

刘世祥, 蔡星, 吴文秀, 等. 生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗生理特性与土壤酶活性的影响 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (7): 794–800.
LIU S X, CAI X, WU W X, et al. Effects of Biochar Addition on Physiology of *Fokienia hodginsii* Seedlings under Drought and Enzyme Activities in Soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (7): 794–800.

生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗生理特性与土壤酶活性的影响

刘世祥, 蔡 星, 吴文秀, 刘晓颖, 荣俊冬, 郑郁善, 陈礼光*

(福建农林大学林学院, 福建 福州 350002)

摘要:【目的】探究干旱胁迫下外源增施生物炭对福建柏苗木生理特性与土壤酶活性的影响。【方法】以一年生福建柏幼苗为试材, 在土壤中分别添加 20、50、80 g·kg⁻¹的玉米秸秆生物炭 (T1、T2、T3), 以不含生物炭处理为对照 (CK), 分析不同添加量生物炭对干旱胁迫下福建柏幼苗生长、渗透调节物质的积累及土壤酶活性的影响。【结果】(1) 生物炭的施加显著提升了福建柏的生长及生物量积累 ($P<0.05$), 50 g·kg⁻¹ (T2) 处理对福建柏株高、地径及单株生物量的积累促进效果最佳。(2) 随着胁迫时间的增加, 各组间的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量总体呈现先升后降的变化趋势, 且各组间差异显著。可溶性糖、脯氨酸含量在胁迫 42 d 时达到最大值; 可溶性蛋白含量在胁迫 56 d 时达到最大值。总体表现为: T2>T1>T3>CK, 且以 T2 处理效果最佳。T2 处理的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量与同期的 CK 相比增加了 50.7%、127%、54.4%。(3) 生物炭的施加显著提升了干旱胁迫下的土壤酶活性 ($P<0.05$), 在胁迫 70 d 时各组脲酶活性达到最大值; 过氧化氢酶、硝酸还原酶、蔗糖酶活性在胁迫 42 d 时达到最大值; 蔗糖酶在胁迫 56 d 时达到最大值。各组间差异总体表现为 T2>T1>T3>CK, 且以 T2 处理最佳。【结论】干旱胁迫下施用 50 g·kg⁻¹ 生物炭量的试验处理最有利于福建柏苗木生长、抗逆生理及土壤酶活性的提高, 生物炭施用量过高时会对其产生抑制作用。

关键词: 生物炭; 干旱胁迫; 福建柏; 土壤酶活性; 渗透调节

中图分类号: S791.43; Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 07-0794-07

Effects of Biochar Addition on Physiology of *Fokienia hodginsii* Seedlings under Drought and Enzyme Activities in Soil

LIU Shixiang, CAI Xing, WU Wenxiu, LIU Xiaoying, RONG Jundong, ZHENG Yushan, CHEN Liguoang*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract:【Objective】Effects of biochar application on the physiology of *Fokienia hodginsii* seedlings under drought stress and enzyme activities in the soil were investigated. 【Method】Corn-stalk biochar was added in varied rates to the irrigation-controlled potting soil in cultivating one-year-old *F. hodginsii* seedlings. Growth and osmotic regulator contents of the seedlings as well as enzyme activities in soils containing the biochar at 20 g·kg⁻¹ (T1), 50 g·kg⁻¹ (T2), or 80 g·kg⁻¹ (T3) along with a blank control (CK) were determined. 【Result】(1) All biochar applications significantly promoted the seedling growth and biomass accumulation ($P<0.05$) with T2 showing the greatest increases on plant height, root diameter, and per plant biomass. (2) Under draught, the contents of soluble sugar, soluble protein, and proline in the seedlings of the treatment groups increased initially followed by a decline. In 42 d, soluble sugar and proline peaked, so did soluble protein in 56 d. The overall effect by the treatments ranked T2>T1>T3>CK. The seedlings grown on T2 had 50.7% more soluble sugar, 127% more soluble protein, and 54.4% more proline than those on CK. (3) The treatments also significantly elevated the enzyme activities in soil ($P<0.05$). Specifically, urease activity reached the maximum in 70d, catalase, nitrate reductase, and sucrase activities in 42d, and sucrase content in 56 d. Of all treatments, the effects ranked T2>T1>T3>CK. Again, T2 was the top performer. 【Conclusion】Short of adequate water supply, biochar addition at a rate of 50 g·kg⁻¹ significantly boosted the enzyme activity in the soil and benefitted the growth and stress resistance of the seedlings grown in the field. On the other

收稿日期: 2024-04-24 修回日期: 2024-06-03

作者简介: 刘世祥 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林培育技术相关研究, E-mail: lsx1872022@163.com

* 通信作者: 陈礼光 (1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事森林培育技术相关研究, E-mail: fjlclg@qq.com

基金项目: 福建省林业种苗科技攻关七期项目 (LZKG-202207); 福建农林大学科技创新专项基金 (KFB23057)

hand, an addition beyond that level could be detrimental.

