

杉木人工林阔叶化改造对林分碳密度的影响

汪保健, 邱勇斌, 张能军, 郑文华, 汪秀玲

(开化县林场, 浙江 开化 324300)

摘要: 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林连栽导致生产力下降, 将杉木二代林改造为杉阔混交林对提高林分生产力和碳汇能力具有重要意义。本文在杉木二代林内分别引入光皮桦 *Betula luminifera*、木荷 *Schima superba* 和厚朴 *Magnolia officinalis*, 构建杉阔混交林, 分析了各林分乔木层、林下植被层、凋落物层和土壤层有机碳密度变化。结果表明: 杉木+木荷、杉木+厚朴混交林乔木层碳密度与杉木纯林接近, 但杉木+光皮桦比杉木纯林乔木层碳密度减少了 25.8%。3 种杉阔混交林与杉木纯林之间林下植被碳密度没有差异, 但凋落物碳密度均低于杉木纯林。杉木+光皮桦、杉木+木荷和杉木+厚朴混交林 0~50 cm 土层土壤有机碳密度分别比杉木纯林增加了 5.9%、8.6% 和 21.7%。相对于杉木纯林, 杉木+木荷和杉木+厚朴混交林林分总碳密度分别增加了 5.7% 和 15.3%, 而杉木+光皮桦林分总碳密度则减少了 6.1%。因此, 树种组成显著影响杉阔混交林林分碳密度及其分配特征, 选择适宜的树种进行杉木二代林阔叶化改造是提高林分固碳潜力的关键。

关键词: 杉木; 阔叶树; 混交林; 碳密度

中图分类号: S756.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-3776(2024)02-0068-06

Effect of Transforming Pure *Cunninghamia lanceolata* Plantation to mixed Forest with Broad-leaf Tree Species on Organic Carbon Density

WANG Baojian, QIU Yongbin, ZHANG Nengjun, ZHENG Wenhua, WANG Xiuling

(Kaihua Forest Farm of Zhejiang, Kaihua 324300, China)

Abstract: In February 2007, transformation was carried out on cutting area of pure the first generation of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Kaihua, Zhejiang Province. Afforestations were implemented on different sample plots namely of pure *C. lanceolata* suckers (CK), 2-year container seedlings of *Betula luminifera*, *Schima superba* and *Houpoa officinalis* with *C. lanceolata* suckers. In November 2022, investigation was made on different sample plots, with DBH, height and stand density. Biomass of sample trees in each plots, understorey vegetation was determined and soil organic carbon and soil bulk density was detected. The results showed that the organic carbon density of arbor layer in *C. lanceolata* suckers + *S. superba* and *C. lanceolata* suckers + *H. officinalis* was close to that in the control, but that in *C. lanceolata* suckers + *B. luminifera* was 25.8% lower than that in the control. There was no difference of organic carbon density of understory vegetation between the three mixed plantations and the control, but the organic carbon density of litter was lower than that of the control. The soil organic carbon density in the 0-50 cm soil layer of the three mixed plantations was 5.9%, 8.6% and 21.7% higher than that of the control. Compared with the control, the total organic carbon density of mixed *C. lanceolata* suckers + *S. superba* and *C. lanceolata* suckers + *M. officinalis* plantations increased by 5.7% and 15.3%, while that of *C. lanceolata* suckers + *B. luminifera* plantation decreased by 6.1%.

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2024-01-18

作者简介: 汪保健, 林业工程师, 从事森林经营等方面研究; E-mail:452162035qq.com。通信通作者: 汪秀玲, 林业工程师, 从事森林经营等方面研究; E-mail:zjkhlcw@163.com。

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; broad leaf tree species; mixed forest; organic carbon density

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是我国亚热带地区栽培面积最大的用材树种。根据第 9 次(2014—2019 年)全国森林资源清查数据,截至 2019 年,我国杉木人工林栽植面积和蓄积量分别为 $9.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $7.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占全国人工乔木林总面积和总蓄积量的 17.33% 和 22.30%^[1]。目前,大部分杉木人工林仍采用集约经营的纯林模式^[2]。尽管纯林经营管理方便,但杉木连栽往往导致林分生产力下降、土壤肥力退化等问题^[3-4]。许多研究表明,混交林比纯林具有更高的林分生产力、土壤肥力、碳汇和林分稳定性^[5]。基于全球混交林和纯林的配对数据分析发现,混交林的树高、胸径和生物量分别比纯林高 5.5%、6.8% 和 25.5%^[6]。对杉阔混交林的研究也表明,杉阔混交林生产力普遍高于杉木纯林^[7-9]。

