

# 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响及综合评价

陈慧<sup>1a,1b</sup>, 时正伦<sup>1a,1b</sup>, 吴永波<sup>1a,1b</sup>, 高婷<sup>1a,1b</sup>, 薛建辉<sup>1a,2,①</sup>

[1. 南京林业大学: a. 生物与环境学院, b. 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

**摘要:** 对不同生物炭配施基肥处理下 1 年生桑树 (*Morus alba* Linn.) 幼苗的 7 个叶片品质指标进行了单因素方差分析和多重比较, 并采用隶属函数法综合评价了不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响。结果表明: T1 组〔添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾)〕的半纤维素、木质素、粗蛋白和多糖含量分别较 CK 组(对照, 不添加生物炭和基肥)升高了 10.92%、20.68%、7.61% 和 27.17%。不同生物炭配施基肥处理下叶片品质指标差异显著, 其中, T2 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 木炭)的半纤维素含量最高, 分别较 CK 组和 T1 组升高了 37.77% 和 24.21%; T4 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 竹炭)的纤维素含量最高, 分别较 CK 组和 T1 组升高了 12.43% 和 33.92%; T3 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭)的木质素、粗蛋白和总黄酮含量均最高, 分别较 CK 组升高了 40.89%、31.48% 和 12.04%, 较 T1 组升高了 16.74%、22.18% 和 87.77%; T5 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 竹炭)的粗脂肪和多糖含量均最高, 分别较 CK 组升高了 24.86% 和 60.57%, 较 T1 组升高了 33.42% 和 26.26%。综合评价结果表明: 供试的 6 个生物炭配施基肥处理组的综合评价值为 0.37~0.62, 均大于 CK 组(0.29)和 T1 组(0.28), 并以 T3 组为最大。比较而言, 添加木炭的 2 个生物炭配施基肥处理组的综合评价值均值最大(0.58), 而添加稻壳炭的 2 个生物炭配施基肥处理组的综合评价值均值最小(0.43)。综上所述, 不同生物炭配施基肥处理可明显提高桑树幼苗的叶片品质, 并以木炭的效果最好。在喀斯特地区种植饲用桑树时, 宜采用质量分数 4% 木炭配施猪粪堆肥和化肥的施肥方式。

**关键词:** 桑树; 叶片品质; 生物炭; 基肥; 综合评价

中图分类号: S888.2; S888.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)03-0071-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.03.09

**Effects of different biochar combined with base fertilizer treatments on leaf quality of *Morus alba* seedlings and comprehensive evaluation** CHEN Hui<sup>1a,1b</sup>, SHI Zhenglun<sup>1a,1b</sup>, WU Yongbo<sup>1a,1b</sup>, GAO Ting<sup>1a,1b</sup>, XUE Jianhui<sup>1a,2,①</sup> (1. Nanjing Forestry University: a. College of Biology and the Environment, b. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(3): 71-77

**Abstract:** One-way ANOVA and multiple comparison were conducted by seven leaf quality indexes of one-year-old *Morus alba* Linn. seedlings under different biochar combined with base fertilizer treatments, and effects of different biochar combined with base fertilizer treatments on leaf quality of *M. alba* seedlings was comprehensively evaluated by using subordinate function method. The results show that hemicellulose, lignin, crude protein, and polysaccharide contents of T1 group [adding 120 g of pig

收稿日期: 2021-03-29

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502605)

作者简介: 陈慧(1993—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事森林恢复生态学方面的研究。

①通信作者 E-mail: jhxue@cnbg.net

引用格式: 陈慧, 时正伦, 吴永波, 等. 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(3): 71-77.

