

生物炭添加对弃渣场渣土理化性质和植物生长状况的影响

钱毅¹, 王玉帅³, 陈平平², 杨刚³, 李建兴², 陈奇伯¹, 杨淩舟¹, 叶南⁴

(1. 西南林业大学水土保持学院, 昆明 650224; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051; 3. 云南省滇中引水工程有限公司, 昆明 650205; 4. 长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局, 南京 210019)

摘要: [目的] 探究玉米秸秆生物炭添加对弃渣场渣土理化性质和狗牙根(*Cynodon dactylon*)生长的影响, 为弃渣场水土保持工程建设和植被恢复提供实践指导。[方法] 以滇中引水工程典型弃渣场堆置的渣土为研究对象, 采用盆栽模拟试验, 以弃渣场渣土(CK)为对照, 研究了1%、3%和6%生物炭添加(S₁, S₂, S₃)处理下, 弃渣场渣土理化性质以及狗牙根生长和养分吸收的变化特征。[结果] (1) 添加生物炭提高了渣土孔隙度并降低了容重, 使pH值从偏酸趋于中性, 同时渣土有机碳、全氮、全磷、全钾含量平均提高了26.48%、46.13%、25.97%、4.46%, 6%添加量改良效果最为显著。(2) 3%添加量更好地改善了渣土颗粒分布, 提高了 ≥ 0.25 mm团聚体占比和团聚体稳定性, 其中团聚体平均重量直径、团聚体几何平均直径相比于CK提高了75.29%、26.32%。(3) 生物炭添加使狗牙根生物量提高了19.89%~107.28%, 根系氮、磷、钾含量平均提高了29.63%、39.95%、35.37%, 其中3%添加量改良效果最佳。(4) 冗余分析和偏最小二乘结构方程模型显示, 容重是限制弃渣场狗牙根生长的主要因子。[结论] 生物炭添加可改良弃渣场渣土理化性质, 提高狗牙根生物量和养分积累, 总体而言, 生物炭添加量3%的渣土改良及促进植物生长效果最佳。

关键词: 生物炭; 渣土理化性质; 狗牙根; 养分吸收

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0206-09

Effects of biochar addition on physicochemical properties and plant growth conditions of slag dump soil

Qian Yi¹, Wang Yushuai³, Chen Pingping², Yang Gang³, Li Jianxing², Chen Qibo¹, Yang Haozhou¹, Ye Nan⁴

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Kunming Institute of Survey, Design and Research Co., Ltd. of PowerChina Group, Kunming 650051, China; 3. Yunnan Dianzhong Water Diversion Engineering Co., Ltd., Kunming 650205, China; 4. Hydrological Bureau of the Yangtze River Water Resources Commission, Lower Yangtze River Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210019, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of corn straw biochar addition on the physicochemical properties of slag dump soil and the growth of *Cynodon dactylon*, and to provide practical guidance for the construction of soil and water conservation projects and vegetation restoration in slag dumps. [Methods] A pot experiment was conducted using slag dump soil from a typical site of the Central Yunnan Water Diversion Project, with slag soil (CK) as the control. The effects of 1%, 3% and 6% biochar treatments (S₁, S₂ and S₃) on the physicochemical properties of the soil and growth and nutrient uptake of *C. dactylon* were investigated. [Results] (1) Addition of biochar increased the porosity of the slag soil and lowered the bulk density, causing the

收稿日期: 2025-05-11

修回日期: 2025-06-09

接受日期: 2025-06-22

资助项目: 云南省滇中引水工程水土保持关键技术专项(DZYS-ZH-STBC-SJ-001); 国家自然科学基金(3186030253)

第一作者: 钱毅(1999—), 女, 云南玉溪人, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持及生态恢复。E-mail: qianyi20250423@163.com

通信作者: 陈奇伯(1965—), 男, 甘肃定西人, 博士, 教授, 主要从事水土保持及生态恢复研究。E-mail: chengqb@swfu.edu.cn

王玉帅(1988—), 男, 河南灵宝人, 学士, 高级工程师, 主要从事滇中引水工程环境保护、水土保持建设管理工作。E-mail: 564465987@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

pH value to shift from acidic to neutral. Meanwhile, the organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium contents of the slag soil increased by 26.48%, 46.13%, 25.97% and 4.46%, respectively. The 6% addition rate showing the most significant improvement. (2) The 3% addition improved the particle distribution of the slag soil, increasing the proportion of ≥ 0.25 mm aggregates and the aggregate stability, and the Mean Weight Diameter (MWD) and Geometric Mean Diameter (GMD) increased by 75.29% and 26.32% compared with CK. (3) Biochar addition increased the biomass of *C. dactylon* by 19.89%~107.28%. The nitrogen, phosphorus and potassium contents of the root system were increased by 29.63%, 39.95% and 35.37% on average, respectively, with the 3% addition showing the best effect. (4) Redundancy analysis and partial least squares structural equation modeling showed that bulk density was the main factor limiting the growth of *C. dactylon* in the slag dump. [Conclusion] The addition of biochar can improve the physicochemical properties of slag dump soil and increase the biomass and nutrient accumulation of *C. dactylon*. Overall, a 3% biochar addition shows the best effect in improving the soil quality and promoting plant growth.

Keywords: biochar; physicochemical properties of slag soil; *Cynodon dactylon*; nutrient uptake

生物炭因其高碳含量、多孔结构、较大的比表面积、丰富的含氧官能团等特性^[1],在农林和环境领域常被用作土壤改良剂。玉米秸秆因其来源广泛和低成本,成了制备生物炭的首选天然材料。近5年的最新研究结果表明,在盐碱地中,生物炭可增加土壤孔隙度与持水能力,提高磷、钾养分含量,减少植物对钠的吸收,在3%生物炭添加下,百里香地上部分鲜重和干重均达到最大值^[2];与有机肥结合施入弃渣场覆土时,能降低弃渣场覆土容重并提升养分含量,显著提高植物生物量^[3];在红黏土中,土壤pH值随生物炭掺量增加而增大^[4];施用于紫色土旱坡地时,可使全氮总流失通量最小化,有效提升土壤质量^[5]。同样,在棕壤、黑土等土壤类型中,施入生物炭有效提高土壤持水保肥能力和土壤生物活性,促进农作物产量及植物生长。多项研究^[6-7]已证实,生物炭添加能改善土壤理化性质、优化土壤物质循环和水分运输,补充土壤有机碳和氮、磷、钾等养分含量,提高土壤生物活性。目前,土壤改良研究多在农业土壤肥力提升等方面,在生态脆弱环境的废弃地、弃渣场植被恢复中,生物炭在改良渣土性质,进一步促进植物生长的研究还不深入。

