网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.010

施用生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤质量和荞麦产量的影响

初俊奇[1],王琦[2],张玉芬[3],武程程[4],刘彦廷[5],赵宝平[6],周磊[1]

(1 内蒙古民族大学 草业学院,内蒙古 通辽 028000;2 通辽市农牧业科学院,内蒙古 通辽 028015;3 内蒙古民族大学 生命科学与食品学院,内蒙古 通辽 028000;4 内蒙古民族大学 农学院,内蒙古 通辽 028000;5 通辽市园区公共事业服务中心 内蒙古 通辽 028000;6 内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

[摘 要] 【目的】探究施用不同量生物炭4年后其对风沙土土壤理化和生物学性状、土壤质量及荞麦产量的影响,旨在为风沙土改良与生产力提升提供理论依据。【方法】以荞麦品种通荞5号为供试材料,2020年在科尔沁沙地风沙土上分别一次性施用0,20,40和60 t/hm^{2}生物炭(分别用BC0(对照)、BC1、BC2和BC3表示),于2023年荞麦收获期采样测定0~20 cm土层土壤团聚体特性、养分含量、微生物生物量碳氮磷含量和酶活性及荞麦产量,基于全数据集计算土壤质量指数,通过随机森林模型明确荞麦产量的关键影响因子。【结果】与对照相比,生物炭显著降低了0~20 cm土层粒径<0.1 mm团聚体含量,提高了0.1~<0.25,0.25~<0.5和0.5~<1 mm团聚体含量,但对1~<2 mm团聚体含量均无显著影响;生物炭明显提高了0~10和10~20 cm土层土壤团聚体平均质量直径,增幅分别为2.79%~7.00%和2.48%~8.71%。与对照相比,生物炭明显提高了土壤有机碳(SOC)、碱解氮、速效磷、速效钾以及微生物生物量碳氮磷(MBC、MBN、MBP)含量,增强了脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,其中以BC3处理对以上指标的影响最明显。与对照相比,生物炭显著提高了土壤质量指数,且土壤质量指数与生物炭施用量成正比关系。3个生物炭处理中,仅BC3显著提高了荞麦籽粒产量,较对照增产13.14%。随机森林分析结果显示,团聚体(0.1~<0.5 mm粒级)和有机碳组分(MBC、SOC)对荞麦产量贡献显著。【结论】一次性施用4年后,高施用量生物炭具有明显的残留效应,显著提升了风沙土土壤质量与荞麦产量,而低施用量生物炭效果有限,表明生物炭在风沙土改良中存在"施用量阈值"效应,建议生态脆弱区风沙土地区优先采用高施用量生物炭策略,以实现生物炭的长期稳定效应和农业可持续发展目标。

[关键词] 科尔沁风沙土;生物炭;土壤理化性质;微生物学性状;荞麦产量

[中图分类号] S156;S517 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0093-12

Effects of biochar application on soil quality and buckwheat yield in aeolian sandy soil of the Horqin sandy land

CHU Junqi[1], WANG Qi[2], ZHANG Yufen[3], WU Chengcheng[4], LIU Yanting[5], ZHAO Baoping[6], ZHOU Lei[1]

(1 *College of Grassland Science, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 2 *Tongliao Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tongliao, Inner Mongolia* 028015, *China*; 3 *College of Life Sciences and Food Engineering, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 4 *College of Agricultural, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 5 *Public Utilities Service Center, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 6 *College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the effects of different biochar application rates on

[收稿日期] 2025-04-06 [修回日期] 2025-06-15

[基金项目] 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-07);内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS03027);内蒙古自治区教育厅"加强我国北方重要生态安全屏障"研究专项(STAQZX202317)

[作者简介] 初俊奇(2003—),男,内蒙古乌兰浩特人,在读硕士,主要从事土壤改良研究。E-mail:jqchu123@163.com

[通信作者] 周磊(1988—),男,山西代县人,讲师,主要从事土壤改良研究。E-mail:jolay789@163.com

the physicochemical and biological properties of aeolian sandy soil, soil quality, and buckwheat yield after four years, to provide a theoretical basis for the improvement and productivity enhancement of aeolian sandy soils. 【Method】 A field experiment was conducted in 2020 on aeolian sandy soil in the Horqin sandy land with the buckwheat cultivar Tongqiao No. 5 as the test crop. Biochar was applied once at rates of 0, 20, 40, and 60 t/hm^2, designated as BC0 (the control), BC1, BC2, and BC3, respectively. In 2023, during the buckwheat harvest stage, soil samples were collected from the 0−20 cm soil layer to determine soil aggregate characteristics, nutrient contents, microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus, enzyme activities, and buckwheat yield. Based on the full dataset, the soil quality index (SQI) was calculated, and key yield-influencing factors were identified by using a random forest model. 【Result】 Compared with the control, biochar application significantly reduced the content of soil aggregates <0.1 mm in the 0−20 cm soil layer, and increased the contents of 0.1−<0.25, 0.25−<0.5, and 0.5−<1 mm aggregates. However, no significant effect was observed for the 1−<2 mm aggregates. Biochar application notably increased the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates in both the 0−10 cm (increased by 2.79%−7.00%) and 10−20 cm (increased by 2.48%−8.71%) soil layers. In addition, biochar application significantly enhanced soil organic carbon (SOC), available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), and microbial biomass phosphorus (MBP) contents, as well as the activities of urease, sucrase, and alkaline phosphatase. Among all treatments, BC3 treatment showed the most pronounced improvements in these indicators. Biochar application also significantly improved the SQI, which increased proportionally with increasing application rate. Among the three biochar treatments, only BC3 treatment significantly increased buckwheat grain yield, showing a 13.14% increase compared with the control. Random forest analysis indicated that 0.1−<0.5 mm aggregates and organic carbon components (MBC and SOC) were the major contributors to buckwheat yield. 【Conclusion】 Four years after a one-time application, high rates of biochar application demonstrated a pronounced residual effect, significantly improving soil quality and buckwheat yield in aeolian sandy soils. In contrast, low application rates had limited effects, suggesting a "threshold effect" for biochar application in such soils. Therefore, in ecologically fragile regions affected by aeolian sandy soils, priority should be given to high-rate biochar application strategies to achieve long-term, stable effects and support sustainable agricultural development.

Key words: Horqin aeolian sandy soil; biochar; soil physicochemical properties; microbiological charactersistics; buckwheat yield

第六次全国荒漠化与沙化调查数据表明,内蒙古自治区的沙化土地面积为3 981.53万hm^2,位居全国第二,占总面积的33.66%[1]。沙化后土壤质地疏松、结构差、养分贫瘠,从而导致土地生产力低下,严重制约着该区域的农业生产和可持续发展[2]。因此,如何有效改良风沙土并提高土地生产力,具有重要的现实意义。

近年来,作为一种有机改良剂,生物炭广泛应用于农业生产,尤其在退化土壤修复中表现突出。其独特的多孔结构和较大比表面积可改善土壤的水分保持能力、通气性和结构稳定性,减少养分流失,提升养分供应能力。同时,生物炭还可优化土壤微环境,促进微生物多样性和活性。研究表明,生物炭在改善土壤质量方面具有显著且相对持久的效果[3]。例如,杨丹等[3]研究发现,连续施用生物炭3年可显著提高滨海盐碱地土壤的有机质、碱解氮和有效磷含量,并增强土壤中酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。RONG等[4]发现,在酸性土壤中一次性施加生物炭后,水稻产量在连续3年内均保持显著提升。MAJOR等[5]开展的4年田间试验也显示,尽管生物炭施用第1年对玉米产量影响不显著,但其后3年平均增产达66%。然而,部分研究也指出,生物炭的改良效果可能较为有限,甚至在特定条件下会产生负面影响。例如,张贵芹等[6]在滨海盐碱地的试验中发现,生物炭对土壤保水性、夏玉米的产量及品质的提升均不显著。此外,有研究表明,生物炭对土壤团聚体稳定性、水分含量、养分有效性、微生物活性及生物量等指标无显著影响,甚至可能导致不利后果[7]。RONDON等[8]指出,生物炭具有较强的氮吸附能力,可能抑制氮

