

高氮和生物炭添加对黄土高原撂荒地土壤氮组分的影响

鲁文德,李广,刘帅楠,张馨月

(甘肃农业大学林学院,兰州 730070)

摘要:[目的]为探究BC添加对高N沉降下土壤N素变化的影响。[方法]以黄土高原撂荒地作为研究对象,设置对照(N0BC0)、高N(N9BC0)、BC添加(N0BC20)及其复合处理(N9BC20),分析不同处理对土壤氮组分的变化规律及空间分布特征。[结果]1)与对照相比,N9BC20处理显著增加0~40 cm 土层 TN、 NH_4^+ -N、DON 质量分数分别增加 1.95、1.70、1.44 倍;相较于 N9BC0 处理,N9BC20 处理显著增加 0~40 cm 土层土壤 TN、DON、DTN 质量分数分别增加 1.39、1.35、1.22 倍;不同处理下土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、MBN 质量分数均随土层深度增加而减少。2)N9BC0 处理降低 0~40 cm 土层土壤 DON/DTN,但 N9BC20 处理提高 0~40 cm 土层土壤 NO_3^- -N/DTN 和 DON/DTN,促进土壤 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化。3)N9BC20 处理下,0~40 cm 土层 NH_4^+ -N、DTN、DON 的 NPMI 均为最大,且分别是 N9BC0 处理的 1.08、1.36、1.60 倍。4)回归分析表明,土壤体积质量解释 TN 变化的 22.6%,土壤全磷和 pH 共同解释 TN 变化的 53.7%。[结论]BC 添加可通过改变黄土高原土壤非生物因素调控土壤 N 库的动态变化,可作为未来高 N 沉降背景下黄土高原土壤固 N 培肥和地力提升的潜在措施。

关键词:高氮沉降;生物炭添加;黄土高原;撂荒地;土壤氮组分

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)04-0039-09

Effects of High Nitrogen and Biochar Additions on Soil Nitrogen Fractions in Abandoned Grasslands on the Loess Plateau

LU Wende, LI Guang, LIU Shuainan, ZHANG Xinyue

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] To explore how biochar (BC) addition affects the change of soil nitrogen (N) under high N deposition. [Methods] Taking the loess plateau abandoned grassland as the research object, we set up the control (N0BC0), high N (N9BC0), BC addition (N0BC20) and its composite treatment (N9BC20) to analyze the change rule of different treatments on the soil nitrogen component and the spatial distribution characteristics. [Result] 1) Compared with the control, N9 BC20 treatment significantly increased the contents of TN, NH_4^+ -N and DON by 1.95, 1.70 and 1.44 times, respectively. Compared with N9BC0 treatment, N9BC20 treatment significantly increased soil TN, DON, and DTN contents in the 0—40 cm soil layer by 1.39, 1.35 and 1.22 times, respectively. Soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and MBN contents under different treatments decreased with the increase of soil depth. 2) N9BC0 treatment decreased soil DON/DTN ratio in the 0—40 cm soil layer. However, the N9BC20 treatment increased soil NO_3^- -N/DTN and DON/DTN ratios in the 0—40 cm soil layer, and promoted the conversion of soil NH_4^+ -N to NO_3^- -N. 3) The NPMIs of NH_4^+ -N, DTN, and DON in the 0—40 cm

收稿日期:2024-11-28

修回日期:2025-03-26

录用日期:2025-04-12

网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-15

资助项目:甘肃农业大学优秀博士研究生学位论文培育项目(YB2023002);甘肃省科技计划项目(24JRRA682);甘肃省财政专项项目(GSCZZ20160909);甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA116);国家自然科学基金项目(32360438);甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09)

第一作者:鲁文德(1997—),男,硕士研究生,主要从事土壤氮循环研究。E-mail:luwende97@163.com

通信作者:李广(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:lig93272883@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

soil layer under the N9BC20 treatment were all the largest, being 1.08, 1.36 and 1.60 times of that of N9BC0 treatment, respectively. 4) Regression analysis showed that soil bulk density explained 22.6% of the variation in TN, and soil total phosphorus and pH together explained 53.7% of the variation in TN. [Conclusion] BC addition can regulate the dynamics of soil N pools by altering abiotic factors in soils on the Loess Plateau and can be a potential measure for N fixation and soil fertility enhancement for soils on the Loess Plateau under the background of high N deposition in the future.

Keywords: high nitrogen deposition; biochar addition; the Loess Plateau; abandoned grassland; soil nitrogen fractions

Received: 2024-11-28

Revised: 2025-03-26

Accepted: 2025-04-12

Online(www.cnki.net): 2025-05-15

氮(N)素是限制植物生长的主要因素之一,其形态和质量分数与生态系统N转化过程关系密切,进而可能对区域生态环境产生影响^[1]。而土壤N库是生态系统中N循环的重要组成部分,其微小的变化引起N循环和N排放的巨大改变^[2]。土壤N库有多种形式,通常根据N源及供N能力划分为具有不同特征的组分,且不同形态N组分的变化可直接或间接影响土壤N素的有效性^[3]。已有研究^[4]表明,土壤TN能说明N库容量的变化,其对土壤环境变化的敏感性较高,可作为表征总N库的重要指标。而土壤DON虽在TN中所占比例较小,但可参与土壤中能量输送和转化,从而间接调控N库的分配格局,影响N库的积累与分配过程^[4]。土壤MBN可诠释土壤微生物对N素的矿化与固持作用,也是土壤有机氮(ON)中最为活跃的组分,对植物N素的供应起着重要的调节作用^[5]。同时,硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)作为IN的主要组分,可被植物和微生物直接吸收利用,其质量分数能够反映土壤的供N水平^[3]。综上,探明土壤N库各组分质量分数、积累及分配变化特征,对于认识生态系统的土壤N循环及转化过程具有十分重要的科学意义。

