

育苗基质施用生物炭对直干桉苗木生长的效应及其作用机制

刘 宇¹, 高成香¹, 孔令荣¹, 石 在¹, 万 辉², 杜官本², 曹子林³, 王晓丽^{1*}

(1. 西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学材料与化学工程学院, 云南 昆明 650224; 3. 西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

摘 要: 探究施用不同用量生物炭对直干桉幼苗生长量及其土壤酶活性的影响, 获得直干桉育苗最优基质, 为合理应用生物炭提供理论参考。以直干桉幼苗为研究对象, 在容器育苗基质中, 添加不同质量比的生物炭, 设置质量分数分别为 0 (CK)、2% (T1)、4% (T2)、6% (T3)、8% (T4) 和 10% (T5) 的 6 个梯度, 每个处理 3 次重复, 采用完全随机试验设计, 分析各处理直干桉幼苗的生长量、土壤化学性质和土壤酶活性。结果表明: (1) 4% ~ 6% 生物炭可提高直干桉幼苗生长量; (2) 施用生物炭不同程度地提高了直干桉基质的土壤养分, pH、有机质、全氮和速效钾随着生物炭施用量的增加, 其含量变化趋势一致为 T5>T4>T3>T2>T1>CK, 碱解氮、有效磷、阳离子交换量含量与 CK 相比, 分别显著提高 9.25%、119.51% 和 108.77%, 其他指标与 CK 差异不显著; (3) 土壤过氧化氢酶、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性随生物炭施用量的增加而降低, 土壤脲酶活性随生物炭施用量的增加而增加, 在生物炭施用量为 10% 时含量最高; (4) 不同添加处理直干桉幼苗养分指标有 4 个特征值大于 1 的主成分, 累计贡献率达 82.754%, 第一主成分主要的影响因子是过氧化氢酶; 第二主成分主要影响因子是全磷、有机质; 第三主成分主要影响因子是碱解氮; 第四主成分主要影响因子是全钾。总体上, 施用 4% ~ 6% 生物炭可显著提高直干桉苗木生长, 同时能提高育苗基质营养元素含量及主要土壤酶活性。

关键词: 生物炭; 土壤酶活性; 桉树; 基质; 营养元素

生物炭是有机物质在低氧条件下热解过程中热量转化产生的一种材料^[1]。生物炭是用木屑、木质颗粒和树皮、农业残留物、造纸污泥和甘蔗渣等原料生产^[2]。生物炭改良剂可增加土壤碳储量、保持土壤养分、提高作物产量和土壤质量, 并减少农田温室气体排放^[3-4]。据报道, 生物炭的低添加量通常会对各种作物产生积极影响, 但生物炭的高添加量则会抑制作物的生长量或生产力^[5]。生物炭已被提出用于固碳和提高土壤生产力并通过改变土壤化学性质, 包括 pH、阳离子交换能力和养分有效性^[6]。土壤酶来源于土壤中动植物和微生物细胞的分泌物及残体的分解等, 是土壤中最活跃的组分之一, 在有机质分解中发挥着积极作用^[7], 前人研

究表明, 在新疆地区的灰漠土和风沙土连作的棉田上施用生物炭, 能提高其根际土壤养分和微生物多样性^[8]。但也有研究报道, 树枝制备生物炭可以提高壤土和砂土中与氮磷循环相关的酶活性, 却降低了壤土中与碳循环有关的酶活性^[9]。目前关于生物炭对土壤酶活性影响的研究多集中于室内培养试验或短期的田间试验, 结果还不尽一致^[10]。可见, 生物炭对土壤酶活性的影响因其原料来源和土壤类型的不同而有较大差异。

桉树作为速生树种, 在中国种植历史悠久, 桉树的种植面积不断扩大。育苗基质决定育苗效果, 在生产加工中不仅需要考虑基质的性状是否优良, 还需要考虑材料运输是否轻便。生物炭为多孔结构, 质量轻, 具有保水保肥的作用, 能够改善土壤的理化特性, 提供植物所需的营养元素。目前, 已有大量关于生物炭应用于农林业生产的研究报道, 但将生物炭应用于桉树幼苗及其对育苗基质化学性质和酶活性影响的研究少有报道。对直干桉 (*Eucalyptus maideni* F.v. Muell.) 幼苗添加不同浓度的生物炭, 探讨生物炭对直干桉幼苗生长、土壤化学性质

收稿日期: 2024-04-22; 录用日期: 2024-05-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2201003); 云南省种业联合实验室项目 (202205AR070001-18); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2024Y575)。