manure compost and 1 fertilizer (containing 3.00 g of urea, 2.25 g of potassium dihydrogen phosphate, and 1.50 g of potassium chloride)] increase by 10.92%, 20.68%, 7.61%, and 27.17% respectively compared with those of CK group (the control, no biochar and base fertilizer). There are significant differences in leaf quality indexes under different biochar combined with base fertilizer treatments, in which, hemicellulose content of T2 group (adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of wood charcoal) is the highest, which increases by 37.77% and 24.21% respectively compared with that of CK group and T1 group; cellulose content of T4 group (adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of bamboo charcoal) is the highest, which increases by 12.43% and 33.92% respectively compared with that of CK group and T1 group; lignin, crude protein, and total flavonoids contents of T3 group (adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of wood charcoal) are the highest, which increase by 40.89%, 31.48%, and 12.04% respectively compared with those of CK group, and increase by 16.74%, 22.18%, and 87.77% respectively compared with those of T1 group; crude fat and polysaccharide contents of T5 group (adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of bamboo charcoal) are the highest, which increase by 24.86% and 60.57% respectively compared with those of CK group, and increase by 33.42% and 26.26% respectively compared with those of T1 group. The comprehensive evaluation analysis result shows that the comprehensive evaluation values of six test biochar combined with base fertilizer treatment groups are 0.37–0.62, which are larger than those of CK group (0.29) and T1 group (0.28), and that of T3 group is the largest. In comparison, the average comprehensive evaluation value of the two biochar combined with base fertilizer treatment groups added with wood charcoal is the largest (0.58), while that of the two biochar combined with base fertilizer treatment groups added with rice husk charcoal is the smallest (0.43). In summary, different biochar combined with base fertilizer treatments can obviously improve the leaf quality of *M. alba* seedlings, and wood charcoal has the best effect. When planting forage mulberry in Karst area, the suitable fertilization method is applying 4% (mass fraction) wood charcoal combined with pig manure compost and chemical fertilizer.

**Key words:** *Morus alba* Linn.; leaf quality; biochar; base fertilizer; comprehensive evaluation

贵州省既是中国西南部喀斯特地形的核心分布区,也是中国土壤石漠化最为严重的地区<sup>[1]</sup>。贵州省大面积山地土壤遭到侵蚀,水土流失严重,土壤水肥调蓄能力和生态系统生物多样性低<sup>[2-5]</sup>。近年来,贵州省在实施退耕还林和人工植被恢复的过程中采用封山育林(草)、人工造林、土壤改良、水土保持与农林复合经营技术等措施改善喀斯特退化山地的生态环境,已经取得了一定的成效<sup>[6]</sup>。例如,按照因地制宜和适地适树的原则进行植被修复<sup>[7-8]</sup>,或通过施用土壤改良剂改善土壤理化性质<sup>[9]</sup>,改善土壤理化性质,形成植被和土壤间的良好养分循环关系,从而提高喀斯特生态环境质量。

生物炭具有官能团丰富、孔隙多和比表面积大等特点,可有效改善土壤理化性质,缓解土壤退化程度<sup>[10-11]</sup>,提高作物生产力<sup>[12]</sup>,被广泛应用于农业生产和生态环境修复。将有机肥或无机肥与生物炭混合制成生物炭配施基肥,能显著提高土壤养分含量<sup>[13]</sup>。与单施化肥相比,施用生物炭配施基肥对土壤的改良效果更显著,并能够促进植物对土壤养分的吸收<sup>[14]</sup>。此外,施用生物炭配施基肥还能够促进植

物根系发育,加快喀斯特地区的植被恢复<sup>[15]</sup>。

桑树(*Morus alba* Linn.)原产于中国中部和北部,具有根系发达、适应性强等特点,在全国各地均有自然分布和人工种植。该树种在生态保护与恢复、石漠化治理及水土流失防治等方面发挥着重要作用<sup>[16]</sup>;其叶片含有丰富的营养物质(包括蛋白质、脂肪和纤维素等)<sup>[17-18]</sup>,并含有多酚、多糖和黄酮等活性成分<sup>[19-20]</sup>,具有较高的营养价值、饲用价值及药用价值。此外,桑树还是喀斯特地区发展生态经济林的主要树种之一,在贵州省喀斯特石漠化山地的生态修复中具有潜在的生态系统服务价值。