N肥使用、化石燃料燃烧等人类活动导致全球范围内大气N沉降量持续增加,进而造成土壤酸化、养分流失、生物多样性降低及生态系统生产力下降等一系列生态环境问题。有研究^[6]表明,过高的N沉降量降低土壤中微生物的丰富度和生物量,并通过改变微生物对底物的利用方式,影响土壤微生物的整体功能。高N沉降还造成草地土壤pH下降而严重酸化,最终导致草地植被的生产力下降。因此,如何降低高N沉降对生态系统带来的负面影响是目前众多学者关注的热点话题之一。

生物炭(BC)是一种可以有效固存土壤N养分的改良剂,可有效减少土壤N素的损失。有研究^[7]表明,BC具有较大的比表面积和孔隙度,能够降低土壤体

积质量,提高土壤团聚体稳定性,改善土壤质量。BC也可与土壤矿物颗粒结合,形成微小团粒结构,增强水分子在土壤中的附着力,减少土壤水分蒸发,提高土壤持水能力。因而,BC可在施用土壤后改变土壤的理化性质,从而直接或间接地影响土壤N素循环与利用。一方面,生物质热解成BC时,一部分N素通过挥发损失,一部分则被保留下来。相关研究^[8]表明,在 CO_2 环境下,BC中氢自由基的生成抑制含N气体的挥发;另一方面,除BC带入土壤的N素外,还主要体现在BC对土壤N素的截留和吸附作用。有研究^[9]发现,由于BC自身对N素的截留和吸附能力,使得土壤 NO_3^- -N和总N淋洗速度随BC施用量的增加逐渐降低。BC对土壤微生物群落结构也有显著影响。研究^[9]表明,BC的添加可改变土壤孔隙结构,促进土壤微生物的生长,增加土壤生物多样性,从而改善生态平衡。有研究^[10]通过高通量测序发现,变形菌门可能是底物在含BC土壤中矿化量增加的关键微生物类型。综上,BC输入土壤后可以通过改变土壤物理、化学和生物学特性,减少N素的淋溶损失和挥发损失,增强土壤的固N能力。然而,目前关于BC的研究主要集中在农田作物生长^[7]、土壤修复及经济林地土壤理化性质^[11]和微生物的组成等^[6]方面。但BC添加对未来高N沉降背景下土壤N组分的影响还存在很大的不确定性,亟待进一步了解。

黄土高原地区由于水土流失问题严重、植被覆盖度较低,被认为是我国典型的生态脆弱区和生态修复的重点区,其对全球气候变化(如大气N沉降)较为敏感^[12]。自1999年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原地区植被覆盖面积不断扩大,生态环境得到有效改善。退耕还林还草过程使得土壤、植被和大气间的养分元素流动状况发生明显改变,也让该区撂荒草地(弃耕后自然恢复的草地)中土壤N组分的分布出现差异。黄土高原由于土壤肥力有限、水分短缺、侵蚀严重等问题严重制约区域的生态环境建设^[12]。草地作为黄土高

原面积最大的土地利用类型(平均占比为41.8%),对区域生态环境建设有相当大的贡献^[13]。BC作为一种有效的土壤改良剂,能够改善土壤环境,为植被生长提供更好的条件。有研究^[14]表明,高氮沉降打破植物体内的营养平衡,降低植物的生长能力,可能导致森林和草原的缩减,甚至生物多样性的降低。因此,为研究BC添加能否应对高N沉降带来的负面影响,本文以黄土高原区撂荒草地为对象,分析高N和BC添加对土壤N组分分布特征的影响,以期探明黄土高原地区土壤N循环变化规律,为区域植被恢复和筛选稳定大气高N沉降下土壤的固N措施具有重要意义,且可作为BC研究在撂荒草地生态系统的补充。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区(34°26′~35°35′N,103°52′~105°13′E)水土保持科学研究所试验站。该区属大陆性气候,流域面积8.56 km²。其主要特征是气候干燥,光能较为丰富,雨热同季,年均气温6.3℃,年平均光照时间2 500 h,年平均蒸发量1 400 mm以上,无霜期141 d,年平均降水量350~400 mm,年际变异大,主要集中在7—9月^[15]。试验地土壤类型主要以黄绵土为主。该区域优势种分别为长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)和冷蒿(*Artemisia frigida* Willd)等。研究样地土壤理化性质见表1。

表 1 样地土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil on the sampling plot

处理	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	体积质量/ (g·cm ⁻³)	pH (1:2.5)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
N0BC0	8.96±0.27B	1.43±0.03A	8.15±0.02A	0.28±0.01B
N0BC20	9.49±0.18A	1.43±0.03A	8.11±0.01A	0.36±0.01A
N9BC0	8.70±0.12B	1.38±0.02A	8.14±0.03A	0.24±0.02C
N9BC20	9.77±0.17A	1.41±0.02A	8.11±0.04A	0.33±0.01A

