

林木生物炭施加对东方杉苗木生长特性的影响

Effects of Woody Biochar Application on Growth Characteristics of *×Taxodiomeria peizhongii* Seedlings

陆 颖¹ 韩玉洁^{2*} 张文文³
LU Ying¹ HAN Yujie^{2*} ZHANG Wenwen³

(1.上海市崇明区林业站, 上海 202150; 2.上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 3.上海市林业总站, 上海 200072)
(1. Chongming District Forestry Station, Shanghai, China, 202150; 2. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai, China, 200232; 3. Shanghai Forest Station, Shanghai, China, 200072)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0112-07
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 07. 0112. 013
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-05-06
修回日期: 2025-05-21

摘 要

为系统解析林木生物炭施用对盐碱土东方杉(*×Taxodiomeria peizhongii*) 苗木生长的影响。以1.5年生东方杉幼苗为试验材料, 设置对照(CK)、生物炭(B)、林木废弃物(W)、林木废弃物与生物炭混合物(WB)4组处理, 通过连续360天的定位观测, 定量分析不同处理对东方杉地上部生长指标(地径、株高、冠幅)和根系形态指标(数量、总长、表面积、体积)的差异化影响。综合运用植物生长指数法(Plant Growth Index, PGI)与根系参数修正的生物量扩展因子法(Biomass Expansion Factor, BEF), 构建多维评估体系。试验结果显示: B组地径生长量较CK组显著提升24.86% ($p < 0.05$), 株高与冠幅虽呈增长趋势但未达显著水平; WB组未显现显著促生效应。根系发育对生物炭的响应较地上部更为敏感, 其中B组根根表面积与体积分别较CK组显著增加287.16%和376.75%, WB组对应增幅为76.01%和97.19%, W组增幅分别为54.82%和58.12%。PGI评估表明, B组综合生长指数(4.28)显著高于WB组(2.34)、W组(2.15)及CK组(2.09) ($p < 0.05$)。经根系体积比较正后, BEF模型测算显示B组单株生物量达 1.05 ± 0.35 kg, 较CK组提升133.05% ($p < 0.05$), 与PGI评估结论形成互证。以上结果表明林木生物炭对东方杉生物量积累具有显著增益效应, 并创新性提出基于根系形态参数的BEF修正模型, 为土壤改良措施背景下林木碳汇计量提供方法学支撑。

关键词

林木生物炭; 东方杉; 生物量; 植物生长指数; 生物量扩展因子法

Abstract

To systematically analyze the effects of woody biochar application on the growth of *×Taxodiomeria peizhongii* seedlings in saline-alkali soil, 1.5-year-old *×Taxodiomeria peizhongii* seedlings were utilized as experimental material. Four treatment groups were established: control (CK), biochar (B), woody waste (W), and woody waste-biochar mixture (WB). Over a duration of 360 days of continuous field observations were conducted, during which quantitative analyses were performed to assess the differential effects of these treatments on aboveground growth parameters (including ground diameter, plant height, crown width) as well as root growth indices (such as number, total length, surface area, volume) of the seedlings. A multidimensional evaluation system was constructed by integrating the Plant Growth Index (PGI) method and the Biomass Expansion Factor (BEF) method, modified to incorporate root parameters. Experimental results demonstrated that the B group exhibited a 24.86% significant increase in ground diameter growth compared to the CK group ($p < 0.05$). At the same time, plant height and crown width showed growth trends that did not reach statistical significance. The WB group did not display significant growth-promoting effects. Root system development responded more sensitively to biochar than aboveground parts: the B group showed 287.16% and 376.75% significant increases in root surface area and volume, respectively, compared to the CK group, whereas the WB group exhibited 76.01% and 97.19% increases, and the W group showed 54.82% and 58.12% increases. PGI evaluation revealed that the comprehensive growth index of the B group (4.28) was significantly higher than those of WB (2.34), W (2.15), and CK (2.09) ($p < 0.05$). After correction by root volume ratio, the BEF model estimated the biomass per plant in the B group to be 1.05 ± 0.35 kg, representing a 133.05% increase over the CK group ($p < 0.05$), corroborating the PGI assessment. This study confirm the significant biomass accumulation enhancement effect of woody biochar on *×Taxodiomeria peizhongii* and innovatively proposes a BEF correction model based on root morphological parameters, providing methodological support for carbon sequestration quantification in forest ecosystems under soil amendment practices.