近年来,随着“双碳”目标的提出,混交林在固碳增汇方面的重要作用进一步得到重视。研究发现,随着树种组成多样性增加,林分地上生物量和碳储量逐渐增大,这种影响随时间的延长和植物的生长而增强,8 年生混交林碳储量比纯林高 1 倍以上^[10]。基于中国 6 098 个森林、灌木和草地样点的数据分析也表明,土壤碳储量随着物种多样性和地下生物量的增加而增加^[11]。然而也有研究表明,树种丰富度与生物量之间没有关系^[12]。李婷婷等^[5]认为树种组成与林分生产力和碳储量的关系不仅与树种多样性有关,还受到树种特性、生态位、林分结构及立地条件等因素的影响。此外,树种特性对森林生态系统土壤碳储量的影响可能大于树种多样性^[5]。因此,选择适宜的混交树种可能更有利于提高森林碳储量。

尽管过去几十年来,杉木阔叶树混交林的研究取得了很大进展,但多数研究关注林分生产力、地上生物量和碳储量的变化,对土壤碳储量研究相对不足。此外,不同地区杉阔混交林对林分碳储量影响的研究结果也不尽相同^[13-14]。因此,开展更多杉阔混交林地上、地下碳储量的研究对筛选适宜的高碳汇杉木混交林模式具有重要意义。为此,本研究以开化林场二代杉木萌生林为对照,选择补植不同阔叶树构建的杉阔混交林为研究对象,分析不同林分乔木层、林下植被层、凋落物层和土壤层碳储量的特征,为试验区固碳增汇背景下杉阔混交林高效培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在浙江省开化县林场(118°25'E, 29°09'N)实施,研究区平均海拔为 262 m,年均气温为 16.4 °C,年均降水量为 1 814 mm,主要集中在 6—9 月。年日照时数为 1 334.1 h,无霜期为 252 d,属亚热带季风气候。土壤类型为红黄壤,pH 值为 4.5~5.2。

1.2 试验设计

2007 年 2 月,选择 3 种阔叶树种(光皮桦 *Betula luminifera*、木荷 *Schima superba* 和厚朴 *Houpoa officinalis*) 在一代杉木皆伐迹地上更新造林。试验采用随机区组设计,包括 4 种处理:杉木萌生纯林、杉木萌条+木荷、杉木萌条+厚朴和杉木萌条+光皮桦,每个样地对应一个处理,面积为 30 m×25 m,3 次重复,共 12 块样地。所有样地均为阳坡,且位于坡的中部,试验前立地条件基本一致。在杉阔混交林样地中补植的阔叶树密度为 1 250 株·hm⁻²,杉木萌条的保留密度也为 1 250 株·hm⁻² 左右,杉木萌生纯林密度保持在 2 500 株·hm⁻²。试验用 3 种阔叶树均采用 2 年生实容器苗造林,平均苗高在 0.6~0.8 m,平均地径在 0.5~0.8 cm。前 3 年每年抚育 2 次,包括除杂和清除多余的杉木萌条。

1.3 样地调查

2022 年 11 月,对所有样地内林木进行每木检尺,调查样地内的树高、胸径和林分密度。根据调查数据,每个样地选取 6 株样木(根据平均胸径和树高,3 株杉木、3 株阔叶树),全株收获,按照叶、枝、皮、茎、根分别称取鲜重,然后每种器官取少量样本带回实验室,在 60 °C 下烘干至恒重,根据各器官含水率和林分密度,计算干生物量。

在每块样地的 4 个角和中心位置分别设置 1 m×1 m 的小样方, 全株收获小样方内的灌木和草本植物, 同时收集小样方内所有的地表凋落物。林下植被主要以金星蕨 *Parathelypteris glanduligera* 为主, 覆盖度 95% 以上。林下植被和凋落物称取鲜质量后带回实验室在 60 ℃ 下烘干至恒重。在每个样地内, 随机挖四个土壤剖面, 分别采集 0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 土层中土壤样品, 用于土壤有机碳含量分析; 同时在每层土壤中部用环刀采样, 用于土壤容重测定。