滇中引水工程规划建设了220个弃渣场,用于科学处置 $7.19 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的工程弃渣。长期堆置的弃渣容易引发面蚀、沟蚀、崩塌等次生地质灾害,影响土壤资源可持续发展和生态环境^[8]。弃渣场渣土中添加土壤改良剂是一种有效措施。土壤改良剂作用在植物根系后,能缓解资源限制问题,从而提升植物生产力。体现土壤改良剂-土壤-植物之间的相互作用。

本研究以滇中引水工程某弃渣场堆置的渣土为对象,通过盆栽模拟试验,种植抗逆性草本植物狗牙根(*Cynodon dactylon*),探究玉米秸秆生物炭不同添加量(0%,1%,3%,6%)对弃渣场渣土养分、结构及

狗牙根生长的影响。通过试验结果筛选出适宜弃渣场渣土的最佳生物炭添加量,为滇中引水工程弃渣场渣土改良及生态恢复提供客观依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验材料

本研究以金沙江干热河谷区新普村弃渣场(101°34'48"E,25°12'56"N)为例,经现场调查,其弃渣主要源于周边隧洞及倒虹吸工程开挖。研究区属高原亚热带季风气候,年平均温度15℃,海拔1830 m,年降雨量平值850 mm。2024年4月中旬到新普村弃渣场采集渣土,去除大块石砾风干。

供试土壤理化性质为pH值6.05,容重 1.27 g/cm^3 ,有机碳 11.44 g/kg ,全氮 1.00 g/kg ,全磷 1.54 g/kg ,全钾 46.82 g/kg 。供试植物选择金沙江干热河谷典型指示草本植物狗牙根,狗牙根具有根系发达、环境适应能力强等^[9]优点。试验所用玉米秸秆生物炭由星诺环保材料有限公司提供(炭烧温度500℃、颗粒直径200目、灰度12.95%、氮含量10.61%、O/C 0.22%、H/C 0.46%、比表面积 $603 \text{ m}^2/\text{g}$)。

1.2 试验设计

盆栽模拟试验于2024年5—10月在云南省农业科学院热区生态农业研究所试验基地进行。容器为自制聚乙烯管(高40 cm、口径20 cm、管帽封底,管身隔10 cm打孔),生物炭添加比例参考以往研究^[10-12],包括4个处理:无添加生物炭对照组(Control, CK),添加1%,3%,6%的生物炭(S_1, S_2, S_3),每个处理设6个重复。渣土过筛后与生物炭均匀混合装盆,每盆渣土容重为 1.27 g/cm^3 。为避免测定干扰,其中3盆用于渣土理化指标测定,3盆用于植物生长测定。播种前对狗牙根进行温水浸种,采取穴播的播种方式,

每盆播种25粒饱满的种子,种植期内保证盆栽的含水量保持在其田间持水量的80%左右,定期养护。2024年10月下旬收获狗牙根植株,测定生物量、根长等生长指标,同期采集盆栽渣土样品用于测定渣土理化性质等指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 渣土理化性质测定 环刀法测定渣土容重、孔隙度、毛管孔隙度,酸度计测定渣土pH值;机械稳定性团聚体用干筛法测定;粒径分布的体积占比用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000)分析;全氮含量用凯氏定氮法测定;全磷含量用紫外分光光度法测定;全钾含量用火焰光度法测定;有机碳含量用重铬酸钾容量法测定^[13]。

1.3.2 狗牙根采样、根系分析与养分测定 狗牙根收获时,靠近容器中间位置选取3株,用测量软尺测量植株株高,再用剪刀将狗牙根地上与地下部分分离称取鲜重,用自来水轻轻冲洗根系,吸水纸吸水后放入自封袋中,存放于冰箱中保持4℃带回实验室进行根系测定。将根系放于透明塑料托盘中整理根系互不交叉,避免扫描重叠。通过扫描仪(Expression/

12000XL)对根系进行扫描,扫描得到的根系图片使用根系分析软件(WinRHIZO)进行分析,获取根长、根表面积等根系参数。随后将植物放入信封,烘箱中105℃杀青30 min后80℃烘干至恒重并计算根冠比、比根长。用研磨机将地上部分与根系研磨成粉末,测定狗牙根地上部分与根系养分氮、磷、钾含量。

1.4 统计分析

运用Excel 2019对试验数据进行基本处理,运用SPSS 29.0进行不同指标之间数据分析,运用Origin 2021绘制相关图表,运用Canoco 5进行冗余分析,运用R语言进行结构方程参数确定。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对渣土理化性质的影响

2.1.1 生物炭添加对渣土物理性质的影响 与CK相比,生物炭添加处理下pH值提高了6.98%~15.87% ($p < 0.05$),趋于中性;容重降低了1.57%~11.81% ($p < 0.05$);总孔隙度提高3.94%~10.81%,毛管孔隙度提高3.57%~6.68%。渣土pH值、容重、总孔隙度对生物炭添加均表现出显著差异(表1)。

表1 生物炭不同添加量处理下渣土物理性质特征

Table 1 Characterization of physical properties of slag soil under different biochar addition treatments

处理组	pH值	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%
CK	6.30±0.22b	1.27±0.06a	30.99±8.35b	27.35±6.42a
S ₁	6.74±0.33ab	1.25±0.11a	34.93±0.95ab	30.92±1.63a
S ₂	7.14±0.44a	1.14±0.03ab	38.14±2.87ab	34.03±3.47a
S ₃	7.30±0.33a	1.12±0.04b	41.80±2.23a	31.40±4.25a

注:数据以“均值±标准差”表示,不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 生物炭添加对渣土养分含量的影响 与CK相比,添加生物炭后有机碳含量显著提高了11.80%~45.31% ($p < 0.05$);全氮和全磷含量显著提高了25.25%~59.60% ($p < 0.05$)和18.40%~23.31% ($p < 0.05$),全钾含量呈波动变化,S₁处理降低了0.96%,S₂,S₃处理分别提高了5.92%和8.43%。有机碳、全氮、全磷含量对生物炭添加均表现出显著差异(图1)。