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

1.2 试验设计

2022年6月选择3个植被生长状况基本一致的撂荒后自然恢复的草地为试验样地。试验涉及高N、生物炭2个因素,共设4个处理(N0BC0:不施生物炭、氮;N0BC20:不施氮+施生物炭20 t/hm²;N9BC0:不施生物炭+施氮9 g/(m²·a);N9BC20:施生物炭20 t/hm²+施氮9 g/(m²·a)。采用双因素嵌套随机组合排列,每个处理3个重复,共计12个重复处理小区,每小区间隔>1 m,小区面积4 m²(2 m×2 m)。

试验地于2022年6月按0~20、20~40 cm土层一次性施入生物质炭20 t/hm²,按照土层土壤与生物质炭混合翻拌均匀,后续不再添加,且BC0处理仅开挖回填。添加氮肥为尿素,将尿素按每年施用量平均分成3等份,分别于2022年6月、8月、10月和2023年3月、6月、9月中根据各处理所需用量施入小区。本试验所用生物炭购自河南三利新能源有限公司,为小麦秸秆(400℃热解)。其TN为7.67 g/kg,有机碳为118.11 g/kg,全磷(TP)为1.02 g/kg,pH为9.36(m炭:V水=1:10)。

1.3 样品采集

2023年10月底,在每个样方中随机选取3个土壤取样点,采用土钻分别在0~10、10~20、20~40 cm土层取样,1个处理共取9个样点,将同一样点处理土壤样品混匀后作1个土壤样品,每个处理3次重复。采集的新鲜土壤样品过2 mm筛,去除碎屑、动植物残体和砾石等,将过筛后新鲜的土壤样品低温运输回实验室。

1.4 样品室内分析

土壤pH采用电位法^[16]测定,以水为浸提剂,水土比为2.5:1;土壤水分体积分数采用烘干法测定;土壤体积质量(BD)采用环刀法测定;土壤TN采用半微量凯氏法测定;土壤MBN采用氯仿熏蒸浸提法测定;土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N采用2 mol/L KCl溶液浸提,并使用Smart Chem450全自动间断化学分析仪测定;土壤有机碳(SOC)质量分数采用重铬酸钾氧化外加热法测定;土壤TP采用钼锑抗比色法测定,土壤DON采用同NO₃⁻-N、NH₄⁺-N相同浸提溶液加氧化剂进行高压灭菌后比色计算。

土壤氮库管理指数计算应用相关研究^[17]的计算方法,计算公式为:

氮库指数(NPI)=土样全氮(g/kg)/参考土壤全氮(g/kg)

氮库的不稳定性即氮库活度(L)=土样中某种可溶性氮(LON)(mg/kg)/土样中除相对应可溶性氮(mg/kg)以外的所有氮(N-LON)(mg/kg)

活度指数(LI)=土样的不稳定性(L)/参考的不稳定性(L0)

基于以上参数可以得到氮库管理指数(NPMI):
NPMI=NPI×LI×100

1.5 数据处理分析

采用Excel 2016软件对原始数据进行整理和计算,使用SPSS 27.0软件对土壤各项指标进行不同处理和不同土层间的单因素方差分析(One-way ANOVA),采用Origin 2024软件进行绘图,文中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 高氮和生物炭添加对土壤全氮质量分数的影响

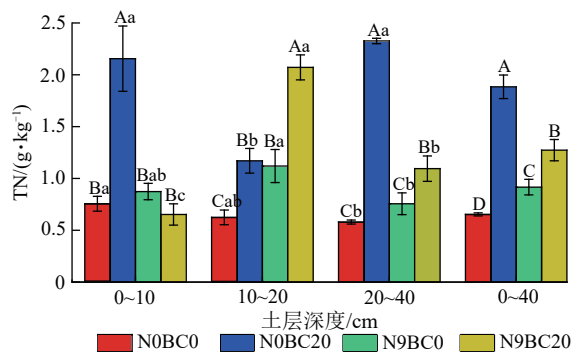
高 N 和 BC 添加显著增加土壤 TN 质量分数。由图 1 可知,在 0~40 cm 土层, N0BC20、N9BC0 和 N9BC20 处理下的 TN 质量分数均显著高于对照 (N0BC0),且 N0BC20 处理下的 TN 质量分数最高,为对照的 2.9 倍 ($p < 0.05$)。

相较于对照, N0BC20 处理下的 TN 质量分数在 10~20 cm 土层处最低,且低于 N9BC20 处理; N9BC0 和 N9BC20 处理下的 TN 质量分数变化趋势相似,均在 10~20 cm 土层处最大。

2.2 高氮和生物炭添加对土壤氮组分质量分数的影响

BC 添加显著增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DTN 和 DON 质量分数。由图 2 可知,在 0~40 cm 土层, N0BC20 和 N9BC20 处理下的 DON 质量分数显著高于对照和

N9BC0 处理,且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DTN 和 DON 质量分数均在 N9BC20 处理下最高。N0BC20 处理显著降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数 ($p < 0.05$)。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($p < 0.05$);不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 高氮和生物炭添加对土壤全氮质量分数的影响

Fig.1 Effects of high nitrogen and biochar addition on soil total nitrogen content