Key words: biochar; drought stress; *Fokienia hodginsii*; soil enzyme activity; osmoregulation

0 引言

【研究意义】福建柏 (*Fokienia hodginsii*) 是柏科 (Cupressaceae) 福建柏属 (*Fokienia*) 濒危植物, 其材质优良, 抗逆性强, 是南方重要用材树种^[1]。近年来, 因全球气候变化导致干旱频繁, 造成植物体内水分亏缺, 影响植物生长甚至导致死亡^[2]。生物炭可有效改善土壤理化性质, 提升土壤细菌群落多样性和微生物丰度, 增强植物的抗逆能力, 缓解干旱对植物所造成的伤害^[3, 4]。**【前人研究进展】**生物炭添加对提高植物生长量和土壤持水量有积极作用^[5]。Qian 等^[6]发现生物炭添加能够增强田间持水能力, 且效果随着生物炭施用量增加而提升。生物炭还能延缓肥料养分在土壤中的释放速度, 提高土壤养分利用效率, 促进作物增产^[5]。Pandian 等^[7]在热带半干旱地区的试验表明, 棉花与玉米秸秆类生物炭的施加, 花生豆荚产量增加 29%。此外, Zoghi 等^[8]通过干旱胁迫下板栗幼苗的观测发现, 干旱诱导苗木脯氨酸和过氧化氢增加, 叶绿素含量减少, 而生物炭添加能有效减缓干旱胁迫带来的负面影响, 为植株生长创造更适宜的条件。Kammann 等^[9]基于藜麦的盆栽试验发现, 干旱胁迫下添加生物炭提高了植株的钾浓度, 改善藜麦叶片的渗透压。添加生物炭对土壤酶活性也有一定的促进作用^[10]。但也有研究发现施用生物炭对植物生长影响不显著, 施用量过高时甚至会出现抑制作用^[11]。**【本研究切入点】**目前生物炭的应用主要在土壤及农作物影响方面, 在林业上仍少见报道, 特别未见生物炭在福建柏栽培中的应用。**【拟解决的关键问题】**本研究以一年生福建柏幼苗为试材, 分析不同添加量生物炭对干旱胁迫下福建柏幼苗生长、渗透调节物质的积累及土壤酶活性的影响, 旨在明确干旱胁迫下生物炭添加对福建柏幼苗的影响, 为干旱胁迫下生物炭的合理应用提供理论依据, 以应对干旱等逆境下的林木栽培。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及供试材料

试验于福建农林大学温室大棚 (119°14'47.37"E, 26°05'29.88"N) 进行, 属亚热带季风气候, 冬暖夏凉, 无霜期达 326 d 以上, 年平均日照 1840 h, 年平均降水量 900~2100 mm, 年平均气温 16~20 °C, 极端气温 -1.2 °C, 最热的 7~8 月平均气温 24~29 °C, 极端气温 42.3 °C, 年空气相对湿度 77%, 土壤为红

壤土。供试土壤理化性质: pH 4.32、全氮 1.23 g·kg⁻¹、碱解氮 75.3 mg·kg⁻¹、有效磷 28.96 mg·kg⁻¹、速效钾 56.28 mg·kg⁻¹。

玉米生物炭购于南京勤丰秸秆有限公司, 选取秸秆部位在 500 °C 厌氧环境下炭化而成。供试生物炭的 pH、碳 C、氮 N、全磷 TP、全钾 TK 分别为 8.62、72.47%、0.61%、2.31%、0.69%。福建柏 1 年生幼苗购于南平森科种苗有限公司。

1.2 试验方法

使用多菌灵 1:1000 的水溶液对供试土壤进行杀菌处理, 并在阳光下暴晒 5 d 以上, 自然风干后进行过筛处理。将过 25 目孔筛的生物炭与土壤混匀, 在土壤中分别添加 20、50、80 g·kg⁻¹ 的生物炭 (玉米) 搅拌均匀, 分别记为 T1、T2、T3, 将不含生物炭处理作为对照 (CK)。选择生长一致的苗木进行处理, 供试苗木平均株高 19.7 cm, 平均地径 2.14 mm。移栽到 22.3 cm×15.5 cm×19 cm (上口×下口径×高) 的生长盆中, 每盆装土 5 kg, 栽种 1 株, 每个处理种植 15 株, 共 60 盆。参考余孟杨等^[12]的研究方法, 设置中度干旱胁迫 (土壤含水量为最大田间持水量的 40%~50%, 土壤含水量为 17.6%~19.8%) 的水分处理。为保证福建柏幼苗适应盆栽环境, 正常生长 60 d 后, 于试验前 10 d 对苗木停止浇水, 对其进行土壤含水量的控制, 同时进行物理除草。控制土壤含水量的方法为: 每天下午 17:00, 通过称重法并结合 TDR 350 便携式土壤水分速测仪测定土壤含水量, 根据测定结果及土壤重量, 如土壤含水量少于设定范围, 及时向盆内补充水分, 使土壤含水量保持在干旱胁迫范围内。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 生长指标测定