素的生物可利用性；WANG 等[9]的盆栽试验进一步发现，高生物炭施用量（占土壤质量的 5%）可抑制过氧化物酶、硫酸酯酶等参与硫循环的胞外酶活性，平均降幅达 44.6%。综上所述，生物炭的改良效果受多种因素共同调控。尽管存在一定的不确定性，其作为低肥力土壤改良措施的潜力已得到广泛认可并在实践中不断验证。

荞麦（*Fagopyrum esculentum* Moench），是一种兼具药用和食用价值的植物，因其丰富的营养成分而被誉为 21 世纪最具潜力的健康食品[10]。内蒙古的荞麦种植主要集中在东部通辽市的库伦旗和奈曼旗，以及赤峰市的敖汉旗和翁牛特旗，库伦旗更是被誉为“中国荞麦之乡”[11]。这些荞麦主产区位于科尔沁沙地内，该地区土壤退化严重，沙地面积大，土地生产力低，导致荞麦产量低下，制约着荞麦产业的可持续发展。

尽管已有大量研究探讨了生物炭在土壤改良及作物增产增效中的作用，但针对其对沙地风沙土的改良研究仍相对较少，尤其是对其一次性施用后的残留效应仍缺乏深入探讨。因此，本研究以科尔沁沙地风沙土为对象，探讨一次性施用 4 年后，不同施用量生物炭对风沙土 0～20 cm 土层土壤理化性质、微生物生物量碳氮磷含量和酶活性、荞麦产量及其对风沙土土壤质量和生产力的影响，旨在为该地区风沙土改良与生产力提升提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于内蒙古通辽市科尔沁区敖力布皋镇西辽河村（43°45′ N，122°25′ E），该地区属温带大陆性季风气候，年平均降雨量约为 399 mm，年均气温 6.4 ℃。土壤类型为风沙土，机械组成为：沙粒 89.33%，粉粒 8.7%，黏粒 1.97%。供试土壤理化性质：pH 7.74，体积质量 1.6 g/cm^3，有机质 7.46 g/kg，全氮 0.34 g/kg，全磷 7.12 mg/kg，铵态氮 13.25 mg/kg，硝态氮 78.31 mg/kg，速效磷 7.12 mg/kg，速效钾 81.44 mg/kg。

1.2　供试材料

生物炭购于辽宁金和富农业科技股份有限公司，该生物炭以玉米秸秆为原料，在 450 ℃下缓慢热解 90 min 制备而成。生物炭的基本性质如下：pH 8.85，总碳 657.8 g/kg，总氮 9.20 g/kg，总磷 8.85 g/kg，总钾 12.3 g/kg，有效磷 120 mg/kg，有效钾 289 mg/kg，灰分含量 16.02%，阳离子交换量 37.53 cmol/kg，比表面积 8.87 m^2/g，密度约为 0.596 g/cm^3，电导率为 1 240 μS/cm。

1.3　试验设计

本试验开始于 2020 年，共设 4 个处理，分别为：BC0（对照），0 t/hm^2 生物炭；BC1，20 t/hm^2 生物炭；BC2，40 t/hm^2 生物炭；BC3，60 t/hm^2 生物炭。每个处理重复 3 次，共 12 个小区，小区面积为 30 m^2（6 m×5 m）。为防止水分与养分在处理间横向流失，各小区之间设置宽 30 cm、高 10 cm 的土埂进行物理隔离。2020 年 6 月，生物炭一次性撒施于各小区表层，后用旋耕机旋耕 2 次，深度为 15 cm，后续不再施用生物炭。底肥为磷酸二铵和硫酸钾，施用量分别为 100 和 150 kg/hm^2，均基施于播种沟。荞麦品种为通荞 5 号，播种量为 45 kg/hm^2，行距为 40 cm。2020 年 7 月 3 日播种，9 月 28 日收获。2021 年 7 月 5 日播种，9 月 30 日收获。2022 年 7 月 7 日播种，9 月 30 日收获。2023 年 7 月 23 日播种，9 月 28 日收获。其余田间管理措施均依照当地常规农艺措施执行。灌溉根据降雨状况与土壤墒情灵活适时进行。试验期间荞麦未发生明显病虫害，因而未开展病虫害处理措施。

1.4　样品采集与测定

于荞麦成熟期，用土钻分别采集 0～10 和 10～20 cm 土层土样。每个小区随机选取 5 个采样点，分别采集对应土层的土壤并充分混合成 1 个土样。去除植物残体及作物根系后，样品装入干净的塑封袋，带回实验室进行后续分析。一部分置于通风处阴干，用于土壤团聚体分级和理化性质分析；一部分保存于 4 ℃，用于土壤微生物生物量和酶活性测定。

1.4.1　土壤团聚体含量　利用干筛法进行机械稳定性团聚体分级。称取 100 g 风干土样，并将土样置于 2 mm 孔径的土筛上，在振荡机上振荡 10 min，并依次通过孔径为 2，1，0.5，0.25 和 0.1 mm 的筛组。收集各孔径土筛上的土壤样品，用电子天平称质量，记录各粒级土壤样品质量，计算各粒径团聚体含量。由于本试验土样中无＞2 mm 的团聚体，所以本试验的团聚体粒径分为 5 个级别，即＜0.1，0.1～＜0.25，0.25～＜0.5，0.5～＜1 和 1～＜2 mm。

土壤团聚体稳定性指标采用平均质量直径（mean weight diameter，MWD）进行评价[12]，计算公式为：

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}x_i w_i。\qquad(1)$$

式中:x_i为第i个粒径团聚体的平均直径(mm);w_i为第i个粒径团聚体质量所占比例(%);n为粒径分组的组数。

1.4.2 土壤理化性质 土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定,碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法测定,速效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗吸光光度法测定,速效钾(AK)含量采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定,以上指标的测定方法均参考鲍士旦的《土壤农化分析》[13]。

1.4.3 土壤微生物学特性 土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量磷(MBP)含量采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法[14]测定。土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定[15]。

1.4.4 荞麦产量 于荞麦成熟期,在每个小区中心区域内随机选择2 m^2(1 m×2 m)样方,用电子天平称质量测定产量。

1.5 土壤质量评价

为评价不同生物炭施用量对风沙土土壤质量的影响,采用全数据集法(包括>0.25 mm团聚体、SOC、AN、AP、AK、MBC、MBN、MBP、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶11个指标),分别进行0~10和10~20 cm土层土壤质量评价(SQI),计算步骤如下:

