

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.027

引用格式:郑文贤,李世雄,赵文,等.炭氮配施对黑土滩人工草地植被与土壤的修复研究[J].草地学报,2026,34(3):1041—1052

ZHENG Wen-xian, LI Shi-xiong, ZHAO Wen, et al. Effects of Biochar and Nitrogen Co-Application on Vegetation and Soil Restoration in Bare-Land Artificial Restoration Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1041—1052

炭氮配施对黑土滩人工草地植被与土壤的修复研究

郑文贤¹, 李世雄^{1,2,3}, 赵文¹, 宋江琴¹, 火久艳¹, 随奇奇¹, 徐海峰¹, 尹亚丽^{1,2*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室(青海大学), 青海 西宁 810016; 3. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:为探究祁连山区生物炭配施氮肥对黑土滩人工草地植被、土壤理化性质及胞外酶活性的影响,本研究于2021年采用随机区组设计开展试验。试验设基肥(生物炭 $0.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),并在此基础上配施不同梯度的氮肥,分别为50, 100, 150, 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (对应处理 $\text{CN}_1\sim\text{CN}_4$),并设 CN_0 (基肥)、 CN_5 (氮肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和CK(不施肥),共7个处理。结果表明,氮配施显著提高植被地上、地下生物量和根冠比($P<0.05$)。 CN_3 处理显著提高土壤含水量、全氮、有机碳和硝态氮含量。 CN_3 和 CN_4 处理显著增加 β -1,4-乙酰氨基葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和纤维素二糖水解酶活性($P<0.05$)。Piecewise SEM(Structural equation modeling)模型分析结果表明,炭氮配施通过提高胞外酶活性、促进养分供应,改善植被生长状况和土壤肥力。综上, CN_3 (基肥+氮肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, C:N $\approx 12:1$)对黑土滩人工草地植被与土壤的修复效果最佳,本研究可为黑土滩草地修复提供理论参考。

关键词:生物炭与氮肥;黑土滩人工草地;土壤理化性质;植被生物量;胞外酶活性

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1041-12

Effects of Biochar and Nitrogen Co-Application on Vegetation and Soil Restoration in Bare-Land Artificial Restoration Grassland

ZHENG Wen-xian¹, LI Shi-xiong^{1,2,3}, ZHAO Wen¹, SONG Jiang-qin¹, HUO Jiu-yan¹,
SUI Qi-qi¹, XU Hai-feng¹, YIN Ya-li^{1,2*}

(1. Academy of Animal Science and Veterinary Medicine Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source, Ministry of Education, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: To investigate the effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on vegetation, soil physico-chemical properties, and extracellular enzyme activities in artificially restored bare-land grasslands in the Qilian Mountains, a randomized block design was conducted in 2021. The treatments included a basal fertilizer (biochar $0.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ + organic fertilizer $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) with nitrogen additions of 50, 100, 150, and 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CN_1 , CN_2 , CN_3 , CN_4), as well as CN_0 (basal fertilizer only), CN_5 (200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen without basal fertilizer), and CK (no fertilization), totaling seven treatments. The results showed that biochar-nitrogen application significantly increased aboveground biomass (AB), belowground biomass (BB), and root/shoot ratio (R/S) ($P<0.05$). Specifically, CN_3 significantly enhanced soil water content (SWC), total nitrogen (TN), soil organic carbon (SOC), and nitrate nitrogen (NO_3^- -N), while CN_3 and CN_4 significantly promoted the activities of β -1,4-acetylglucosaminidase (NAG), leucine aminopeptidase (LAP), and cellobiose hydrolase (CBH) ($P<0.05$). Piecewise structural equation modeling (SEM) indicated that biochar-nitrogen application improved vegetation performance and soil fertility by stimulating extracellular enzyme activities and nutrient

收稿日期:2025-04-17;修回日期:2025-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(32260357);青海省科技项目(2023-ZJ-925M)资助

作者简介:郑文贤(1997-),男,汉族,甘肃古浪人,博士研究生,主要从事草地生态与环境保护研究, E-mail:2874009886@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail:yaliyin@163.com

supply. In conclusion, CN_3 (basal fertilizer + $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen, $C:N \approx 12:1$) showed the optimal effect, providing a theoretical reference for the restoration of bare-land artificial grassland in alpine regions.

Key words: Biochar and nitrogen fertilizer; Bare-land artificial restoration grassland; Soil physicochemical properties; Vegetation biomass; Extracellular enzyme activity

祁连山区位于青藏高原东北边缘,是我国西部重要的生态安全屏障和水源涵养地,同时也是我国生物多样性保护和畜牧业发展的重点区域^[1]。高寒草甸作为该区域主要的草地类型,不仅为畜牧业提供了资源基础,还在生物多样性保护、气候调节和水源涵养等方面发挥着重要作用^[2]。然而,气候变化和过度放牧导致祁连山区高寒草甸逐渐退化^[3]。部分草地退化后形成了“黑土滩”——冬季土壤裸露、夏季毒杂草覆盖的极度退化草地类型^[4]。“黑土滩”的不断蔓延不仅破坏了当地的生态环境,还制约着当地畜牧业的持续发展^[2-4]。

已有研究中,学者们通过补播禾本科植物、围栏封育等措施恢复黑土滩退化草地植被,提升其植被生物量和覆盖度^[5];同时,也有大量研究聚焦于土壤改良,通过施用氮肥、有机肥和生物炭等方式改善土壤理化性质、提高土壤肥力^[6]。然而,单一的植被恢复或土壤改良措施往往面临恢复速度慢、生态效益有限的问题,难以实现草地生态系统的稳定重建^[5-7]。本质上,草地退化是一个植被与土壤功能协同退化的过程,恢复退化草地亦需要从植被-土壤互促机制出发,构建综合性修复路径。

在这一背景下,生物炭与氮肥的配施措施逐渐受到重视。生物炭是通过植物材料热解制得的碳质物质,具有良好的孔隙结构、持水性和吸附性,能够提高土壤有机碳含量、改善土壤理化性质,并为微生物提供适宜的栖息环境,从而提升土壤胞外酶活性,进而促进碳氮循环^[8-9]。而氮肥的配施则为微生物提供了丰富的氮源,能够进一步刺激胞外酶活性,提高有机质的分解效率^[10]。已有研究表明,适宜比例的生物炭与氮肥配施不仅能够促进植被生长、提升土壤肥力,还可增强胞外酶活性,进而促进养分转化^[9-10]。值得注意的是,单独施用生物炭的效果在极度退化草地中往往有限。Ge等^[11]研究发现,单独施用生物炭的效果较弱,因为生物炭养分含量较低,在没有外源氮肥输入的情况下,无法有效满足植被的养分需求。夏浩和孟繁昊^[7,12]的研究表明,该措施能够显著提高土壤氮素利用率、减少土壤养分流失,增加土壤微生物量。因此,在退化草地恢复过程中,构建“植被恢复+土壤改良”的协同策略显得尤为关

键^[10]。其中,土壤胞外酶作为微生物在分解有机物、释放氮和碳等养分过程中的重要催化剂,在草地生态系统功能恢复中扮演着核心角色^[13]。

综上所述,针对祁连山区黑土滩草地协同退化的生态问题,本研究以植被恢复与土壤改良协同作用为核心^[4-6, 11, 13],采用植被修复结合生物炭和氮肥配施的土壤改良措施,探讨其对退化草地植被生长、土壤理化性质及土壤胞外酶活性的影响,旨在为黑土滩草地的生态恢复与可持续利用提供理论支持与实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验处理