2.1.3 生物炭添加对渣土质地及团聚体稳定性的影响 根据USDA土壤质地三角图分类标准,研究区土壤主要类型为黏土(图2A)。CK的黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、砂粒(>50 μm)体积占比分别为23.13%,66.14%,10.73%,生物炭添加处理后,渣土黏粒、粉粒体积占比分别平均降低12.92%,12.60%,砂粒平均提高25.52%。整体来看,生物炭添加导致渣土机械组成发生改变,砂粒随生物炭添加整体逐渐增加,黏粒和粉粒降低。

与CK相比,S₂,S₃处理下>5 mm团聚体占比中,平均提高10.50%;生物炭添加后,对5~2 mm团聚体

占比无显著差异;2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm分别平均降低9.00%,6.50%,3.00%;<0.25 mm团聚体占比平均提高6.00%。S₁处理低于S₂,S₃处理对渣土机械稳定性团聚体分布效果,S₂处理下≥0.25 mm团聚体占比达91.00%(图2B)。与CK相比,生物炭添加处理的团聚体平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)、团聚体几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)提高了30.89%~75.29%,5.26%~26.32%(图3)。

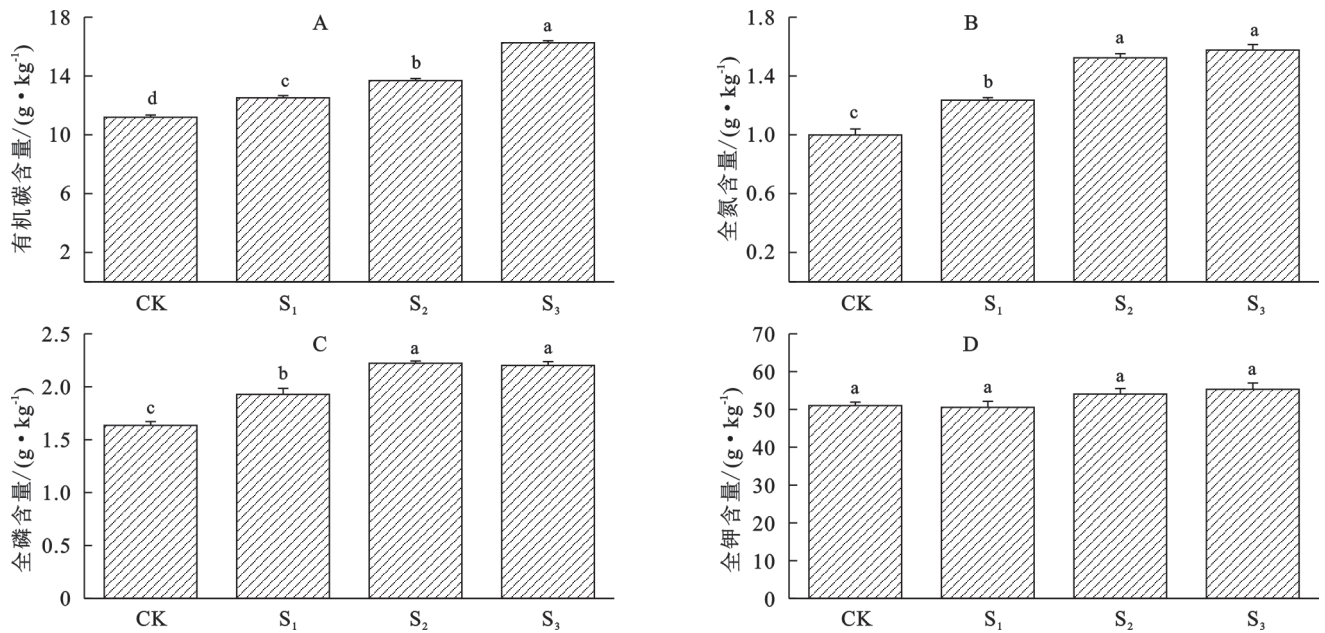
2.2 生物炭添加对狗牙根生长的影响

2.2.1 生物炭添加对狗牙根生长指标及根系形态的影响 生物炭添加处理后,对狗牙根生长指标均有正向效应,株高、干重、鲜重、根冠比分别提高了2.18%~21.36%,19.89%~107.28%,8.76%~49.32%和4.41%~19.12%(图4)。狗牙根干重随生物炭增加而增长,二者存在正向显著差异,其余指标无显著差异。但整体来说生物炭添加能促进狗牙根生物量积累。

与CK相比,狗牙根根干重、平均根径、总根长、

总根表面积、总根体积分别提高了 40.11%~166.14%, 8.57%~34.29%, 91.09%~134.13% ($p < 0.05$), 24.44%~64.76% 和 158.62%~222.41% ($p <$

0.05), 比根长为先升后降趋势, 变化幅度为 51.44%~ -2.24%(图 5)。生物炭添加处理对狗牙根根系发育表现积极(图 6), 但平均根径、比根长并没有显著差异。



注:不同小写字母表示处理组之间 $p < 0.05$ 差异显著性。

图 1 生物炭不同添加量处理下渣土养分含量变化

Fig. 1 Nutrient contents of slag soil under different biochar addition treatments