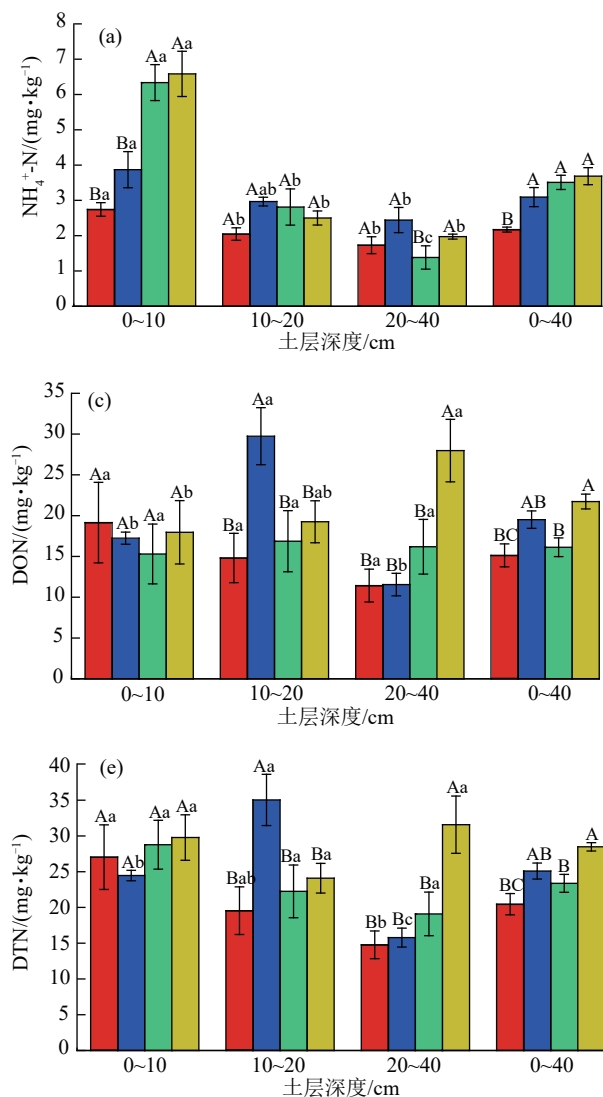


图 2 高氮和生物炭添加对土壤氮组分质量分数的影响

Fig.2 Effects of high nitrogen and biochar addition on the contents different soil nitrogen fractions

4 种处理下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBN 质量分数变化趋势一致,均随土层深度的增加而降低。相较于对照,N0BC20 处理下的 DON 和 DTN 质量分数在 10~20 cm 土层处最大,分别为对照的 2.0、1.8 倍,但 N9BC20 处理下的 DON 和 DTN 质量分数在 20~40 cm 土层处最大,分别为对照的 2.4、2.1 倍。而 N9BC0 处理下的 DON 和 DTN 质量分数在土层间的变化不大。

2.3 高氮和生物炭添加对土壤氮组分比例的影响

由表 2 可知,N0BC20 处理显著降低土壤各 N 组

分占 TN 的比例。N9BC20 处理显著增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 MBN 占 TN 的比例($p<0.05$)。BC 添加有效增加 DTN 中 DON、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的占比,同时有效降低 DTN 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的占比。在 DTN 中,DON 占据较大比例,4 种处理下的 DON 占比为 68.17%~75.69%。由图 3 可知,N0BC0 和 N9BC0 处理下的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比小于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而 N0BC20 和 N9BC20 处理下的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、N0BC20 和 N9BC20 处理下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比之和,均大于其余 2 种未添加 BC 处理下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比之和。

表 2 高氮和生物炭添加对土壤氮组分比例的影响

Table 2 Effects of high nitrogen and biochar addition on the proportions of different soil nitrogen fractions					%
处理	DTN/TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ /TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ /TN	DON/TN	MBN/TN
N0BC0	3.16±0.16A	0.49±0.04A	0.35±0.01B	2.33±0.15A	9.06±0.28A
N0BC20	1.70±0.18B	0.15±0.01B	0.19±0.02C	1.36±0.16B	4.53±0.34C
N9BC0	2.83±0.28A	0.44±0.03A	0.40±0.04AB	2.00±0.23A	6.95±0.66B
N9BC20	2.99±0.26A	0.40±0.09A	0.48±0.07A	2.10±0.16A	7.45±0.94AB

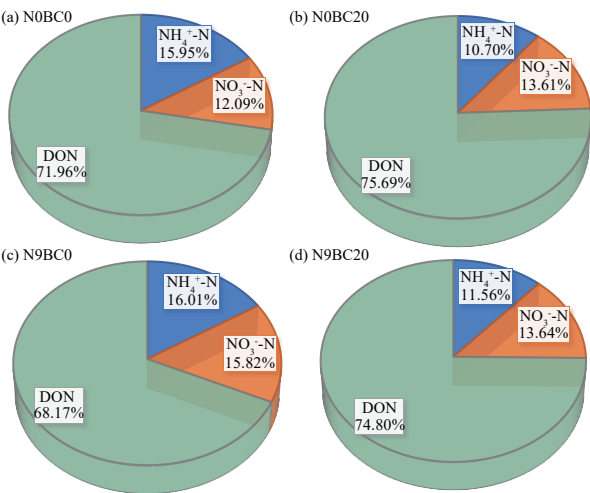


图 3 不同处理下可溶性氮占溶解性总氮的比例

Fig.3 The ratios of different dissolved nitrogen fractions to total dissolved nitrogen under different treatments