烘干后的林木各器官样本以及林下植被和凋落物样品粉碎过 1 mm 筛, 土壤样品自然风干后过 0.15 mm 筛。乔木各器官、林下植被、凋落物和土壤碳含量测定采用重铬酸钾氧化-外热法测定^[15]。

1.4 数据分析

乔木层(叶、枝、皮、茎、根总和)、林下植被层和凋落物层单位面积有机碳密度(以下简称碳密度, *TC*)估算公式为:

$$TC=B\times C$$

式中, *B* 为乔木层、林下植被层或凋落物层单位面积干生物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), *C* 为乔木层、林下植被层或凋落物层的有机碳含量(%)。

每一土层土壤碳密度(*SOC*)估算公式为:

$$SOC=C\times H\times B\times 10$$

式中, *H* 为土层厚度(cm), *B* 土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), *C* 有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 每个样地土壤层有机碳含量为 3 个土层的总和。

使用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 分析和处理数据。通过单因素方差分析比较不同林分乔木层、林下植被层、凋落物层和土壤层碳密度的差异, 并进行邓肯氏多重比较检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 林分生长特征

从表 1 可以看出, 厚朴的平均胸径最大, 木荷的平均胸径次之, 光皮桦的平均胸径最小, 3 种杉阔混交林中杉木的平均胸径均显著高于杉木纯林中杉木的平均胸径($P<0.05$)。光皮桦的平均树高显著低于其他树种($P<0.05$), 3 种杉阔混交林中杉木的平均树高均显著高于杉木纯林中杉木的平均树高($P<0.05$)。

表 1 不同林分生长状况
Tab. 1 Growth traits of different sample plots

林分	树种	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)
杉木+光皮桦	杉木	10.2±0.8b	11.5±1.0a	1 231±134
	光皮桦	8.5±1.2c	9.1±0.9b	963±165
杉木+木荷	杉木	10.3±1.1b	12.1±1.5a	1 196±151
	木荷	11.8±0.7a	10.9±1.2ab	1 159±128
杉木+厚朴	杉木	10.6±0.9b	11.7±0.8a	1 203±139
	厚朴	12.5±1.3a	11.3±1.5a	1 172±106
杉木	杉木	9.3±0.9c	10.5±1.1b	2 386±182

注: 表中同一列数据后的不同小写字母表示在不同树种之间差异显著($P<0.05$)。

2.2 乔木层碳密度

对不同林分乔木各器官碳密度的分析结果表明(表 2), 杉木+木荷和杉木+厚朴混交林树干、树皮和树枝碳密度高于杉木+光皮桦和杉木纯林, 尤其是树干碳密度分别比杉木纯林增加了 36.2%和 41.4%; 树叶和树根的碳密度均以杉木纯林最高, 杉木+光皮桦、杉木+木荷和杉木+厚朴混交林分别比杉木纯林减少了 40.6%、29.3%和 29.7%, 3 种混交林树叶和树根的碳密度接近。杉木+木荷和杉木+厚朴混交林乔木层总碳密度与杉木纯林之间没有显著差异, 但杉木+光皮桦林分乔木层总碳密度显著低于杉木纯林($P<0.05$)。相对于杉木纯林, 杉木+

木荷和杉木+厚朴混交林乔木层总碳密度分别增加了 2.7%和 6.6%, 而杉木+光皮桦则减少了 25.8%。此外, 相对于杉木纯林, 杉阔混交林增加了树干碳密度(杉木+光皮桦除外), 但减少了树根碳密度。

表 2 不同林分乔木层各器官碳密度
Tab. 2 Organic carbon density of different arbor organs in different sample plots