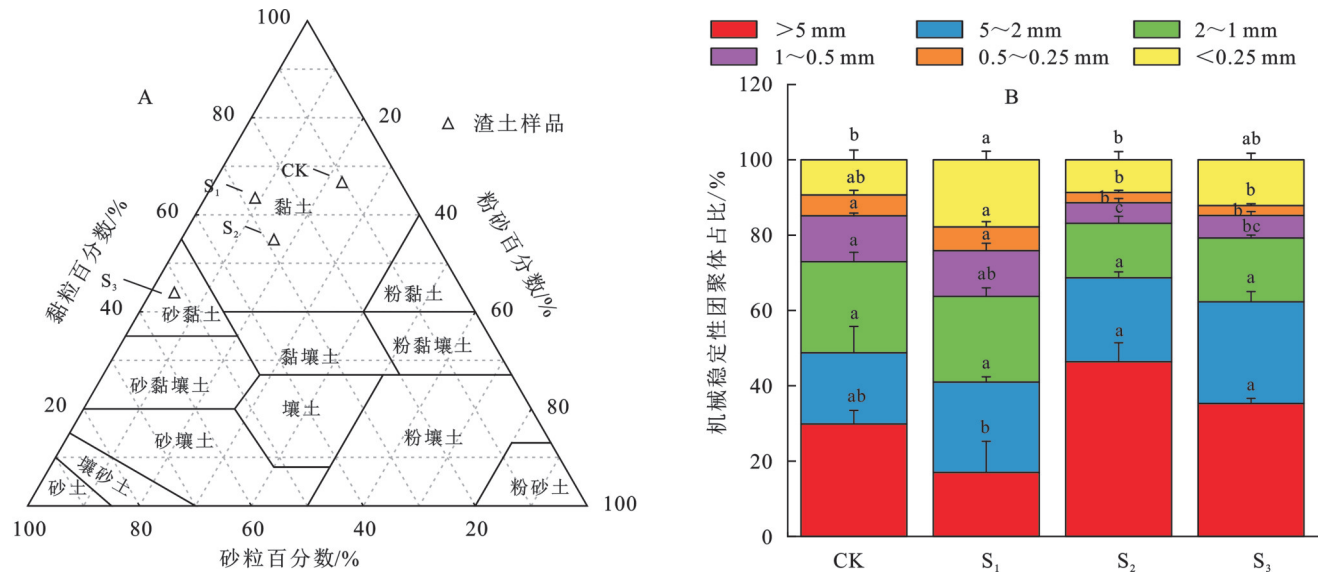


图 2 生物炭不同添加量处理下渣土质地、机械稳定性团聚体含量分布

Fig. 2 Distribution of slag soil texture and content of mechanically stable aggregates under different biochar addition treatments

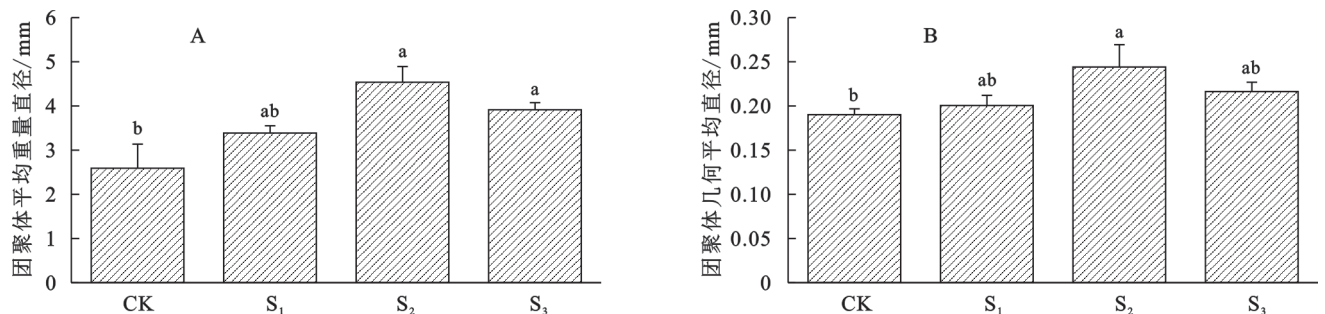


图 3 生物炭不同添加量处理下渣土团聚体稳定性变化

Fig. 3 Changes in stability of slag soil aggregates under different biochar addition treatments

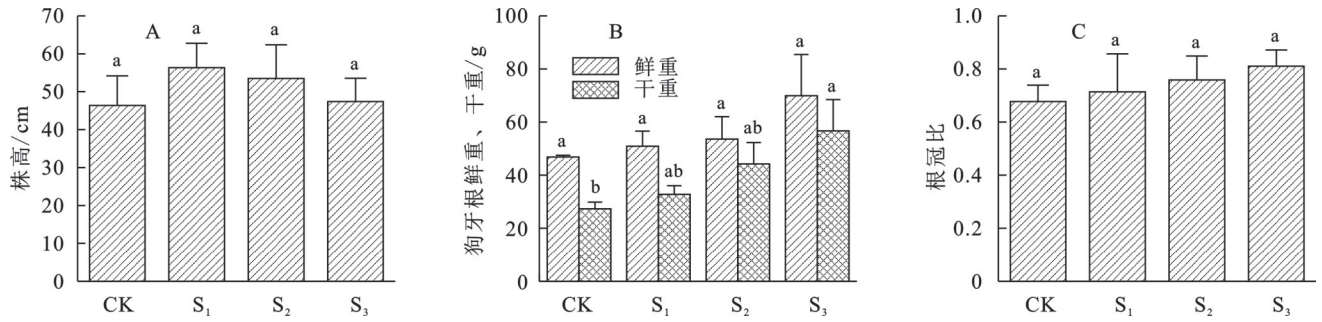


图 4 生物炭不同添加量处理下狗牙根生长指标变化

Fig. 4 Growth indices of *Cynodon dactylon* under different biochar addition treatments