作者简介: 刘宇 (1996-), 硕士在读, 主要从事与森林培育相关林地土壤改良方面的研究工作。E-mail: 1253442720@qq.com。

通讯作者: 王晓丽, E-mail: 1144607944@qq.com。

和土壤酶活性的影响,为直干桉幼苗的生长提供科学依据。

1 材料与方法

试验所用生物炭购自广西汇诚炭化有限公司,该产品采用荔枝木为原料,经过高温(450~500℃)厌氧条件下裂解而成。试验所用直干桉种子来自云南省楚雄州的优良单株,播种育苗及后续的相关试验处理(不同生物炭添加量的试验)在西南林业大学树木园内进行。本试验所用容器规格为18.5 cm×16 cm,材质为聚乙烯塑料。2023年4月开始完全随机区组试验,试验采用单因素(生物炭添加量)试验设计,设计6个水平,分别为0%(CK)、2%(T1)、4%(T2)、6%(T3)、8%(T4)和10%(T5),试验的田间排布按照完全随机区组,每处理3次重复,各重复30株,共计540株。育苗采用红土添加不同量生物炭拌匀作育苗基质,将混匀的育苗基质等量装填入容器中,然后进行播种育苗。

1.1 直干桉幼苗生长量测量及土壤采集

植株样品测量:于2023年10月测量直干桉幼苗,用卷尺测量每株的苗高、长短冠幅,并用游标卡尺测量每株地径。土壤样品采集:于2023年10月采集土壤样品,每个处理随机选取5株生长均匀的苗木,共30株,在育苗容器中距苗木5 cm处取3个点采集0~10 cm土样并混合均匀得到一个混合样,带回实验室后自然风干后磨碎、过0.15 mm筛后用于土壤养分和酶活性的测定。

1.2 土壤化学性质分析

pH测定:称取10 g过2 mm筛孔的风干土置于50 mL烧杯中并加入25 mL水(水土比为2.5:1),用磁力搅拌机剧烈搅拌2 min,静置30 min至上清液澄清时,用pH计于1 h内完成测定;有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-容量法测定;全磷(TP)样品经消煮后,通过无磷滤纸过滤后用钼锑抗比色法测定(UV-1600,紫外可见分光光度计);用酸溶火焰光度法测定全钾(TK);用碱解扩散法测定碱解氮(AN);用盐酸-氟化铵法测定有效磷(AP);用乙酸铵提取法测定速效钾(AK)^[11];采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定土壤阳离子交换量(CEC)^[12]。

1.3 土壤酶活性分析

β -葡萄糖苷酶(BG, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)采用硝基酚比色法;脲酶(URE, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)采用苯酚-次氯酸钠

比色法;蔗糖酶(SUC, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)采用3,5-二硝基水杨酸比色法;用高锰酸钾滴定测定过氧化氢酶(CAT, $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)^[7];用对硝基苯磷酸二钠比色法测定酸性磷酸酶(ACP, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13]。

1.4 数据处理

运用Excel 2021对测定的原始数据进行统计和处理,采用SPSS 23.0中的单因素方差分析方法研究不同处理对直干桉幼苗生长、土壤养分和酶活性的影响,通过最小显著性差异(LSD)法进行多重比较,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 和Pearson相关性分析以及主成分分析。并运用Origin 2021制图。

2 结果与分析

2.1 育苗基质中添加生物炭对直干桉幼苗生长的影响

由图1可知,T3处理直干桉幼苗的苗高、地径和长、短冠幅分别较CK升高26.09%、20.24%、50.00%、29.17%。T5处理直干桉幼苗的苗高、地径和长、短冠幅分别较CK降低6.52%、19.34%、24.14%、29.17%。说明10%生物炭施用量短期内会显著降低直干桉幼苗的生长量,直干桉幼苗施用适量生物炭可在短期内迅速改良其育苗土壤营养元素和酶活性等,从而改变直干桉幼苗根系对土壤养分的利用速率。

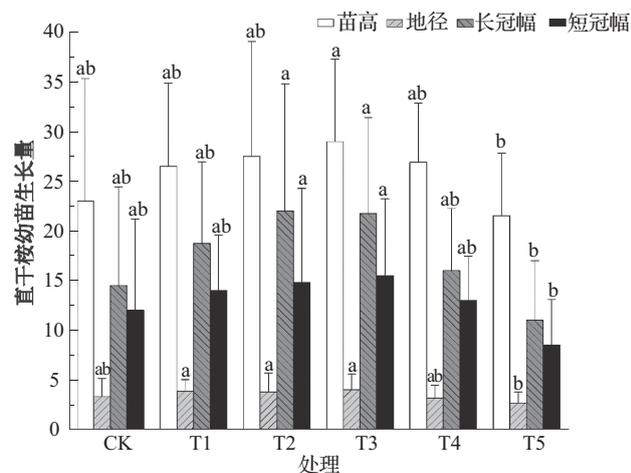


图1 施用生物炭对直干桉幼苗生长量的影响

注:苗高单位cm,地径单位mm,长冠幅单位cm,短冠幅单位cm;不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 育苗基质中添加生物炭对土壤化学性质的影响