2.4 高氮和生物炭添加对土壤氮库管理指数的影响

NPI 是评价土壤质量及土壤管理的重要指标,能够反映土壤中 N 素的总量和形态,是衡量土壤 N 素状况的关键参数。由表 3 可知,相较于对照,N0BC20、N9BC0 和 N9BC20 处理下的 NPI 均有所提升,其中,N0BC20 处理下土壤的 NPI 最高,为 3.005,远高于对照处理。

NPMI 是反映地区土壤 N 的丰度、N 的活性强度及土壤供 N 能力的重要指标。除 N0BC20 处理下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 NPMI 低于对照之外,其余处理下其他指标的 NPMI 均高于对照,其中,N9BC20 处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DTN 和 DON 的 NPMI 均为对应指标的最高,分别为 163.625、179.613、160.160。

2.5 高氮和生物炭添加下土壤氮库管理指数及土壤理化性质间的相互作用关系

相关分析(图 4)表明,NPMI 与 DTN 和 DON 呈极显著正相关($p<0.01$)。NPI、TN 和 TP 两两间呈极显著正相关($p<0.01$),NPI 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著负相关($p<0.05$)。土壤温度(ST)与 BD 和 TP 呈极显著正相关($p<0.01$),与土壤水分体积分数(SMC)、DTN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN 和 SOC 呈极显著负相关($p<0.01$)。SMC 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN、SOC 呈极显著正相关($p<0.01$),与 DTN 呈显著正相关($p<0.05$),与 BD 和 TP 呈极显著负相关($p<0.01$)。DTN 与 DON 和 MBN 呈极显著负相关($p<0.01$),与 SOC 呈显著正相关($p<0.05$),与 TP 呈极显著负相关($p<0.01$)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均与 MBN 和 SOC 呈极显著正相关($p<0.01$),均与 BD 和 TP 呈极显著负相关($p<0.01$),且二者间呈极显著正相关($p<0.01$)。MBN、SOC 均与 BD 和 TP 呈极显著负相关($p<0.01$)。MBN 与 SOC 呈极显著正相关($p<0.01$)。

2.6 不同土层土壤全氮质量分数与影响因子的关系

为探究土壤 TN 质量分数与影响因子间的相关关系,利用逐步回归方程分析检验选出最优模型。对 3 个土层回归模型分析可得,0~10 cm 土层 TN 仅受 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 影响;10~20 cm 土层 TN 仅受 BD 影响;20~40 cm 土层 TN 受 TP 和 pH 影响,决定系数为 0.537(表 4),不同土层各因子对土壤 TN 质量分数变化产生不同影响。

表 3 高氮和生物炭添加对土壤氮库管理指数的影响

Table 3 Effects of high nitrogen and biochar addition on soil nitrogen pool management indices

处理	氮库指数 (NPI)	NO ₃ ⁻ -N			NH ₄ ⁺ -N			DTN			DON		
		L	LI	NPMI	L	LI	NPMI	L	LI	NPMI	L	LI	NPMI
N0BC0	1.000	0.005	1.000	100.000	0.003	1.000	100.000	0.033	1.000	100.000	0.024	1.000	100.000
N0BC20	3.005	0.002	0.377	96.146	0.002	0.591	145.806	0.017	0.589	138.055	0.014	0.691	160.386
N9BC0	1.460	0.004	0.974	119.267	0.004	1.234	151.257	0.029	0.905	117.747	0.021	0.850	112.083
N9BC20	2.129	0.004	0.776	106.876	0.005	1.354	163.625	0.031	1.031	160.160	0.022	1.113	179.613

注：NPI、L、LI、NPMI 分别为氮库指数、氮库活度、活度指数、氮库管理指数。

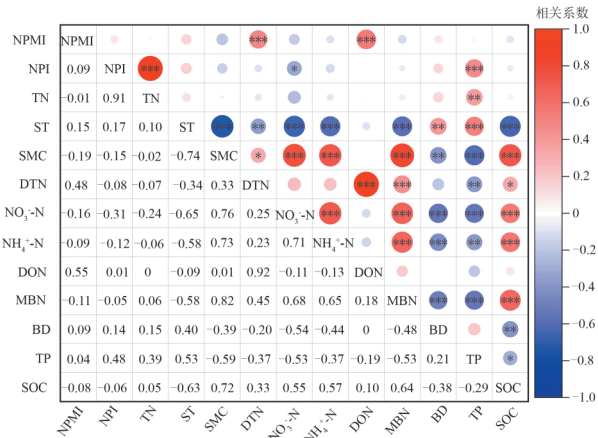


图 4 土壤氮库管理指数及土壤理化性质相关矩阵

Fig.4 Correlation matrix of soil nitrogen pool management indices and soil physical and chemical properties

表 4 不同土层土壤全氮质量分数与影响因子的回归分析模型

Table 4 Regression analysis model of soil total nitrogen content and the influencing factors in different soil layers

土层深度/cm	回归方程	R ²	p
0~10	y=2.503-0.267x ₁	0.345	0.004
10~20	y=-6.542+5.400x ₂	0.226	0.020
20~40	y=-22.563+5.826x ₃ +2.645x ₄	0.537	<0.001