研究区位于青海省祁连县默勒镇祁连山高寒草地生态试验站($37^{\circ}56' \sim 38^{\circ}00' \text{N}$, $100^{\circ}13' \sim 100^{\circ}14' \text{E}$,平均海拔约3500 m)。该区属于典型高原大陆性气候,年均温 -3.9°C ,暖季短暂(6—8月),冷季漫长(9月—次年5月),年降水量在450 mm~550 mm之间,约80%集中在6—8月,年蒸发量约1162.3 mm。植物生长期在150 d左右。该试验区植被类型为典型的高寒草甸,原生草地植被以高山嵩草(*Carex parvula*)和矮生嵩草(*C. alatauensis*)为主,黑土滩人工草地的优势种植物为草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*)和天山千里光(*Senecio thian-schanicus*),土壤类型为高寒草甸土。黑土滩人工草地的土壤基况如下:pH值为7.93,土壤容重为 $1.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有机碳含量为 $15.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $2.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $8.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

本研究以祁连山典型黑土滩人工草地为研究对象,采用随机区组设计,设置定量生物炭($0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和有机肥($1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)作为基肥,配施4个梯度氮肥量(50, 100, 150, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)分别记为 $CN_1 \sim CN_4$,同时设置2个对照处理(CN_0 :仅施生物炭+有机肥, CN_5 :仅施氮肥 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和1个空白对照(CK:不施任何肥料),共7个处理。每个处理4次重复,共28个小区,每小区面积为 100 m^2 ,小

区间隔1 m(图1D)。试验于2021年5月中下旬开展,统一对黑土滩退化草地进行翻耕(耕深约20 cm),将肥料按比例混合后旋耕入土,随后以 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 播种量撒播青海草地早熟禾,耙地、镇压、无灌溉。

生物炭和有机肥为一次性施入,氮肥自2021年初次施入,后续隔年5月补施(图1C)。恢复当年实行全面封育,自次年起每年冬季(12月至次年3月)放牧,放牧强度控制在70%,其余时间封育。

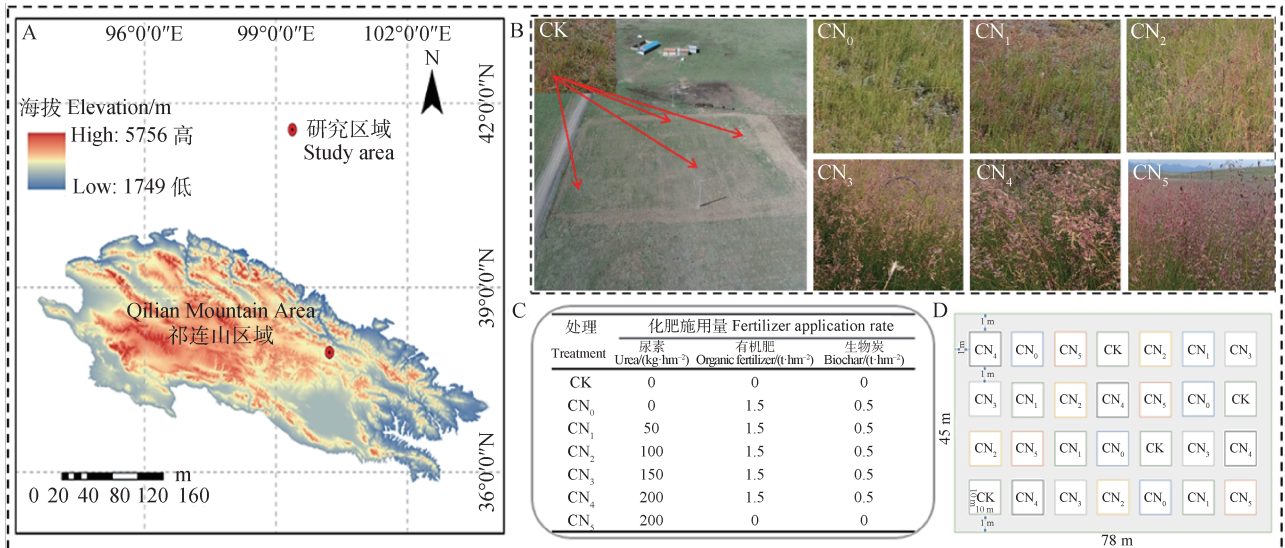


图1 小区布置及生长状况图
Fig. 1 Plot layout and growth conditions

1.2 供试物种及肥料

青海草地早熟禾是青海地区海拔4000多米的野生驯化新品种,其根茎繁殖力较强,易快速形成草皮,有效改良土壤结构、增强稳定性,是快速恢复“黑土滩”退化草地应用最广泛的新种质资源^[14]。在长期的生长过程中,该品种能促进本地草种的更新与复苏。此外,该物种所形成的植被群落具有较高的多样性,涵盖多种本土禾本科及附生植物,这种稳定的群落结构有助于增强草地生态系统的稳定性^[14-15]。

所用肥料包括:1)生物炭(河南昌盛生物炭制备厂提供),以玉米芯为原料,于 500°C 下烧制而成,其碳、氮、全磷、速效磷含量分别为 $400 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $12.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $8.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $120.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,粒径为3~8 mm;2)有机肥(宁夏伊品生物科技股份有限公司提供),总养分 $\geq 10\%$,有机质 $\geq 45\%$,氮含量1%~5%,钾含量0.2%~2.5%;3)尿素(青海云天化国际化肥有限公司提供),总氮含量 $\geq 46\%$,粒径0.85~2.8 mm $\geq 93\%$ 。

试验设置基肥为生物炭 $5 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 与有机肥 $15 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 混合施用,总碳投入量为 $8.75 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$;在此基础上,设置了4个尿素氮梯度(CN₁,CN₂,CN₃,CN₄),其纯氮投入量依次为

0,0.23,0.46,0.69 kg和 $9.2 \text{ g} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 。

1.3 样品采集与处理

在2023年8—9月植被生长旺季,采用“S”形取样法,在小区内随机选取3个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方,调查样方内植被物种及各物种分盖度,每个物种随机选取10株测量其高度。将样方内植被齐地面刈割,分种装入信封袋,105 $^\circ\text{C}$ 杀青处理2 h,65 $^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,称取地上干物质量^[4, 13-14]。以孔径为7 cm的根钻,在刈割后的样方内采集0~15 cm土层植物根系,每个样方取1钻,3钻混合为1个重复,装入网袋中,用河水冲洗泥沙,清除石粒等杂质,65 $^\circ\text{C}$ 恒温烘至恒重,称取地下干物质量。用孔径3.5 cm的土钻,随机采集每个小区内0~15 cm的土层土壤,5个点混合为1个重复,共28份。用2 mm土筛除去所取新鲜土样中的植物根系和杂物,用于土壤理化性质和酶活性等指标的测定^[15-18]。

土壤理化性质测定^[19-20]:土壤容重(Bulk density, BD)采用环刀法测定,土壤pH值采用酸度计测定(土:水质量比为1:5),土壤含水量(Soil water content, SWC)采用铝盒烘干法测定,土壤铵态氮(Ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$)和硝态氮(Nitrate nitrogen, $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$)均采用全自动间断化学分析仪

(CleverChem)测定,土壤速效磷(Available phosphorus, AP)测定采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法,土壤全氮(Total nitrogen, TN)含量采用碱性过硫酸钾消解-全自动间断化学分析仪(CleverChem)测定,土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量采用 Elementar TOC 仪测定,土壤全磷(Total phosphorus, TP)含量采用钼锑抗比色法测定。

土壤酶活性的测定^[21]:采用双抗体夹心法测定 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -1,4-acetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨基肽酶(Leucine aminopeptidase, LAP)、纤维素二糖水解酶(Cellobiose hydrolase, CBH)活性。在450 nm 波长下测定吸光度(OD)值,通过标准曲线计算样品中三种土壤酶的活性。