在不同生物炭添加处理条件下,直干桉幼苗土壤各含量均表现出不同的变化规律及差异显著性(表1)。较CK相比,pH、SOM、TN和AK随着生物炭施用

表 1 施用生物炭对直干桉幼苗土壤营养元素含量的影响

处理	全氮 (g · kg ⁻¹)	全磷 (g · kg ⁻¹)	全钾 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	有机质 (g · kg ⁻¹)	阳离子交换量 (cmol · kg ⁻¹)	酸碱度
CK	1.19 ± 0.89b	1.14 ± 0.09a	11.69 ± 0.52a	49.93 ± 6.09b	7.71 ± 3.97b	121.02 ± 3.75c	16.36 ± 11.18d	3.30 ± 0.68c	4.19 ± 0.15d
T1	2.72 ± 0.39a	1.13 ± 0.14a	12.15 ± 1.29a	46.20 ± 9.68b	6.85 ± 5.83b	126.59 ± 5.05c	26.06 ± 11.90cd	3.01 ± 1.31c	5.14 ± 0.43c
T2	3.27 ± 0.32a	1.20 ± 0.12a	12.24 ± 1.20a	49.00 ± 10.44b	9.37 ± 1.91a	132.54 ± 5.89c	31.52 ± 8.80c	4.08 ± 0.78c	5.34 ± 0.49bc
T3	3.30 ± 0.93a	1.26 ± 0.16a	12.43 ± 1.15a	63.00 ± 14.76ab	14.41 ± 3.44a	141.57 ± 5.51b	35.61 ± 10.10bc	6.03 ± 1.12ab	5.47 ± 0.23bc
T4	3.27 ± 0.89a	1.31 ± 0.09a	12.57 ± 1.21a	57.96 ± 10.47ab	16.28 ± 4.08a	148.89 ± 8.83b	45.17 ± 6.71ab	6.90 ± 1.45a	5.66 ± 0.35b
T5	3.52 ± 1.17a	1.32 ± 0.18a	12.25 ± 1.23a	69.53 ± 24.16a	16.92 ± 1.66a	156.59 ± 6.35a	51.20 ± 7.04a	4.81 ± 1.23bc	6.34 ± 0.26a

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

量的增加，其含量变化趋势一致为 T5>T4>T3>T2>T1>CK、增幅分别为 22.71% ~ 51.34%、59.30% ~ 213.04%、129.59% ~ 196.85% 和 4.60% ~ 29.39% 并在 T5 时最高，其中除 T1 与 T2、T3 间无显著性差异，T2 与 T1、T3、T4 间无显著性差异，T3 与 T1、T2、T4 以及 T4 与 T2、T3 间无显著性差异，pH 在其他处理间则均有显著性差异 ($P < 0.05$)；AN、AP 含

量表现为 T3、T4、T5 与 CK 间存在显著差异，分别显著提高 26.17%、16.07%、39.25% 和 87.01%、111.25%、119.51%；CEC 表现为 T3、T4 与 CK 间存在显著差异，分别显著提高 82.46%、108.77%，其他指标与 CK 差异不显著。