Keywords

woody biochar; *×Taxodiomeria peizhongii*; biomass; Plant Growth Index; Biomass Expansion Factor method

陆 颖

1986年生/女/上海人/工程师/研究方向为森林资源监测与管理

韩玉洁

1977年生/女/广西都安人/硕士/正高级工程师/研究方向为森林生态学和城市生态学

张文文

1990年生/女/江苏徐州人/硕士/工程师/研究方向为生态定位监测与评价

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yujie_han@foxmail.com

基金项目:

上海市“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项项目“林木废弃物高值转化耦合能源增值利用关键技术开发与示范”(编号: 22dz1208200)

林木废弃物的形成源于城市林业经营管理过程中树木的自然凋落、森林抚育、采伐及修剪等作业环节，其本质为植物生命活动的代谢副产物，具体包含乔木与灌木的枝干、枯落物及凋落叶等植物残体，在专业领域通常被定义为园林绿化废弃物^[1]。据上海市绿化和市容管理局统计数据显示，2020年度全市林木废弃物总量已逾百万吨级规模，初步计量达105.4万^[2]。针对此类生物质资源，传统填埋与焚烧处置方式不仅导致氮、磷等营养元素的循环中断，更会引发次生土壤污染及大气污染物排放等环境问题，造成显著的资源价值流失^[3]。当前主流的资源化利用途径主要包括：制备有机覆盖物、开发生态复合材料^[4]以及进行堆肥化/有机肥转化^[5]三个技术方向，然而受制于技术转化效率、经济成本控制及市场接纳度等因素，实际产业化规模仍显不足。相关研究证实，2017年上海市此类废弃物的资源转化效率仅维持在20%左右^[6]。如何构建科学高效的林木废弃物处理体系，实现生物质资源的全量化循环利用，已成为循环经济范式下亟待攻克的关键科学问题。

生物炭作为一种富含碳元素的固态多孔材料，在土壤改良领域展现出多重环境效益。其碳含量（60% ~ 80%）及芳香化结构特征赋予其百年尺度的碳封存潜力^[7]。该材料的多级孔隙结构可有效改善土壤团聚体稳定性，增强土壤持水保肥能力；其表面丰富的官能团（如羧基、酚羟基等）可调节土壤pH值并促进养分形态转化^[8]。Bouqbis等^[9]的田间试验表明，施用15%坚果壳生物炭与堆肥的复合基质可使砂质土壤的阳离子交换量提升38%，速效磷含量增加2.3倍，同时促使藜麦生物量提高62%。Rumpa等^[10]研究发现，40 t/hm²的水葫芦生物炭施用量可使壅菜根际变形菌门丰度增加27%，显著促进固氮菌群定殖，最终实

现18%的产量提升。Gao等^[11]的长期定位试验证实，稻壳生物炭（pH值为9.2）能连续5年降低土壤氮素淋失量41% ~ 53%，该效应与生物炭对土壤脲酶活性的抑制作用呈显著相关性。中国森林生态系统每年产生约3.8亿t林木废弃物，这些富含有机质^[12]的林木生物质资源是制备生物炭的理想原材料。然而，现有研究多集中于玉米、水稻等大田作物的生物量响应机制，而对林木幼苗的生理生态响应研究仍存在显著空白。

本研究于2023年4月在上海市崇明区盐碱地低效林上实施，采用完全随机区组设计，设立4个处理组：空白对照组、单施林木生物炭组、单施林木废弃物，以及生物炭与废弃物复合施用组。通过定期测量植株地径、株高、冠幅扩展度及根系生长情况（包括根数目、体积等指标），系统解析不同处理对盐碱土东方杉苗木生长的调控效应。本研究通过为期一年对东方杉幼苗不同生长指标的测定及分析，以期对林木生物炭在盐碱土东方杉林木应用的可行性提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

上海市崇明区地处长江三角洲冲积洲岛，地势平坦，整体呈现西北高、东南低的地貌特征。该区域属北亚热带季风气候，温和湿润。2023年，年平均气温16.5℃，月均温变化幅度介于4.1℃（1月）至28.8℃（7月）之间，年均降水量1 441.0 mm，降水季节性分布显著，主要集中在5-9月汛期^[13]。本研究区域本底土壤（0 ~ 20 cm）的理化性质情况详见表1。

1.2 试验材料制备

试验材料采集与处理：本研究系统采集崇明区香樟（*Camphora officinarum*）、女贞（*Ligustr-*

表1 土壤理化性质
Tab. 1 Soil physical and chemical properties

指标 Index	数值 Value
土壤容重/（g/cm ³ ）	1.35
土壤总孔隙度/%	36.14
土壤紧实度/kPa	1 039.25
土壤pH值	8.34
土壤EC值/（mS/cm）	1.37
速效氮含量/（mg/kg）	92.26
全碳含量/（g/kg）	23.12
有机碳含量/（g/kg）	13.84
惰性有机碳含量/（g/kg）	6.89
速效磷含量/（mg/kg）	5.67
速效钾含量/（mg/kg）	152.72

um lucidum)、红叶李（*Prunus cerasifera* ‘Pissardii’）及荷花玉兰（*Magnolia grandiflora*）等典型林分的抚育剩余物，以直径≤5 cm的枝干材料为主，经粉碎后进行均质化处理，并通过晾晒调控含水率至30%以下备用。

生物炭制备工艺：采用同济大学自主研发的撬装式“零能耗”连续炭化装置，在500 ~ 600℃高温及缺氧条件下，进行热解处理，获得林木生物炭产物。原料及衍生生物炭的关键理化参数如表2所示。