于胁迫试验第 70 天对福建柏生长指标进行测定。株高的测量使用直尺测量土壤表面到植株顶端的垂直距离, 精确到 0.01 cm, 并将多次测量结果取平均值记为株高; 地径的测量使用数显游标卡尺测量, 测量苗干靠近地表面处的直径, 精确到 0.01 mm, 并将多次测量结果取平均值记为地径。

1.3.2 叶片采集与处理

于胁迫试验第 14、28、42、56、70 天采集福建柏幼苗叶片, 采集每个处理所种植的 15 株福建柏不同方位上的成熟叶片, 将其置于自封袋混匀, 标记后将其置入液氮中快速冻结, 带回实验室后进行

相关指标的测定。

1.3.3 根际土壤采集与处理

于胁迫试验第14、28、42、56、70天进行土壤样品采集，采集每个处理所种植的15盆根际土壤，采用螺旋取土钻采集每个处理种植的15盆植株不同方向土壤样品，先剔除其中残根和残渣，然后过2 mm筛网并充分混合，随后将其装入自封袋中，标记后带回实验室，土壤样品置于4℃冰箱储存备用，用于土壤酶活性的测定。

1.3.4 指标测定

(1) 生物量测定。于胁迫试验第70天对福建柏幼苗进行生物量测定，采用全株获取法，分别称取地上部分(茎和叶)和地下部分(根)鲜质量，随后将样品于105℃烘箱杀青30 min，在85℃下烘至恒重，使用精度0.0001的电子天平称量其干质量，即为生物量。

(2) 叶片渗透调节物质。可溶性糖(Soluble Sugar, SS)、可溶性蛋白(Souble protein, SP)和脯氨酸(Proline, Pro)含量分别采用蒽酮比色法、考马斯亮蓝法、酸性茚三酮法进行测定^[13]。

(3) 土壤酶活性。土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和脱氢酶分别采用靛酚蓝比色法、高锰酸钾滴定法、3,5-二硝基水杨酸比色法、酚

二磺比色法、TTC还原法进行测定^[14]。

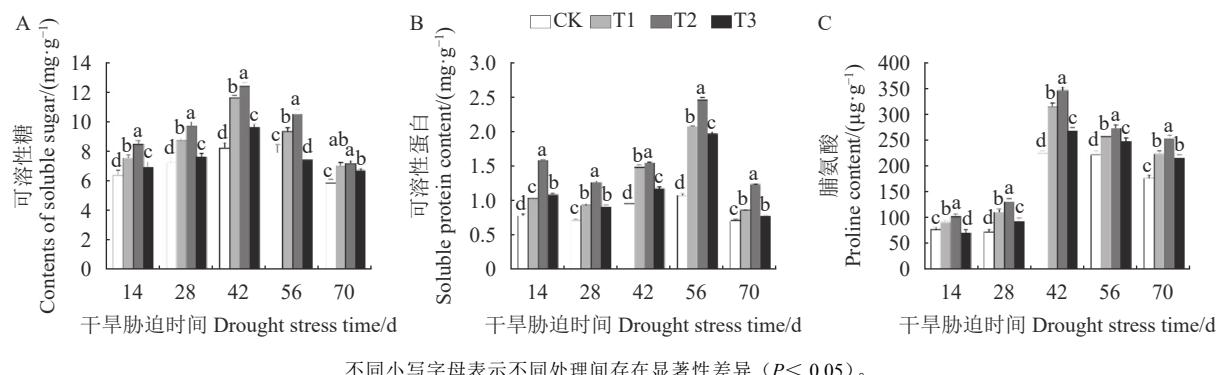
1.4 数据统计与分析

利用Microsoft Excel 2019对数据进行整理汇总，采用SPSS 25.0软件对数据进行单因素方差分析(One-way analysis of variance, ANOVA, $P < 0.05$)。使用Canoco 5.0软件对生长指标与土壤酶的相关性进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗生长及生物量的影响

施加生物炭对福建柏幼苗株高、地径、根生物量、茎生物量、叶生物量和单株生物量均有显著影响(表1)。在干旱胁迫下，随着施炭量增加苗木生长呈现出先增长后降低的变化趋势。T1、T2、T3处理下的株高相较于CK显著提高29.2%、30.0%、11.0%($P < 0.05$)；地径相较于CK显著提高26.7%、29.6%、15.6%($P < 0.05$)。生物量的积累状况能够反映植物的生长状态，T1、T2、T3处理下的根生物量相较于CK显著提高45.1%、51.8%、3.0%($P < 0.05$)；茎生物量相较于CK显著提高12.8%、16.8%、7.5%($P < 0.05$)；叶生物量相较于CK显著提升17.6%、22.1%、2.2%($P < 0.05$)；单株生物量相较于CK显著提高45.1%、51.8%、3.0%($P < 0.05$)。



不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

Data with different lowercase letters indicate significant differences($P < 0.05$).