1)将每个土壤指标转化成0~1的无量纲得分(S_i),其计算公式如下[16]:

$$S_i=\frac{x_i-x_{min}}{x_{max}-x_{min}}。\quad(2)$$

式中:S_i为第i个指标的得分,x_i、x_{max}、x_{min}分别为指标的测量值、最大值和最小值。

2)主成分分析。根据指标的特征值与所有指标特征值之和的比例计算指标的权重(w_i),计算公式为:

$$w_i=C_i/\sum_{i=1}^{n}C_i。\quad(3)$$

式中:C_i为指标特征值,n为指标数量。

3)通过得分值乘以各指标相应的权重计算SQI,即:

$$SQI=\sum_{i=1}^{n}w_i\times S_i。\quad(4)$$

1.6 数据处理

采用Excel进行数据预处理,采用SPSS 27.0软件对数据进行方差分析,利用Origin 2021进行主成分分析及绘图,使用R语言中"Rand Forest"包进行随机森林分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤团聚体组成和稳定性影响

2.1.1 土壤团聚体组成 生物炭对科尔沁沙地风沙土0~20 cm土层土壤团聚体含量的影响见表1。

表1 生物炭对科尔沁沙地风沙土0~20 cm土层土壤团聚体组成的影响

Table 1 Effects of biochar on the composition of soil aggregate in the 0−20 cm soil layer in the Horqin aeolian sandy soil%

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatments	不同粒径土壤团聚体 Soil aggregate of different particle sizes				
		<0.1 mm	0.1~<0.25 mm	0.25~<0.5 mm	0.5~<1 mm	1~<2 mm
0~10	BC0	79.18±0.32 a	15.15±0.40 c	1.58±0.09 b	2.76±0.11 b	1.31±0.07 a
	BC1	75.97±0.24 b	17.95±0.04 b	1.79±0.05 b	2.91±0.13 ab	1.35±0.13 a
	BC2	73.94±0.45 c	18.80±0.46 a	2.80±0.11 a	2.99±0.10 ab	1.45±0.09 a
	BC3	73.38±0.53 c	19.02±0.34 a	3.01±0.11 a	3.17±0.05 a	1.40±0.08 a
10~20	BC0	77.16±0.17 a	15.80±0.16 b	2.44±0.18 d	3.09±0.18 b	1.48±0.10 a
	BC1	73.42±0.50 b	18.90±0.69 a	3.05±0.07 c	3.16±0.23 b	1.45±0.09 a
	BC2	72.68±0.29 b	19.00±0.31 a	3.45±0.14 b	3.33±0.13 b	1.51±0.12 a
	BC3	71.47±0.30 c	18.96±0.49 a	3.78±0.06 a	4.28±0.13 a	1.50±0.02 a
生物炭(BC)Biochar		***	NS	***	***	*
土层深度(SD)Soil depth		***	***	***	***	NS
生物炭×土层深度BC×SD		NS	NS	**	**	NS

注:BC0(对照).0 t/hm^{2}生物炭;BC1.20 t/hm^{2}生物炭;BC2.40 t/hm^{2}生物炭;BC3.60 t/hm^{2}生物炭。同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*、**和***分别表示在$P<0.05$、$P<0.01$和$P<0.001$水平影响显著,NS表示影响不显著。下同。

Note: BC0 (control). 0 t/hm^2 biochar; BC1. 20 t/hm^2 biochar; BC2. 40 t/hm^2 biochar; and BC3. 60 t/hm^2 biochar. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). *, **, and *** indicate significant effects at the $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$ levels, respectively, and NS indicates no significant effects. The same below.

由表1可知,在0~10和10~20 cm土层,各粒级团聚体含量由高到低大致表现出<0.1,0.1~<

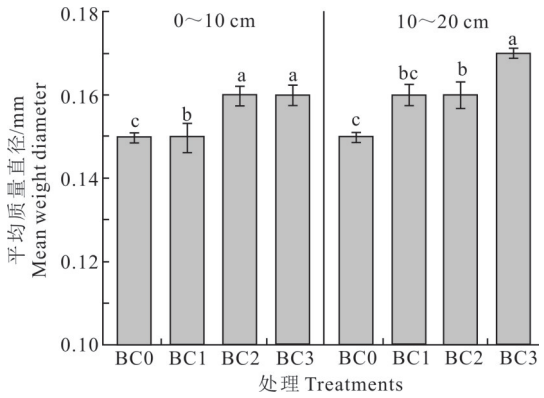
0.25，0.25～＜0.5，0.5～＜1，1～＜2 mm。在两个土层中均以粒径＜0.1 mm团聚体含量最高，分别占73.38%～79.18% 和 71.47%～77.16%；1～＜2 mm 团聚体占比最低，仅占 1.31%～1.45% 和 1.45%～1.51%。所有生物炭处理对1～＜2 mm团聚体含量均无显著影响。

在0～10 cm土层，生物炭显著降低了粒径＜0.1 mm团聚体含量，以BC3处理的降低幅度最大，较BC0处理降低了7.32%，BC2与BC3处理之间差异不显著。与BC0处理相比，各生物炭处理显著提高0.1～＜0.25 mm团聚体含量，增幅为25.6%～24.1%；仅BC2和BC3处理显著提高了0.25～＜0.5 mm团聚体含量，但二者之间差异不显著；对于0.5～＜1 mm团聚体而言，仅BC3处理显著提高了其含量，增幅为6.87%（表1）。

在10～20 cm土层，各生物炭处理粒径＜0.1 mm团聚体含量相较于BC0均显著降低（$P<0.05$），其中BC3处理降幅最大，较BC0降低了7.39%；BC3与BC2、BC1处理之间差异显著（$P<0.05$），但BC2和BC1处理间无显著差异。与BC0处理相比，施用生物炭显著提高了0.1～＜0.25 mm团聚体含量，增幅为19.62%～20.25%。0.25～＜0.5 mm团聚体含量随生物炭施用量增加而提高，BC1、BC2和BC3分别较BC0处理提高25.01%，41.42% 和54.90%。对0.5～＜1 mm团聚体而言，与BC0处理相比，仅BC3处理显著提高了38.54%，其余处理无显著变化（表1）。

由表1可知，除生物炭对0.1～＜0.25 mm团聚体和土层深度对1～＜2 mm团聚体无显著影响外，土层深度与生物炭对其余粒径团聚体均有显著或极显著影响；土层深度与生物炭的交互作用仅对0.25～＜0.5和0.5～＜1 mm团聚体有极显著影响（$P<0.01$）。

2.1.2　*土壤团聚体稳定性*　从图1可知，与BC0处理相比，各生物炭处理均明显提高了0～20 cm土层土壤团聚体平均质量直径（MWD）。在0～10 cm土层，生物炭处理的MWD较BC0增幅为2.79%～7.00%，但BC2与BC3处理间差异不显著；而在10～20 cm土层，土壤MWD基本表现为随着生物炭施用量的增加而增大，其中BC3较BC0处理提高幅度最大，为8.71%；BC1处理最小，为2.48%。由此说明，生物炭可明显增强风沙土0～20 cm土层土壤机械稳定性。



图柱上标不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下图同。
Different lowercase letters marked on the bars indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）. The same below.