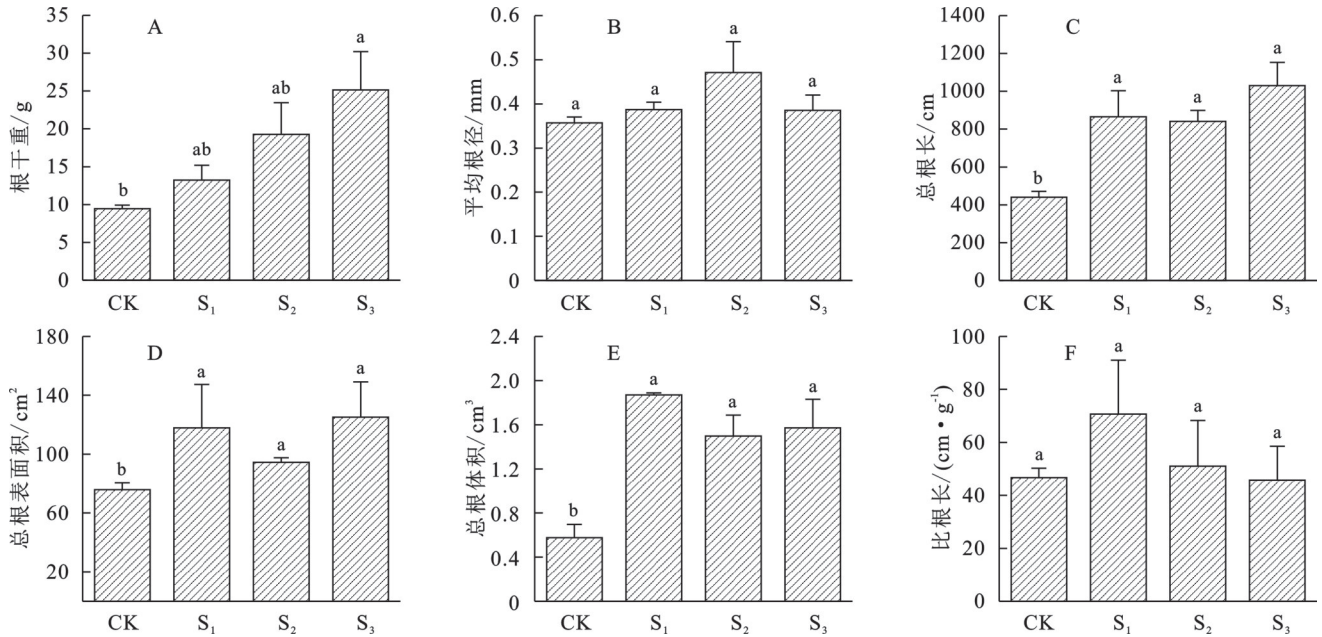


图 5 生物炭不同添加量处理下狗牙根根系形态变化

Fig. 5 Root morphology of *C. dactylon* under different biochar addition treatments

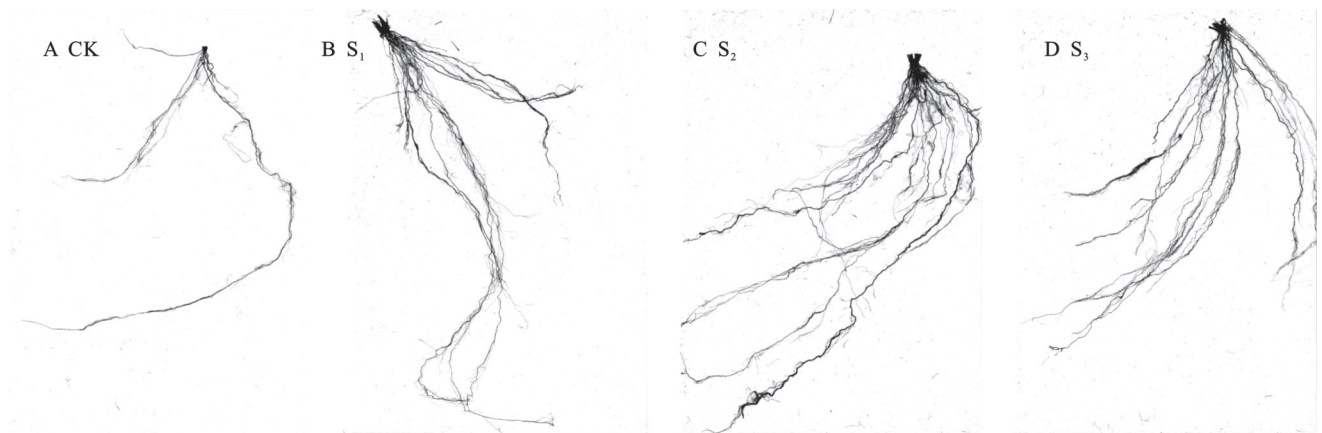


图 6 生物炭不同添加量处理下狗牙根根系发育典型图

Fig. 6 Typical images of root system development of *C. dactylon* under different biochar addition treatments

2.2.2 生物炭添加对狗牙根养分含量的影响 与 CK 相比,狗牙根地上部分氮、磷、钾含量分别显著提高了 28.57%~85.71% ($p < 0.05$), 3.23%~50.32% 和 200.00%~489.61% ($p < 0.05$); 根系氮、磷、钾含量分别显著提高了 22.21%~44.45% ($p < 0.05$), 14.29%~80.16% ($p < 0.05$) 和 11.56%~51.70% ($p < 0.05$)。生物炭添加显著提高狗牙根地上部分和根系养分积累,狗

牙根根系养分对生物炭添加表现出显著性差异(图 7)。

2.3 相关性分析

2.3.1 生物炭添加对渣土理化性质和狗牙根生长 RDA 分析 以渣土理化性质作为响应变量,狗牙根生长指标作为解释变量进行冗余分析(图 8)。RDA1 轴与 RDA2 轴分别解释了 74.36%, 18.63% 的变化(总解释量 92.99%)。全钾含量、MWD 值与狗牙根鲜

重、干重、根干重呈显著正相关,有机碳、全氮含量、全磷含量、pH值、GMD值与狗牙根总根体积呈正相关;容重与狗牙根生物量、根冠比呈负相关,pH值与狗牙根氮含量呈显著负相关,毛管孔隙度与根系氮、地上

部分钾、根系钾含量呈负相关,其余指标之间无显著相关性。对渣土环境因子表现显著的指标是狗牙根干重、根系氮含量(表 2),对模型的贡献率为 29.90%,12.9%,容重是限制狗牙根生长的主要因子。