目前,有关生物炭和生物炭基肥改善喀斯特石漠化山地土壤的理化特性和微生物群落结构,进而提高土壤肥力和保水保肥性能的研究已有报道<sup>[21-23]</sup>,但关于生物炭基肥对桑树叶片品质的影响却不清楚,不利于饲用桑树在喀斯特地区的有效种植。为此,本研究将不同种类和用量的生物炭与猪粪堆肥和化肥混合,制成生物炭配施基肥,并将不同生物炭配施基肥施入喀斯特山地石灰土中,采用盆栽法进行栽培实验,探究不同生物炭配施基肥处理下1年生桑树幼苗

叶片品质的差异;在此基础上,采用隶属函数法综合评价不同生物炭配施基肥处理对桑树叶片品质的影响,以期筛选出在喀斯特山地土壤中种植饲用桑树的适宜生物炭配施基肥的配方,为在喀斯特地区种植饲用桑树提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试材料为来自贵州省安顺市普定县马官镇(东经 105°45'、北纬 26°13')的1年生桑树幼苗。供试植株生长旺盛且长势基本一致,株高(50±2) cm、地径(6.0±0.2) mm。

供试土壤为贵州典型的喀斯特山地石灰土,采自贵州省安顺市普定县马官镇观音山(东经 105°27'、北纬 26°25'),为0~25 cm的表层土。土壤的有机质含量为 14.44 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量为 5.40 mg·kg<sup>-1</sup>,碱

解氮含量为 65.81 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量为 26.84 g·kg<sup>-1</sup>,pH 7.72。

供试化肥由尿素(N含量 46.7%)、磷酸二氢铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量 61.7%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O含量 63.2%)按照质量比 3.00:2.25:1.50 的比例混合而成;有机肥料为猪粪堆肥,购自上海时科生物科技有限公司,总养分含量 6.85%,有机质含量 823 g·kg<sup>-1</sup>,总氮含量 17.1 g·kg<sup>-1</sup>,总磷含量 42.8 g·kg<sup>-1</sup>,总钾含量 8.6 g·kg<sup>-1</sup>,pH 8.50。

供试生物炭有3种,分别为木炭、竹炭和稻壳炭,均购自安徽拜尔福生物科技有限公司,裂解温度 450 °C~500 °C,烧制时间 40 min。3种生物炭的理化性质见表1。

实验在南京林业大学下蜀教学实习林场(东经 119°14'、北纬 31°59')进行。该林场位于江苏省句容市境内,属北亚热带季风气候区,四季分明,年降水量 1 104 mm,年均温 15.2 °C。

表1 供试生物炭的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of biochar tested

生物炭 Biochar	pH 值 pH value	养分含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Nutrient content					比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) Specific surface area
		碳 Carbon	灰分 Ash	总氮 Total nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有效钾 Available potassium	
木炭 Wood charcoal	8.89	589	435	13	23.52	2.19	380.83
竹炭 Bamboo charcoal	9.05	601	263	18	32.62	2.74	68.93
稻壳炭 Rice husk charcoal	9.41	463	135	6	21.31	2.54	91.45

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 采用室外盆栽法进行栽培实验,每盆装 7.5 kg 土壤。根据预实验结果,共设置 8 个处理组:CK 组为对照,即不添加生物炭和基肥;T1 组为基肥处理组;T2 组和 T3 组分别为添加质量分数 2% 和 4% 木炭的生物炭配施基肥处理组;T4 组和 T5 组分别为添加质量分数 2% 和 4% 竹炭的生物炭配施基肥处理组;T6 组和 T7 组分别为添加质量分数 2% 和 4% 稻壳炭的生物炭配施基肥处理组。其中,T1 组添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾);T2 组添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 木炭;T3 组添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭;T4 组添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 竹炭;T5 组添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 竹炭;T6 组添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 稻壳炭;T7 组添加 120 g 猪粪堆