图1 生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 1 Effects of biochar addition on osmoregulatory substances in leaves of *F. hodginsii* seedlings under drought stress

表1 生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗生长及生物量积累的影响

Table 1 Effects of biochar addition on growth and biomass accumulation of *F. hodginsii* seedlings

| 处理 Treatment | 株高 Plant height/cm | 地径 Ground diameter/mm | 根生物量 Root biomass/g | 茎生物量 Stem biomass/g | 叶生物量 Leaf biomass/g | 单株生物量 Biomass per plant/g |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| CK | 20.81±1.90c | 2.43±0.46c | 1.66±0.20d | 2.26±0.14c | 1.31±0.13b | 5.23±0.26c |
| T1 | 26.90±3.20a | 3.08±0.61ab | 2.41±0.12b | 2.55±0.12b | 1.54±0.15a | 6.53±0.28a |
| T2 | 27.10±1.50a | 3.15±0.68a | 2.52±0.18a | 2.64±0.15a | 1.60±0.12a | 6.76±0.31a |
| T3 | 23.10±1.80b | 2.81±0.43b | 1.71±0.16c | 2.43±0.11b | 1.34±0.12b | 5.47±0.24b |

不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

Data with different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

于 CK 显著提升 22.9%、29.3%、4.6% ($P < 0.05$)。T3 处理福建柏的生长相较于 T1、T2 处理则呈下降趋势, 且部分指标差异显著 ($P < 0.05$), T2 处理对福建柏生长的促进效果最佳, 组间总体表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.2 生物炭添加对干旱胁迫下福建柏幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

随着胁迫时间的增加, 各组可溶性糖含量呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 呈上升趋势, 至 42 d 达到峰值后开始下降(图 1A)。各组可溶性糖含量均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的可溶性糖含量均显著高于 CK, 且在 T2 处理下可溶性糖含量增幅最大。于 42 d 时各组可溶性糖含量达到最大值, 分别为 8.25、11.65、12.44、 $9.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著增加 41.2%、50.7%、17.3% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

随着胁迫时间的增加, 各组可溶性蛋白含量总体呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~28 d 期间, 各组可溶性蛋白含量呈降低趋势, 而后在 42~56 d 时呈上升趋势, 并在 56 d 达到峰值后开始下降(图 1B)。各组间可溶性蛋白含量均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的可溶性蛋白含量均显著高于 CK, 且在 T2 处理下可溶性蛋白含量增幅最大。56 d 时各组间可溶性蛋白含量达到最大值, 分别为 1.08、2.06、2.46、 $1.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著增加 90.7%、127%、82.42% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

随着胁迫时间的增加, 各组脯氨酸含量呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 各组脯氨酸含量呈明显的上升趋势, 至 42 d 达到峰值后开始下降(图 1C)。各组间脯氨酸含量均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的脯氨酸含量均显著高于 CK, 且在 T2 处理下脯氨酸含量增幅最大。42 d 时各组间脯氨酸含量达到最大值, 分别为 224.88、316.02、347.17、 $268.39 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著增加 40.5%、54.4%、19.3% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.3 生物炭添加对干旱胁迫下土壤酶活性的影响

2.3.1 土壤脲酶活性

随着胁迫时间的增加, 各组脲酶活性呈先升后降再上升的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 呈先上升后下降的趋势, 而后在 56~70 d 时呈上升趋势, 并在 70 d 时达到峰值(图 2A)。各组脲酶活性均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的脲酶活性均显著高于 CK, 且在 T2 处理下脲酶活性最高。

于 70 d 时各组脲酶活性达到最大值, 分别为 131.99、194.49、301.29、 $225.14 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著提升 47.4%、128%、70.6% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.3.2 土壤过氧化氢酶活性

随着胁迫时间的增加, 各组过氧化氢酶活性呈先上升而后逐渐稳定的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 呈上升趋势, 至 42 d 达到峰值, 而后在 42~70 d 时呈现出较为稳定的趋势(图 2B)。各组过氧化氢酶活性均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的过氧化氢酶活性均显著高于 CK, 且在 T2 处理下过氧化氢酶活性最高。于 42 d 时各组过氧化氢酶活性最高, 分别为 81.40、93.77、99.62、 $87.06 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著提升 15.2%、22.4%、7.1% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.3.3 土壤硝酸还原酶活性