器官	杉木+光皮桦/(t·hm ⁻²)	杉木+木荷/(t·hm ⁻²)	杉木+厚朴/(t·hm ⁻²)	杉木/(t·hm ⁻²)
树干	15.31±2.15b	22.82±2.67a	23.69±2.95a	16.76±1.98b
树皮	0.91±0.13b	1.91±0.33a	2.17±0.15a	0.53±0.09c
树枝	2.62±0.35b	4.15±0.24a	4.68±0.46a	3.40±0.38ab
树叶	1.73±0.23b	2.03±0.29b	2.20±0.19ab	2.75±0.31a
树根	12.72±1.37b	15.14±1.85b	15.06±1.29b	21.42±2.34a
总计	33.29±3.05b	46.05±3.92a	47.80±2.94a	44.86±4.08a

注: 表中同一行数据后的不同小写字母表示各器官碳密度在不同林分之间差异显著(P<0.05)。

2.3 林下植被和凋落物层碳密度

尽管 3 种杉阔混交林与杉木纯林之间林下植被碳密度没有显著差异, 但杉木+光皮桦和杉木+厚朴混交林比杉木纯林林下植被碳密度分别增加了 27.5%和 19.7%, 而杉木+木荷比杉木纯林减少了 11.8%(图 1A)。3 种杉阔混交林凋落物碳密度均低于杉木纯林, 尤其是杉木+厚朴混交林与杉木纯林之间差异显著(P<0.05)(图 1B)。杉木+光皮桦、杉木+木荷和杉木+厚朴混交林凋落物碳密度分别比杉木纯林减少了 28.6%、13.5%和 32.5%。

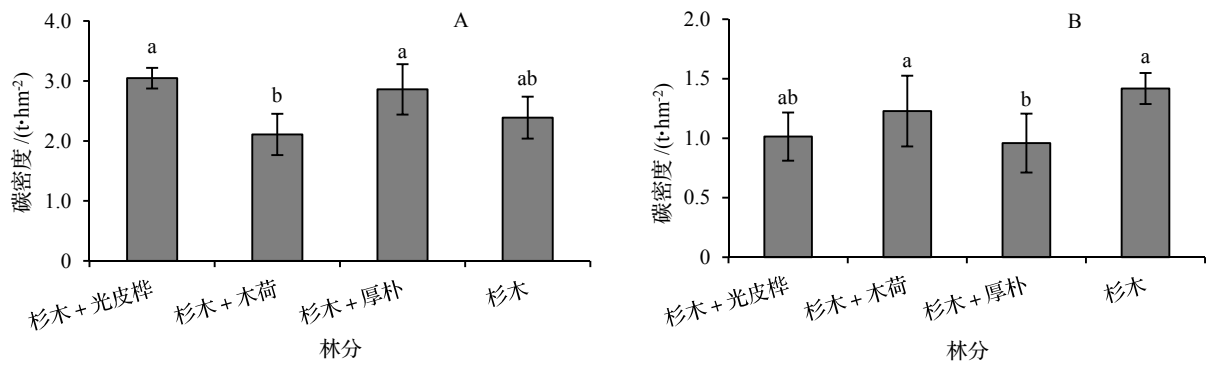


图 1 不同林分林下植被(A)和凋落物(B)碳密度

Fig. 1 Organic carbon density of understory vegetation and litter in different sample plots

2.4 土壤层碳密度

从表 3 可以看出, 0~10 cm 和 10~30 cm 土层仅杉木+厚朴混交林土壤有机碳密度显著高于杉木纯林(P<0.05), 30~50 cm 土层 3 种杉阔混交林与杉木纯林之间土壤有机碳密度均没有显著差异。0~50 cm 土层杉木阔叶树混交林土壤有机碳密度均高于杉木纯林, 仅杉木+厚朴混交林土壤有机碳密度与杉木纯林之间差异显著(P<0.05)。杉木+光皮桦、杉木+木荷和杉木+厚朴混交林 0~50 cm 总土壤有机碳密度分别比杉木纯林增加了 5.9%、8.6%和 21.7%。

表 3 不同林分土壤有机碳密度
Tab. 3 Soil organic carbon density in different sample plots

土壤深度/cm	杉木+光皮桦/(t·hm ⁻²)	杉木+木荷/(t·hm ⁻²)	杉木+厚朴/(t·hm ⁻²)	杉木/(t·hm ⁻²)
0~10	25.37±2.83b	27.53±1.87ab	30.66±2.69a	25.23±2.18b
10~30	29.50±1.74ab	28.20±1.57ab	32.63±1.63a	25.76±1.54b
30~50	18.82±1.08a	19.81±0.94a	21.36±0.76a	18.57±0.91a
总计	73.68±2.79ab	75.52±3.55ab	84.64±3.98a	69.55±2.86b