1.4 数据处理

使用Excel 2019对原始数据进行整理,采用Kolmogorov-Smirnov test 检验法对数据进行正态性统计检验,结果表明数据满足统计检验的正态性假设。随后,采用单因素方差分析(ANOVA)和LSD多重比较($\alpha=0.05$),检验不同处理间数据的差异显著性;为进一步揭示指标间的关系,采用主成分分析法(Principal component analysis, PCA)对土壤理化特性、胞外酶活性和植被生物量进行相关分析和主要因子提取。所用变量包括:植被生物量[地上生物量(Aboveground biomass, AB)和地下生物量(Belowground biomass, BB)]、土壤理化性质(BD, pH, SWC, NH_4^+-N , NO_3^--N , AP, SOC, TP, TN, C/N, C/P, N/P)和土壤胞外酶(NAG, LAP, CBH)。在结构方程模型(Piecewise SEM)构建中,利用SPSS 23.0对炭氮配施量、土壤物理性质(BD)、化学性质(NO_3^--N , TN, N/P)、胞外酶活性(NAG, LAP, CBH)及植被生物量(AB, BB)等变量进行降维和参数化处理,并将处理结果整合至SEM中。经过模型检查、修正与优化,最终获得最优SEM模型。用Origin 2022和R4.3.2软件进行制图。文中数据均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 生物炭配施氮肥对植被生物量及根冠比的影响

不同处理下植被地上、地下生物量的变化如图2所示。与对照相比,单独生物炭(CN_0)添加对植被

地上、地下生物量无明显影响;生物炭配施氮肥后植被地上生物量显著增加($P<0.05$), CN_4 处理的地上生物量最高,为 $320.48 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,增幅达221.38%;而 CN_3 , CN_4 和 CN_5 三者间差异不显著。与对照相比,生物炭或氮肥(CN_0 , CN_5)单独添加对植被地下生物量均无明显影响;生物炭配施氮肥处理 CN_3 和 CN_4 地下生物量显著增加($P<0.05$),其中 CN_3 处理最高,为 $1334.83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,较对照增加224.74%(图2a)。 CN_0 , CN_5 处理对植被根冠比无明显影响;与对照相比,生物炭配施氮处理 CN_2 和 CN_3 植被根冠比显著增加($P<0.05$),其中 CN_3 处理最高,增幅为22.39%(图2b)。即炭氮配施改变了植被生物量的分配格局,并且在 CN_3 处理下较优。

2.2 生物炭配施氮肥对土壤理化性质的影响

土壤容重、pH值、含水量和速效养分含量的变化如图3所示。生物炭配施氮肥处理下土壤容重和pH值均低于对照处理。与对照相比,土壤容重和pH值均在 CN_4 处理下显著降低($P<0.05$),降幅分别为11.13%和3.31%,土壤pH值在其他处理之间均无显著差异;与对照相比,土壤含水量、铵态氮和硝态氮含量均呈增加的趋势,其中, CN_3 处理的土壤含水量和硝态氮含量显著增加($P<0.05$),增幅分别为18.83%和156.27%; CN_4 处理的土壤铵态氮和速效磷含量显著增加($P<0.05$),增幅分别为42.04%和71.33%。

土壤全效养分和化学计量特征的变化如图4所示。不同处理下土壤有机碳、全氮和全磷含量均有增加的趋势。与对照相比, CN_3 处理的有机碳和全氮含量显著增加($P<0.05$),增幅分别为33.78%和204.19%; CN_4 处理的全磷含量显著增加($P<0.05$),增幅为30.71%。与 CN_0 相比,生物炭配施氮肥处理下土壤C/N, C/P均有降低的趋势。与对照相比, CN_3 处理的土壤C/N显著降低($P<0.05$),降幅为62.76%;土壤N/P显著增加($P<0.05$),增幅为109.76%。说明生物炭配施氮肥能够有效地改善土壤状况,进而增加退化草地的植被生物量。

2.3 生物炭配施氮肥对土壤胞外酶活性的影响

图5显示,生物炭配施氮肥处理下土壤 β -1,4-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、土壤纤维素水解酶(CBH)活性均高于对照组。与单施生物炭(CN_0)或氮肥(CN_5)相比,配施处理土壤

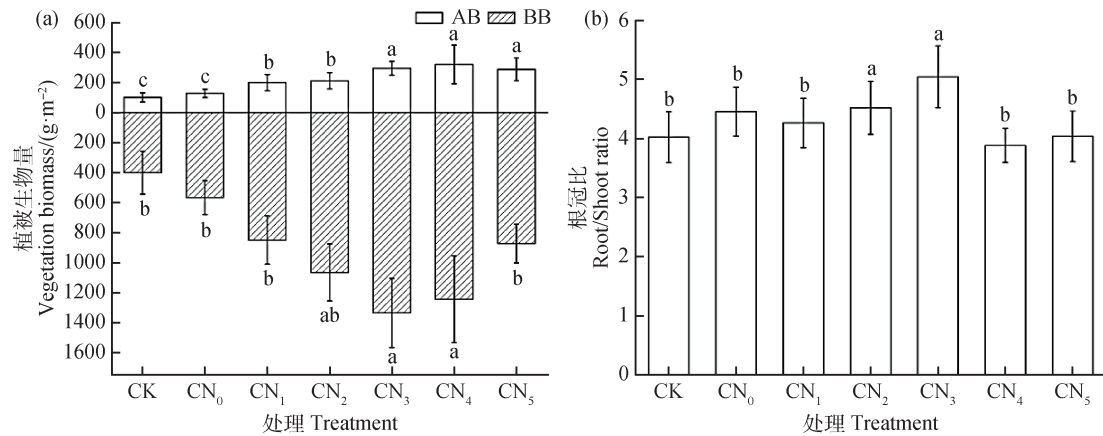


图2 生物炭配施氮肥对植被生物量及根冠比的影响

Fig. 2 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on vegetation biomass and root-shoot ratio

注: CK为不施任何肥料;CN₀为仅施生物炭+有机肥;CN₁为生物炭(0.5 t·hm⁻²)+有机肥(1.5 t·hm⁻²)+氮肥量50 kg·hm⁻²;CN₂为生物炭(0.5 t·hm⁻²)+有机肥(1.5 t·hm⁻²)+氮肥量100 kg·hm⁻²;CN₃为生物炭(0.5 t·hm⁻²)+有机肥(1.5 t·hm⁻²)+氮肥量150 kg·hm⁻²;CN₄为生物炭(0.5 t·hm⁻²)+有机肥(1.5 t·hm⁻²)+氮肥量200 kg·hm⁻²;CN₅为仅施氮肥200 kg·hm⁻²,不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$),下同。AB为地上生物量,BB为地下生物量,R/S为根冠比。下同

Note: CK represents no fertilizers applied; CN₀ represents only biochar organic fertilizer applied; CN₁ represents biochar (0.5 t·hm⁻²) + organic fertilizer (1.5 t·hm⁻²) + nitrogen fertilizer amount 50 kg·hm⁻²; CN₂ represents biochar (0.5 t·hm⁻²) + organic fertilizer (1.5 t·hm⁻²) + nitrogen fertilizer amount 100 kg·hm⁻²; CN₃ represents biochar (0.5 t·hm⁻²) + organic fertilizer (1.5 t·hm⁻²) + nitrogen fertilizer amount 150 kg·hm⁻²; CN₄ represents biochar (0.5 t·hm⁻²) + organic fertilizer (1.5 t·hm⁻²) + nitrogen fertilizer amount 200 kg·hm⁻²; CN₅ represents only nitrogen fertilizer 200 kg·hm⁻², Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$), the same below. AB represents above-ground biomass, BB represents below-ground biomass, R/S represents root-shoot ratio. The same as below