注：y 为土壤 TN 质量分数；x₁ 为土壤 NO₃⁻-N 质量分数；x₂ 为土壤 BD；x₃ 为土壤 TP 质量分数；x₄ 为土壤 pH。

3 讨论

N 循环是生态系统主要的功能之一，对于外源 C、N 输入较为敏感^[18]。本研究中，高 N 添加显著增加 0~40 cm 土层土壤 TN 和 NH₄⁺-N 质量分数，主要是因为外源 N 素添加使得 N 素在土壤中形成积累。同时，N 添加促进植物生长带来的有机残体输入增加^[18]。在 0~10 cm 土层，BC 添加显著增加土壤 TN 质量分数，N9BC20 处理无显著差异，但在 10~20 cm 土层，N0BC0 和 N9BC20 处理均显著增加土壤 TN 质量分数，是因为 BC 具有大孔径，施入土壤后对矿质 N 的吸附能力增强，从而在一定程度上增加土壤氮素的固持^[19]。同时，有研究^[19]发现，土壤性质在 0~10 cm 的土层深度变化最为显著，而 10~20 cm 土

层，N0BC20 和 N9BC20 处理无显著差异可能是因为降水使得 TN 向下发生淋溶。本研究还发现，NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 质量分数最大值分别在 N9BC20 和 N9BC0 处理。表明添加尿素 N 肥后，尿素在短时间内转化为碳酸氢铵，经过矿化作用转化为 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N^[20]。本研究发现，添加 BC 显著增加土壤 TN 和 NH₄⁺-N 质量分数，与前人^[7]研究结果基本一致。一方面，由于 BC 能够增加土壤中 N 的吸附作用，尤其对 NH₄⁺-N 具有较强的吸附能力^[7]。同时，BC 还能减少氨的挥发损失，减少 N 素的损失途径，从而减少 N 素的损失；另一方面，BC 可为固 N 细菌提供适宜的生境和丰富的 C 源，提高固 N 细菌的活性，使固 N 细菌更好地进行固 N 过程，进而增强土壤 N 素的固定^[21]。已有研究^[22]发现，NO₃⁻-N 是容易被植物吸收和利用的土壤 N 离子。然而，在土壤中，该离子形式的 N 具有流动性，不易被土壤胶体吸附。本研究中，BC 添加显著减少 0~40 cm 土层土壤中 NO₃⁻-N 质量分数。是因为 NO₃⁻-N 是土壤各种形态 N 素中最难被土壤颗粒所吸附的，很容易发生淋失^[22]。而黄土高原土壤通气性较好，添加 BC 可进一步改善土壤通气状况，加之 BC 对 NH₄⁺-N 的吸附能力强^[7]，故此造成 NO₃⁻-N 过多淋失。MAGRINI-BAIR 等^[23]研究结果进一步验证，在总 N 淋失量中，NO₃⁻-N 淋失量最大，占总 N 淋失量的 84%~90%。

MBN 可为土壤提供 N 源营养，其动态变化表征土壤养分的转化和有效性^[24]。本研究表明，添加 BC 显著增加 0~40 cm 土层土壤 MBN 的质量分数。BC 不仅影响土壤微生物群落的多样性，还改变微生物群落结构和组成^[25]。该影响一方面因为 BC 施入土壤后可提高土壤 pH，增加土壤持水性和孔隙度，降低土壤体积质量，为微生物的生长繁殖提供舒适、良好的生存条件，增加土壤微生物生物量^[26]；另一方面，BC 吸附性强，C 质量分数高，营养元素丰富，施入土壤后部分组分可直接作为能源物质供微生物生长利用^[10]，并且对 N 养分的吸附性增强土壤养分供应的能力^[27]。本研究中，N9BC20 处理的 MBN 质量分数

基本没有变化,可能是高N添加降低土壤pH,减少土壤微生物量,抵消BC添加的作用。BC添加显著降低MBN占TN的比例,因为N0BC20处理的TN增幅远大于MBN增幅。

DON是土壤ON组分中最活跃的部分,是土壤ON矿化过程的重要参与部分^[28]。有研究^[29]对不同类型农田土壤DON的测定发现,农田土壤DON质量分数为20~30 kg/hm²,约占TN的2.5%~4.0%,而本研究中,DON占TN比例均低于2.5%,可能是农田土壤在耕作过程中添加肥料,但撂荒草地由于长期弃耕土壤中DON存在损失。本研究结果得出,高N和BC添加显著提高0~40 cm土层土壤DON质量分数,与BHOGAL等^[29]的研究结果一致。是因为BC的加入导致N质量分数的相对缺乏,刺激微生物的N素获取能力,促进含N有机质的快速分解及N素的释放^[30]。DTN主要包括DON和溶解性无机氮(DIN),其质量分数变化主要受到DON和DIN的影响。本研究结果显示,高N和BC添加显著增加DTN质量分数,在土层间的规律表现为N0BC20处理下的DTN在10~20 cm土层处最大,N9BC20处理下的DTN质量分数在20~40 cm土层处最大,与DON质量分数在土层间的变化规律一致,因为DON在DTN中占据较大比例,所以DTN的变化主要受到DON的影响。由图4可知,DON与DTN质量分数的相关系数非常显著,其值达到0.92,也能证实此观点。

DTN/TN、DON/TN、NH₄⁺-N/TN和NO₃⁻-N/TN可表征可溶性N素在土壤中变化。本研究显示,添加BC造成DTN/TN显著降低,说明添加BC后TN增幅大于DTN,图1和图2也验证该现象。本研究结果显示,N0BC0和N9BC0处理下的NH₄⁺-N/TN均大于NO₃⁻-N/TN,N0BC20和N9BC20处理下的NH₄⁺-N/TN均小于NO₃⁻-N/TN,且N0BC20和N9BC20处理下的DON/TN均大于N0BC0和N9BC0处理。说明BC添加提高DON和NO₃⁻-N在DTN中的占比,NO₃⁻-N占比提高可能是因为BC添加后促进硝化作用,使得一部分NH₄⁺-N被硝化作用转化为NO₃⁻-N^[16],且由图4可知,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的相关系数非常显著,而DON占比提高的原因可能是BC添加促进微生物的分解作用,从而使微生物释放出以可溶性形式存在的ON^[28]。