图1　生物炭对科尔沁沙地风沙土0～20 cm土层土壤团聚体平均质量直径的影响

Fig. 1　Effect of biochar on the mean weight diameter of soil aggregates in 0－20 cm soil layer in Horqin aeolian sandy soil

2.2　生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤养分含量的影响

表2显示，生物炭提高了0～10和10～20 cm土层土壤养分含量，但不同施用量对不同土层各养分含量影响有差异，表层土壤养分含量高于深层土壤。生物炭处理均显著提高了风沙土0～10和10～20 cm土层土壤有机碳含量，增幅分别为14.91%～33.09% 和9.09%～33.09%，其中均以BC3处理含量最高。在0～10 cm土层，仅BC3处理显著提高了土壤碱解氮含量；而在10～20 cm土层，BC2处理土壤碱解氮含量最高，较BC0处理增加了30.02%。生物炭对0～10 cm土层速效磷含量无显著影响；但在10～20 cm土层，BC2和BC3处理速效磷含量分别较BC0显著增加了35.70% 和48.36%。生物炭显著提高了0～10 cm土层速效钾含量，增幅为3.76%～8.01%；但在10～20 cm土层，仅BC3处理显著提高了速效钾含量，增幅为14.03%。表2显示，生物炭和土层深度及其二者的交互作用对SOC、AN、AP与AK均有显著或极显著影响。

2.2.1　*土壤微生物生物量与酶活性*　由表3可见，与BC0处理相比，生物炭提高了0～20 cm土层土壤微生物生物量碳氮磷含量，且微生物碳氮磷含量均表现为10～20 cm土层高于0～10 cm土层。在0～10 cm土层，土壤微生物生物量碳含量随生物炭施用量的增加而增大，BC3、BC2和BC1分别较BC0处理提高了19.06%，13.94% 和6.77%；在10～20 cm土层，与BC0相比，仅BC2和BC3处理显著提高了微生物生物量碳含量，增幅分别为7.77% 和

6.57%。在0～10 cm土层,与BC0处理相比,仅BC2和BC3处理对微生物生物量氮含量有显著提升作用;在10～20 cm土层,与BC0处理相比,生物炭处理均显著提高了微生物生物量氮含量,其中BC2处理最高。在0～10 cm土层,与BC0相比,仅BC3处理显著提高了微生物生物量磷含量;在10～20 cm土层,各生物炭处理与BC0之间差异不显著。

表2 生物炭对科尔沁沙地风沙土0～20 cm土层土壤养分含量的影响

Table 2 Effects of biochar on soil nutrient content in 0－20 cm soil layer in Horqin aeolian sandy soil

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	有机碳/(g·kg^{-1}) Soil organic carbon	碱解氮/(mg·kg^{-1}) Available nitrogen	速效磷/(mg·kg^{-1}) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg^{-1}) Available potassium
0～10	BC0	4.56±0.04 c	50.71±0.48 b	5.78±0.11 a	101.05±2.14 c
	BC1	5.09±0.04 b	51.66±1.59 b	5.76±0.20 a	104.85±1.29 b
	BC2	5.21±0.02 a	52.90±1.02 b	5.80±0.03 a	109.13±1.67 a
	BC3	5.24±0.03 a	57.65±1.75 a	5.85±0.25 a	107.89±1.03 ab
10～20	BC0	2.75±0.14 c	29.64±0.79 c	2.44±0.06 b	36.23±1.22 b
	BC1	3.00±0.11 b	30.89±0.89 c	2.55±0.17 b	36.75±1.09 b
	BC2	3.23±0.08 b	38.54±0.52 a	3.31±0.18 a	38.30±0.78 b
	BC3	3.66±0.09 a	35.78±0.51 b	3.61±0.23 a	41.35±0.76 a
生物炭(BC)Biochar		***	***	***	***
土层深度(SD)Soil depth		***	***	***	***
生物炭×土层深度BC×SD		**	***	***	*

表3 生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤微生物生物量碳氮磷含量与酶活性的影响

Table 3 Effects of biochar on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus contents and enzymatic activities in Horqin aeolian sandy soil

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatments	微生物生物量碳/(mg·kg^{-1}) MBC	微生物生物量氮/(mg·kg^{-1}) MBN	微生物生物量磷/(mg·kg^{-1}) MBP	脲酶/(mg·g^{-1}·d^{-1}) Ure	蔗糖酶/(mg·g^{-1}·d^{-1}) Int	碱性磷酸酶/(μg·g^{-1}·h^{-1}) Alkp
0～10	BC0	91.31±1.29 d	4.83±0.03 b	3.64±0.14 b	114.93±4.60 c	1.11±0.02 c	224.29±3.09 c
	BC1	97.50±1.65 c	4.81±0.08 b	3.70±0.11 b	125.57±2.94 b	1.28±0.05 b	233.34±5.04 bc
	BC2	104.09±2.01 b	5.26±0.07 a	3.88±0.02 b	135.81±3.71 a	1.38±0.04 ab	235.62±5.44 b
	BC3	108.71±1.11 a	5.38±0.11 a	3.95±0.07 a	137.74±3.37 a	1.29±0.03 a	248.77±2.94 a
10～20	BC0	107.67±2.07 b	5.45±0.31 c	4.30±0.17 ab	101.98±5.53 a	0.98±0.03 b	213.02±9.08 a
	BC1	110.78±1.79 ab	6.06±0.25 b	4.22±0.06 b	113.82±3.54 a	1.00±0.03 b	216.53±6.73 a
	BC2	114.75±3.50 a	7.08±0.14 a	4.31±0.08 ab	117.56±3.67 a	1.14±0.05 a	219.42±0.89 a
	BC3	116.03±0.21 a	6.20±0.05 b	4.64±0.10 a	114.42±7.79 a	1.14±0.04 a	221.66±9.59 a
生物炭(BC)Biochar		***	***	**	***	***	*
土层深度(SD)Soil depth		***	***	***	***	***	***
生物炭×土层深度BC×SD		*	***	NS	NS	NS	NS

表3表明,生物炭提高了0～20 cm土层土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性,且0～10 cm土层3种酶活性均高于10～20 cm土层。与BC0处理相比,生物炭均显著提高了0～10 cm土层土壤脲酶活性,其中BC3处理的脲酶活性最大,较BC0处理提高了16.22%;在10～20 cm土层,各处理之间则无显著差异。与BC0处理相比,生物炭显著提高了0～10 cm土层土壤蔗糖酶活性,增幅为15.32%～24.32%;在10～20 cm土层,只有BC2和BC3处理显著提高了土壤蔗糖酶活性,但二者之间差异不显著。在0～10 cm土层,BC2和BC3处理显著提高了土壤碱性磷酸酶活性,较BC0分别提高5.05%和10.92%;但在10～20 cm土层,各处理之间则无显著差异。

表3显示,除了土层深度与生物炭的交互作用对土壤微生物生物量磷无显著影响外,生物炭和土层深度及其交互作用对土壤微生物量碳、氮和磷均有显著或极显著影响。生物炭和土层深度对土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶均有显著或极显著影响,但二者交互作用影响不显著。

2.2.2 土壤微生物生物量与酶活性的相关分析

由表4可知,在0～10 cm土层,除了蔗糖酶与MBN和MBP无显著性相关关系外,其他各指标间均存在显著或极显著正相关关系;而在10～20 cm土层,仅MBC与MBN之间以及MBN与蔗糖酶和脲酶之间均呈显著正相关($P<0.05$)。

表 4　土壤微生物生物量碳氮磷含量与脲酶、蔗糖酶及碱性磷酸酶活性之间的相关性

Table 4　Correlation analysis between soil microbial biomass carbon，nitrogen，and phosphorus and the activities of urease，invertase，and alkaline phosphatase

土层深度/cm Soil depth	指标 Index	MBC	MBN	MBP	Ure	Int	土层深度/cm Soil depth	指标 Index	MBC	MBN	MBP	Ure	Int
0～10	MBC	1					10～20	MBC	1				
	MBN	0.865**	1					MBN	0.587*	1			
	MBP	0.775**	0.812**	1				MBP	0.504	0.144	1		
	Ure	0.897**	0.764**	0.606*	1			Ure	0.571	0.597*	−0.108	1	
	Int	0.689*	0.482	0.482	0.774**	1		Int	0.573	0.604*	0.332	0.548	1
	Alkp	0.838**	0.719**	0.700*	0.748**	0.500		Alkp	0.109	0.267	0.294	0.301	0.482

注：MBC. 微生物生物量碳；MBN. 微生物生物量氮；MBP. 微生物生物量磷；Ure. 脲酶；Int. 蔗糖酶；Alkp. 碱性磷酸酶。*表示显著相关（$P<0.05$），**表示极显著相关（$P<0.01$）。

Note：MBC. Microbial biomass carbon；MBN. Microbial biomass nitrogen；MBP. Microbial biomass phosphorus；Ure. Urease；Int. Invertase；Alkp. Alkaline phosphatase. *indicates significant correlation（$P<0.05$），and ** indicates highly significant correlation（$P<0.01$）.