2.3 育苗基质中添加生物炭对土壤酶活性的影响

由图 2 可知，在不同浓度生物炭处理下，CAT、

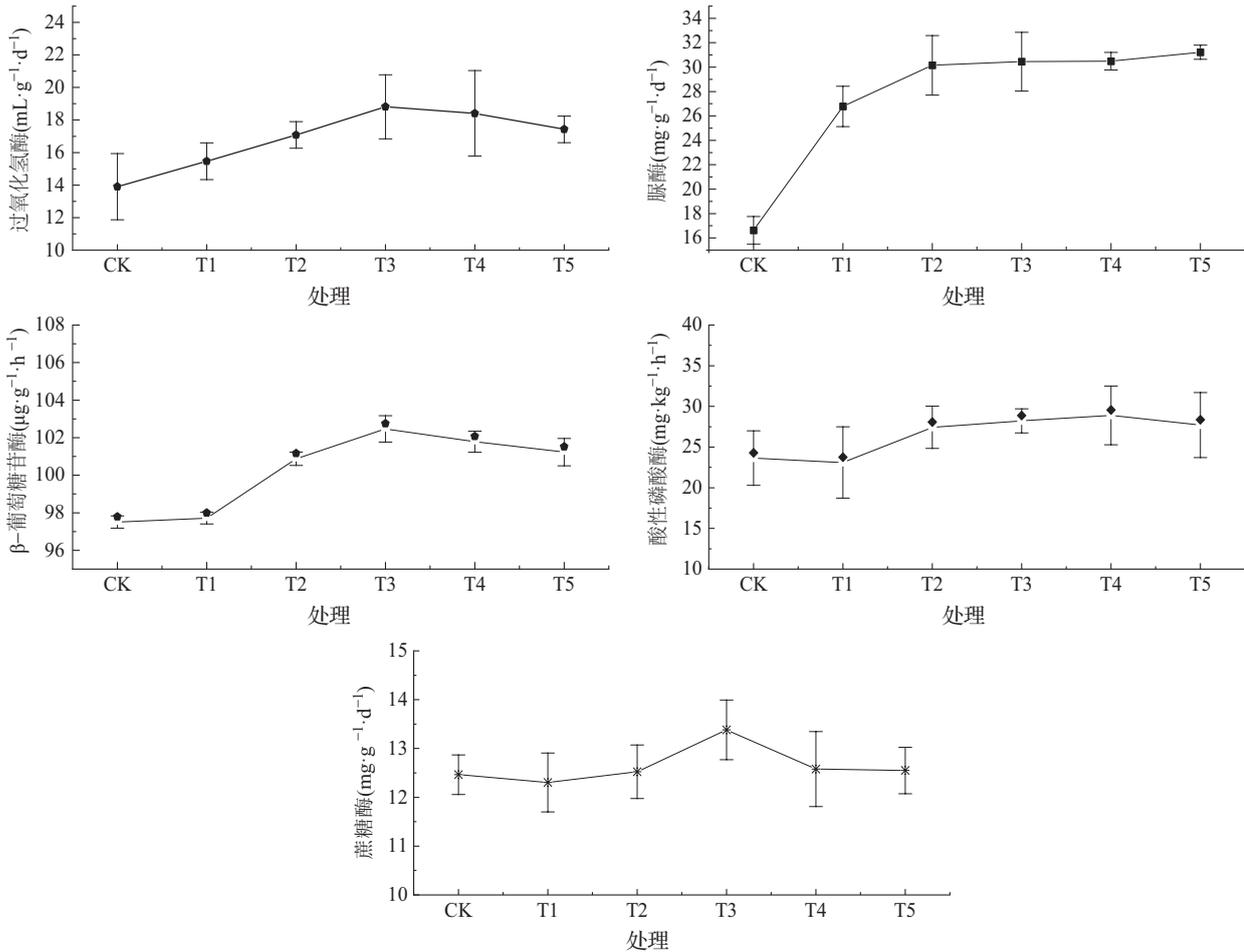


图 2 施用生物炭对直干桉幼苗土壤酶活性的影响

BG 活性表现为 CK 与 T2、T3、T4、T5 间存在显著差异, 分别增加了 22.87% ~ 35.34%、3.46% ~ 5.09%, 顺序依次为 CK<T1<T2<T5<T4<T3, 在 T3 时最高; URE 活性表现为 CK 与各处理均存在显著差异, 增幅为 61.08% ~ 87.84%, 顺序依次为 CK<T1<T2<T5<T3<T4, 在 T4 时最高; ACP 活性表现为 CK 与 T3、T4 间存在显著差异, 增幅为 19.34% ~ 22.21%, 顺序依次为 T1<CK<T2<T5<T3<T4, 在 T4 时最高; SUC 活性表现为 CK 与 T3 间存在显著差异, 增幅为 7.37% ($P<0.05$), 顺序依次为 T1<CK<T2<T5<T4<T3, 在 T3 时最高。

2.4 育苗基质中添加生物炭后土壤化学性质与酶活性的相关性分析

由图 3 可知, CAT 与 TN、AK、SOM、pH 之间呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 AP 之间呈显著正相关 ($P<0.05$); URE 与 TN、AP、AK、SOM、pH 之间呈极显著正相关 ($P<0.01$) 与 TP、AN、CEC 之间呈显著正相关 ($P<0.05$); BG 与 TN、AN、AP、AK、SOM、CEC、pH 之间呈极显著正相关 ($P<0.01$) 与 TP 之间呈显著正相关 ($P<0.05$); ACP 与 AN、CEC 之间呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 TN、AK、pH 之间存在显著正相关 ($P<0.05$); SUC 与 TN、CEC 之间有极显著正相关 ($P<0.01$), 与 AK 之间存在显著正相关 ($P<0.05$); 表明土壤酶活性与土壤化学性质间存在密切的关系, 土壤酶活性受到多个因子的共同影响。