注: 表中同一行数据后的不同小写字母表示各器官碳密度在不同林分之间差异显著(P<0.05)。

2.5 林分碳密度组成特征

不同林分总碳密度及其组成特征见表 4。各林分总碳密度组成特征基本类似，均为土壤碳密度比例最高，其次为乔木层碳密度，林下植被和凋落物碳密度较低。各林分总碳密度大小顺序为（杉木+厚朴）>（杉木+木荷）>杉木纯林>（杉木+光皮桦）。相对于杉木纯林，杉木+木荷和杉木+厚朴混交林总碳密度分别增加了 5.7% 和 15.3%，而杉木+光皮桦混交林总碳密度则减少了 6.1%。

表 4 不同林分碳密度组成
Tab. 4 Component of organic carbon density in different sample plots

组分		杉木+光皮桦	杉木+木荷	杉木+厚朴	杉木
乔木	碳密度/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	33.29	46.05	47.80	44.86
	百分比/%	29.98	36.87	35.08	37.95
林下植被	碳密度/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	3.05	2.11	2.86	2.39
	百分比/%	2.75	1.69	2.10	2.02
凋落物	碳密度/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	1.01	1.23	0.96	1.42
	百分比/%	0.91	0.98	0.70	1.20
土壤	碳密度/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	73.68	75.52	84.64	69.55
	百分比/%	66.36	60.46	62.12	58.83
总计	碳密度/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	111.03	124.91	136.26	118.22
	百分比/%	100	100	100	100

3 讨论

多数研究表明，混交林具有更高的生产力，因而具有较高的碳汇潜力^[5]。本研究发现，二代杉木萌生林改造为杉阔混交林后短期内并未显著改变乔木层的碳密度，而且杉木+光皮桦混交林乔木层碳密度低于杉木纯林。杉木+光皮桦混交林的乔木层碳密度较低可能是因为杉木萌条前期生长较快，导致光皮桦在与杉木竞争中处于劣势，生长受到抑制。尽管杉木+木荷和杉木+厚朴混交林与杉木纯林之间乔木层总碳密度没有显著差异，但这 2 种杉阔混交林显著提高了树干碳密度，而根系碳密度则显著低于杉木纯林。这是因为杉木萌生纯林具有较大的根系，而杉阔混交林中部分杉木萌条被清除，新补植的阔叶树根系相对较小，从而导致杉木纯林根系碳密度高于杉阔混交林。由此可见，选择不同树种与二代杉木林混交对乔木层碳密度分配具有显著影响。其他一些研究表明，相对于杉木纯林，杉木+木荷和杉木+厚朴混交林增加了林分生物量和材积^[8-9]。但廖祥明等^[16]发现 7 年生杉木+木荷混交林与杉木纯林之间树干碳密度没有显著差异，而乔木层碳密度显著低于杉木纯林。这种差异可能与林龄和林分密度有关。

本研究中林下植被碳密度在杉阔混交林与杉木纯林之间没有显著差异，但杉阔混交林凋落物碳密度普遍低于杉木纯林。林下植被生长主要取决于林下光环境^[17]，林分郁闭后不同林分林下的光环境可能差异较小，因此导致林下植被碳密度没有显著差异。但杉阔混交林凋落物碳密度较低可能与针阔混合凋落物具有较高的分解速率有关，从而减少了凋落物生物量。其他的研究结果也证实，多树种混合凋落物的分解速率通常高于单一树木凋落物，因为凋落物多样性增加了碳源和营养物质供应的多样性和异质性，同时影响土壤的微生境和微生物活性，有利于促进凋落物分解^[18-19]。

我们发现总体上杉阔混交林土壤有机碳密度高于杉木纯林，这与现有的一些研究结果一致^[14]。同时，不同杉阔混交林之间也差异显著，尤其是杉木与厚朴混交更有利于提高土壤有机碳密度，这可能与厚朴作为落叶树种具有丰富的凋落物有关。杉木林中补植的光皮桦由于生长受到抑制，凋落物输入减少，导致相对于杉木纯林，杉木+光皮桦混交林中土壤有机碳积累效应较小。