1.3 试验设计

本研究设置4种处理条件：对照组（CK，无任何处理）、单一生物炭处理组（B，生物炭施用量0.35 kg/m²）、单一林木废弃物处理组（W，林木废弃物施用量1.12 kg/m²）以及混合处理组（WB，林木废弃物施用量为0.56 kg/m²，生物炭施用量0.18 kg/m²）。采用完全随机区组设计，每个处理设置4个生物学重复，共计16个试验样方（4 m×5 m）。各处理组施用量按照单位面积林分抚育产出的林木废弃物量或炭化后的生物炭量同比例还田。所有物料均通过机械旋耕方式混入

表2 试验材料基础特性分析
Tab. 2 Analysis of basic characteristics of test materials

试验材料 Testing material	性质 Property	表征值 Value
林木废弃物	全碳含量	45.49%
	全氮含量	0.45%
	碳氮比 (C/N)	102.22
林木生物炭	全碳含量	72.35%
	全氮含量	1.17%
	碳氮比 (C/N)	61.84
	pH 值	9.16

0 ~ 20 cm 耕作层。

试验地原生林木生长状况欠佳，大部分已死亡，本试验开始前已实施伐除作业并全面整地。本试验开始于2023年4月，苗木选用1.5年生东方杉扦插苗，苗高60 ~ 80 cm，株行距1 m×1 m，栽植深度为20 ~ 25 cm，每个样方规范种植20株，定植后立即浇透定根水。

1.4 苗木生长指标测定与生物量计算

1.4.1 苗木生长动态监测

地上部分参数测定：在东方杉定植1 d (当天)、30 d、90 d、180 d、270 d、360 d，分6个时间节点，以一年为完整周期系统观测了样方内20株苗木的地径、株高及成活率等生长指标。

地下根系参数测定：采用AZR-100型活体根系监测系统结合微根管技术进行监测，以获取植物根系生长的动态图像，每个处理选取4株生长状况相似的东方杉幼苗作为观测对象。通过winRHINO tron专业分析软件对根系数量、总根长、平均根长、根投影面积、总表面积、平均根径以及根总体积进行了精确测定。根系数据采集间隔基本与地上部分同步(270 d除外)，共完成5个时间节点一年完整周期的观测。

1.4.2 苗木生物量估算

基于生物量扩展因子(Biomass Expansion Factor, BEF)法，构建适用于东方杉苗木的地上生物量(Aboveground Biomass, AGB)和全株生物量(Total Tree Biomass, TTB)计算模型。计算见公式(1)。

$$B = V \times D \times F \times (1 + R) \quad (1)$$

式中，*B*为单株生物量(g)，*V*为树干材积(m³)，*D*为木材基本密度(g/cm³)，*F*表征生物量扩展因子，*R*为植物地下生物量与植物地上生物量的比率。通过上海地区适用的二元材积方程，基于胸径和树高数据计算单株材积。继而结合*D*和*F*将材积转换为地上生物量，最后通过*R*值推算地下生物量。

鉴于试验对象为幼龄苗木，传统材积测算方法存在适用性限制，本研究假设东方杉幼苗为圆锥体几何模型。该模型仅需实测地径计量的圆锥体底面圆半径(*r*)和实测株高(*h*)为参数，相应得到单株幼苗材积(*V*)的计算公式(2)。

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times h \quad (2)$$

基于不同处理组根系生长参数的显著性差异(*p* < 0.05)，发现试验处理显著影响根系生物量积累。据此对原有公式进行适应性修正，建立处理效应参数化方程，见公式(3)(4)。

$$B_A = V \times D \times F \quad (3)$$

$$B_T = V \times D \times F \times (1 + R \times \frac{V_1}{V_2}) \quad (4)$$

式中，*B_A*为地上生物量；*V*为植株材积；*D*和*F*分别参照DB33/T 2416-2021中柳杉(父本)的木材密度和生物量扩展因子^[14]；*B_T*为全株生物量，*V₁*、*V₂*分别表示处理组与对照组根系体积。

因处理初期(前30天)苗木形态参数变异不明显，生物量模型适用性不足，故重点分析处理270 ~ 360 d期间的生物量动态变化。

1.4.3 苗木生长综合评价

植物生长指数(Plant Growth Index, PGI)采用多指标归一化方法计算^[15]，见公式(5)。

$$S_i = \frac{X}{X_{\max}} \quad (5)$$

式中，*S_i*是因子*i*的线性分数，从0到1变化，*X*表示测量值，*X_{max}*是因子*i*的最大平均值。使用PGI面积方法计算GI，方法是比较包含所有植物参数的雷达图的面积，见公式(6)。

$$I = 0.5 \times \sum_i^n S_i^2 \times \sin(\frac{2\pi}{n}) \quad (6)$$

式中，*I*为PGI，*n*是所使用的参数或因子数。通过计算植物生长指数来综合反映东方杉生长状况。植物生长指标由地径、树高、东西冠幅、南北冠幅、根数目、总根长、根总表面积及总体积8个指标构成。