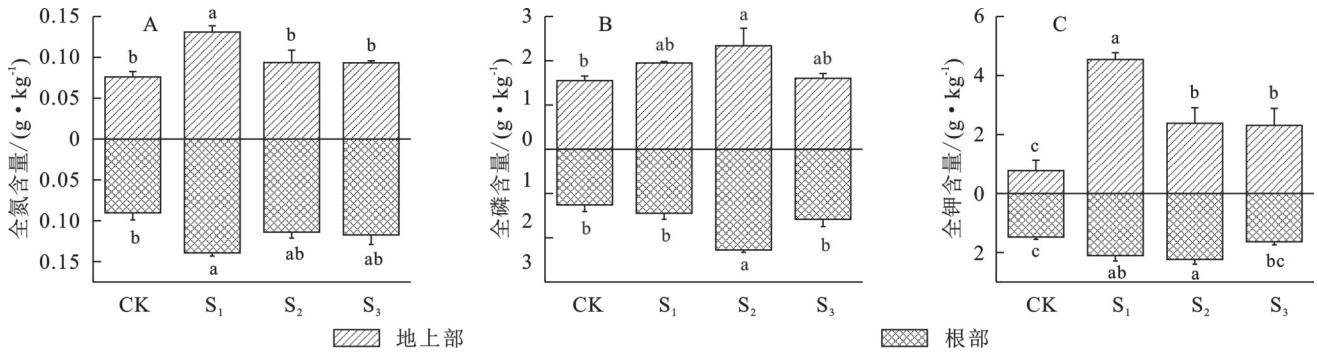
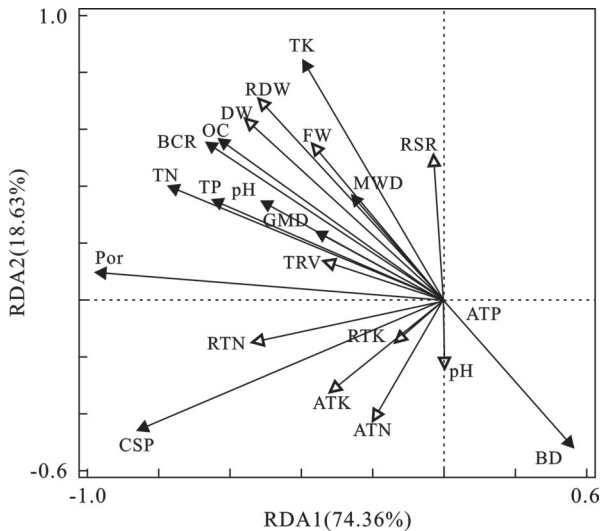


Fig. 7 Nutrient contents of *C. dactylon* under different biochar addition treatments



注:黑色箭头表示渣土理化性质(BCR为生物炭添加梯度;pH为渣土pH值;BD为容重;Por为总孔隙度;CSP为毛管孔隙度;MWD为团聚体平均重量直径;GMD为团聚体几何平均直径;OC为有机碳;TN为渣土全氮;TP为渣土全磷;TK为渣土全钾)。白色箭头表示狗牙根生长指标(PH为株高;FW为狗牙根鲜重;DW为狗牙根干重;RSR为根冠比;RDW为根干重;ARD为平均根径;TRL为总根长;TRSA为总根表面积;TRV为总根体积;SRL为比根长;ATN为地上部氮;ATP为地上部磷;ATK为地上部钾;RTN为根系氮;RTP为根系磷;RTK为根系钾)。

图 8 生物炭添加对渣土理化性质、狗牙根生长的冗余分析
Fig. 8 Redundancy analysis of physicochemical properties of slag soil and growth of *C. dactylon* under biochar addition

2.3.2 生物炭添加对渣土理化性质、狗牙根生长路径分析 基于偏最小二乘结构方程模型(Partial Least Squares Structural Equation Modeling, PLS-SEM),构建“生物炭添加处理—渣土理化性质—狗牙根生长”作用路径(图 9)。通过选取相关变量(生物炭添加、渣土理化性质、狗牙根生长和养分指标)整合至结构方程模型中,模型拟合优度为 0.564,该模型对渣土理化性质、狗牙根生长的总解释度分别为 79.70%和 80.00%。生物炭添加对渣土理化性质表

现出显著正向效应(路径系数为 0.893, $p < 0.05$),生物炭添加显著提高渣土有机碳、全氮、全磷含量,改良渣土孔隙度和团聚体稳定性,减小渣土容重。渣土理化性质对狗牙根生长表现出直接正向影响(路径系数为 0.904, $p < 0.05$),生物炭通过直接改良渣土理化性质,提高了狗牙根生长和根系发育。生物炭添加对狗牙根生长表现不显著负相关(路径系数为 -0.011),而是存在间接影响。表明改良渣土环境是狗牙根生长的驱动因素。

表 2 各指标对狗牙根生长的贡献率
Table 2 Contribution rates of each indicator to growth of *C. dactylon*

相关指标	贡献率/%	p 值
DW	29.90	0.040
RTN	12.90	0.172
FW	9.00	0.248
ATP	7.50	0.266
RSR	7.50	0.286
ATK	8.30	0.260
RTK	7.80	0.204
ATN	6.00	0.264
PH	7.20	0.120
TRV	2.30	0.406

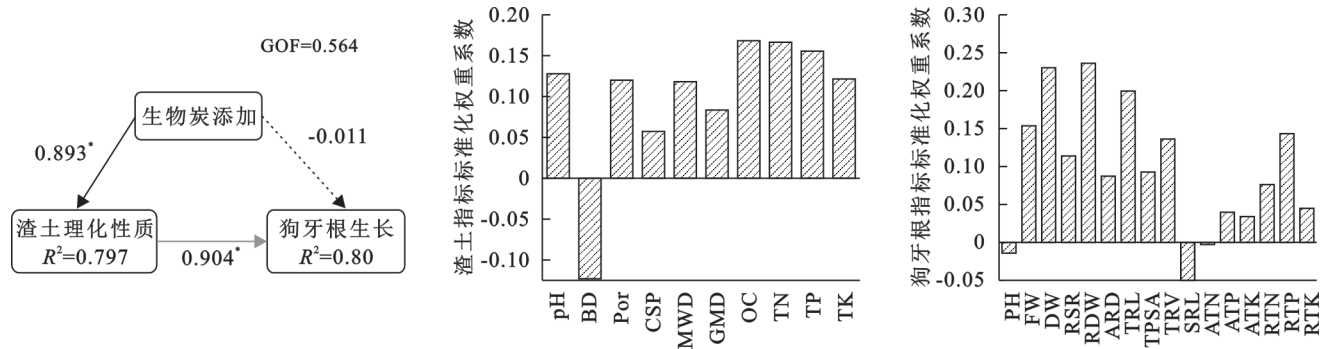
3 讨论

3.1 生物炭添加对渣土理化性质的影响

已有相关分析^[14]表明,酸性土壤添加碱性改良剂可有效提高土壤 pH 值,缓解土壤酸化。本研究中,渣土生物炭添加后,pH 值从 6.05 提升至 7.30,这与生物炭含有碱性物质(碳酸盐)和热解温度有关。胡燕梅等^[15]研究发现,向红壤坡耕地添加 5% 玉米秸秆生物炭可使土壤容重降低 6.48%,总孔隙度增加