2.3　生物炭对科尔沁沙地荞麦产量的影响

由图 2 可知，4 个处理中，BC3 处理荞麦籽粒产量最高，为 1 209.97 kg/hm^2，较 BC0 处理增加了 13.14%；其余处理与 BC0 之间无显著差异。

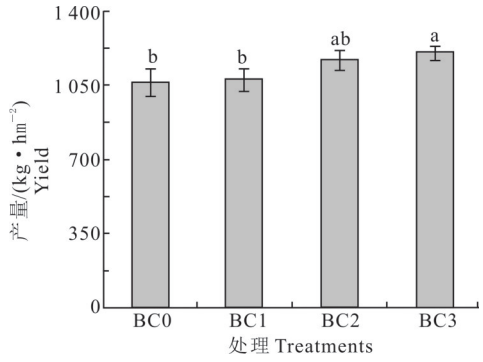


图 2　生物炭对科尔沁沙地风沙土荞麦产量的影响

Fig. 2　Effects of biochar on the yield of buckwheat in Horqin aeolian sandy soil

2.4　土壤质量指数及其与荞麦产量的关系

土壤质量指数及其与荞麦产量的关系见图 3 和图 4。

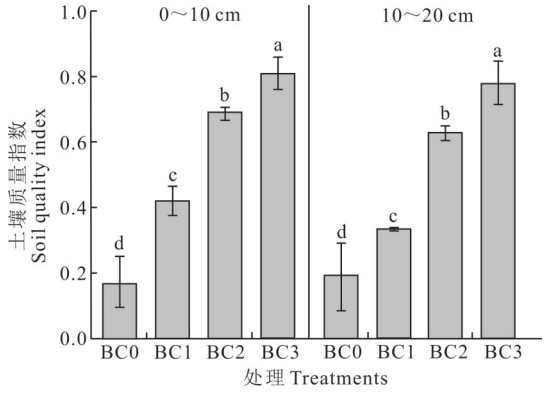


图 3　生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤质量指数的影响

Fig. 3　Effects of biochar on soil quality index in Horqin aeolian sandy soil

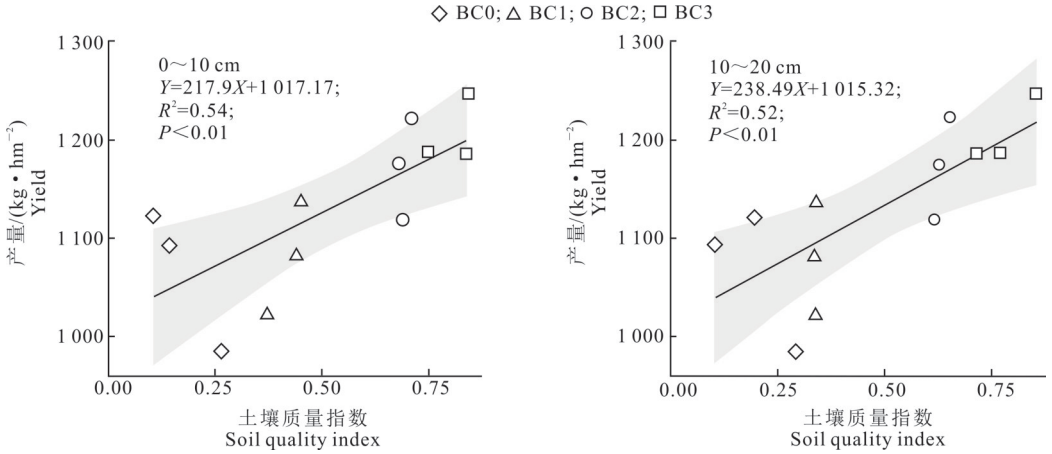


图 4　生物炭处理科尔沁沙地风沙土土壤质量指数与荞麦产量的相关性分析

Fig. 4　Correlation analysis of biochar treatments on soil quality index and buckwheat yield in Horqin aeolian sandy soil

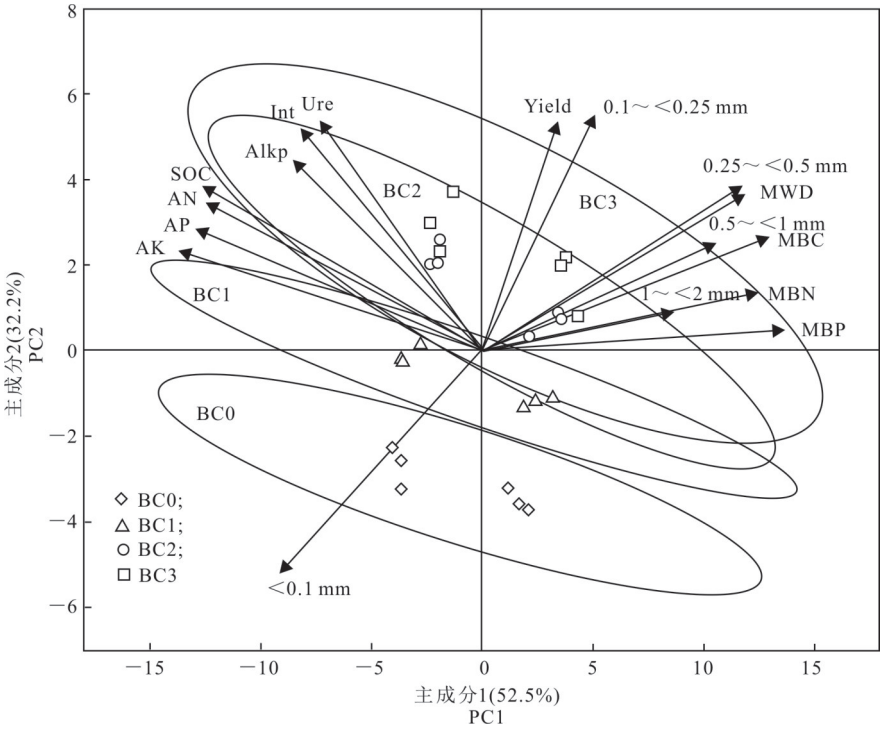
图 3 显示，生物炭显著提高了科尔沁沙地风沙土 0～10 和 10～20 cm 土层土壤质量，且随着生物炭