1.5 数据分析方法

试验数据经Microsoft Excel 2016进行预处理，计算各参数均值及标准差。采用IBM SPSS Statistics 26.0实施单因素方差分析(One-way ANOVA)，并用Duncan法进行多重比较(*α*=0.05)。

表3 不同处理下东方杉地径、苗高、冠幅的变化
Tab. 3 Changes in diameter, seedling height, and crown width of *× Taxodiomeria peizhongii* under different treatments

指标 Index	处理 Treatment	施用时间 Application time					
		1 d	30 d	90 d	180 d	270 d	360 d
地径 /mm	CK	10.7 ± 0.36	11.26 ± 0.47	13.07 ± 0.82	13.98 ± 1.38a	14.06 ± 1.72a	14.36 ± 1.73a
	B	10.91 ± 0.11	11.66 ± 0.24	13.11 ± 0.78	15.07 ± 1.87b	15.35 ± 2.1b	15.48 ± 2.02b
	WB	10.85 ± 0.23	11.61 ± 0.17	12.94 ± 0.65	13.82 ± 1.01a	14.17 ± 1.18a	14.26 ± 1.13a
	W	10.76 ± 0.44	11.34 ± 0.36	12.69 ± 0.78	13.52 ± 0.82a	13.79 ± 0.92a	14.01 ± 0.83a
株高 /cm	CK	93.46 ± 4.22	95.62 ± 2.37	92.47 ± 8.59a	96.44 ± 16.29b	99.01 ± 15.52ab	97.25 ± 14.65ab
	B	94.14 ± 5.83	96.24 ± 4.77	90.25 ± 7.99ab	105.94 ± 19.65a	106.58 ± 19.67a	105.82 ± 19.64a
	WB	93.44 ± 4.84	95.45 ± 5.03	86.28 ± 8.71b	92.02 ± 12.52b	96 ± 11.36b	93.05 ± 9.41b
	W	95.79 ± 1.7	97.38 ± 4.09	92.28 ± 4.99a	99.72 ± 13.1ab	101.82 ± 12.99ab	100.65 ± 11.1ab
冠幅 /m ²	CK	0.44 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.59 ± 0.02ab	0.54 ± 0.02	0.43 ± 0.02
	B	0.41 ± 0.02	0.5 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.81 ± 0.02a	0.69 ± 0.02	0.54 ± 0.02
	WB	0.43 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.41 ± 0.02	0.53 ± 0.02b	0.47 ± 0.02	0.41 ± 0.02
	W	0.46 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.57 ± 0.02ab	0.51 ± 0.02	0.36 ± 0.02

注：同列数据后不同小写字母表示相同处理时间下不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)，相同小写字母表示差异不显著 ($p > 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 林木生物炭施用对东方杉地上生长指标的影响

生物炭处理显著促进了东方杉地径、株高及冠幅的增长，显示出其在木本植物生长调控中的作用。观测数据显示，各处理组在施用后90 d内未呈现显著性差异 ($p > 0.05$)。随着处理时间延长至180~360 d，生物炭处理组地径值较对照组出现显著性差异 ($p < 0.05$)。周年生长周期结束时，地径增长呈现明显梯度特征：B组 (4.57 mm) > CK组 (3.66 mm) > WB组 (3.41 mm) > W组 (3.25 mm) (表3)，该梯度关系表明单施生物炭对地径发育具有特异性促进效应，而混合施用模式未表现出显著协同作用。处理360 d后，B组株高均值达峰值 (105.82 cm)，较WB组 (93.05 cm)、CK组 (97.25 cm) 及W组 (100.65 cm) 分别提高13.72%、8.81%和5.14%。冠幅扩展趋势与株高生长规律一致，具体表现为B组 (0.54 m²) > CK

组 (0.43 m²) > WB组 (0.41 m²) > W组 (0.36 m²)。综合结果表明，单施生物炭对东方杉的地径、株高和冠幅均有一定的促进作用，其中地径指标的响应最为显著。

2.2 林木生物炭施用对根系生长的形态学影响

通过根系监测系统连续观测不同处理组根系形态参数动态变化 (表4)。实验数据显示，随处理时间延长，各处理组根系数量、总根长、平均根长及平均根径均呈显著增长趋势。处理周期达360 d时，各形态学指标排序为：B组 > WB组 > W组 > CK组。统计学分析显示，生物炭处理组根总表面积和根总体积分别达到对照组的3.87倍和4.77倍，差异达极显著水平 ($p < 0.01$)。混合处理组两项参数分别为对照组的1.76倍和1.97倍，虽显著低于单一生物炭处理，但仍表现出明显促生效应。值得注意的是，单独施用林木废弃物虽使根总表面积和根总体积的均值分别提高