3.96%，显著提升土壤持水能力。本研究中，生物炭添加使渣土容重降低了1.57%~11.81%，总孔隙度

增加了3.94%~10.81%，生物炭具有疏松多孔结构能降低渣土容重，提高孔隙度。



注：黑色、灰色实线箭头表示正向影响，虚线箭头表示负向影响，箭头线上的数字表示标准化路径系数。 R^2 是决定性系数。GOF指数代表拟合优度，星号表示显著差异(*代表 $p < 0.05$)。

图9 生物炭添加对渣土理化性质、狗牙根生长的路径分析

Fig. 9 Path analysis of physicochemical properties of slag soil and growth of *C. dactylon* under biochar addition

Zhang等^[16]研究发现，添加生物炭可改善盐渍化土壤理化性质，使土壤全氮含量增加了6.38%~58.51%。本研究中，生物炭添加处理下渣土养分含量高于对照组，不同生物炭添加量处理对渣土有机碳、全氮、全磷含量分别提高了11.80%~45.31%，25.25%~59.60%，18.40%~23.31%，而对全钾含量的变化影响较小。这可能与生物炭中的灰分富含多种营养元素有关，可直接补充渣土有机碳、氮、磷等养分。生物炭表面官能团(羧基、羰基等)吸附等理化特性，能有效减少渣土氮、磷元素流失。RDA(图8)和PLS-SEM分析(图9)表明，生物炭添加与渣土理化性质之间存在显著正向关系。

张宇新^[17]的研究发现，玉米秸秆生物炭添加使10—20 cm棕壤土层黏粒、粉粒含量降低，砂粒含量增加。本研究中，渣土黏粒、粉粒体积占比分别平均降低12.92%，12.60%，砂粒平均提高25.52%。由于生物炭含氧官能团吸附小粒径颗粒，使黏粒和粉粒流失量减少。在浇灌过程中，黏粒和粉粒流失量相对砂粒减少，砂粒未被吸附且因流失量较大致其在渣土中占比相对升高。

谭立伟等^[3]研究表明，土壤粒径 ≥ 0.25 mm团聚体含量占比越高，土壤颗粒流失越少。MWD值、GMD值越高，土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力越强。本研究中， S_2 处理下 ≥ 0.25 mm团聚体占比达最高，WMD值、GMD值相比对照组分别提高了75.29%，26.32%，生物炭添加提高了渣土有机碳和土壤生物活性，产生更多分泌物形成胶结物质，通过胶结作用使不同粒径颗粒结合形成稳定团聚体结构。团聚体稳定性指标呈“增加—减少”趋势(图3)，这与Pang等^[18]发现的旱作覆膜农田土壤团聚体稳定性随生物炭添加量的增加逐渐增大的趋势，和Liu等^[19]发现的生物炭添加对砂壤土团聚体稳定性无显

著影响的趋势不同。可能是过量生物炭添加吸附了(Ca^{2+} , Mg^{2+} 等)离子，削弱黏粒桥接与絮凝^[20]，也可能与土壤类型、土壤质地等有关。

3.2 生物炭添加对狗牙根生长的影响

本研究中，生物炭添加与狗牙根株高呈先升后降趋势(图4A)，根冠比呈上升、比根长呈下降趋势。表明生物炭添加影响植物资源分配，更偏向于根系发育^[21]。刘大翔等^[10]研究发现，随着生物炭添加量的增加，狗牙根生物量呈上升趋势。这一结论与本研究结果一致，生物炭添加使狗牙根生物量提高了19.89%~107.28%。PLS-SEM分析表明，生物炭添加通过直接改善渣土理化性质，提升养分含量增强渣土生物活性，促进提高狗牙根生长。

Wan等^[22]对生物炭改良土壤提升玉米根系形态的研究发现，与土壤相比，生物炭改良的土壤中生长的植物具有更大的总根长、根平均直径、根体积等。本研究中，生物炭添加处理优化了狗牙根根系形态，其中 S_2 处理下平均根径增幅最大，而 S_3 处理下平均根径降低(图5)。这种变化可能与生物炭过量添加引发的根际碳酸盐轻度富集，诱导根系形态重塑有关^[23]，适量生物炭添加能够促进根系机械锚固作用，提高土壤固土能力^[24]。除比根长外，根系指标均优于对照组。已有分析表明^[25]，土壤容重过大，可能导致根系穿透阻力增大，影响作物产量。本研究RDA分析结果发现，渣土容重与狗牙根根生物量存在负相关关系，表明较高的容重能限制根系生长，可能与生物炭添加量和狗牙根根系生长动态密切相关。

Zhang等^[26]的研究发现，土壤养分含量是限制黄壤狗牙根生长的主要因素，而Yang等^[27]研究表明，过量添加生物炭(> 900 kg/hm²)会抑制烤烟的生长。本研究中，随着生物炭添加狗牙根地上部分和根系养分含量呈先升后降趋势(图7)，表明过量生物炭添

加(6%添加量)影响狗牙根养分吸收,进而抑制狗牙根生长。可能是生物炭的灰分含量过高,渣土养分调控不平衡,影响植物对养分吸收。可推断出生物炭添加存在一个最佳阈值,超过该阈值将抑制植物养分积累和生长产生负面影响^[28-29]。

未来研究可在弃渣场野外场地进一步分析生物炭添加对渣土-狗牙根体系长期协同机制,综合评估生物炭与其他改良剂对渣土改良效果、生物炭添加对渣土微生物群落动态影响。

4 结论

(1) 生物炭施入渣土可显著改善渣土理化性质,其添加量与改良效果呈显著剂量效应。当添加量达6%时,渣土容重降低了11.81%,孔隙度显著增加,pH值趋于中性,同时有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别提高了45.31%,59.60%,23.31%和8.43%。

(2) 生物炭对渣土团聚体结构具有显著调控作用,3%添加量处理下MWD值、GMD值分别为4.54 mm和0.24 mm,显著高于6%处理的3.92 mm,0.21 mm,表明适量添加更有利于团聚体形成和稳定。