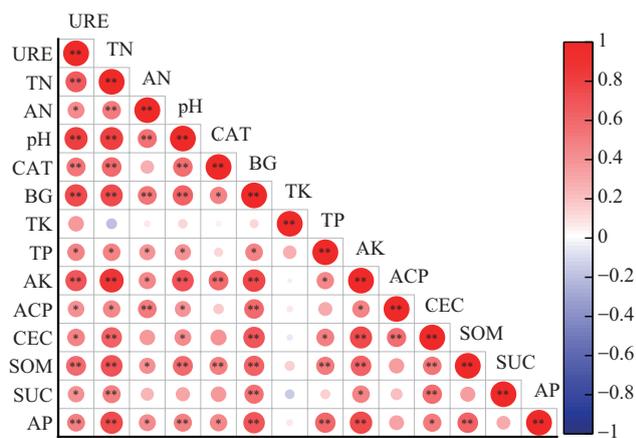


图 3 直干按幼苗土壤营养元素含量和酶活性的相关性分析

注: P 表示 ≤ 0.05 , ** 表示 $P \leq 0.01$ 。

2.5 育苗基质中添加生物炭后土壤化学性质与土壤酶 PCA 分析

对 14 个土壤指标进行主成分分析, 以特征值

>1 为标准, 得到主成分分析载荷图 (图 4), 不同变量的分布取决于载荷因子距原点的距离, 离原点越远, 对主成分的贡献率越大。获得 2 个特征值 >1 的主成分因子, 其中主成分一特征值为 7.860, 方差贡献率达到 56.1%; 主成分二的特征值为 1.542, 贡献率为 11.0%; 第三主成分特征值为 1.178, 方差贡献率达到 8.4%; 第四主成分的特征值为 1.004, 贡献率为 7.2%。4 个主成分累积方差贡献率达到 82.8%, 表明 4 个主成分可以代表大部分养分指标和土壤酶。

表 2 为主成分的载荷矩阵, 结合图 4 和表 2 可知, 第一主成分主要的影响因子是 CAT, 载荷值别是 0.913, 在第一主成分中只有 TK 表现出负作用, 载荷值为 -0.005; 第二主成分主要影响因子是 TP、SOM, 在第二主成分中只有 SUC 表现出负作用, 载荷值为 -0.050; 第三主成分主要影响因子是 AN, 载荷值为 0.805; 第四主成分主要影响因子是 TK, 载荷值为 0.927。

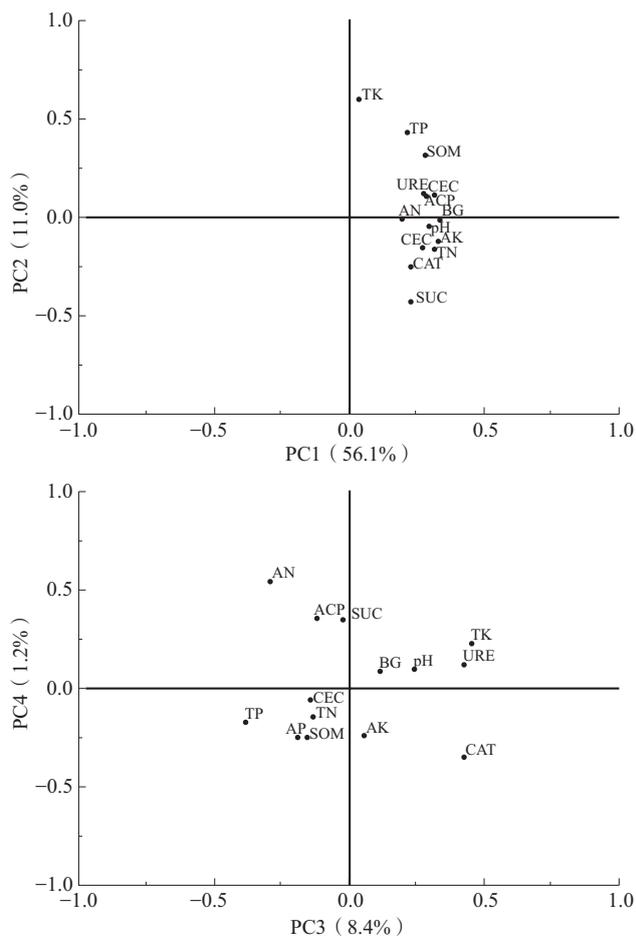


图 4 不同处理下土壤化学性质与土壤酶主成分分析

表2 不同处理下土壤化学性质与土壤酶旋转成分矩阵

指标	主成分一	主成分二	主成分三	主成分四
CAT	0.913	0.085	-0.040	-0.027
URE	0.688	0.211	0.328	0.477
BG	0.676	0.399	0.492	0.162
ACP	0.307	0.438	0.696	0.204
SUC	0.513	-0.050	0.702	-0.248
TN	0.629	0.514	0.391	-0.208
TP	0.014	0.895	0.171	0.145
TK	-0.005	0.101	-0.031	0.927
AN	0.028	0.248	0.805	0.024
AP	0.498	0.771	0.265	-0.028
AK	0.783	0.489	0.272	-0.080
SOM	0.359	0.820	0.155	0.171
CEC	0.500	0.422	0.400	-0.194
pH	0.689	0.247	0.425	0.208