54.82%和58.12%，但经Duncan多重检验未达统计学显著水平。

2.3 林木生物炭施用对植物生长指数的影响

PGL作为评估植物生长状态与健康水平的综合量化指标，在本研究中被应用于系统评价东方杉的生长发育特征。该指数通过整合地径、树高、东西冠幅、南北冠幅、根系数目、总根长、根系总表面积及总体积等8项形态指标构建而成。实验数据显示，各处理组的PGL值呈现显著递减趋势：4.28 (B组) > 2.34 (WB组) > 2.15 (W组) > 2.09 (CK组) (图1-a)。值得注意的是，生物炭处理组的PGL值较对照组提高约100%，而其余处理组间未呈现统计学显著差异。进一步分析表明，生物炭处理组在所有8项形态指标上均表现出最优值，其中根系数数 (根系数目、总根长、根表面积和总体积) 的贡献度更为显著 (图1-b)。上述结果证实林木生物炭的施用能有

表4 不同处理下东方杉根系指标参数时序变化
Tab. 4 Time series changes of morphological parameters of the root system of *Taxodiomeria peizhongii* under different treatments

指标 Index	处理 Treatment	施用时间 Application time				
		1 d	30 d	90 d	180 d	360 d
根系数量 / 个	CK	0.00±0.00	0.00±0.00	0.25±0.43b	1.00±0.71b	2.5±0.50b
	B	0.00±0.00	0.50±0.50	1.50±0.50a	2.75±1.3a	5.25±0.83a
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00	0.25±0.43b	1.50±0.50b	3.25±0.43b
	W	0.00±0.00	0.25±0.43	0.50±0.87b	1.75±0.83b	3.00±0.71b
总根长 /mm	CK	0.00±0.00	0.00±0.00b	1.29±2.24b	6.56±5.94b	29.14±4.06c
	B	0.00±0.00	4.17±4.63a	11.91±3.35a	34.04±10.23a	85.79±11.61a
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00b	1.12±1.94b	18.26±6.96b	45.82±4.83b
	W	0.00±0.00	1.43±2.47b	3.83±6.63b	17.81±7.01b	41.24±11.42b
平均根长 /mm	CK	0.00±0.00	0.00±0.00	1.29±2.24b	4.53±2.92b	12.02±2.32b
	B	0.00±0.00	4.17±4.63	8.31±2.47a	13.91±3.27a	16.40±0.43a
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00	1.12±1.94b	12.00±0.98a	14.16±0.73ab
	W	0.00±0.00	1.43±2.47	1.92±3.32b	10.57±1.69a	13.62±0.64ab
平均根径 / (mm/10)	CK	0.00±0.00	0.00±0.00b	0.53±0.91b	2.92±1.71b	4.39±0.37
	B	0.00±0.00	1.82±1.83a	5.10±1.24a	5.36±0.82a	5.79±0.16
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00b	0.80±1.39b	4.86±0.44a	4.90±0.20
	W	0.00±0.00	0.86±1.49b	1.00±1.74b	4.54±0.14a	4.76±0.19
根总表面积 /mm ²	CK	0.00±0.00	0.00±0.00b	0.86±1.49b	8.18±7.51c	40.26±7.10c
	B	0.00±0.00	4.64±4.97a	19.29±7.46a	54.76±10.84a	155.87±21.01a
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00b	1.13±1.95b	28.51±12.71b	70.86±10.36b
	W	0.00±0.00	1.54±2.68ab	4.82±8.35b	25.07±9.16b	62.33±19.56bc
根总体积 /mm ³	CK	0.00±0.00	0.00±0.00	0.05±0.08b	0.85±0.79c	4.99±1.04c
	B	0.00±0.00	0.42±0.43	2.72±1.53a	7.63±0.96a	23.79±3.68a
	WB	0.00±0.00	0.00±0.00	0.09±0.16b	3.74±1.98b	9.84±2.03b
	W	0.00±0.00	0.13±0.23	0.51±0.88b	2.93±1.05bc	7.89±2.85bc

注：同列数据后不同小写字母表示相同处理时间下不同处理间差异显著 ($p<0.05$)，相同小写字母表示差异不显著 ($p>0.05$)。

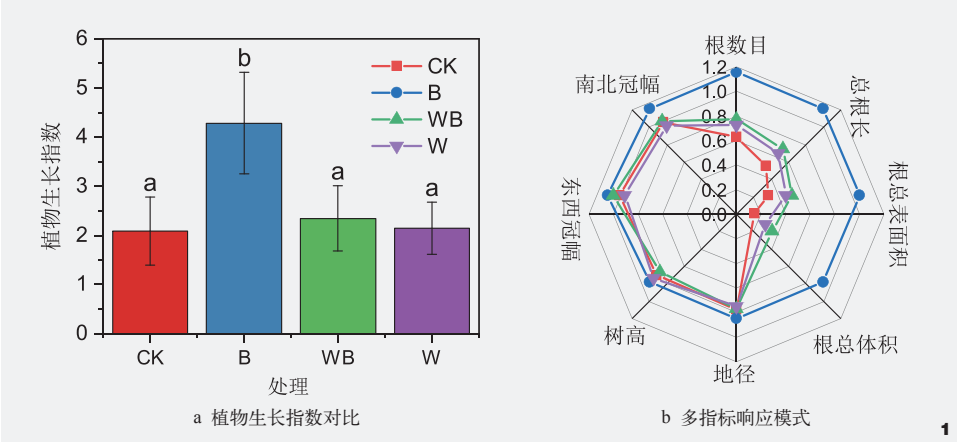


图1 东方杉地上部与根系生长参数对林木废弃物及生物炭处理的响应特征雷达图
Fig. 1 Radar map of response characteristics of aboveground and root growth parameters of oriental fir to forest waste and biochar treatments