NPMI能反映外界条件对土壤N组分变化的效应^[17]。本研究中,除N0BC20处理的NO₃⁻-N的NPMI较对照下降之外,其余各处理下各N组分NPMI较对照均有所增加,与BC添加后降低NO₃⁻-N的变化趋势一致^[22],同时,除NO₃⁻-N外,其他各指标

的NPMI都在N9BC20处理最大。可能是高N和BC的添加一方面为土壤带入相对充足的C源和N源^[11];另一方面,可通过调节土壤pH^[31],有利于土壤中N素的增加,进而达到土壤活性N库扩容的目的。相关性分析表明,NPMI与DTN和DON呈极显著正相关,说明NPMI与DTN和DON的变化规律高度一致,因此,通过高N和BC添加调控NPMI能直接或间接提高土壤供N能力。

4 结论

1)BC显著提高黄土高原撂荒草地TN、DON、NH₄⁺-N和MBN质量分数,且能降低NO₃⁻-N质量分数。

2)BC显著改变土壤N组分质量分数及分配,有利于土壤N的固定,能够增加黄土高原撂荒草地土壤N组分的蓄积。

3)但高N添加不仅降低DON/DTN,也降低BC对土壤微生物的积极作用。同时,高N和BC复合添加对黄土高原撂荒草地DON和NH₄⁺-N影响较大,能为土壤提供更多可以被植物直接利用的N素。

综上,在供试施用量下,BC添加能够在高N背景下提高土壤一定的供N能力。

参考文献:

- [1] 肖博,王邵军,解玲玲,等.蚂蚁筑巢定居活动对热带森林土壤氮库及组分分配的影响[J].生态环境学报,2023,32(6):1026-1036.
XIAO B, WANG S J, XIE L L, et al. Effect of ant nest-ing activity on soil nitrogen component allocation in the Xishuangbanna tropical forests[J]. Ecology and Environ-mental Sciences, 2023, 32(6): 1026-1036.
- [2] 莫江明,彭少麟,方运霆,等.鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究[J].生态学报,2001,21(3):492-497.
MO J M, PENG S L, FANG Y T, et al. A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soils of pine-broadleaf mixed forest in Dinghuashan Biosphere Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 492-497.
- [3] 赵满兴,白二磊,刘慧,等.黄土丘陵区人工林土壤可溶性氮组分季节变化[J].水土保持学报,2019,33(2):258-263.
ZHAO M X, BAI E L, LIU H, et al. Seasonal variation of soil soluble nitrogen fractions in plantation in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 258-263.
- [4] 廖鑫宇,盛建东,程军回,等.新疆山地草甸土壤全氮变化特征与影响因素的关系分析[J].天津农业科学,2022,28(7):34-43.
LIAO X Y, SHENG J D, CHENG J H, et al. Relation-