肥、1 份化肥和 300 g 稻壳炭。

1.2.2 处理及采样方法 实验前,将土壤风干、消毒,去除石砾等杂物,过孔径 2 mm 筛,备用。按照实验设计的比例将各生物炭和基肥混匀,然后将其与 7.5 kg 土壤充分混匀,装入上口口径 21 cm、下口径 16 cm 的花盆中,置于室内,充分反应 2 周后,栽植桑树幼苗。每个处理 6 盆,每盆 1 株,视为 6 个重复。实验期间,采取常规栽培管理措施并定期浇水。

培养 8 个月后,采集各单株的所有成熟叶片,放入样品袋中并编号;于 105 °C 杀青 15 min,75 °C 烘干至恒质量,粉碎后过孔径 2 mm 筛,备用。

1.2.3 叶片品质指标测定 采用盐酸水解法<sup>[24]</sup>测定叶片的半纤维素含量;采用硫酸蒽酮比色法<sup>[25]222-223</sup>测定叶片的纤维素含量;采用滴定法<sup>[24]</sup>测定叶片的木质素含量;采用凯氏定氮法<sup>[25]195-198</sup>测定叶片的粗蛋白含量;采用索氏抽提法<sup>[25]241-242</sup>测定叶片的粗脂

肪含量;采用分光光度计法<sup>[26]</sup>测定叶片的总黄酮含量;采用蒽酮比色法<sup>[25]202-203</sup>测定叶片的多糖含量。各指标均重复测定3次,结果取平均值。

### 1.3 数据处理与统计分析

采用 EXCEL 2016 和 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(LSD法)对不同处理组间各指标的差异显著性进行分析;采用隶属函数法<sup>[27]</sup>对不同生物炭配施基肥处理组桑树幼苗叶片品质进行综合评价,各指标的隶属函数值 $[\mu(X_j)]$ 计算公式为 $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,式中, $X_j$ 表示第 $j$ 个指标值, $X_{\min}$ 表示第 $j$ 个指标的最小值, $X_{\max}$ 表示第 $j$ 个指标的最大值。此外,还计算出各指标的标准差系数( $V_j$ )和权重

( $W_j$ ),计算公式分别为 $V_j = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1}}}{\bar{X}_j}$ 和

$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j}$ ,式中, $X_{ij}$ 表示第 $i$ 个处理下第 $j$ 个指标的

隶属函数值, $\bar{X}_j$ 表示第 $j$ 个指标所有处理的平均值。根据 $\mu(X_j)$ 和 $W_j$ 计算综合评价值( $D$ ),计算公式为 $D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \cdot W_j]$ 。 $D$ 值越大,表示桑树叶片品质越好<sup>[28]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响

不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响见表2。方差分析结果表明:各组间叶片的半纤维素、纤维素、木质素、粗蛋白、粗脂肪、总黄酮和多糖含量差异显著( $P < 0.05$ )。T1组〔添加120 g猪粪堆肥和1份化肥(包含3.00 g尿素、2.25 g磷酸二氢钾和1.50 g氯化钾)〕叶片的半纤维素、木质素、粗蛋白和多糖含量分别较CK组(对照,不添加生物炭和基肥)升高了10.92%、20.68%、7.61%和27.17%,且该组的半纤维素、木质素和多糖含量与CK组差异显著;而该组叶片的纤维素、粗脂肪和总黄酮含量分别较CK组降低了16.04%、6.42%和40.33%,且该组的纤维素和总黄酮含量与CK组差异显著。

多重比较分析结果表明:T2组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和150 g木炭)叶片的半纤维素含量在供试的6个生物炭配施基肥处理组中最高,分别较CK组和T1组升高了37.77%和24.21%。与CK组相比,T2组和T6组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和150 g稻壳炭)叶片的半纤维素含量显著升高,T7组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和300 g稻壳炭)叶片的半纤维素含量略升高,T5组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和300 g竹炭)叶片的半纤维素含量显著降低,而T3组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和300 g木炭)和T4组(添加120 g猪粪堆肥、1份化肥和150 g竹炭)叶片的半纤维素含量略降低。与T1组相比,T2组和T6组叶片的半纤维素含量显著升高,而T3组、T4组、T5组和T7组叶片的半纤维素含量显著降低。