施用量的增加而增大。在0～10和10～20 cm土层，生物炭处理土壤质量指数分别较BC0提高了71.78%～297.66%和147.65%～376.81%。

由图4可知，荞麦产量与土壤质量指数呈正相关关系，说明生物炭通过提高土壤质量来提高荞麦产量。

2.5 科尔沁沙地风沙土土壤理化指标、微生物学特性与荞麦产量关系的主成分分析

将不同处理的各粒级团聚体、养分、微生物生物量碳氮磷含量和酶活性与荞麦产量的关系进行了主成分分析，结果(图5)表明，主成分1和主成分2分别对上述指标的方差贡献率为52.5%和30.2%，二者共解释了82.7%的总变异度。BC0处理与生物炭处理区分明显，说明BC0与其他生物炭处理之间差异较大；但BC2和BC3处理重叠，说明二者之间差异较小。除粒径<0.1 mm团聚体外，其他粒径团聚体、土壤微生物生物量碳氮磷、3种酶与BC2和BC3处理关系密切，土壤有机碳、速效氮磷钾与BC1、BC2和BC3处理关系密切；粒径<0.1 mm团聚体与BC0关系密切。粒径0.1～<0.25 mm团聚体与荞麦产量关系密切。



Yield. 荞麦产量；AN. 碱解氮；AP. 速效磷；AK. 速效钾；SOC. 土壤有机碳；Ure. 脲酶；Int. 蔗糖酶；Alkp. 碱性磷酸酶；MBC. 微生物生物量碳；MBN. 微生物生物量氮；MBP. 微生物生物量磷；土壤团聚体按粒径分为<0.1，0.1～<0.25，0.25～<0.5，0.5～<1和1～<2 mm 5个粒级；MWD. 团聚体平均质量直径。下同。

Yield. Buckwheat yield; AN. Available nitrogen; AP. Available phosphorus; AK. Available potassium; SOC. Soil organic carbon; Ure. Urease; Int. Invertase; Alkp. Alkaline phosphatase; MBC. Microbial biomass carbon; MBN. Microbial biomass nitrogen; MBP. Microbial biomass phosphorus; <0.1, 0.1～<0.25, 0.25～<0.5, 0.5～<1 and 1～<2 mm refers to soil aggregate fractions with particle sizes within the corresponding ranges; MWD. Mean weight diameter. The same below.

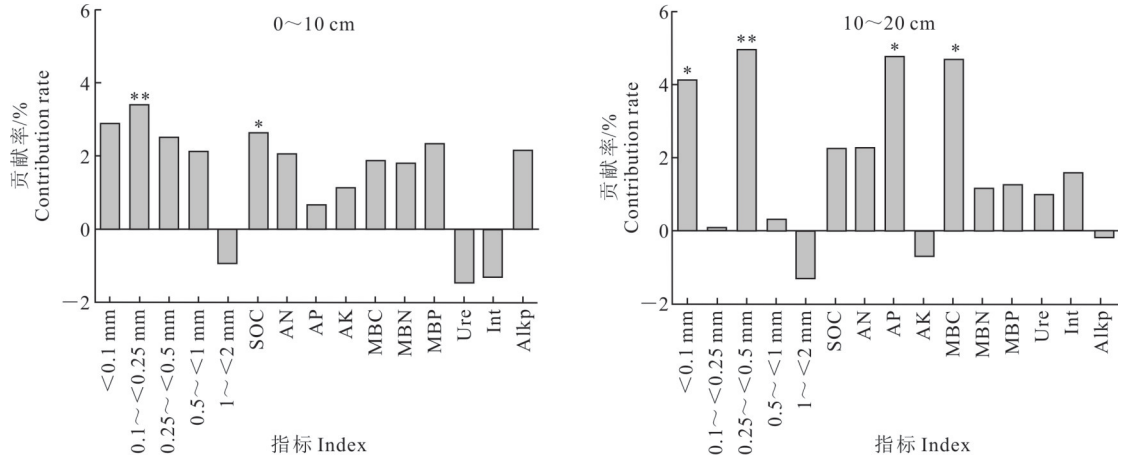
图5 科尔沁沙地风沙土土壤理化指标、微生物学特性与荞麦产量的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of the soil physicochemical indexes, microbiological characteristics and buckwheat yield in Horqin aeolian sandy soil

2.6 科尔沁沙地风沙土土壤理化指标、微生物学特性与荞麦产量关系的随机森林分析

为进一步明确0～10和10～20 cm土层各指标对荞麦产量的贡献度，以荞麦产量为目标，通过随机森林模型进行了分析，结果(图6)表明，在0～10 cm土层，有2个指标对荞麦产量具有显著或极显著影响，分别为0.1～<0.25 mm团聚体和SOC，其对荞麦产量的贡献率分别为3.40%和2.63%，累计贡献率为6.03%；在10～20 cm土层，有4个指标对荞麦产量具有显著或极显著影响，分别为0.25～<0.5 mm团聚体、AP、MBC和<0.1 mm团聚体，其对荞麦产量贡献率分别为4.96%，4.76%，4.70%和4.14%，四者累计贡献率达到了18.56%。说明生物炭主要通过改善团聚体结构，提高有机碳、速

效磷、微生物生物量碳含量以提高荞麦产量。



*、**分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 水平有显著影响。

* and** indicate significant effects at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

图 6　不同指标对荞麦产量贡献率的随机森林分析结果

Fig. 6　Random forest analysis results of the contribution rates of different indicators to buckwheat yield

3　讨　论

3.1　生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤理化性质的影响

土壤结构是表征土壤状况的重要指标之一，良好的土壤结构是提高作物产量和改善退化土壤环境质量的关键因素[17]。生物炭通过表面电荷作用与矿质颗粒结合，促进微团聚体（<0.25 mm）向大团聚体（>0.25 mm）的转变，其多孔结构为胶结物质（如菌丝、多糖）提供附着位点，从而增强团聚体的稳定性[18]。本研究发现，施用生物炭 4 年后，粒径<0.1 mm 土壤团聚体含量降低，0.1～<0.25，0.25～<0.5 和 0.5～<1 mm 团聚体含量提高，表明生物炭施用显著促进了<0.1 mm 团聚体向大团聚体的转变；生物炭对 0.1～<0.25 mm 粒级团聚体含量的提升作用最为明显，这说明大团聚体的形成与累积是通过微团聚体的持续结合实现的[19]。生物炭施用量和持效时间是影响土壤团聚体变化的重要因素之一。一般而言，较高的生物炭施用更有利于促进大团聚体的形成，LIU 等[20]研究发现，高施用量（8 t/hm^2）生物炭比低施用量（4 t/hm^2）更有利于大团聚体的形成。本研究也发现，在生物炭施用量为 60 t/hm^2（BC3）时，其对>0.1 mm 团聚体含量的增加效果优于其他处理，说明在此条件下，高施用量生物炭更有利于大团聚体的形成。本研究中，在 0～20 cm 土层，MWD 值随生物炭施用量的增加而明显升高，进一步证实了生物炭在提升风沙土结构稳定性方面有积极作用。这表明生物炭不仅有助于促进团聚体粒径向较大粒级的转化，同时也增强了团聚体的稳定性。

SOC 是表征土壤肥力与健康状况的重要指标[21]。大量研究表明，施用生物炭提高了 SOC 含量，这与其自身的碳含量密切相关。生物炭富含碳，施入土壤后可增加碳源输入，同时还可促进土壤中原有有机质的分解与转化，从而提升 SOC 含量[22]。本研究发现，生物炭显著提高了 0～20 cm 土层风沙土 SOC 含量，但并未随施用量的增加而线性增加，其原因可能较为复杂：一方面，高施用量生物炭中惰性碳比例较高，难以在短期内被有效转化，同时土壤对碳的吸附与稳定容量趋于饱和，限制了其对额外碳输入的固持效率[23]；另一方面，较高施用量生物炭可能引发土壤有机碳与氮之间的比例失衡，促使微生物固持更多无机氮以满足其代谢需求，从而造成氮素供应受限[24]，这种氮限制状态可能抑制微生物对有机碳的有效转化与稳定化，降低碳的保留效率，不利于 SOC 的持续积累。此外，部分超出稳定容量的碳源可能被快速矿化为 CO_2，进一步削弱了生物炭的长期碳汇功能[25]。随着施用年限的延长，生物炭促进 SOC 积累的效应也可能趋于减弱或稳定，这些因素共同导致 SOC 增幅在高施用量生物炭处理下趋于平缓。