随着胁迫时间的增加, 各组硝酸还原酶活性总体呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 呈上升趋势, 至 42 d 达到峰值后呈下降趋势(图 2C)。T2、T3 处理在 14~28 d 时相较于 CK、T1 处理呈现出下降趋势, 但随着胁迫时间的增加, 各组间硝酸还原酶活性均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的硝酸还原酶活性均显著高于 CK, 且在 T2 处理下硝酸还原酶活性最高。于 42 d 时各组硝酸还原酶活性最高, 分别为 4.62、7.55、15.01、 $6.89 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著提升 63.4%、224.8%、49.1% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.3.4 脱氢酶活性

随着胁迫时间的增加, 各组脱氢酶活性呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~56 d 期间, 呈上升趋势, 至 56 d 达到峰值后呈下降趋势(图 2D)。在胁迫 14 d 时, CK 与 T3 处理未呈现出显著差异, T1 和 T2 处理未存在显著差异, 但随着胁迫时间的增加, 各组间脱氢酶活性均存在显著差异 ($P < 0.05$), T1、T2、T3 处理下的脱氢酶活性均显著高于 CK, 且在 T2 处理下脱氢酶活性最高。于 56 d 时各组脱氢酶活性最高, 分别为 35.35、33.59、37.66、 $36.1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T1 和 T3 处理未存在显著差异, T1、T2、T3 处理相较于 CK 显著提升 7.4%、12.1%、5.2% ($P < 0.05$), 总体变化趋势表现为 $T2 > T1 > T3 > CK$ 。

2.3.5 蔗糖酶

随着胁迫时间的增加, 各组蔗糖酶活性呈先升后降的变化趋势。在胁迫 14~42 d 期间, 呈上升趋势, 至 42 d 达到峰值后呈下降趋势(图 2E)。各组

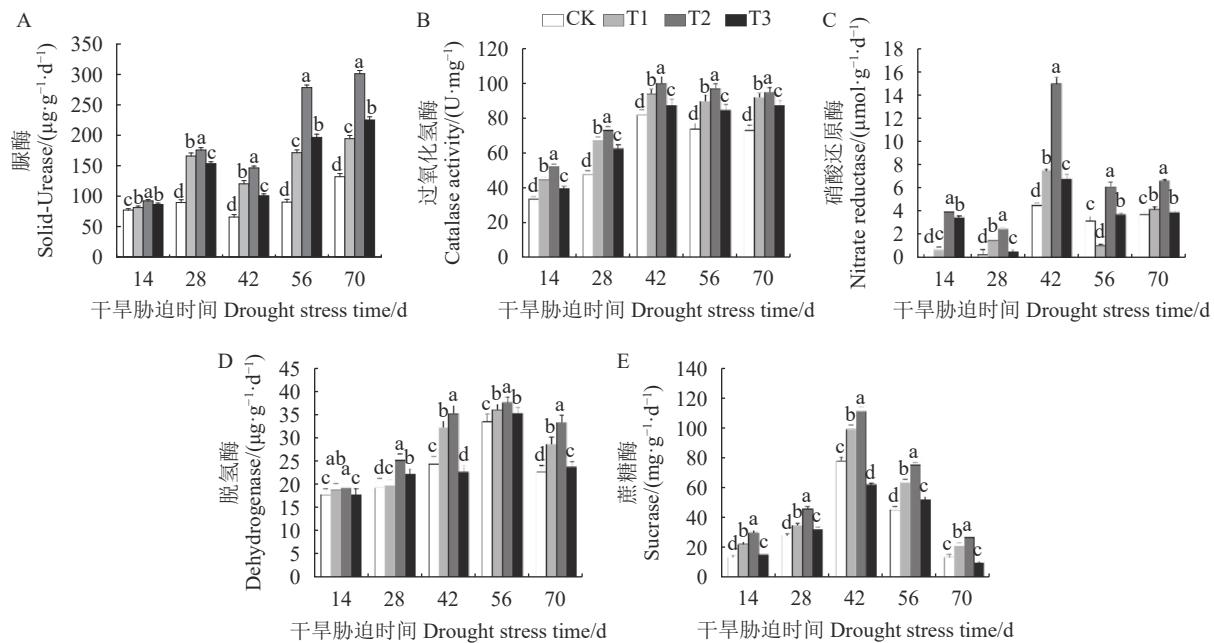


图2 生物炭添加对干旱胁迫下土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effect of biochar addition on soil enzyme activity under drought stress