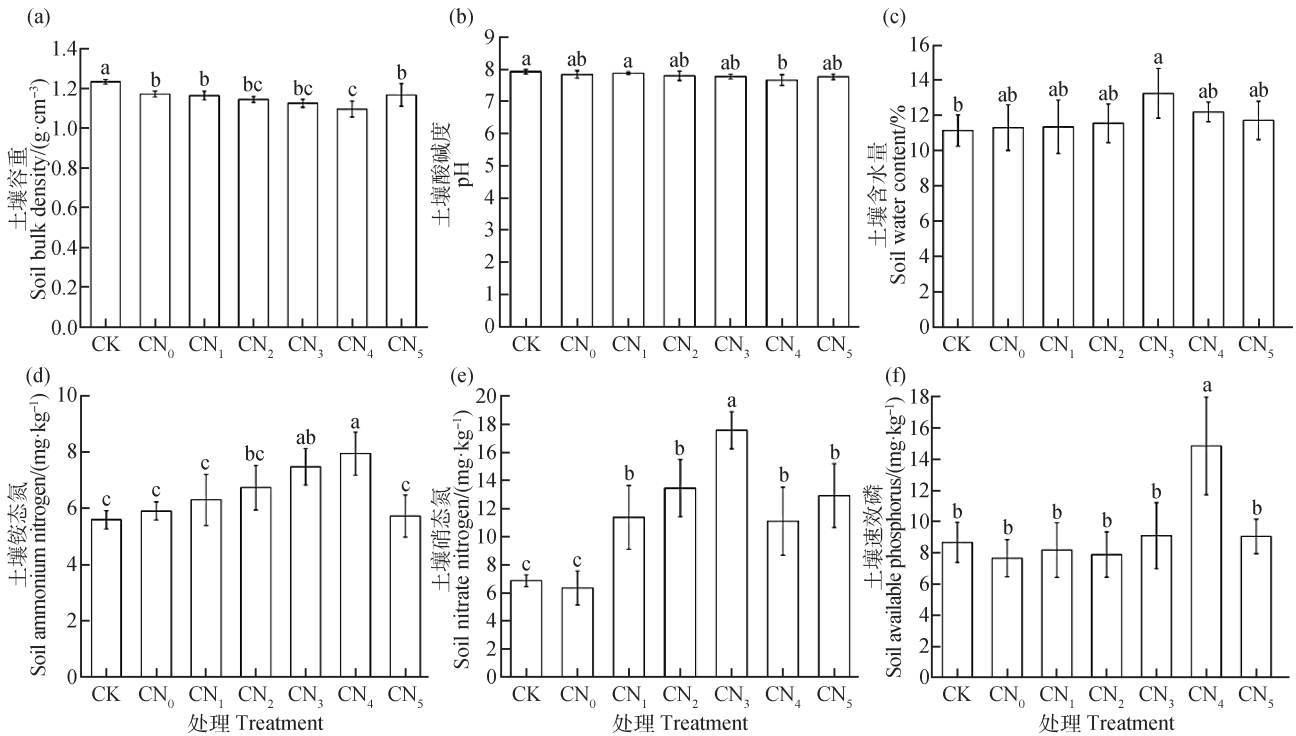


图3 生物炭配施氮肥对土壤容重、pH值、含水量和速效养分变化的影响

Fig. 3 Impact of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil bulk density, pH value, water content, and available nutrient dynamics

NAG活性均显著增加($P < 0.05$)。与对照相比,CN₃, CN₄处理的LAP和CBH均显著增加($P < 0.05$),其中,CN₃处理的土壤NAG活性最高,为10.40 nmol·g⁻¹·h⁻¹,

增幅达131.63%;CN₄处理的土壤LAP和CBH的活性最高,分别为18.55 nmol·g⁻¹·h⁻¹和139.88 nmol·g⁻¹·h⁻¹,增幅分别达63.02%和62.14%。

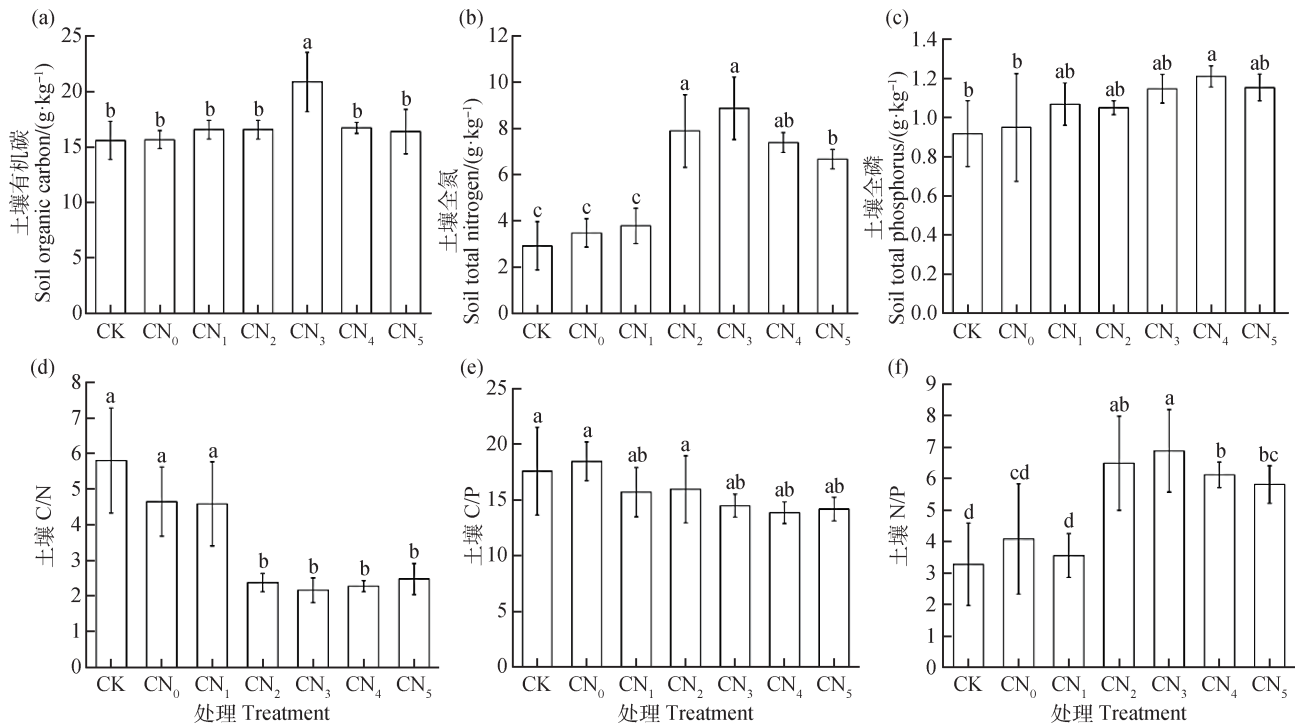


图4 生物炭配施氮肥对土壤全养分和化学计量特征变化的影响

Fig. 4 Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on the dynamics of total nutrient content and chemical stoichiometry characteristics in soil

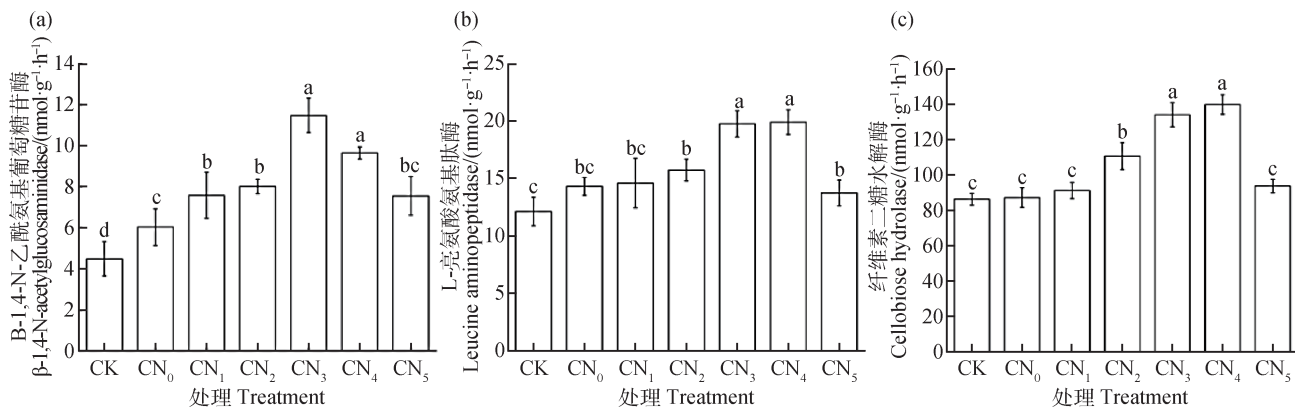


图5 生物炭配施氮肥对土壤胞外酶活性的影响

Fig. 5 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil extracellular enzyme activity