- ship between soil total nitrogen change characteristics and influencing factors in mountainous meadow in Xinjiang [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2022, 28(7): 34-43.
- [5] 唐玉霞, 贾树龙, 孟春香, 等. 土壤微生物生物量氮研究综述[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(2): 76-78.
TANG Y X, JIA S L, MENG C X, et al. A summary of soil microbial biomass nitrogen [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(2): 76-78.
- [6] 代欣. 模拟不同氮沉降水平对桑树幼苗生长、生理特征的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
DAI X. Effects of simulated different nitrogen deposition levels on growth and physiological characteristics of mulberry seedlings [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [7] 尚杰. 添加生物炭对壤土理化性质和作物生长的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
SHANG J. Effects of biochar addition on physical and chemical properties of Lou soil and crop growth [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [8] 邹峻桦. 不同温度及气氛条件下生物炭的制备与还田效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
ZOU J H. Study on preparation and effect of biochar returning to field under different temperatures and atmosphere conditions [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [9] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
GAO D C, ZHANG L, LIU Q, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 54-61.
- [10] 潘少彤. 含生物质炭土壤中底物矿化过程及其物理与生物学机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
PAN S T. Substrate mineralization process and its physical and biological mechanism in soil containing biomass carbon [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [11] 赵蕊蕊, 刘勇, 王凯. 生物炭和有机肥对毛白杨人工林地木质分解及土壤养分循环相关酶活性的影响[J]. 林业科学, 2023, 59(11): 1-11.
ZHAO R R, LIU Y, WANG K. Effects of biochar and manure on wood decomposition and soil enzyme activities related soil nutrient cycling in a triploid *Populus tomentosa* plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(11): 1-11.
- [12] 杨波, 王全九, 许晓婷, 等. 还林还草工程后榆林市 NDVI 时空变化趋势 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1839-1848.
YANG B, WANG Q J, XU X T, et al. NDVI spatio-temporal variation in Yulin after grain for green project [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1839-1848.
- [13] 钟泽坤. 增温和降雨改变对黄土丘陵区撂荒草地土壤碳循环关键过程的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
ZHONG Z K. Effects of warming and rainfall changes on key processes of soil carbon cycle in abandoned grassland in Loess Hilly Region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [14] 饶玉良, 曹春, 张晓雪, 等. 内蒙古荒漠草原土壤氮挥发对外源氮输入的响应[J]. 中国沙漠, 2024, 44(6): 178-186.
RAO Y L, CAO C, ZHANG X X, et al. Response of soil ammonia volatilization to exogenous nitrogen input in Inner Mongolian desert grasslands [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(6): 178-186.
- [15] 杜梦寅, 袁建钰, 李广, 等. 保护性耕作对黄土高原半干旱区农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 493-501.
DU M Y, YUAN J Y, LI G, et al. Effects of protective measures on N_2O emission from farmland soil in a semi-arid area of the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 493-501.
- [16] 王浩东, 陈梦, 袁丛军, 等. 马尾松纯林阔叶化改造对土壤碳氮固持的短期效应[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(10): 126-137.
WANG H D, CHEN M, YUAN C J, et al. The short-term effects of converting pure *Pinus massoniana* forests into mixed broadleaved forests on soil carbon and nitrogen sequestration [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2024, 44(10): 126-137.
- [17] 宋雅菲. 农艺措施对冀北坝上土壤氮素形态及氮库管理指数的影响[D]. 河北 张家口: 河北北方学院, 2019.
SONG Y F. Effects of agronomic measures on soil nitrogen forms and nitrogen pool management index in Bashang, northern Hebei Province [D]. Zhangjiakou, Hebei: Hebei North University, 2019.
- [18] GRUBER N, GALLOWAY J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle [J]. Nature, 2008, 451(7176): 293-296.
- [19] 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.
- [20] 田兴芳. 黄土高原撂荒草地土壤团聚体氮素转化特征及管理建议[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
TIAN X F. Nitrogen transformation characteristics of soil aggregates in abandoned grassland on Loess Plateau and management suggestions [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [21] KLEBER M, HOCKADAY W, NICOP S. Characteristics of biochar: Macro-molecular properties [M]// Biochar For Environmental Management. Routledge, 2015: 111-137.
- [22] 袁新民, 杨学云, 同延安, 等. 不同施氮量对土壤 NO_3^- -N

- 累积的影响[J].干旱地区农业研究,2001,19(1):8-13.
- YUAN X M, YANG X Y, TONG Yan'an, et al. Effect of N fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(1):8-13.
- [23] MAGRINI-BAIR K, CZERNIK S, PILATH H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers [J]. Annals of Environmental Science, 2009, 3(1):217-225.
- [24] 郭洁芸,王雅敬,李建龙.氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J].生态学报,2022,42(12):4823-4833.
- GUO J Y, WANG Y X, LI J L. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4823-4833.
- [25] 徐彬.减氮配施生物炭对稻田土壤有机碳氮矿化及水稻产量的影响[D].贵阳:贵州大学,2023.
- XU B. Effects of nitrogen reduction combined with biochar application on mineralization of organic carbon and nitrogen in paddy soil and rice yield[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [26] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009.
- [27] LEHMANN J, PEREIRA DA SILVA J, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. Plant and Soil, 2003, 249(2):343-357.
- [28] 陶朋闯,陈效民,靳译文,等.生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):231-235.
- TAO P C, CHEN X M, JIN Z W, et al. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1):231-235.
- [29] BHOGAL A, MURPHY D V, FORTUNE S, et al. Distribution of nitrogen pools in the soil profile of undisturbed and reseeded grasslands [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(4):356-362.
- [30] LI T, ZHANG X K, WANG X Q, et al. Effect of inoculating thermophilic bacterial consortia on compost efficiency and quality [J]. Waste Management, 2023, 170:341-353.
- [31] 黄雨晗,曹银贵,周伟,等.秸秆生物炭对草原矿区重构土苜蓿生长状况的影响[J].生态学报,2021,41(2):588-602.
- HUANG Y H, CAO Y G, ZHOU W, et al. Effects of straw biochar on the growth of medicago falcata in the reconstructed soil of grassland mining area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2):588-602.
- (上接第38页)
- [26] 潘根兴,丁元君,陈硕桐,等.从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J].地球科学进展,2019,34(5):451-470.
- PAN G X, DING Y J, CHEN S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(5):451-470.
- [27] 赵洋,陈永乐,张志山,等.腾格里沙漠东南缘固沙区深层土壤无机碳密度及其垂直分布特征[J].水土保持学报,2012,26(5):206-210.
- ZHAO Y, CHEN Y L, ZHANG Z S, et al. Soil inorganic carbon density and distribution characteristics in sand-fixed dunes in the Tengger Desert, northern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5):206-210.
- [28] 蒋小董.毛乌素沙地防护林恢复土壤无机碳累积效应与机制[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- JIANG X D. Efficiency and mechanism of soil inorganic carbon accumulation following vegetation restoration of shelter forest in Mu Us sandy land [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2020.
- [29] 黄战,马泽跃,冯雷,等.氮肥施用对库尔勒香梨园土壤有机碳和无机碳剖面分布的影响[J].中国土壤与肥料,2023(6):50-60.
- HUANG Z, MA Z Y, FENG L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on the distribution of organic carbon and inorganic carbon profile in Korla fragrant pear orchard soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(6):50-60.
- [30] 徐薇薇,乔木.干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1558-1561.
- XU W W, QIAO M. Soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in arid regions of China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6):1558-1561.