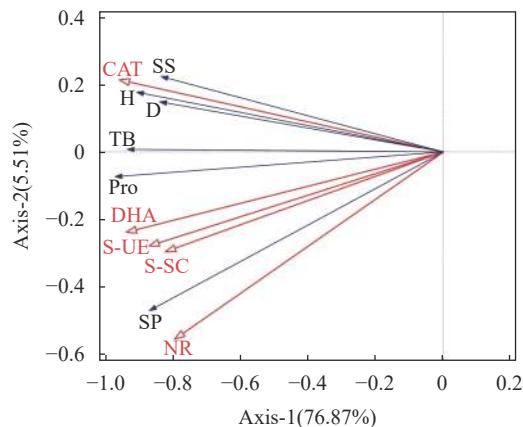
蔗糖酶活性均存在显著差异 ($P < 0.05$)，T1、T2、T3 处理下的蔗糖酶均显著高于 CK，且在 T2 处理下最高。于 42 d 时各组蔗糖酶活性最高，分别为 77.92、99.34、111.26、61.98 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，T1、T2 处理相较于同期的 CK 蔗糖酶活性显著提升 27.5%、42.8% ($P < 0.05$)，T3 处理下的蔗糖酶活性总体要低于 CK，总体变化趋势表现为 T2>T1>CK>T3。

2.4 干旱胁迫下生物炭添加对福建柏幼苗生长、生理与土壤酶活性的相关性分析

福建柏生长、生理指标对环境因子（土壤酶活性）的解释率达 82.38%，RDA 前两个约束轴分别解释了总变异的 76.87% 和 5.51%（图 3），各因子箭头的夹角越小，相关性越高，方向相同代表正相关，生物炭添加对干旱胁迫下福建柏生长指标（株高、地径、单株生物量）以及生理指标（脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量）呈较强的正相关性。同时，还显著提升了土壤酶活性（脲酶、过氧化氢酶、硝酸还原酶、脱氢酶和蔗糖酶），呈现较强的正相关性。

3 讨论与结论

施用生物炭处理对干旱胁迫下福建柏幼苗生长有促进作用，不同添加量的生物炭对福建柏生长的影响有所差异。在干旱胁迫下，T1、T2、T3 处理能够有效缓解干旱对福建柏生长产生的抑制作用，使得福建柏的株高、地径及单株生物量（根、茎、叶）显著高于对照处理。这与陈佳欣等^[15]的研究结



S-UE: 脲酶, S-SC: 蔗糖酶, CAT: 过氧化氢酶, DHA: 脱氢酶, NR: 硝酸还原酶, SS: 可溶性糖, Pro: 脯氨酸, SP: 可溶性蛋白, H: 株高, D: 地径, TB: 生物量。

S-UE: urease; S-SC: sucrase; CAT: catalase; DHA: dehydrogenase; NR: nitrate reductase; SS: soluble sugar; Pro: proline; SP: soluble protein; H: plant height; D: diameter; TB: biomass.

图3 干旱胁迫下福建柏幼苗各指标与土壤酶活性的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis on physiochemical indicators of *F. hodginsii* seedlings and soil enzyme activity under drought stress

果一致。主要是因为生物炭具有良好的物理性质和养分调控作用，能够吸收并保留水分，提高土壤的持水量和养分含量，改善植物的生长环境^[7]，干旱胁迫下能促进福建柏幼苗生长。生物炭添加为根系创造了良好的生长环境，促进苗木对土壤氮素的吸收与利用，从而提高福建柏苗木干物质的积累^[8]。当生物炭施用量达 80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (T3 处理) 时，福建柏在株高、地径及单株生物量（根、茎、叶）要显著

低于T1、T2处理,说明当生物炭施用量过高会对福建柏生长产生抑制作用,这与Baronti等^[16]的研究结果一致。可能是因为过量施用生物炭导致土壤孔隙结构紧密化,进而降低土壤田间持水能力,并造成pH和全盐量的增加,从而不利于植物的生长。此外,由于生物炭能吸附低分子有机化合物,降低土壤微生物生物量和某些微量元素的有效性,从而对苗木生长产生抑制作用^[17]。说明适量添加生物炭有助于促进干旱胁迫下福建柏的生长,生物炭施用量过高时会对苗木生长产生抑制作用,生物炭的添加可以有效缓解干旱对植物生长的负面影响。