2.4 生物炭配施氮肥对土壤综合肥力的影响

为了明确生物炭配施氮肥对土壤综合肥力的影响,对土壤物理性质、化学性质、土壤胞外酶活性以及植被生物量等17个指标进行主成分分析。结果显示,生物炭配施氮肥对土壤综合肥力评分具有显著影响(图6)。主成分分析提取出5个主成分,特征根均大于1,累计方差总解释率为82.32%,表明主成分基本反映土壤质量的综合状况。具体来看,主成分PC₁主要反映了C/N, NAG, CBH, LAP, BD, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N和TN的贡献,方差解释率最高,为47.22%,说明其与第一主成分之间相关性较高,即在一定范围内,土壤胞外酶活性、NO₃⁻-N,

NH₄⁺-N和TN含量越高,表明土壤综合肥力越好;PC₂, PC₃, PC₄和PC₅在TP, N/P, C/P, SOC, SWC, AP和pH等指标上的载荷值较高,分别解释了14.54%, 8.21%, 6.46%和5.89%的方差,反映了土壤中的养分平衡、酶活性、水分及酸碱度等多方面的影响。进一步通过贡献率与主成分得分加权计算出生物炭配施氮肥不同处理下的土壤综合肥力得分,结果显示, CN₃, CN₂和CN₄处理的土壤综合肥力得分显著高于其他处理,依次为CN₃ > CN₂ > CN₄ > CN₀ > CN₁ > CN₅ > CK。这表明在黑土滩退化草地中适量的生物炭配施氮肥能够有效改善土壤综合肥力,增强土壤养分的有效性和结构的稳定性。

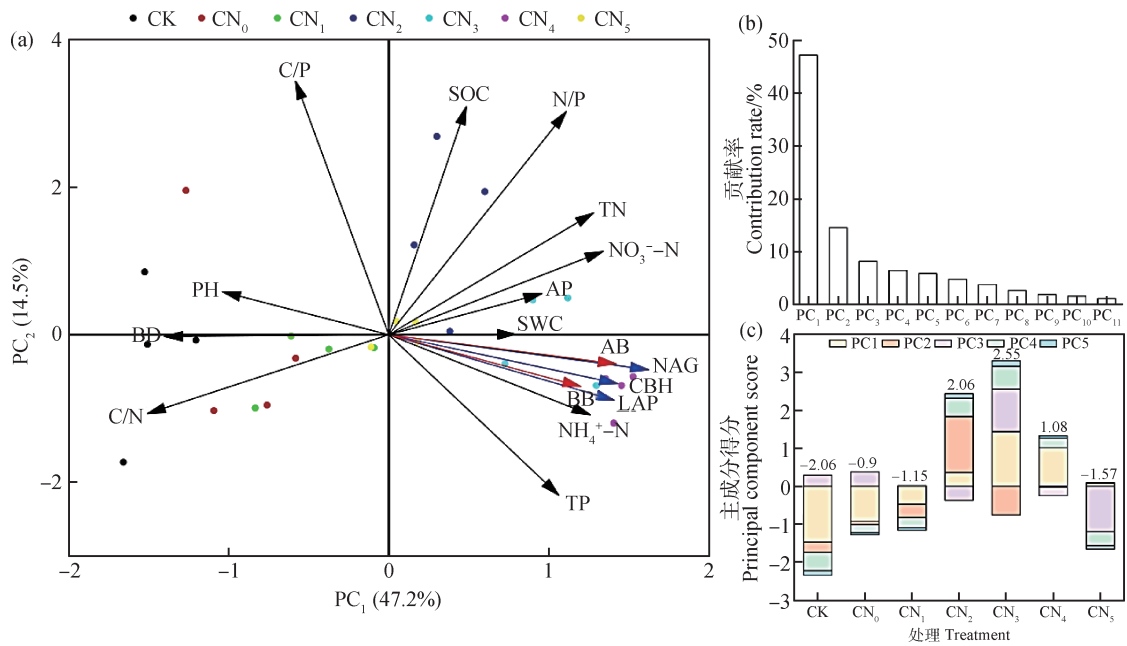


图6 生物炭配施氮肥对土壤综合肥力的影响

Fig. 6 Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil comprehensive fertility

注:(a)主成分分析图;(b)各主成分贡献率;(c)不同处理下的土壤综合肥力得分。图中数值为不同处理下各指标的综合得分,数值越大,表示生物炭配施氮肥处理的效果越好。BD表示容重;SWC表示含水量;SOC表示有机碳;AP表示速效磷;TP表示全磷;TN表示全氮;NH₄⁺-N表示铵态氮;NO₃⁻-N表示硝态氮;LAP表示亮氨酸氨基肽酶;CBH表示纤维素水解酶;NAG表示β-1,4-乙酰氨基葡萄糖苷酶

Note: (a) Principal component analysis diagram; (b) the contribution rate of each principal component; (c) soil fertility score under different treatments. The value in the figure is the comprehensive score of each index under different treatments, the larger the value, the better the effect of biochar combined with nitrogen fertilizer treatment. BD represents bulk density; SWC represents water content; SOC represents organic carbon; AP represents available phosphorus; TP represents total phosphorus; TN represents total nitrogen; NH₄⁺-N represents ammonium nitrogen; NO₃⁻-N represents nitrate nitrogen; LAP represents L-leucine aminopeptidase; CBH represents cellulosic hydrolase; NAG represents β-1,4-nacetylglucosaminidase

基于分段结构方程模型(Piecewise SEM),分析了生物炭配施氮肥处理下土壤物理性质、土壤化学性质、土壤胞外酶活性和植被生物量之间的关系(图7)。结果表明,模型对土壤胞外酶活性、土壤物理性质、土壤化学性质的解释度分别为83%,55%和23%。路径分析结果进一步显示,生物炭配施氮肥对土壤胞外酶活性(路径系数=0.86, $P<0.001$)和土壤化学性质(路径系数=0.489, $P<0.01$)产生极显著的正向影响,而对土壤物理性质产生极显著的负向影响(路径系数=-0.733, $P<0.001$);同时,植被生物量主要受土壤胞外酶活性的正向调控(路径系数=0.221, $P<0.05$)。

3 讨论

3.1 生物炭配施氮肥对植被生物量及根冠比的影响

植被生物量是评估草地生产力和恢复效果的

重要指标,直接反映着草地生态系统中植被的生长状况^[22]。本研究结果显示,在黑土滩人工草地中,不同比例的生物炭配施氮肥显著提高了植被生物量,其中CN₃和CN₄处理的植被地上、地下生物量显著高于对照组($P<0.05$),且以CN₃处理的效果最佳。这与陆啸飞等^[22]关于氮添加对植被地上/地下生物量分配影响的结论一致,表明生物炭与氮肥配施对黑土滩退化草地的修复具有一定促进作用。这种效果可能归因于生物炭丰富的孔隙结构改善了土壤环境、减少了土壤养分的流失^[23-24]。然而,在CN₅处理下,虽然地上生物量显著高于对照组($P<0.05$),但地下生物量并未出现显著变化。这可能是由于单独添加氮肥导致土壤中C、N、P等养分失衡,进而影响植被对关键养分的吸收和利用,限制了地下植被生长^[25]。这一现象与王连春等^[26]关于配比施肥影响川滇无患子[*Sapindus delavayi* (Franch.) Radlk.]生长的研究结论相一致,进一步支持了本研究的结果。根冠比是衡量植被地上和