杉木二代林内引入不同的阔叶树种显著影响杉阔混交林林分总碳密度及其组成特征。其他一些研究也表明，树种组成是影响森林碳汇能力的重要因素^[5]。对浙江省国有林场不同植被类型碳密度的分析显示，针阔混交林（ $92.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）碳密度高于杉木纯林碳密度（ $56.95 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）^[20]。此外，唐学军等^[14]研究表明，中亚热带 14 种典

型杉阔混交林林分总碳密度比杉木纯林碳密度增加 15% ~ 18%, 乔木层碳密度比杉木纯林碳密度增加 21% ~ 109%, 土壤层碳密度比杉木纯林碳密度增加 8% ~ 14%。然而本研究发现, 杉阔混交林林分总碳密度的增加主要来自于土壤碳密度的增大, 乔木层的碳密度与杉木纯林的碳密度接近。这种差异一方面与试验林分为杉木二代林有关, 另一方面, 可能受到试验林分林龄的影响。总体上, 选择适宜的阔叶树构建杉阔混交林有利于提高林分碳储量和固碳潜力。

4 结论

在杉木二代萌生林内引入阔叶树改造为杉阔混交林, 改变了林分总碳密度及其组成特征。杉木与厚朴混交对提升林分碳密度效果最佳, 主要与树干和土壤碳密度的增加有关, 这有利于木材生产和碳汇功能的协同提升, 是今后值得推广的杉阔混交模式。尽管如此, 为了更准确地评估森林生态系统碳储量, 有必要对不同杉阔混交林的碳密度开展长期动态监测。

参考文献

- [1] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 28–29.
- [2] 盛伟彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 1–14.
- [3] 夏丽丹, 于姣姐, 邓玲玲, 等. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(2): 37–42.
- [4] 郭佳欢, 孙杰杰, 冯会丽, 等. 杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 801–809.
- [5] 李婷婷, 吴水荣, 王林龙, 等. 国内外混交林研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(5): 42–48.
- [6] FENG YUHAO, SCHMID BERNHARD, LOREAU MICHEL, et al. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions[J]. Science, 2022, 376: 865–868.
- [7] 戴俊, 陈琴, 陈代喜, 等. 杉木与阔叶树混交林初期生长效应分析[J]. 广西林业科学, 2021, 50(1): 18–21.
- [8] 张莉. 杉木-厚朴人工混交林与杉木纯林生物量对比[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(9): 55–56.
- [9] 何善飞. 杉木、木荷纯林及其混交林生长状况和病虫害调查分析[J]. 南方农业, 2022, 16(18): 82–84.
- [10] HUANG Y, CHEN Y, 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.
- [11] CHEN S, WANG W, XU W, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proc Nat Acad Sci, 2018, 115(16): 4027–4032.
- [12] FINEGAN B, PEÑA-CLAROS M, OLIVEIRA A, et al. Does functional trait diversity predict above-ground biomass and productivity of tropical forests? testing three alternative hypotheses[J]. J Ecol, 2015, 103: 191–201.
- [13] 张骏, 葛滢, 江波, 等. 浙江省杉木生态公益林碳储量效益分析[J]. 林业科学, 2010(6): 22–26.
- [14] 唐学君, 肖舜祯, 王伟峰, 等. 中亚热带典型杉阔混交林碳储量分配特征[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(4): 111–114, 121.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析: 第3版[M]. 北京: 中国农业出版社: 2000: 30–32.
- [16] 廖祥明. 杉木阔叶化改造对生态系统碳储量的影响[J]. 绿色科技, 2021, 23(24): 181–184, 187.
- [17] 胡冬冬, 唐丹, 王文欢, 等. 人工林林下植被演替及其人为影响因子[J]. 山西农业科学, 2018, 46(3): 471–475.
- [18] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 213–223.
- [19] 张悦, 张艺凡, 马怡波, 等. 森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展[J]. 环境生态学, 2023, 5(4): 45–56.
- [20] 蒋静俭, 李子睿, 牛明月, 等. 浙江省国有林场森林植被固碳释氧服务功能价值评估[J]. 林业资源管理, 2022(S1): 66–71.