生物炭的添加有助于福建柏幼苗叶片渗透调节物质的积累,在各干旱胁迫时间下,T1、T2、T3处理下的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量总体显著高于CK,且均呈现出先上升后下降的趋势。这说明生物炭的施加可有效减缓干旱胁迫带来的负面影响,增强干旱胁迫下福建柏的抗逆性,从而减轻干旱对福建柏细胞造成的损伤,这与Kammann等^[9]的研究结果一致。可能是因为生物炭可以高效改良土壤的理化性质,同时还能增加土壤细菌群落多样性和微生物数量,以提高作物的抗逆性^[3, 18];且生物炭本身也含有一定矿物质养分,可增加土壤中矿质养分含量,如P、K、Ca、Mg、Zn等,其中钾元素含量间接影响着植株对干旱胁迫的抵御能力,调节作物根系中的渗透压梯度,钾离子数量愈多,渗透压势就愈大,进入细胞的水分也就愈多,在一定程度上影响着植株对干旱胁迫的抵御能力^[19, 20]。本研究结果表明,在干旱胁迫下,福建柏受生物炭添加量不同而影响渗透调节物质含量的积累表现出差异,当施用量达80 g·kg⁻¹时,福建柏渗透调节物质总体要低于T1、T2组,这与周翠香^[21]的研究结果相一致。可能是因为过量使用生物炭会对土壤结构、性质、养分供应、酸碱度以及土壤微生物等方面产生不利影响,从而对土壤环境产生威胁^[22],表明该剂量的生物炭添加会使得福建柏处于一定的胁迫环境之中,生物炭施用量过高会对植物生长产生不利的影响。

干旱胁迫下生物炭对土壤脲酶、过氧化氢酶、硝酸还原酶、脱氢酶和蔗糖酶活性具有一定的促进作用,其影响程度与生物炭的施用量有关。在不同施用量下,各组间土壤酶活性表现出一定的规律性。生物炭对土壤酶活性的促进是因其自身具有的多孔结构和吸附性能,生物炭能够吸附酶促反应的底物,从而为土壤酶提供更多的结合位点,提高土壤酶活性^[23]。土壤脲酶是一种催化尿素水解生成氨气和二氧化碳的酶,其活性与土壤中全氮、速效氮含量相关联,生物炭的含氮量作用于土壤中也会促

进土壤脲酶活性增加^[24];土壤过氧化氢酶与土壤呼吸强度和微生物活动有关,而生物炭疏松多孔的结构会引发土壤结构的改变,提升土壤的孔隙度、透气性等性能,从而有效改善根系生长和微生物活动的生存环境,间接促进微生物活性,进而进一步增强土壤酶活性^[25];土壤硝酸还原酶是催化硝酸根离子转化为亚硝酸根离子的专性酶,其活性高低直接影响土壤硝态氮和亚硝态氮的含量,生物炭的施加能够改善土壤的酸碱度,为土壤硝酸还原酶创造一个更适宜的环境^[26];土壤脱氢酶作为土壤微生物的降解性能指标,能够反映土壤环境中活性微生物量以及对有机物的降解特征,生物炭的施加为土壤微生物提供富足的营养物质,激活酶的活性,从而促进脱氢酶活性^[11]。外源生物炭的施入能提升土壤微生物活性,促进腐解,有利于土壤养分的循环利用,从而提升土壤蔗糖酶活性^[27]。但当生物炭施用量为80 g·kg⁻¹时,土壤各酶指标要显著低于T2、T1处理,且蔗糖酶活性总体要低于CK,说明生物炭施用量过高会降低土壤酶活性,这与Masto等^[28]的研究结果一致。生物炭用量过高会抑制土壤酶活性,可能是因为生物炭具有较强的吸附作用,其表面的官能团含有较高比例的含氧官能团,使得生物炭对酶分子的吸附性增强,进而对酶促反应结合点形成饱和,从而抑制酶促反应,抑制酶活性^[26],施用过多生物炭导致土壤碳氮比升高,可供微生物利用的碳源增加而氮素有效性降低^[7],不足以维持微生物正常的生理代谢,从而导致土壤酶活性降低。RDA结果表明,福建柏生长、生理指标与环境因子(土壤酶活性)呈正相关性,表明在干旱胁迫下,生物炭可通过调节土壤性质,改善作物生长发育环境,从而改变福建柏生理功能,提高其抵御干旱胁迫的能力,有效减缓干旱胁迫带来的负面影响,为福建柏生长创造适宜的条件。

综上所述,适量施用生物炭可以有效缓解干旱对福建柏幼苗产生的抑制作用,对福建柏苗木株高、地径生长及生物量有显著的促进作用,并提高苗木的抗逆性和土壤酶活性。但当施用量达80 g·kg⁻¹时,会对幼苗生长、渗透调节物质的积累和土壤酶活性产生一定的抑制作用。施用50 g·kg⁻¹生物炭量的效果较好。

参考文献:

- [1] 农业部,国家林业局.国家重点保护野生植物名录(第一批)[EB/OL]. 2001-08-04. <https://www.wPCA.org.cn/newsinfo/396692.html>.
- [2] 温琦,赵文博,张幽静,等.植物干旱胁迫响应的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(12): 11-15.