3 讨论

3.1 施用生物炭对直干桉幼苗生长的作用效应

生物炭的添加显著增强了基质的持水性能及养分保持能力,为幼苗提供了良好的生长环境^[14]。张伟明等^[15]研究表明,生物炭的多孔结构和吸附性能能够增强土壤的保水能力,减少水分的蒸发和流失,使得土壤保持适宜的水分含量,有利于植物根系对水分的吸收和利用。同时,生物炭的添加能够改善土壤的通气性,增加土壤中的氧气含量,减少二氧化碳和其他有害气体的积累,从而优化根系的呼吸环境。此外,生物炭还能够调节土壤的温度,降低极端温度对植物根系的伤害,为根系的正常生长提供稳定的热环境。Atkinson等^[16]指出,生物炭相较于其他土壤有机质,具有较大的比表面积、较多的表面负电荷以及较高的电荷密度,为其在土壤环境中提供了更强的离子交换和吸附能力,从而促进植物对养分的吸收和利用,增强了植物的生长活性。本研究结果发现,随着施加生物炭处理的变化,直干桉幼苗的生长性状也受到影响。与对照处理相比,生物炭施加处理显著增加了直干桉幼苗地径和长、短冠幅,表明生物炭的施加对直干桉幼苗的生长量有较明显的影响。

3.2 施用生物炭对土壤化学性质的作用效应

生物炭作为土壤改良剂,其独特的高孔隙度、内表面积大以及微孔结构,改良了植物生长的土壤环境,促进养分的吸收与利用,进而改善土壤理化性质^[17]。众多学者研究表明,在添加生物炭

后,土壤的pH可能会发生变化,这种变化的方向主要取决于生物炭的pH和石灰化值。Lehmann^[18]研究发现,生物炭的pH可低于4或高于12,这种差异主要源于生物炭的制备原料类型、热解温度以及氧化程度等多个因素。例如,Cheng等^[19]指出,生物炭的pH不仅受到其原料和热解条件的显著影响,生物炭的氧化程度同样会对其pH产生重要影响。生物炭会改良土壤pH、有机碳含量、和K⁺浓度^[20-21]。此外,Farrell等^[22]报告称,施用生物炭可提高土壤中的可溶性碳含量和土壤pH。本试验结果显示,生物炭处理较对照处理显著增加了土壤pH。这主要是因为生物炭本身独特的结构及理化特征。首先是生物炭含有的可溶性的盐离子,在其融入土壤的过程中会逐渐释放,从而改善土壤的酸性^[23]。因此,对于直干桉这一类喜微酸性土壤的作物生长具有积极意义。姚奇等^[24]研究发现,生物炭的施用可显著提高土壤全氮含量。生物炭与磷肥减量配施会显著提高土壤全磷和有效磷含量^[25]。另外,生物炭改良土壤后,土壤氮和磷含量的增加为直干桉幼苗生长提供了充足的养分^[26]。

3.3 施用生物炭对土壤酶活性的作用效应

Wang等^[27]研究表明,较小的生物炭施用量可提高土壤胞外酶的活性,如 β -D-纤维生物糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶和N-乙酰- β -葡萄糖苷酶。杜倩等^[28]研究表明,将玉米生物炭和油菜生物炭施入烟草土壤后,促进了脲酶、蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶的活性。本研究中,随着生物炭施用量的增加, β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶的含量先升高后降低;这表明生物炭促进了相关酶的活性。可见,生物炭施用后,能改善直干桉幼苗的土壤质量。脲酶在将土壤中的尿素水解为氨和二氧化碳方面发挥着重要作用。有关生物炭增强土壤中脲酶活性的报道还有很多^[16]。王永庆等^[29]研究表明,土壤脲酶对氮的化学分解过程有重要作用,在本研究中,生物炭添加增强了脲酶的活性。且土壤脲酶与全氮呈极显著正相关($P < 0.01$),脲酶与碱解氮呈显著正相关($P < 0.05$),表明生物炭的添加能够有效增强土壤的氮素固持效应,进而促进土壤氮素的积累与转化,提高土壤的氮素利用效率。酸性磷酸酶是一类能够从有机磷(P_o)化合物中调动无机磷(P_i)的酶,因为它们在酸性环境中催化磷酸酯的水解以释放P_i。许多研究人员观察到酸性磷酸酶活性与土壤pH呈反向关系,因为随着生物炭添加