(3) 3%添加量使狗牙根总生物量增加了61.75%,平均根径、总根长和根体积分别提高了34.29%,8.57%和158.62%。6%添加量引发高剂量抑制效应,株高和根系(氮、磷、钾)养分吸收效率相比另外两组处理降低了2.18%,22.22%,25.40%和11.56%。

(4) 冗余分析表明,容重是限制狗牙根生长的主要因子。偏最小二乘结构方程模型表明,生物炭添加改善了弃渣场渣土理化性质,促进狗牙根生长。生物炭添加量为3%时,渣土改良效果和植物生长效果最佳。

参考文献(References):

- [1] Kang M W, Yibeltal M, Kim Y H, et al. Enhancement of soil physical properties and soil water retention with biochar-based soil amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,836:155746.
- [2] Eghlima G, Mohammadi M, Aghamir F. Biochar application improved soil properties, growth performances, essential oil, and rosmarinic acid content of *Thymus vulgaris* L. under salt stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2025,222:109698.
- [3] 谭立伟,杨东阳,温少卿,等.复合改良剂施加修复工程弃渣场覆土的效能研究[J]. *环境生态学*, 2024,6(10):75-84.
Tan L W, Yang D Y, Wen S Q, et al. Research on the effectiveness of amending composite ameliorants for remediating covering soil on the waste slag dump[J]. *Environmental Ecology*, 2024,6(10):75-84.
- [4] 李源涛,刘之葵,陶国钰,等.生物炭对红黏土饱和持水量及植物生长的影响[J]. *长江科学院院报*, 2025,42(5):97-103.
Li Y T, Liu Z K, Tao G Z, et al. Effects of biochar on saturated water holding capacity of red clay and plant growth[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025,42(5):97-103.
- [5] Wang S, Wang Z F, Long Y, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. *Environmental Science*, 2020,41(5):2406-2415.
- [6] 黄英梅,梁春梅,梁永鑫,等.不同类型生物炭对绿地土壤理化性质和绣球花生长的影响[J]. *江西农业学报*, 2025,37(2):23-35.
Huang Y M, Liang C M, Liang Y X, et al. Effects of different types of biochar on physical and chemical properties of greenbelt soil and growth of *Hydrangea macrophylla* [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2025,37(2):23-35.
- [7] Parasar B J, Agarwala N. Unravelling the role of biochar-microbe-soil tripartite interaction in regulating soil carbon and nitrogen budget: a panacea to soil sustainability[J]. *Biochar*, 2025,7(1):37.
- [8] Lal R, Bouma J, Brevik E, et al. Soils and sustainable development goals of the United Nations: an International Union of Soil Sciences perspective[J]. *Geoderma Regional*, 2021,25:e00398.
- [9] Zhang P Y, Wang P C, Jin S Y. Study on the morphology and mechanical properties of *Cynodon dactylon* in the riparian zone slopes of a large reservoir[J]. *Applied Sciences*, 2024,14(7):2888.
- [10] 刘大翔,高贤,许亚坤,等.施加生物炭对植被混凝土理化性质及狗牙根生物量的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021,29(1):1-14.
Liu D X, Gao X, Xu Y K, et al. Influence of biochar addition amount on physicochemical properties of vegetation concrete and biomass of *Cynodon dactylon*[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021,29(1):1-14.
- [11] Ren H X, Wang D M, Wang H, et al. Effects of biochar on the photosynthetic and antioxidant characteristics of ryegrass and alfalfa under saline-alkali stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(17):116-123.
- [12] 高言,沈洪政,杨婷,等.不同生物炭添加量对土壤水分运动过程的影响及模拟研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(9):134-140.
Gao Y, Shen H Z, Yang T, et al. The effects of different biochar additions on soil water movement[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(9):134-140.
- [13] 胡慧蓉,田昆.土壤学实验指导教程[M].北京:中国林业出版社,2012.

- Hu H R, Tian K. Guide course of soil science experiment [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012.
- [14] Liu S W, Cen B T, Yu Z N, et al. The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity [J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 52.
- [15] 胡燕梅, 陈正发, 颜科宇, 等. 生物炭对红壤坡耕地土壤持水及入渗特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2025, 43(2): 192-203.
- Hu Y M, Chen Z F, Yan K Y, et al. Effects of biochar on soil water holding and infiltration characteristics of red soil slope cropland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(2): 192-203.
- [16] Zhang J H, Wu B, Wang G L, et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 285-294.
- [17] 张宇新. 生物炭添加对棕壤结构稳定性及水分特性影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- Zhang Y X. Effects of biochar addition on structural stability and water characteristics of brown soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.
- [18] Pang J W, Wang Y H, Tao H Y, et al. Effects of different biochar application rates on soil aggregate characteristics and organic carbon contents for film-mulching field in semiarid areas [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(9): 1729-1743.
- [19] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14(6): 975-979.
- [20] Fan Q Y, Sun J X, Chu L, et al. Effects of chemical oxidation on surface oxygen-containing functional groups and adsorption behavior of biochar [J]. *Chemosphere*, 2018, 207: 33-40.
- [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]. 山东烟台: 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, Shandong: Ludong University, 2019.
- [22] Wan H, Liu X Z, Shi Q M, et al. Biochar amendment alters root morphology of maize plant: its implications in enhancing nutrient uptake and shoot growth under reduced irrigation regimes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1122742.
- [23] Li Q W, Liang J F, Zhang X Y, et al. Biochar addition affects root morphology and nitrogen uptake capacity in common reed (*Phragmites australis*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 144381.
- [24] 王海涛, 张宇, 刘琳琳, 等. 草本植物根系对土体的加筋作用 [J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(2): 100-106, 128.
- Wang H T, Zhang Y, Liu L L, et al. Reinforcement effect of herb root system on soil [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(2): 100-106, 128.
- [25] Zhang F B, Hou Y X, Ao Y Y, et al. Root-soil interaction under soil compaction [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 531-543.
- [26] Zhang J, Ran Y G, Ma D H, et al. Dynamic characteristics of *Cynodon dactylon* root growth and its influence on soil pore evolution [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(1): 54-68.
- [27] Yang Y F, Ahmed W, Ye C H, et al. Exploring the effect of different application rates of biochar on the accumulation of nutrients and growth of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1225031.
- [28] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2011, 37(4): 439-445.
- Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2011, 37(4): 439-445.
- [29] 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.