, Wang X G. Few large trees, rather than plant diversity and composition, drive the above-ground biomass stock and dynamics of temperate forests in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 481: 118698.
- [32] Seiwa K, Kikuzawa K, Kadowaki T, Akasaka S, Ueno N. Shoot life span in relation to successional status in deciduous broad - leaved tree species in a temperate forest. *The New Phytologist*, 2006, 169(3): 537-548.
- [33] Lichstein J W, Peterson B T, Langebrake J, McKinley S A. Leaf economics of early- and late-successional plants. *The American Naturalist*, 2021, 198(3): 347-359.
- [34] Ameray A, Bergeron Y, Valeria O, Montoro Girona M, Cavard X. Forest carbon management: A review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate, and tropical forests. *Current Forestry Reports*, 2021, 7(4): 245-266.
- [35] Carol Adair E, Hooper D U, Paquette A, Hungate B A. Ecosystem context illuminates conflicting roles of plant diversity in carbon storage. *Ecology Letters*, 2018, 21(11): 1604-1619.
- [36] Ruiz-Benito P, Gómez-Aparicio L, Paquette A, Messier C, Kattge J, Zavala M A. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(3): 311-322.
- [37] Conti G, Díaz S. Plant functional diversity and carbon storage-an empirical test in semi - arid forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 18-28.
- [38] Wright A J, Barry K E, Lortie C J, Callaway R M. Biodiversity and ecosystem functioning: Have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? *Journal of Ecology*, 2021, 109(5): 1962-1968.