本研究发现，生物炭施用 4 年后，其在一定程度上提高了风沙土的土壤速效养分，且以高施用量生物炭的影响最明显。可能原因如下：（1）生物炭本身含有一定量的速效性和缓效性养分，其施用后这些养分可逐渐释放。在高施用量下，生物炭的养分

存储能力更强,其缓释作用在多年后仍能显著提高土壤速效养分含量。(2)生物炭的多孔结构和表面电荷可有效吸附和固定土壤中的速效养分,如NH_4^+、NO_3^-和PO_4^{3-},减少养分的淋失与挥发,高施用量生物炭处理下其作用更加明显,使得土壤中的速效养分在施用多年后仍得以保持较高水平。(3)生物炭通过改善土壤微生物的生存环境(如增加有机碳源、优化水分与气体交换条件)促进微生物活动,微生物活动产生的矿化作用可持续释放速效氮、磷、钾等养分,尤其是在高施用量生物炭处理下,这种促进效应更为显著。(4)风沙土本身养分水平较低,生物炭的养分提升效应在风沙土上表现得更为显著。可知高施用量生物炭通过累积效应进一步增强了速效养分的提升幅度,表现出更明显的残留效应。

3.2 生物炭对科尔沁沙地风沙土土壤微生物特性的影响

风沙土由于水分状况差,养分贫瘠,导致土壤微生物数量和活性受到限制[26]。本研究发现,与对照相比,生物炭提高了MBC、MBN和MBP含量,这是由于生物炭为微生物提供了碳源和栖息场所,改善了土壤环境,促进了微生物生长和繁殖[27]。这一观点可由MBC、MBN和MBP与土壤大团聚体和养分呈正相关关系来证实。3个生物炭处理中,BC3处理对MBC、MBN和MBP含量的提升效果总体最显著,说明高施用量生物炭的残留效应更长。但HUSSAIN等[28]研究发现,当生物炭施用量过高时,会产生毒性效应;刘杰云等[29]发现,生物炭施用量过高降低了MBC、MBN和MBP含量。这与本研究结果存在差异,其原因可能是过量生物炭吸附了土壤有机碳及其他有机物,进而抑制了微生物的生长,也可能与生物炭原材料、制备方法、施用量和土壤类型存在差异有关。酶在土壤有机物分解和养分循环中起着至关重要的作用[20]。本研究发现,施用生物炭4年后,土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性不同程度得以提高。可能原因如下:(1)生物炭可以调节土壤三相比,改善了微生物的生存环境,从而促进酶的分泌[29];(2)生物炭提高了SOC,为土壤酶提供了额外的底物;(3)生物炭能够促进作物根系生长,从而有利于根系沉积的形成[30],而根系沉积是刺激微生物生长及排泄酶的催化剂[31]。此外,本研究的相关性分析结果显示,3种酶活性与MBC、MBN和MBP含量之间总体均呈正相关关系,且在0~10 cm土层中相关性更为显著。表明生物炭通过促进微生物生物量提升,间接促进了土壤酶活性的增强,从而有助于养分循环功能的加强。

3.3 生物炭对科尔沁沙地荞麦产量及土壤质量的影响

本研究发现,与对照相比,一次性施用生物炭4年后可明显提高荞麦产量,这可能与生物炭改善风沙土团聚体结构、提高养分含量以及优化微生态环境密切相关,这一点可由荞麦产量与土壤质量指数呈正相关关系得以证实。然而仅高施用量(60 t/hm^2)生物炭处理表现出显著的增产效果,说明生物炭的残留效应与其施用量密切相关[32]。其原因可能包括:(1)高施用量生物炭为作物提供了更多的养分来源,保障了持久的养分供应[20];(2)高施用量生物炭对土壤性质的改善更加显著[33];(3)生物炭具有较长的降解周期,能够形成长期的土壤有机质库,逐步提升土壤质量指数。低施用量生物炭虽能显著提高土壤质量,但未显著提升荞麦产量,这可能是因为土壤质量的提升幅度未能达到影响产量的阈值[34],尤其是在养分贫瘠的风沙土中,低施用量的生物炭可能无法提供足够的养分以促进作物的生长。根据随机森林模型分析可知,0.1~0.5 mm团聚体和有机碳组分(MBC、SOC)对荞麦产量贡献率总体较高,表明生物炭通过促进团聚体的形成和提高有机碳含量,改善土壤结构,进而提高荞麦产量。

本试验地点位于内蒙古通辽市科尔沁区,该区域属于典型的风蚀沙地生态类型,生态环境较为脆弱。本研究在生物炭施用及其效应分析过程中,尚未充分考虑科尔沁沙地干旱、多风等特殊气候条件对生物炭迁移损失的潜在影响。因此,在科尔沁沙地等风蚀高风险区域开展生物炭施用研究与实践时,应系统评估风蚀条件下生物炭的迁移机制与损失风险。建议结合风速、地表覆盖度、施用方式及土壤理化特性等因素,建立适宜的风蚀防控措施(如秸秆覆盖、留茬等),并开展长期定位观测与动态监测,以全面评价风蚀环境中生物炭对土壤质量提升和碳储存效应的稳定性与持久性的影响,为干旱半干旱地区风沙土土壤改良提供理论依据与技术支撑。

4 结 论

在科尔沁沙地风沙土中一次性施用20~60

t/hm²生物炭，4年后的分析结果显示，其可以明显促进0～20 cm土层微团聚体向大团聚体的转化，并明显提高土壤有机碳、速效养分和MBC、MBN和MBP含量以及脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性，改善土壤微生态环境，从而有效改善土壤质量并促进荞麦产量的提高，其中60 t/hm²生物炭处理总体表现最佳，且具有较强的残留效应。

[参考文献]

[1] 昝国盛，王翠萍，李锋，等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理，2023(1)：1-7.
ZAN G S，WANG C P，LI F，et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. Forest Resources Management，2023(1)：1-7.

[2] HOU D，BOLAN，TAANG D C W，et al. Sustainable soil use and management：an interdisciplinary and systematic approach [J]. Science of The Total Environment，2020，729：138961.

[3] 杨丹，杨天昱，何娜，等. 施用生物炭基肥对盐渍型水稻土肥力及水稻产量的影响[J]. 土壤通报，2024，55(6)：1676-1684.
YANG D，YANG T Y，HE N，et al. Effects of applying the biochar-based fertilizer on the fertility of saline paddy soil and rice yield[J]. Chinese Journal of Soil Science，2024，55(6)：1676-1684.

[4] RONG F L，QIN S S，SU G R，et al. Legacy effect of single biochar application on soil ecosystem multifunctionality and its contribution to rice yield：a five-year field experiment for acidic paddy[J]. Field Crops Research，2023，303：109141.

[5] MAJOR J，RONDON M，MONLINA D，et al. Maize yield and nutrition during 4years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil，2010，333(1)：117-128.