效促进东方杉的形态建成，且该促生效应主要通过调控根系发育机制实现。

2.4 林木生物炭施用对东方杉生物量的影响

BEF法作为森林植被生物量估算的经典方法，本研究依据《城市绿化碳汇计量与监测技术规程》(DB33/T 2416-2021)^[14]建立二元回归方程进行东方杉生物量测算。数据显示，处理270 d与360 d时，各处理组生物量均值维持在0.5 kg左右，其中生物炭处理组生物量虽略高于其他处理组，但组间差异未达统计学显著水平(图2-a)。

鉴于根系体积指标在组间呈现显著变异，本研究采用各处理组根系总体积比值为权重对原二元方程进行校正。校正后结果显示：360 d试验周期后，各处理组东方杉生物量排序为B组(1.05 kg) > WB组(0.55 kg) > W组(0.50 kg) > CK组(0.45 kg) (图2-b)。其中，生物炭处理组生物量较对照组显著提升133.05% ($p<0.05$)；而混合处理组与废弃物处理组较对照组的生物量增量未达显著水平，该趋势与基于植物生长指数的分析结论具有一致性。

3 讨论

3.1 生物量扩展因子法在林木生物量计算中的修正研究

BEF法作为基于林木可测属性(地径、胸径、树高等)估算单株或林分生物量的经典方法，其核心机理在于建立生物量与木材体积间的转换系数，通过材积模型实现生物量的间接推算^[16]。该方法因具备操作便捷、经济高效等优势，在森林碳汇计量及生态系统服务评估领域具有广泛应用价值，特别是在大尺度研究中缺乏直接生物量实测数据时更具实践意义^[17]。然而，本研究发现传统BEF

法仅依据地上部分生长参数（如树高、地径）进行生物量估算存在显著局限性。实验数据显示：生物炭处理组根系体积较对照组增加376.75% ($p < 0.05$)，而传统BEF法计算所得地上生物量差异不足10%，这揭示了植物地上与地下器官对处理措施的响应存在空间异质性。这种根冠生长的非同步性导致传统BEF法的生物量估算产生系统性偏差，特别是在土壤改良措施影响下更为显著。

针对该局限性，本研究提出基于根系体积比值的动态修正模型。基于试验结果发现，不同处理组根系生长参数存在显著性差异，即试验处理显著影响根系生物量积累。若不对BEF进行修正，根系生物量的积累差异无法得到体现。通过建立不同处理组与对照组根系总体积的权重函数，对BEF法估算的地下生物量进行非线性校正。修正后，生物炭处理组总生物量达到对照组的2.33倍 ($p < 0.01$)，与PGL的评估结果高度吻合，验证了修正方法的有效性。该修正方法有效解决了传统BEF法对根系生长异质性响应的忽略问题，为量化土壤改良措施对植物生物量的影响提供了新的方法学框架。

3.2 林木生物炭促进东方杉生长的原因分析

生物炭作为农林废弃物的热解产物，通过改善土壤理化性质及调节微生物群落结构，对植物生长产生多维度促进作用^[8]。首先，生物炭能够通过调节土壤的水分和温度来促进植物生长。在绿色屋顶的研究中，添加污泥生物炭显著增加了基质的水分含量，调节了基质温度，从而促进了植物生长^[18]。此外，生物炭的应用还可以通过改善土壤的物理结构和提高养分利用效率来增强植物生产力^[19]。其次，生物炭在缓解土壤盐碱胁迫方面也表现出积极作用。研究发现，生物炭

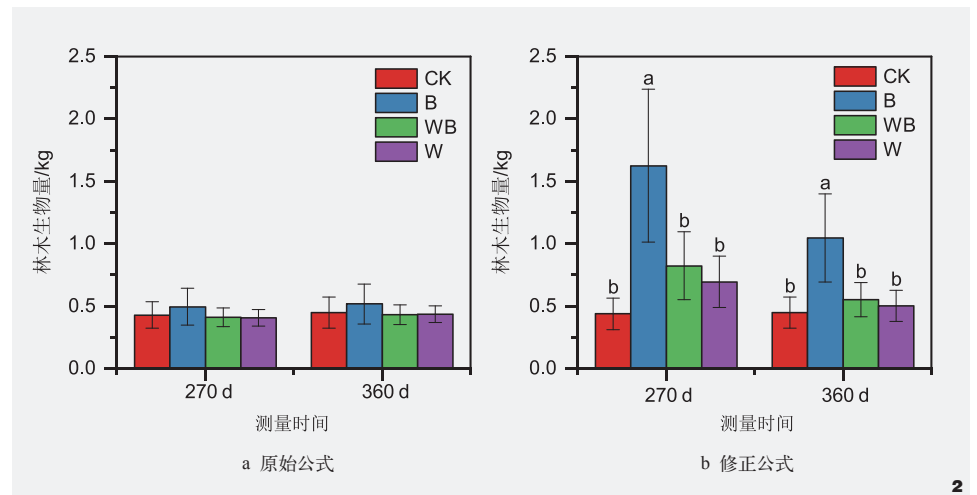


图2 不同处理组在270 d与360 d观测周期的林木生物量对比
Fig. 2 Comparison of forest biomass between different treatment groups during 270 d and 360 d observation periods