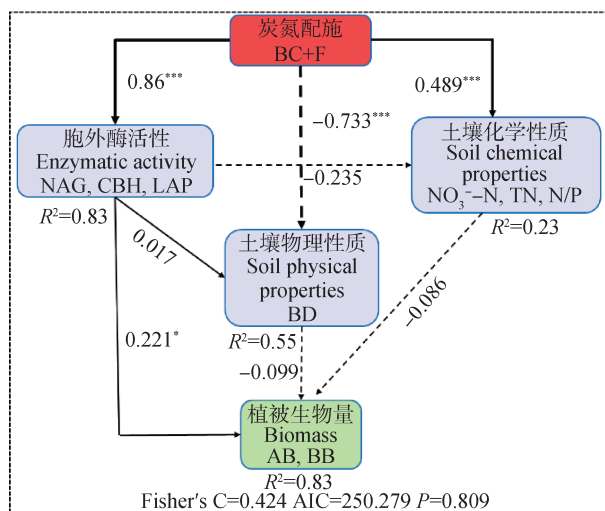


图7 生物炭配施氮肥对土壤理化性质、胞外酶活性与植被生物量的 piecewise SEM 分析结果

Fig. 7 Piecewise SEM analysis results of biochar with nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties, extracellular enzyme activities and vegetation biomass

注:在模型构建中,将环境因子按属性分组作为潜变量:土壤物理性质以容重表征,土壤化学性质由硝态氮、全氮和N/P表征,土壤胞外酶活性以 β -1,4-乙酰氨基葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶、土壤纤维素二糖水解酶表征,植被生物量则由地上生物量和地下生物量表征。图中实线表示正相关;虚线表示负相关;线条的粗细表示相关强度,线条上的数字是相关系数;响应变量旁边的 R^2 表示解释的方差比例;星号表示有统计学意义(“*”“**”和“***”分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$)

Note: In the model construction, environmental factors were grouped as latent variables according to their attributes: soil physical property was represented by bulk density; soil chemical properties were represented by nitrate nitrogen, total nitrogen, and N/P; soil extracellular enzyme activities were represented by β -1,4-N-acetylglucosaminidase, leucine aminopeptidase, and cellobiohydrolase; and plant biomass was represented by aboveground and belowground biomass. Solid lines indicate positive correlations, dashed lines indicate negative correlations, line thickness reflects the strength of the relationships, and the numbers on the lines denote the path coefficients. The R^2 values next to the response variables indicate the proportion of explained variance. Asterisks denote statistical significance (“*”“**” and “***” indicate $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively)

地下生长状况及吸收能力的关键指标,其比值的增加表明了植物在生物炭与氮肥添加条件下将更多资源分配给地下部分。 CN_3 处理的黑土滩恢复草地生态系统中根冠比显著增加($P<0.05$)。这主要是由于生物炭配施氮肥后,土壤养分氮素供应得到增强,从而促进了植物根系的生长。此外,生物炭改善了土壤的容重和含水量,提高了根系对水分和养分的吸收效率,从而导致根冠比增加^[23]。而这种根

系优势的增强,有助于植物更好地适应黑土滩低养分和恶劣环境^[27]。因此,生物炭与氮配施有助于改善黑土滩退化草地的植被生物量分配格局,减缓草地退化,促进草地的可持续发展^[22]。

3.2 生物炭配施氮肥对土壤理化性质和胞外酶活性的影响

土壤养分反映着土壤的肥力状况,是植被生长发育及组成的重要基础,决定着植被群落的结构和功能,同时也是环境状况的指示器^[28-29]。以往研究显示,单独添加氮肥或者生物炭能够在短期内提高土壤中的养分含量,快速提升土壤肥力^[30]。在本研究中,生物炭与氮肥同时施入土壤中,土壤pH值显著降低($P<0.05$),这一结果与崔月峰等^[31]关于秸秆和生物炭还田对pH值影响的研究结论相反。造成这种差异的原因可能是退化草地修复过程中原有土壤养分循环系统被破坏,导致地下腐殖物分泌相关代谢物,但由于本研究未对根系分泌的代谢物进行分析,pH值降低是否与分泌代谢物相关仍需进一步探究。此外,氮肥的输入导致土壤中的 NH_4^+ , NO_3^- 含量增加,这些离子在被植物吸收后会释放 H^+ 进入土壤中,从而引起土壤酸化,这也是导致pH值降低的主要原因之一^[32]。本研究还发现,土壤容重(BD)显著降低($P<0.05$)。其原因主要包括两个方面:一是生物炭和氮肥的添加促进了根系残留物分解,生成的产物与土壤颗粒结合,形成了稳定的团聚体结构,进而降低土壤BD;二是生物炭具有质地疏松、吸附性强等特性,改善了土壤结构,从而降低土壤BD。该结果与崔月峰等^[31]的研究结论一致。表明生物炭配施氮肥显著增加了部分处理下土壤中的C,N,P以及速效养分含量($P<0.05$)。这主要是由于生物炭的多孔性和特殊的表面结构具有极强的吸附能力,可以有效保留土壤中的养分,增强土壤的固持能力,并减少养分的淋溶损失^[32]。已有研究表明,生物炭和氮肥的适量添加能有效提高土壤含水量和C,N,P元素的固持能力,进而促进植被的生长^[33-34]。本研究中, CN_3 处理下的土壤SWC, TOC和TN含量均显著增加($P<0.05$),这与李焕茹等^[16]关于碳氮添加对草地土壤有机碳、氮、磷含量影响的研究结果相一致,说明生物炭配施氮肥有助于保持土壤中C,N,P养分的平衡,从而稳定退化的草地生态系统。

土壤胞外酶主要由土壤微生物(如细菌、真菌)

分泌产生,亦可来源于动植物代谢物和残体分解过程。其活性受养分状况和环境因子调控,能够降解大分子有机物,释放可利用的碳、氮、磷等养分。因此,胞外酶被广泛用于评估微生物功能和土壤养分循环效率^[35]。本研究中,选择了与C、N循环相关的三种酶,包括参与C循环的CBH和参与N循环的NAG和LAP。结果显示,在黑土滩修复草地土壤中添加生物炭和氮肥能够显著改变这三种酶的活性($P<0.05$)。生物炭和氮肥的添加显著提高了CBH的活性,这与李焕茹等^[16]的研究一致,适量的生物炭与氮肥配施可以为土壤微生物提供碳源和氮源,缓解微生物与植物根系之间的养分竞争,从而有利于酶活性的提高。此外,生物炭与氮肥的添加也显著增加了LAP的活性,这可能是因为生物炭的添加改变了土壤的理化性质,提高了土壤呼吸速率,加速了有机质的分解,从而为LAP酶活性的增加创造了有利的环境^[36]。这与苗宇等^[37]关于有机肥料对黑土胞外酶活性影响的研究结果相符。同样,杜林森等^[38]的研究也发现,在风沙土壤中使用生物炭或化肥能够有效提高土壤氮循环水解酶NAG和LAP的活性。其原因是炭肥和氮肥的协同作用提高了土壤氮素的有效性和生物活性,促进了氮素的分解转化过程,从而增加了土壤NAG和LAP的活性。此外,生物炭的添加改善了土壤理化性质,增加了土壤的养分供应能力,进而促进了土壤微生物的生长和活动,最终导致胞外酶活性的提高^[35]。本研究表明,适宜的生物炭与氮肥配比添加能进一步提高土壤NAG、LAP和CBH的活性。主要是因为生物炭与氮肥的施用改变了土壤微环境,调节了土壤中的C/N比,从而促进了与C、N转化相关酶的活性^[39]。然而,我们还发现,土壤胞外酶活性对生物炭和氮肥添加的响应并非表现为单一的促进作用,还取决于土壤胞外酶对有效养分的利用程度,这与Pu等^[40]关于生物炭添加对土壤酶活性影响的研究结果相一致。

3.3 生物炭配施氮肥对土壤综合肥力的影响

土壤肥力是衡量土壤为植物生长提供养分能力的重要指标^[41],其揭示了土壤的理化性质、酶活性以及植被生长方面的综合表现^[42]。主要包括土壤中的养分(氮、磷、钾等)含量、有机质含量、土壤结构的稳定性、水分保持能力以及酶活性等因素,这些因素共同作用于植物的生长发育^[43]。主成分