- response to drought stress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(12): 11–15. (in Chinese)
- [3] JIN H. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils[J]. 2010.DOI: <http://hdl.handle.net/1813/17077>.
- [4] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (7): 1–12.
- GOU M M, QU Z Y, WANG F, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 1–12. (in Chinese)
- [5] AKHTAR S S, LI G T, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 37–44.
- [6] QIAN Z Z, TANG L Z, ZHUANG S Y, et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at South China [J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 479–488.
- [7] PANDIAN K N, SUBRAMANIYAN P, GNASEKARAN P, et al. Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(9): 1293–1310.
- [8] ZOGHI Z, HOSSEINI S M, KOUCHAKSARAEI M T, et al. The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress [J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138(6): 967–979.
- [9] KAMMANN C I, LINSEL S, GÖBLING J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations [J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1): 195–210.
- [10] 王智慧, 殷大伟, 王洪义, 等. 生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响 [J]. 东北农业科学, 2019, 44 (3): 14–19.
- WANG Z H, YIN D W, WANG H Y, et al. Effects of different amounts of biochar applied on soil nutrient, soil enzyme activity and maize yield [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2019, 44(3): 14–19. (in Chinese)
- [11] YILDIRIM E, EKINCI M, TURAN M. Impact of biochar in mitigating the negative effect of drought stress on cabbage seedlings [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(3): 2297–2309.
- [12] 余孟杨. 福建柏不同无性系对干旱胁迫的生理响应研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- YU M Y. Physiological Response of Different *Fokienia hodginsii* Clones to Drought Stress[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014. (in Chinese)
- [13] 张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 陈佳欣, 冯静怡, 李娟, 等. 生物炭与干旱胁迫对冬小麦根际土壤理化性质及细菌群落的影响 [J]. 西北农业学报, 2023, 32 (11): 1725–1735.
- CHEN J X, FENG J Y, LI J, et al. Effects of biochar and drought stress on physicochemical properties and bacterial community in rhizosphere soil of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(11): 1725–1735. (in Chinese)
- [16] BARONTI S, MAGNO R, MAIENZA A, et al. Long term effect of biochar on soil plant water relation and fine roots: Results after 10 years of vineyard experiment[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 851(Pt 1): 158225.
- [17] 朱自洋, 段文焱, 陈芳媛, 等. 干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 352–359.
- ZHU Z Y, DUAN W Y, CHEN F Y, et al. The mechanism of biochar facilitate ryegrass growth in arid soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 352–359. (in Chinese)
- [18] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展 [J]. 生态科学, 2018, 37 (1): 192–199.
- TANG X C, CHEN J L. Review of effect of biochar on soil physicochemical and microbial properties [J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1): 192–199. (in Chinese)
- [19] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对水稻苗期生长、养分吸收及土壤矿质元素含量的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35 (11): 2952–2959.
- ZHOU J S, YAN P, ZHANG W M, et al. Effects of biochar on seedling growth, nutrient absorption of *Japonica rice* and mineral element contents of substrate soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 2952–2959. (in Chinese)
- [20] 郑瑞伦, 王宁宁, 孙国新, 等. 生物炭对京郊沙化地土壤性质和苜蓿生长、养分吸收的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (5): 904–912.
- ZHENG R L, WANG N N, SUN G X, et al. Effects of biochar on soil properties and alfalfa growth and nutrient uptake in desertified land in Beijing suburb [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 904–912. (in Chinese)
- [21] 周翠香. 黄河三角洲滨海盐碱土壤—植物系统对生物炭添加的响应机理研究 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2019
- ZHOU C X. Response mechanism of coastal saline - alkali soil-plant system to biochar addition in the Yellow River Delta[D]. Yantai: Ludong University, 2019.
- [22] 宋立婷. 生物炭浸提液对杨树幼苗生长和抗旱性的影响 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- SONG L T. Effects of biochar extract on growth and drought resistance of poplar seedlings[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [23] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436–442.
- [24] 高文慧, 郭宗昊, 薛晨, 等. 生物炭及炭基肥对大豆土壤酶活性的影响 [J]. 淮北师范大学学报(自然科学版), 2020, 41 (1): 48–53.
- GAO W H, GUO Z H, XUE C, et al. Effect of biochar and biochar compound fertilizer on soil enzyme activity of soybean [J]. *Journal of HuaiBei Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 41(1): 48–53. (in Chinese)
- [25] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012
- HUANG J. Effects of biochar on soil microbial biomass and soil enzymes[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- [26] ELZOBAIR K A, STROMBERGER M E, IPPOLITO J A, et al. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol [J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 145–152.
- [27] 王颖. 生物炭添加对半干旱区土壤酶活性及细菌多样性影响的定位研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- WANG Y. Localization study on the effect of biochar addition on soil enzyme activity and bacterial diversity in semi-arid area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019. (in Chinese)
- [28] MASTO R E, KUMAR S, ROUT T K, et al. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity [J]. *CATENA*, 2013, 111: 64–71.

(责任编辑: 黄爱萍)