多重比较分析结果表明:T4组叶片的纤维素含量在所有处理组中最高,分别较CK组和T1组升高了12.43%和33.92%。与CK组相比,T2组和T4组叶片的纤维素含量显著升高,T3组叶片的纤维素含量略降低,而T5组、T6组和T7组叶片的纤维素含量显著降低。与T1组相比,供试的6个生物炭配施基肥处理组叶片的纤维素含量均显著升高。

多重比较分析结果表明:T3组叶片的木质素含量最高,分别较CK组和T1组升高了40.89%和16.74%。与CK组相比,T2组、T3组、T4组、T6组和T7组叶片的木质素含量显著升高,而T5组叶片的木质素含量略降低。与T1组相比,T3组和T4组叶片的木质素含量显著升高,T7组叶片的木质素含量略升高,而T2组、T5组和T6组叶片的木质素含量显著降低。

多重比较分析结果表明:T3组叶片的粗蛋白含量最高,分别较CK组和T1组升高了31.48%和22.18%。与CK组相比,T3组叶片的粗蛋白含量显著升高,而T4组、T5组和T7组叶片的粗蛋白含量略升高,而T2组和T6组叶片的粗蛋白含量略降低。与T1组相比,T3组叶片的粗蛋白含量显著升高,T6组叶片的粗蛋白含量显著降低,而T2组、T4组、T5组和T7组叶片的粗蛋白含量略降低。

多重比较分析结果表明:T5组叶片的粗脂肪含量均最高,分别较CK组和T1组升高了24.86%和33.42%。与CK组相比,T4组和T5组叶片的粗脂肪含量显著升高,T2组和T7组叶片的粗脂肪含量略升

高,而 T3 组和 T6 组叶片的粗脂肪含量略降低。与 T1 组相比,T2 组、T4 组、T5 组和 T7 组叶片的粗脂肪含量显著升高,T3 组叶片的粗脂肪含量略升高,而 T6 组叶片的粗脂肪含量略降低。

多重比较分析结果表明:T3 组叶片的总黄酮含量最高,分别较 CK 组和 T1 组升高了 12.04% 和 87.77%。与 CK 组相比,T3 组和 T7 组叶片的总黄酮含量显著升高,T2 组叶片的总黄酮含量略升高,而 T4 组、T5 组和 T6 组叶片的总黄酮含量显著降低。

与 T1 组相比,供试的 6 个生物炭配施基肥处理组叶片的总黄酮含量显著升高。

多重比较分析结果表明:T5 组叶片的多糖含量最高,分别较 CK 组和 T1 组升高了 60.57% 和 26.26%。与 CK 组相比,供试的 6 个生物炭配施基肥处理组叶片的总黄酮含量显著升高。与 T1 组相比,T4 组、T5 组和 T6 组叶片的总黄酮含量显著升高,T7 组叶片的总黄酮含量略升高,T2 组叶片的总黄酮含量显著降低,而 T3 组叶片的总黄酮含量略降低。

表 2 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of different biochar combined with base fertilizer treatments on leaf quality of *Morus alba* Linn. seedlings ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	半纤维素 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Hemicellulose content	纤维素 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Cellulose content	木质素 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Lignin content	粗蛋白 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Crude protein content	粗脂肪 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Crude fat content	总黄酮 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Total flavonoids content	多糖 含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Polysaccharide content
CK	228.35±3.31de	361.89±7.72c	93.74±1.10f	93.59±2.17bc	40.83±0.65cd	5.48±0.14c	62.16±0.37f
T1	253.29±4.69c	303.83±2.72g	113.13±0.78c	100.71±1.58b	38.21±0.76d	3.27±0.03g	79.05±1.79cd
T2	314.60±4.44a	384.14±5.08b	106.99±3.60d	91.45±0.48bc	42.76±0.66c	5.60±0.11c	75.14±1.87e
T3	225.03±3.16e	353.64±1.96cd	132.07±1.04a	123.05±6.12a	40.09±0.73cd	6.14±0.04a	77.31±0.36de
T4	223.06±1.56e	406.89±3.63a	122.85±2.32b	98.97±1.44bc	46.88±3.11b	4.79±0.03e	90.01±0.84b
T5	190.58±3.89f	316.31±3.06f	92.20±2.51f	93.68±9.60bc	50.98±0.53a	4.29±0.02f	99.81±0.83a
T6	280.80±3.69b	326.29±0.99e	101.88±0.98e	89.08±3.48c	37.18±1.32d	5.10±0.12d	92.06±0.17b
T7	234.55±1.43d	345.97±1.81d	116.56±0.96c	94.91±1.54bc	43.74±2.26bc	5.83±0.07b	81.05±0.69c
F 值 F value	248.012	157.505	105.478	18.017	11.992	229.660	245.296
P 值 P value	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.001**	0.000**	0.000**