与蚯蚓堆肥的结合使用能够促进杂交狼尾草在盐胁迫下的生长，提高叶片色素含量和光合作用效率，同时提高土壤酶活性^[20]。类似地，生物炭在缓解豆科植物在盐碱和干旱胁迫下的生长抑制方面也表现出显著效果^[21]。此外，生物炭还可以通过改变土壤微生物群落来促进植物生长。在一项关于生物炭和植物生长促进根际细菌的研究中，生物炭与植物生长促进菌的结合使用显著提高了番茄的生长和产量^[22]。本研究表明：生物炭处理使东方杉生物量提升133.05%。生物炭对树木地上与地下生长表现出双重促进效应。对地上生物量指标的时序分析显示，处理180 d时生物炭处理组地上生物量均值为对照组的1.09倍，至360 d扩大至1.11倍。先前的研究表明，生物炭处理通过优化土壤孔隙结构和提高氮素有效性促进植物细胞分裂与径向生长^[23]，这可能是林木生物炭促进东方杉地径增长的重要因素。值得注意的是，单纯施用木质废弃物对地上生长无显著影响，这可能与木质素类物质的缓释矿化特性导致的养分释放滞后效应有关^[24]。

相较于地上部分，根系对生物炭的响应更为显著。处理360 d后，生物炭处理组根总表面积和体积分别是对照组的3.87倍和4.77倍。生物炭对根系生长的促进作用可能涉及多重机制：（1）生物炭的多孔结构为根系提供了物理保护^[25]；（2）生物炭表面官能团（-COOH、-OH）能吸附根系分泌物中的酚酸类抑制物^[26]；（3）高阳离子交换量固持 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子，形成根际养分缓释库^[27]。进一步的计算发现，生物炭处理组根冠比从180 d的0.32增至360 d的0.51。短期来看，在生物炭介导的胁迫缓解初期，植物通过增加根系生物量分配，从而扩大资源获取范围，这符合“最优分配理论”的资源调控规律^[28]。长期而言，生物炭的持久性（半衰期 ≥ 100 年）可能持续优化根系构型^[29]，持续促进根系生长。但需注意，生物炭表面官能团在老化过程中会发生氧化修饰^[30]，可能改变其吸附特性与微生物互作模式，从而影响其对植物生长促进作用。因此需通过多年定位试验来验证林木生物炭对东方杉地上部及根系生长的影响。

4 结论

本研究通过原位控制试验系统探究了林木生物炭对东方杉苗木生长的影响。结果表明, 在360 d试验周期内, 林木生物炭施加可显著促进东方杉苗木地径生长(较对照组提升24.86%), 并促进根系生长, 其根表面积和根体积分别达到对照组的3.87倍和4.77倍, 从而驱动植株生物量显著积累。本研究创新性地构建了基于根系修正参数的生物量扩展因子法和植物生长指数, 实现了土壤改良措施下林木生长潜力的量化评估。研究成果不仅为人工林生态系统固碳增汇提供了理论依据, 同时为林木加工剩余物资源化利用技术体系优化及森林可持续经营决策支持系统构建奠定了方法学基础。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] FENG X, ZHANG L. Composite Additives Regulate Physicochemical and Microbiological Properties in Green Waste Composting: A Comparative Study of Single-period and Multi-period Addition Modes[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121677.

[2] 朱悦, 何晶晶, 章骅. 上海市园林废弃物产生与利用现状、难点及对策分析[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(03): 15-23.

[3] 李成, 康霄, 刘军, 等. 园林绿化废弃物资源化利用研究进展[J]. 山东林业科技, 2023, 53(04): 123-127.

[4] 王铨铨, 朱桓达, 郑昕宇, 等. 园林废弃物的饲料资源化利用[J]. 现代畜牧科技, 2022(12): 55-57.

[5] ADHIKARI S, MAHMUD P M, MOON E, et al. Comprehensive Life Cycle Assessment of Garden Organic Waste Valorisation: A Case Study in Regional Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 472: 143496.

[6] 唐玮. 枯枝落叶流向何方? 在上海, 每年约有80%绿化废弃物等待回收利用 | 铿锵奋进的脚步 续写春天的故事[EB/OL]. 周到上海. (2021-04-02)[2024-11-21]. <https://static.zhoudaosh.com/39543A2FA1379278BBB25927CEF7CDF8D1F40539997ABAA6F12AD9141F5A26FE>

[7] JOHANNES L. A Handful of Carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.