量的增加, 土壤 pH 也随之升高^[30]。本研究中, 随生物质炭施用量的增加, 酸性磷酸酶活性呈现出先升高后降低的趋势。以上研究结果表明, 生物炭施用量及其内在元素含量的不同, 对土壤酶活性的作用效果不同。本研究中, 生物炭的添加改善了土壤的理化性质, 生物炭蕴含的营养成分可作为产酶微生物的底物, 为微生物的生长与繁殖提供了物质基础。此外, 生物炭的多孔结构和吸附性不仅增加了土壤的比表面积, 为微生物提供了更多的附着位点, 还通过吸附作用影响了土壤中反应底物的数量和浓度, 促进了微生物活性, 增强了酶促反应的效率, 进而增加了土壤酶活性。

3.4 施用生物炭后土壤化学性质与酶活性的相关性

生物炭对土壤酶活性的影响是一个复杂且多方面的过程, 包括生物炭自身的性质、土壤和作物类型、环境因子以及人为因素等。研究发现, 土壤过氧化氢酶、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性与土壤 pH 存在正相关^[31]。本研究中, 土壤过氧化氢酶、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性都与 pH 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表面过氧化氢酶、脲酶和 β -葡萄糖苷酶活性与 pH 有关, β -葡萄糖苷酶与有机质含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明 β -葡萄糖苷酶的变化与有机碳大小有关。王垚等^[32]研究发现随着生物炭量的添加, 土壤蔗糖酶均在 5% 生物炭施入量时显著增加, 但酸性磷酸酶和过氧化氢酶均随生物炭使用量增加而降低。在本研究中, 4% ~ 6% 生物炭条件下, 过氧化氢酶、 β -葡萄糖苷酶和蔗糖酶含量随着施用量的增加而增大, 较高施用量对直干桉幼苗土壤酶含量影响不显著。随着生物炭施用量增加过氧化氢酶、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶含量呈现先上升后下降的趋势。显然, 土壤酶活性的变化可以反映出土壤化学性质的变动。土壤酶活性受到多重因素中共同作用的影响, 尽管不同类型的酶表现出细微的差异, 但与对照处理相比, 施用 4% ~ 6% 的生物炭普遍呈现出对土壤酶活性有促进作用的趋势。这些酶与土壤中的元素转化过程紧密相关, 进一步证实了在直干桉幼苗种植中施用生物炭能有效提升土壤的养分及酶活性。

4 结论

直干桉幼苗基质土壤施用 4% ~ 6% 生物炭可显著提高直干桉幼苗的生长量, 育苗效果最好。育苗基质中施用生物炭改善了土壤化学性质, 土壤养分指标

均有显著提升。土壤酶活性均有所提升, CAT、BG 和 SUC 活性均在 6% 时最高。从环境效益和经济效益综合来看, 短期内 4% ~ 6% 生物炭处理下对直干桉生长、土壤养分和土壤酶影响较其他处理效果更好。

参考文献:

- [1] Abbott L K, MacDonald L M, Wong M T F, et al. Potential roles of biological amendments for profitable grain production – a review [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 34–50.
- [2] Ronsse R, van Hecke S, Dickinson D, et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions *Global Change Biology* [J]. *Bioenergy*, 2013, 5: 104–115.
- [3] Solaiman Z M, Abbott L K, Murphy D V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 5062.
- [4] Zhang F, Liu M, Li Y, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa* [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1150–1158.
- [5] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88: 37–41.
- [6] Liu M, Sun J, Li Y, et al. Nitrogen fertilizer enhances growth and nutrient uptake of *Medicago sativa* inoculated with *Glomus tortuosum* grown in Cd-contaminated acidic soil [J]. *Chemosphere*, 2017, 167: 204–211.
- [7] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1998.
- [8] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (20): 4128–4138.
- [9] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对壤土微生物量碳、氮及酶活性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (6): 1142–1151.
- [10] Castaldi S, Riondeino M, Baronti S, et al. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J]. *Chemosphere*, 2011, 85 (9): 1464–1471.
- [11] 鲁如坤. 土壤化学农业分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 生态环境部. 土壤阳离子交换量的测定: HJ 889—2017 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [13] 张飞. 铀及伴生重金属对土壤酶活性影响的研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [14] 崔雨菲菲, 李晓红. 不同生物炭配比基质对苦瓜幼苗生长的影响 [J]. *中国果菜*, 2024, 44 (3): 70–73.
- [15] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39 (8): 1445–1451.
- [16] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for

- achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review [J]. *Plant and Soil*, 2010, 337: 1–18.
- [17] Zheng Y, Han X, Li Y, et al. Effects of biochar and straw application on the physicochemical and biological properties of paddy soils in Northeast China [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16531.
- [18] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 381–387.
- [19] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37: 1477–1488.
- [20] Wong J T F, Chen X, Deng W, et al. Effects of biochar on bacterial communities in a newly established landfill cover topsoil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236: 667–673.
- [21] Quilliam R S, Glanville H C, Wade S C, et al. Life in the ‘charosphere’ –Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 65: 287–293.
- [22] Farrell M, Kuhn T K, Macdonald L M, et al. Microbial utilisation of biochar-derived carbon [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 288–297.
- [23] Cui L, Noerpel M R, Scheckel K G, et al. Wheat straw biochar reduces environmental cadmium bioavailability [J]. *Environment International*, 2019, 126: 69–75.
- [24] 姚奇, 俞若涵, 张洪宇, 等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (3): 68–74.
- [25] 苏贵锐, 荣飞龙, 张薇, 等. 减磷施肥配施生物炭对南方酸性稻作土壤磷素形态的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2024 (1): 19–27.
- [26] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45: 113–124.
- [27] Wang X, Song D, Liang G, et al. Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and micro community composition in a fluvo-aquic soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 265–272.
- [28] 杜倩, 黄容, 李冰, 等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响 [J]. *核农学报*, 2021, 35 (6): 1440–1450.
- [29] 王永庆, 张莉, 王鑫博, 等. 秸秆颗粒不同量还田对设施土壤酶活性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (12): 30–39.
- [30] Demisie W, Zhang M. Effect of biochar application on microbial biomass and enzymatic activities in degraded red soil [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2015, 10: 755–766.
- [31] 郑慧芬, 吴红慧, 翁伯琦, 等. 施用生物炭提高酸性红壤茶园土壤的微生物特征及酶活性 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (2): 68–74.
- [32] 王垚, 胡洋, 马友华, 等. 生物炭对镉污染土壤有效态镉及土壤酶活性的影响 [J]. *土壤通报*, 2020, 51 (4): 979–985.

Effects of seedling substrate application of biochar on the growth of *Eucalyptus* spp. seedlings with straight stem and its mechanism of action

LIU Yu¹, GAO Cheng-xiang¹, KONG Ling-rong¹, SHI Zai¹, WAN Hui², DU Guan-ben², CAO Zi-lin³, WANG Xiao-li^{*} (1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224; 2. College of Materials and Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224; 3. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224)

Abstract: The effects of different amounts of biochar on the growth of *Eucalyptus* spp. seedlings and soil enzyme activities were investigated, in order to obtain the optimal substrate for *Eucalyptus* spp. seedling nursery, so as to provide theoretical reference for the rational application of biochar. The experiment was conducted with *Eucalyptus* spp. seedlings in container nursery substrates with different mass ratios of biochar, and six gradients of 0 (CK), 2% (T1), 4% (T2), 6% (T3), 8% (T4) and 10% (T5) were set up, with three replications for each treatment, and a completely randomized design was adopted. The growth of *Eucalyptus* spp. seedlings, soil chemical properties and soil enzyme activities in the various treatments were analyzed. The results showed that: (1) 4%–6% biochar increased the growth of *Eucalyptus* spp. seedlings. (2) Biochar application improved soil nutrients of *Eucalyptus* spp. substrate in different degrees, and the trends of pH, soil organic matter, total nitrogen, and available potassium with the increase in the amount of biochar application were consistent as follows: T5>T4>T3>T2>T1>CK, and the available nitrogen, available phosphorus, and cation exchangeable capacity contents were significantly increased by 9.25%, 119.51%, and 108.77%, respectively, compared with CK, while other indexes did not differ significantly from CK. (3) The activities of soil catalase, β -glucosidase, acid phosphatase, and sucrase were reduced with the increase of biochar application. The activity of soil urease increased with the increase of biochar application, and the highest content was found at 10% of biochar application. (4) The nutrient indexes of *Eucalyptus* spp. seedlings with different additive treatments had four principal components with eigenvalues greater than 1, and the cumulative contribution rate reached 82.754%, the main influence factor of the first principal component was catalase, and the main influence factors of the second principal component were total phosphorus and soil organic matter; the third principal component main influence factor was available nitrogen; and the fourth principal component main influence factor was total potassium. In general, application of 4%–6% biochar could significantly improve the growth of *Eucalyptus* spp. seedlings, and increase the content of nutrient elements in seedling substrate and the activities of main soil enzymes.

Key words: biochar; soil enzyme activity; *Eucalyptus* spp.; substrate; nutrients