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同组间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different groups. \*\*;  $P < 0.01$ .

<sup>2)</sup> CK: 对照,不添加生物炭和基肥 The control, no biochar and base fertilizer; T1: 添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾) Adding 120 g of pig manure compost and 1 fertilizer (containing 3.00 g of urea, 2.25 g of potassium dihydrogen phosphate, and 1.50 g of potassium chloride); T2: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 木炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of wood charcoal; T3: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of wood charcoal; T4: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 竹炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of bamboo charcoal; T5: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 竹炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of bamboo charcoal; T6: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 稻壳炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of rice husk charcoal; T7: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 稻壳炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of rice husk charcoal.

## 2.2 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质影响的综合评价

基于上述研究结果,采用隶属函数法综合评价了不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响,结果见表 3。

结果表明:各生物炭配施基肥处理组的综合评价值为 0.28~0.62。其中,T1 组[添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾)]的综合评价最小(0.28),CK 组(对照,不添加生物炭和基肥)次之(0.29);T3 组的综合评价最大(0.62),T4 组次之(0.61)。T2 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 木炭)、T3 组(添加

120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭)、T4 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 竹炭)、T5 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 竹炭)、T6 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 稻壳炭)和 T7 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 稻壳炭)的综合评价均大于 CK 组和 T1 组。说明添加木炭、竹炭和稻壳炭的生物炭配施基肥处理组桑树幼苗的叶片品质优于不添加任何肥料以及仅添加猪粪堆肥和化肥的土壤。比较而言,添加木炭的生物炭配施基肥处理组的综合评价均值最大(0.58),而添加稻壳炭的生物炭配施基肥处理组的综合评价均值最小(0.43)。

表3 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质影响的综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation on effects of different biochar combined with base fertilizer treatments on leaf quality of *Morus alba* Linn. seedlings

处理 <sup>1)</sup> Treatment <sup>1)</sup>	各叶片品质指标的隶属函数值 Subordinate function value of each leaf quality index							综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序 Ranking
	半纤维素含量 Hemicellulose content	纤维素含量 Cellulose content	木质素含量 Lignin content	粗蛋白含量 Crude protein content	粗脂肪含量 Crude fat content	总黄酮含量 Total flavonoids content	多糖含量 Polysaccharide content		
CK	0.30	0.56	0.04	0.13	0.26	0.77	0.00	0.29	7
T1	0.51	0.00	0.52	0.34	0.07	0.00	0.45	0.28	8
T2	1.00	0.78	0.37	0.07	0.40	0.81	0.34	0.54	3
T3	0.28	0.48	1.00	1.00	0.21	1.00	0.40	0.62	1
T4	0.26	1.00	0.77	0.29	0.70	0.53	0.74	0.61	2
T5	0.00	0.12	0.00	0.14	1.00	0.36	1.00	0.37	6
T6	0.73	0.22	0.24	0.00	0.00	0.64	0.79	0.38	5
T7	0.35	0.41	0.61	0.17	0.47	0.89	0.50	0.48	4
$V_j$	1.07	1.07	1.06	1.07	1.08	0.94	1.06		
$W_j$	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.13	0.15		