[8] ZHU X, CHEN B, ZHU L, et al. Effects and Mechanisms of Biochar-microbe Interactions in Soil Improvement and Pollution Remediation: A Review[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 98-115.

[9] BOUQBIS L, DAOUD S, HARROUNI C M. Positive Effect of Biochar Derived from Argan Waste on Soil Nutrients and Growth of Three Plants[J]. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(07): 28-34.

[10] RUMPA J, NUTTAKORN I, PURIN C, et al. Alleviation of Soil Acidification and Modification of Soil Bacterial Community by Biochar Derived from Water Hyacinth Eichhornia Crassipes[J]. Scientific Reports, 2023, 13(01): 397-397.

[11] GAO X, YANG J, LIU W, et al. Effects of Alkaline Biochar on Nitrogen Transformation with Fertilizer in Agricultural Soil[J]. Environmental Research, 2023, 233: 116084.

[12] BOLDRIN A, Christensen H T. Seasonal Generation and Composition of Garden Waste in Aarhus (Denmark) [J]. Waste Management, 2009, 30(04): 551-557.

[13] 上海市崇明区统计局. 崇明统计年鉴(2024年)[EB/OL]. (2024-11-05)[2024-11-21]. <https://www.shcm.gov.cn/govxxgk/qtjj/2024-11-05/7f3cb5dd-c849-4a9c-926d-0f9125f068d1.html>

[14] 浙江省林业标准化技术委员会. DB33/T 2416-2021城市绿化碳汇计量与监测技术规程[S/OL]. (2021-12-24) [2024-11-21]. https://zjjcmpublic.oss-cn-hangzhou-zwynet-d01-a.internet.cloud.zj.gov.cn/jcms_files/jcms1/web3397/site/attach-1/2201041955282236127.pdf

[15] FENG W, ANTONIO RAFAEL SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, BILYERA N, et al. Mechanisms of Biochar-based Organic Fertilizers Enhancing Maize Yield on a Chinese Chernozem: Root Traits, Soil Quality and Soil Microorganisms[J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36: 103756.

[16] 傅煜, 雷渊才, 曾伟生, 等. 基于生物量转换因子法估计区域尺度生物量的不确定性评估方法: 中国, CN105303295A[P]. 2016-02-03.

[17] ARWICK R M. The Use of the Abundance/Biomass Comparison Method in Pollution Monitoring: Limitations and Alternatives[J]. Marine Pollution Bulletin, 1986, 17(05): 183-190.

[18] CHEN H, MA J, WEI J, et al. Biochar Increases Plant Growth and Alters Microbial Communities Via Regulating the Moisture and Temperature of Green Roof Substrate[J]. The Science of the Total

Environment, 2018, 635: 333-342.

[19] DAI Y, ZHENG H, JIANG Z, et al. Combined Effects of Biochar Properties and Soil Conditions on Plant Growth: A Meta-analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 713: 136635.

[20] SONG X, LI H, SONG J, et al. Biochar/Vermicompost Promotes Hybrid Pennisetum Plant Growth and Soil Enzyme Activity in Saline Soils[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 183: 96-110.

[21] RAJHI I, NEFISSI OUERTANI R, FERCHICHI N, et al. Biochar Alleviates Single and Combined Effects of Salinity and Drought Stress in Faba Bean Plants[J]. Photosynthetica, 2024, 62(02): 221-231.

[22] TRIPTI, KUMAR A, USMANI Z, et al. Biochar and Flyash Inoculated with Plant Growth Promoting Rhizobacteria Act as Potential Biofertilizer for Luxuriant Growth and Yield of Tomato Plant[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190: 20-27.

[23] WARNOCK D D, JOHANNES L, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal Responses to Biochar in Soil - Concepts and Mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007(1/2): 9-12.

[24] HE K, XU Y, HE G, et al. Combined Application of Acidic Biochar and Fertilizer Synergistically Enhances Miscanthus Productivity in Coastal Saline-alkaline Soil[J]. Science of The Total Environment, 2023, 893: 164811.

[25] 杨敏, 明东, 段杰, 等. 生物炭对连作烤烟根际土壤酚酸类物质及微生物群落结构的影响[J]. 福建农业学报, 2020, 35(01): 103-110.

[26] MAJOR J, LEHMANN J, RONDON M, et al. Fate of Soil-applied Black Carbon: Downward Migration, Leaching and Soil Respiration[J]. Global Change Biology, 2010, 16(04): 1366-1379.

[27] 冉继伟, 齐昕, 武栋, 等. 施用生物炭对土壤养分有效性和离子交换性能影响的整合分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(09): 1449-1459.

[28] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, et al. Biomass Allocation to Leaves, Stems and Roots: Meta-analyses of Interspecific Variation and Environmental Control[J]. New Phytologist, 2012, 193(01): 30-50.

[29] LEHMANN J, ITHACA, YORK N, et al. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation[J]. Science and Technology; Earthscan, 2015, 25(01): 15801-15811.

[30] CHENG C H, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of Black Carbon by Biotic and Abiotic Processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1477-1488.