[6] 张贵芹，王洪章，郭新送，等. 有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J]. 作物学报，2024，50(9)：2323-2334.
ZHANG G Q，WANG H Z，GUO X S，et al. Effects of organic material inputs on soil physicochemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land[J]. Acta Agronomica Sinica，2024，50(9)：2323-2334.

[7] BRTNICKY M，DATTA R，HOLATKO J，et al. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment[J]. Science of The Total Environment，2021，796：148756.

[8] RONDON M A，LEHMANN J，RAMÍREZ J，et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions[J]. Biology and Fertility of Soils，2007，43(6)：699-708.

[9] WANG X B，SONG D L，LIANG G Q，et al. Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil[J]. Applied Soil Ecology，2015，96：265-272.

[10] 王仙女，罗中旺. 内蒙古荞麦产业现状及展望[J]. 北方农业学报，2017，45(1)：33-36.
WANG X N，LUO Z W. Current situation and prospect of Inner Mongolia buckwheat industry[J]. Journal of Northern Agriculture，2017，45(1)：33-36.

[11] 呼瑞梅，王振国. 内蒙古通辽市荞麦发展现状、优势及应用前景[J]. 杂粮作物，2010，30(2)：156-158.
HU R M，WANG Z G. Development status，advantages and application prospect of buckwheat in Tongliao City，Inner Mongolia[J]. Rain Fed Crops，2010，30(2)：156-158.

[12] 李淑洁，左振江，郝旺林，等. 微塑料对土壤团聚体稳定性及有机碳矿化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(6)：91-100.
LI S J，ZUO Z J，HAO W L，et al. Effects of microplastics on soil aggregate stability and organic carbon mineralization[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2023. 51(6)：91-100.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京：中国农业出版社，2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000.

[14] CUI Y X，FANG L C，GUO X B，et al. Responses of soil microbial communities to nutrient limitation in the desert- grassland ecological transition zone[J]. Science of The Total Environment，2018，642：45-55.

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing：Chinese Agricultural Press，1986.

[16] 丁明净，脱云飞，郑阳，等. 基于最小数据集栗子坪自然保护区不同林分类型土壤质量评价[J]. 土壤通报，2024，55(5)：1215-1228.
DING M J，TUO Y F，ZHENG Y，et al. Soil quality evaluation of different forest types in Liziping nature reserve based on the minimum data set[J]. Chinese Journal of Soil Science，2024，55(5)：1215-1228.

[17] 尚应妮，赵世伟，王子龙，等. 植被恢复下土壤结构与功能的关系[J]. 水土保持研究，2016，23(5)：370-375.
SHANG Y N，ZHAO S W，WANG Z L，et al. Relationship of soil structures and function under vegetation restoration[J]. Research of Soil and Water Conservation，2016，23(5)：370-375.

[18] SUN J N，HE F H，PAN Y H，et al. Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types[J]. Acta Agriculturae Scandinavica，Section B：Soil and Plant Science，2017，67(1)：12-22.

[19] 任娇娇，周运超，刘兵，等. 石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究[J]. 中国岩溶，2019，38(5)：722-728.
REN J J，ZHOU Y C，LIU B，et al. Study on aggregate formation mechanism of soil in limestone[J]. Carsologica Sinica，2019，38(5)：722-728.

[20] LIU X Y，WANG W Q，PEÑUELAS J，et al. Effects of nitrogen-enriched biochar on subtropical paddy soil organic carbon pool dynamics[J]. Science of The Total Environment，2022，851：158322.

[21] 万云星，牟金霞，杨婼妍，等. 生物炭长期施入对燥红土有机碳及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报，2024，43(9)：

2032-2040.
WAN Y X, MOU J X, YANG R Y, et al. Effects of long-term application of biochar on organic carbon and its fractions in dry red soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(9): 2032-2040.

[22] 侯建伟,邢存芳,邓晓梅,等. 不同秸秆生物炭对黄壤理化性质及综合肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(11):49-59.
HOU J H, XING C F, DENG X M, et al. Effect of straw biochar on yellow soil physicochemical properties and comprehensive fertility[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 49-59.

[23] DI J Y, XU M G, ZHANG W J. et al. Combinations of soil properties, carbon inputs and climate control the saturation deficit dynamics of stable soil carbon over 17-year fertilizaiton [J]. Scientific Reports, 2018(8): 12653.

[24] WANG D, LAN Y, CHEN W F. et al. The six-year biochar retention interacted with fertilizer addition alters the soil organic nitrogen supply capacity in bulk and rhizosphere soil[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 338: 117757.

[25] WANG L, CHEN D J, ZHU L Z. Soil carbon saturation and the potential for carbon sequestration in biochar-amended soils [J]. Science of The Total Environment, 2023, 904: 167047.

[26] 顾美英,唐光木,葛春辉,等. 不同秸秆还田方式对和田风沙土土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):489-498.
GU M Y, TANG G M, GE C H, et al. Effects of straw incorporation modes on microbial activity and functional diversity in sandy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 489-498.

[27] 谭春玲,刘洋,黄雪刚,等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响[J]. 中国生态农业学报,2022,30(3):333-342.
TAN C L, LIU Y, HUANG X G, et al. Effect of biochar on soil microbial metabolic activities[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 333-342.

[28] HUSSAIN M, FAROOQ M, NAWAZ A, et al. Biochar for crop production: potential benefits and risks[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 685-716.

[29] 刘杰云,邱虎森,汤宏,等. 生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. 环境科学,2019,40(8):3799-3807.
LIU J Y, QIU H S, TANG H, et al. Effects of biochar amendment on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in paddy soils[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3799-3807.

[30] MIERZWA-HERSZTEK M, GONDEK K, BARAN A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 105: 144-150.

[31] HAN S, LI H B, RENGEL Z, et al. Biochar application promotes crops yield through regulating root development and the community structure of root endophytic fungi in wheat-maize rotation[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 234: 105827.

[32] BÖHME L, BÖHME F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilisation[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(1): 1-12.

[33] YAN X Q, WANG Z J, ZHAO M, et al. Hydrothermal biochar enhances the photosynthetic efficiency and yield of alfalfa by optimizing soil chemical properties and stimulating the activity of microbial communities[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 31420.

[34] LIU Y L, JIANG W T, ZHAO W L, et al. Effects of biochar application on soil properties and the growth of *Melissa officinalis* L. under salt stress[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 338: 113704.

(责任编辑:李小平)

(上接第92页)

[27] 宋小艳,王长庭,胡雷,等. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化[J]. 生态学报,2022,42(4):1538-1548.
SONG X Y, WANG C T, HU L, et al. Changes in soil aggregate-associated organic carbon of degraded alpine meadow in the Zoigê Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1538-1548.

[28] 宫阿都,何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报,2001,15(3):112-115.
GONG A D, HE Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(3): 112-115.

[29] 陈帅,孙涛. 松嫩草地不同退化阶段的土壤团聚体稳定性[J]. 草业科学,2017,34(2):217-223.
CHEN S, SUN T. Research of soil aggregate stability in different degradation stages of Songnen grassland[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(2): 217-223.

[30] 江仁涛,李富程,沈淞涛. 川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 水土保持研究,2018,25(4):36-42.
JIANG R T, LI F C, SHEN S T. Effects of degradation of alpine grassland on soil aggregates composition and stability in northwestern Sichuan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 36-42.

[31] 宗宁,石培礼,牛犇,等. 氮磷配施对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(12):3458-3468.
ZONG N, SHI P L, NIU B, et al. Effects of nitrogen and phosphorous fertilization on community structure and productivity of degraded alpine meadows in northern Tibet, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3458-3468.

(责任编辑:李小平)