<sup>1)</sup> CK: 对照,不添加生物炭和基肥 The control, no biochar and base fertilizer; T1: 添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾) Adding 120 g of pig manure compost and 1 fertilizer (containing 3.00 g of urea, 2.25 g of potassium dihydrogen phosphate, and 1.50 g of potassium chloride); T2: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 木炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of wood charcoal; T3: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of wood charcoal; T4: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 竹炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of bamboo charcoal; T5: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 竹炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of bamboo charcoal; T6: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 150 g 稻壳炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 150 g of rice husk charcoal; T7: 添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 稻壳炭 Adding 120 g of pig manure compost, 1 fertilizer, and 300 g of rice husk charcoal.  $V_j$ : 标准差系数 Coefficient of standard deviation;  $W_j$ : 权重 Weight.

### 3 讨论和结论

相关研究结果表明:施肥可改善桑树叶片品质<sup>[29-30]</sup>。本研究中,T1组〔添加 120 g 猪粪堆肥和 1 份化肥(包含 3.00 g 尿素、2.25 g 磷酸二氢钾和 1.50 g 氯化钾)〕桑树幼苗叶片的半纤维素、木质素、粗蛋白和多糖含量显著高于 CK 组(对照,不添加生物炭和基肥),说明添加猪粪堆肥和化肥可显著提高桑树叶片的半纤维素、木质素、粗蛋白和多糖含量,这是因为添加猪粪堆肥和化肥可增加土壤中有有机质和多种养分的含量,从而提高土壤肥力,利于桑树叶片中有有机物的形成。

本研究表明:不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗的叶片品质均有显著影响,其原因可能是添加生物炭可改善土壤的理化性质,提高土壤肥力<sup>[31-32]</sup>,从而促进植物生长。然而,不同种类生物炭的特性、施用量及施用方式对植物生长的调控作用不同<sup>[33-35]</sup>。本研究中,不同生物炭配施基肥处理组间叶片品质指标也存在显著差异。

根据不同处理组桑树幼苗叶片品质的综合评价结果,各生物炭配施基肥处理组桑树幼苗的叶片品质

均优于 CK 组和 T1 组,其原因可能是生物炭配施基肥可改善土壤的理化性质、微生物特性及养分状况,有利于植物生长,增加叶片有机物合成<sup>[23,36]</sup>。比较发现,添加木炭和竹炭的生物炭配施基肥处理组桑树幼苗叶片品质的综合评价价值均值大于添加稻壳炭的生物炭配施基肥处理组,说明木炭或竹炭配施基肥对喀斯特山地桑树幼苗叶片品质的提升效应更强。T3 组(添加 120 g 猪粪堆肥、1 份化肥和 300 g 木炭)桑树幼苗叶片品质的综合评价价值最大,因此,可将其作为喀斯特山地人工桑树林的施肥方式。

综上所述,采用不同生物炭配施基肥(即猪粪堆肥和化肥)的方式可明显提高桑树幼苗的叶片品质,并以添加木炭的提升效果最好。在喀斯特地区种植饲用桑树时,宜采用质量分数 4% 木炭配施猪粪堆肥和化肥的施肥方式。

#### 参考文献:

- [1] 卢耀如. 地质-生态环境与可持续发展: 中国西南及邻近岩溶地区发展途径[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003: 31.
- [2] 杨苏茂, 熊康宁, 喻阳华, 等. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 91-96.
- [3] 王世杰. 喀斯特石漠化: 中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.