分析结果表明,影响土壤肥力综合评价状况的主要因素是C/N、NAG、CBH、LAP、BD、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和TN,其贡献率为47.22%。这些指标代表着土壤不同方面的特性,对土壤肥力有着关键的影响,在一定程度上可以反映土壤的综合肥力^[41-44]。C/N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和TN表征了土壤有机质的稳定性和分解速率,是植物易吸收的氮素形态,对植物的氮素供应起到直接作用^[19]。生物炭通过提高有机质稳定性,进而提升土壤养分的循环和土壤肥力;NAG、CBH和LAP为土壤胞外酶,分别参与氮、碳的分解与转化过程,其活性越高,土壤微生物功能性越强,对土壤微生物环境的改善作用越好^[40]。生物炭与氮肥配施不同处理(CN_3 、 CN_2 和 CN_4)在土壤肥力得分上显著优于其他处理组,土壤综合肥力从高到低的顺序为: $\text{CN}_3>\text{CN}_2>\text{CN}_4>\text{CN}_0>\text{CN}_1>\text{CN}_5>\text{CK}$ 。这说明在黑土滩退化草地中适量的生物炭与氮肥配施能够显著改善土壤肥力,其中, CN_3 处理(生物炭 $0.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与氮肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施)效果最佳,原因在于该配比在提高土壤养分有效性、酶活性和微生物活力等方面表现出更好的综合改善效果,从而为植被提供了更稳定的养分供应^[41]。相比之下,其他处理的生物炭或氮肥配比可能过高或过低,导致土壤中某些营养元素或微生物活性不足,因而影响了整体肥力的提升效果。

进一步通过Piecwise SEM分析发现,生物炭与氮肥配施对土壤胞外酶活性产生极显著的正向影响(路径系数=0.86, $P<0.001$);对土壤化学性质产生极显著的正向影响(路径系数=0.489, $P<0.01$),这说明生物炭和氮肥的配施改善了土壤酶活性,促进了养分循环,进而改变了土壤的整体化学环境,此结论与白美霞等^[44]关于生物质炭配施有机物料对贫瘠红壤土酶活性的研究结论相似。同时,生物炭与氮肥的配施显著提高了土壤中的TN、 NO_3^- -N含量和N/P,促进了土壤中氮的循环,维持了土壤氮的平衡^[45]。此外,土壤胞外酶活性对植被地上生物量和地下生物量均具有显著的正向影响(路径系数=0.221, $P<0.05$),进一步证实了胞外酶活性在促进植被生长方面发挥的重要作用。这与赵耀东等^[46]研究的结果一致,支持了胞外酶通过加速土壤有机质的分解和养分释放,为植被提供更丰富的可利用养分,从而促进了地上和地下生物量的增加。综上所述,生物炭配施氮肥通过改善土壤理化性质、提升土壤胞外酶活性和增加氮素含量等

途径,显著改善土壤肥力,促进植物生长,表明其在土壤改良与草地恢复中具有广阔的应用前景。在实际生态修复中,生物炭配施氮肥处理可以作为一种重要的措施来改善土壤肥力和促进植被生长。

4 结论

在黑土滩人工草地中添加生物炭与氮肥后,炭氮配施显著改变了植被生物量分配格局;提升了土壤含水量、铵态氮、有机碳和全氮含量,促进了植被对养分的吸收利用;同时增强了与C循环相关的CBH酶活性和与N循环相关的NAG和LAP酶活性,从而提高了土壤综合肥力。其中,基肥配施氮肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C/N $\approx$ 12:1)效果最佳,既能提供持续的养分供应,又能加速草地恢复。本研究结果可为该区域黑土滩退化草地修复提供科学依据。

参考文献

- [1] 杜志勇,丛楠. 植被与土壤特征对青藏高原不同程度退化草地的响应[J]. 生态学报,2024,44(6):2504-2516
DU Z Y, CONG N. Responses of vegetation and soil characteristics to degraded grassland under different degrees on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2504-2516
- [2] 张建贵,王理德,姚拓,等. 东祁连山不同退化草地植物群落特征与土壤养分特性[J]. 水土保持学报,2019,33(1):227-233
ZHANG J G, WANG L D, YAO T, et al. Characteristics of plant community and soil nutrient of different degraded grasslands in east Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 227-233
- [3] 林丽,张德罡,曹广民,等. 放牧强度对高寒嵩草草甸土壤养分特性的影响[J]. 生态学报,2016,36(15):4664-4671
LIN L, ZHANG D G, CAO G M, et al. Responses of soil nutrient traits to grazing intensities in alpine *Kobresia* meadows [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4664-4671
- [4] 尚占环,董全民,施建军,等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展——兼论三江源生态恢复问题[J]. 草地学报,2018,26(1):1-21
SHANG Z H, DONG Q M, SHI J J, et al. Research progress in recent ten years of ecological restoration for “black soil land” degraded grassland on Tibetan Plateau—concurrently discuss of ecological restoration in Sang jiangyuan region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1): 1-21
- [5] 段成伟,李希来,马盼盼,等. 人工修复措施对退化高寒草甸土壤养分及酶活性的影响[J]. 西北农业学报,2022,31(4):431-440
DUAN C W, LI X L, MA P P, et al. Effect of artificial restoration measure on soil nutrients and enzyme activities of degraded alpine meadow [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(4): 431-440
- [6] 李晓燕,李永慧,秦文萍,等. 人工草地建植对三江源区退化高寒草甸土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志,2024,43(1):50-56
LI X Y, LI Y H, QIN W P, et al. Impacts of artificial grasslands on soil organic carbon fractions in a degraded alpine meadow of the Three-River Source Region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(1): 50-56
- [7] 夏浩. 生物炭与氮肥配施提升酸性土壤肥力和氮素利用率的效应及其微生物学机制[D]. 武汉:华中农业大学,2023:14-21
XIA H. Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar on improving fertility and nitrogen utilization efficiency of acid soil and its microbiological mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 14-21
- [8] 张涛,陈晓鹏,赵景学,等. 碳、氮添加对高寒草甸植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. 生态环境学报,2015,24(10):1604-1610
ZHANG T, CHEN X P, ZHAO J X, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on the plant species diversity and biomass of typical alpine meadow in Tibet of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(10): 1604-1610
- [9] 段建军,郭琴波,徐彬,等. 氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(6):298-308
DUAN J J, GUO Q B, XU B, et al. Effects of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on rice yield and nutrient utilization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 298-308
- [10] 胡京钰,杨红军,刘大军,等. 酒糟生物炭与化肥配施对土壤理化特性及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(9):1664-1672
HU J Y, YANG H J, LIU D J, et al. Effects of brewery-waste derived biochar on soil physicochemical properties and crop yield [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(9): 1664-1672
- [11] GE X G, CAO Y H, ZHOU B Z, et al. Combined application of biochar and N increased temperature sensitivity of soil respiration but still decreased the soil CO₂ emissions in moso bamboo plantations [J]. Science of the Total Environment, 2020, 730: 139003
- [12] 孟繁昊. 生物炭配施氮肥对土壤理化性质及春玉米产量和氮效率的影响机制[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018:2-10
MENG F H. Influence mechanism of soil physicochemical property and yield and nitrogen efficiency of spring corn by combined application of biochar with nitrogen fertilizer [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 2-10
- [13] 张常仁,杨雅丽,程全国,等. 不同耕作模式对东北黑土微生物群落结构和酶活性的影响[J]. 土壤与作物,2020,9(4):335-347
ZHANG C R, YANG Y L, CHENG Q G, et al. Effects of dif-