- [4] 郭柯,刘长成,董鸣.我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J].植物生态学报,2011,35(10):991-999.
- [5] 苏生,黄瑞,韩永芬,等.贵州石漠化地区不同能源草对土壤理化性质的影响[J].江苏农业科学,2017,45(14):206-209.
- [6] 何霄嘉,王磊,柯兵,等.中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J].生态学报,2019,39(18):6577-6585.
- [7] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林22年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.
- [8] 孙建,刘子琦,朱大运,等.石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价[J].水土保持研究,2019,26(5):222-228.
- [9] 时正伦,郭雅倩,周之栋,等.生物炭基肥与平茬措施对喀斯特土壤养分含量及刺槐幼苗热能的影响[J].植物资源与环境学报,2019,28(2):71-78.
- [10] SPOKAS K A, CANTRELL K B, NOVAK J M, et al. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 973-989.
- [11] 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(1/2): 1-18.
- [12] AHMED H P, SCHOENAU J J. Effects of biochar on yield, nutrient recovery, and soil properties in a canola (*Brassica napus* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) rotation grown under controlled environmental conditions[J]. Bioenergy Research, 2015, 8(3): 1183-1196.
- [13] 张云舒,唐光木,蒲胜海,等.减氮配施炭基肥对棉田土壤养分、氮素利用率及产量的影响[J].西北农业学报,2020,29(9):1372-1377.
- [14] 康日峰,张乃明,史静,等.生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2014(6):33-38.
- [15] 宋丹丹,何丙辉,罗松平,等.黑麦草和生物炭对喀斯特地区黄壤养分影响研究[J].草业学报,2018,27(4):195-201.
- [16] 贾洪亮,邱长玉.桑树在生态治理方面的应用前景展望[J].广西蚕业,2015,52(3):57-60.
- [17] 吴浩,孟庆翔.桑叶的营养价值及其在畜禽饲养中的应用[J].中国饲料,2010(13):38-40,43.
- [18] 宋琼莉,周泉勇,韦启鹏,等.桑叶提取物对矮脚黄鸡生长性能、屠宰性能及肉品质的影响[J].动物营养学报,2018,30(1):191-201.
- [19] 黄金枝,俞燕芳,胡桂萍,等.30份药食用桑叶营养品质评价及相关性研究[J].食品与发酵工业,2020,46(7):155-160.
- [20] 梁贵秋,祁广军,何雪梅,等.广西蚕区21个桑树品种的桑叶营养与保健品质评价[J].蚕业科学,2015,41(4):701-709.
- [21] 朱倩,周之栋,施毅,等.施用生物炭基肥对喀斯特石灰土磷元素特性的影响[J].生态学报,2018,38(11):4037-4044.
- [22] 孙嘉曼,卜晓莉,吴永波,等.喀斯特山地石灰土施用生物炭对刺槐幼苗生长和土壤特性的影响[J].生态学杂志,2016,35(12):3250-3257.
- [23] ZHOU Z D, GAO T, VAN ZWIETEN L, et al. Soil microbial community structure shifts induced by biochar and biochar-based fertilizer amendment to karst calcareous soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(2): 398-408.
- [24] 熊素敏,左秀凤,朱永义.稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J].粮食与饲料工业,2005(8):40-41.
- [25] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [26] 孙敏耀,唐文照,卢霞,等.分光光度法测定不同采收时间桑叶中总黄酮[J].中草药,2004,35(10):1190-1191.
- [27] 曾卫湘,郑莎,韩冷,等.53份桑种质桑叶的药用品质综合评价[J].蚕业科学,2018,44(6):905-915.
- [28] 张尚雄,尼玛平措,徐雅梅,等.3个披碱草属牧草对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J].草业科学,2016,33(6):1154-1163.
- [29] 鲁剑巍,熊建平,陈防,等.施肥对桑叶品质的影响[J].蚕业科学,2004,30(4):417-420.
- [30] 张志林,秦和生,何梦秀,等.蚯蚓粪配施化肥对桑树根际土壤生物学特征及桑叶产量和品质的影响[J].西南农业学报,2020,33(2):357-362.
- [31] 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.
- [32] HASS A, GONZALEZ J M, LIMA I M, et al. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid appalachian soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1096-1106.
- [33] 刘悦,黎子涵,邹博,等.生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J].应用生态学报,2017,28(3):1030-1038.
- [34] 解钰,吴鹏豹,漆智平,等.王草产量和品质对生物炭浓度梯度的响应[J].广东农业科学,2012,39(11):133-135,143.
- [35] 廖上强,陈延华,李艳梅,等.生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J].农业资源与环境学报,2015,32(5):443-448.
- [36] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1948-1955.

(责任编辑:佟金凤)