- ferent tillages on soil microbial community structure and enzyme activity in Mollisols of China [J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4):335-347
- [14] 秦金萍, 马玉寿, 李世雄, 等. 春季放牧强度对祁连山区青海草地早熟禾人工草地牧草生长的影响[J]. *青海大学学报*, 2019, 37(4):1-6
- QIN J P, MA Y S, LI S X, et al. Effects of grazing intensity in spring on forage growth in *Poa pratensis* L. cv. Qinghai artificial grassland in Qilian mountains [J]. *Journal of Qinghai University*, 2019, 37(4):1-6
- [15] BAI S H, OMIDVAR N, GALLART M, et al. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: a review and meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808:152073
- [16] 李焕茹, 朱莹, 田纪辉, 等. 碳氮添加对草地土壤有机碳氮磷含量及相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2470-2476
- LI H R, ZHU Y, TIAN J H, et al. Effects of carbon and nitrogen additions on soil organic C, N, P contents and their catalyzed enzyme activities in a grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2470-2476
- [17] TIAN J H, WEI K, CONDRON L M, et al. Impact of land use and nutrient addition on phosphatase activities and their relationships with organic phosphorus turnover in semi-arid grassland soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5):675-683
- [18] XU L L, WANG Q B, ZHANG X Y, et al. Effects of applying different kind fertilizers on enzyme activities related to carbon nitrogen and phosphorus cycles in reddish paddy soil [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4):909-914
- [19] ZHANG L Y, XIANG Y Z, JING Y M, et al. Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta-analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(22):22990-23001
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:108-268
- BAO S D. *Soil agrochemical analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:108-268
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:274-329
- GUAN S Y. *Soil enzymes and research methods* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986:274-329
- [22] 陆啸飞, 郭洁芸, 王斌, 等. 氮添加对中国陆地植被地上-地下生物量分配的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(4):1313-1323
- LU X F, GUO J Y, WANG B, et al. Effects of nitrogen addition on plant above and below-ground biomass allocation in terrestrial ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4):1313-1323
- [23] 勒佳佳, 苏原, 彭庆文, 等. 氮添加对天山高寒草原土壤酶活性和酶化学计量特征的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(2):382-389
- LE J J, SU Y, PENG Q W, et al. Effects of nitrogen addition on soil enzyme activities and ecoenzymatic stoichiometry in alpine grassland of the Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2):382-389
- [24] 郭万庆, 徐小逊, 鲁兰, 等. 增温和生物炭添加对麦田土壤养分和微生物生物量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5):611-618
- GUO W Q, XU X X, LU L, et al. Effects of warming and biochar addition on soil nutrients and microbial biomass in wheat fields [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5):611-618
- [25] 赵娜, 王小利, 何进, 等. 有机肥替代化学氮肥对黄壤活性有机碳组分、酶活性及作物产量的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(7):4196-4205
- ZHAO N, WANG X L, HE J, et al. Effects of replacing chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer on active organic carbon fractions, enzyme activities, and crop yield in yellow soil [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7):4196-4205
- [26] 王连春, 金艳彬, 孙凤霞, 等. 配比施肥对川滇无患子生长的影响[J]. *农业与技术*, 2024, 44(3):44-47
- WANG L C, JIN Y B, SUN F X, et al. Effect of proportional fertilization on the growth of *Sapindus mukoraiensis* in Sichuan and Yunnan [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(3):44-47
- [27] 景明慧, 贾晓彤, 张运龙, 等. 长期氮添加对内蒙古典型草原植物地上、地下生物量及根冠比的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(10):3185-3193
- JING M H, JIA X T, ZHANG Y L, et al. Effects of long-term nitrogen addition on community aboveground and belowground biomass and their ratio in a typical steppe of Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10):3185-3193
- [28] 杨学亭, 樊军, 盖佳敏, 等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4):878-886
- YANG X T, FAN J, GE J M, et al. Soil physical and chemical properties and vegetation characteristics of different types of grassland in Qilian Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4):878-886
- [29] 常涛, 张骞, 秦瑞敏, 等. 氮素配施对三江源区退化高寒草甸植被和土壤的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3):860-867
- CHANG T, ZHANG Q, QIN R M, et al. Effects of nitrogen combined application on the vegetation and soil of degraded alpine meadow in the Three-River Headwaters Region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3):860-867
- [30] 姜珊, 张仲胜, 李敏, 等. 短期生物炭添加对退化盐碱湿地土壤微生物群落结构特征影响[J]. *土壤与作物*, 2023, 12(2):225-233
- JIANG S, ZHANG Z S, LI M, et al. Effect of short-term biochar addition on soil microbial community structure in degraded saline-alkali wetland [J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(2):225-233
- [31] 崔月峰, 孙国才, 郭奥楠, 等. 秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及pH值的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(21):255-260
- CUI Y F, SUN G C, GUO A N, et al. Effects of straw and bio-

- char on soil physical properties and pH value in cold water-logged paddy soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(21):255-260
- [32] MATSCHONAT G, MATZNER E. Soil chemical properties affecting NH_4^+ sorption in forest soils[J]. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1996, 159(5):505-511
- [33] 杨宇, 李成蓉, 彭银, 等. 生物炭与有机肥施用对红壤理化性质及氮素径流损失的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(4):16-24
- YANG Y, LI C R, PENG Y, et al. Effects of biochar and organic fertilizer application on physical and chemical properties of red soil and nitrogen losses by runoff[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4):16-24
- [34] 王高飞, 刘鸿雁, 邢丹, 等. 育苗基质添加辣椒秆生物炭对辣椒幼苗生长与养分的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(3):543-549
- WANG G F, LIU H Y, XING D, et al. Effect of pepper straw biochar added in seedling substrate on growth and nutrient of pepper seedlings[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(3):543-549
- [35] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 等. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(10):4140-4149
- SUN C L, WANG Y W, WANG C J, et al. Effects of land use conversion on soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric characteristics in karst mountainous areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10):4140-4149
- [36] 李欣蔚, 肖元明, 李春丽, 等. 青藏高原高寒草甸微地形对土壤胞外酶活性及生态化学计量比的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(2):212-219
- LI X W, XIAO Y M, LI C L, et al. Effects of microtopography on enzyme activities and ecological stoichiometry in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(2):212-219
- [37] 苗宇, 侯瑞星, 裴浩, 等. 有机物料还田对黑土胞外酶化学计量特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(22):207-215
- MIAO Y, HOU R X, PEI H, et al. Impact of organic material incorporation on the chemical stoichiometry characteristics of extracellular enzymes in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(22):207-215
- [38] 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(8):3901-3909
- DU L S, TANG M L, ZHU Z K, et al. Effects of long-term fertilization on enzyme activities in profile of paddy soil profiles[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8):3901-3909
- [39] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5):1214-1226
- MENG F H, GAO J L, YU X F, et al. Improvement of biochemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1214-1226
- [40] PU C, KAN Z R, LIU P, et al. Residue management induced changes in soil organic carbon and total nitrogen under different tillage practices in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6):1337-1347
- [41] 景宇鹏, 李跃进, 姚一萍, 等. 盐渍土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(2):128-138
- JING Y P, LI Y J, YAO Y P, et al. Enzyme activities of saline-alkali soil and its relationship with soil microbial biomass and physicochemical factor[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(2):128-138
- [42] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 等. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3):695-704
- YU Y, ZHANG C R, YANG Y L, et al. Effects of long-term no-tillage and different stover mulching amounts on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities of carbon and nitrogen cycle in Mollisols[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3):695-704
- [43] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3):664-670
- SU J Q, LI X R, BAO J T. Effects of nitrogen addition on soil physico-chemical properties and enzyme activities in desertified steppe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3):664-670
- [44] 白美霞, 司徒高铭, 李松昊, 等. 生物质炭配施有机物料对贫瘠红壤酶活性和微生物碳源代谢功能的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5):1283-1290
- BAI M X, SITU G M, LI S H, et al. Effects of combined application of biochar with organic amendments on enzyme activity and microbial metabolic function of carbon sources in infertile red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5):1283-1290
- [45] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 生物炭氮替代部分化肥氮对黄壤水稻的生物效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2):199-205
- SHI D L, WANG X L, LIU A K, et al. Biological effect of biochar nitrogen replacing partial fertilizer nitrogen on rice in yellow soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2):199-205
- [46] 赵耀东, 潘一展. 连续多年减氮配施生物炭对土壤酶活性、微生物群落及花生产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(17):260-267
- ZHAO Y D, PAN Y Z. Impacts of reduced nitrogen combined with biochar application for many consecutive years on soil enzyme activity, microbial community and peanut yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(17):260-267