

生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究

孟繁昊^{1,2}, 高聚林^{1*}, 于晓芳¹, 王志刚¹, 胡树平¹, 青格尔¹, 孙继颖¹, 屈佳伟¹
(1 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 2 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028000)

摘要:【目的】探讨生物炭配施氮肥对土壤碳氮、生物学性质及春玉米产量的影响, 阐明生物炭配施氮肥后, 土壤碳氮含量及生化性质变化规律, 旨在为合理培肥、改善土壤环境、增加春玉米产量提供科学依据。【方法】在内蒙古西部(包头)和东部(通辽)2个试验点进行大田试验, 设生物炭用量0、8、16、24 t/hm² 4个水平(分别记作C₀、C₈、C₁₆、C₂₄), 设施氮量0、150、300 kg/hm² 3个水平(分别记作N₀、N₁₅₀、N₃₀₀), 于成熟期测产, 并于收获后分3个土层(0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm)测定土壤碳氮含量、微生物量及酶活性。【结果】生物炭和氮肥对2个试验点0—10 cm、10—20 cm和20—40 cm土层有机碳、碳氮比、微生物量及酶活性均有极显著影响($P < 0.01$), 且两者交互作用极显著。3个土层有机碳含量以及0—10 cm和10—20 cm土层全氮含量在各施氮水平随生物炭施用量的增加而增加。施加生物炭和氮肥均能显著提高3个土层的微生物量碳、微生物量氮、蔗糖酶活性、脲酶活性以及总体酶活参数, 且随炭、氮施入量的增加呈先增后减的趋势; 施用生物炭后0—10 cm和10—20 cm土层的微生物量碳、微生物量氮以及蔗糖酶、脲酶活性均显著高于20—40 cm土层。生物炭配施氮肥可显著提高春玉米穗粒数、百粒重及产量, 2试验点产量均以C₈N₁₅₀最大, 包头和通辽分别为15.51 t/hm²和16.43 t/hm²。通过相关分析可知, 春玉米产量主要与0—10 cm和10—20 cm土层的微生物量及酶活性有关。【结论】适量生物炭配施氮肥能够增加土壤碳氮储量、微生物量和酶活性, 改善土壤微生态环境。炭氮配施能够提高土壤肥力, 减少氮肥用量, 本试验中以8 t/hm²生物炭配施150 kg/hm²氮肥为最佳施肥量。

关键词: 生物炭; 氮肥; 土壤碳氮平衡

Improvement of biochemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer

MENG Fan-hao^{1,2}, GAO Ju-lin^{1*}, YU Xiao-fang¹, WANG Zhi-gang¹, HU Shu-ping¹,
QING Ge-er¹, SUN Ji-ying¹, QU Jia-wei¹

(1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2 College of Agronomy, Inner Mongolia Nationality University, Tongliao 028000, China)

Abstract: 【Objectives】The objectives of this study were to investigate the influence of combined application of biochar with nitrogen (N) fertilizer on soil carbon and nitrogen, biological property and spring maize yield, to elucidate the changing rule of soil carbon (C) and N content and the biological character by combined application of biochar with N fertilizer, providing a scientific basis for reasonable fertilization, improving soil environment and increasing spring maize yield. 【Methods】Field experiments were conducted in the west (Baotou) and east (Tongliao) region of Inner Mongolia. There were four biochar rates as 0, 8, 16, 24 t/hm² (expressed as C₀, C₈, C₁₆, C₂₄, respectively) and three N rates of 0, 150, 300 kg/hm² (expressed as N₀, N₁₅₀, N₃₀₀, respectively). Soil C, N content, microbial biomass and enzyme activity of three soil layers (0–10 cm, 10–20 cm and 20–40 cm) and maize yield were tested at harvest. 【Results】Biochar and N fertilizer application significantly affected the organic carbon, C/N ratio, microorganism quantity and enzyme activity of 0–10 cm, 10–20 cm and 20–40 cm

收稿日期: 2018-05-03 接受日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300800, 2017YFD0300804, 2017YFD0300802); 国家玉米产业技术体系(CARS-02-63); 华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站(25204120)资助。

联系方式: 孟繁昊 E-mail: mengfanhao1980@126.com; * 通信作者 高聚林 E-mail: nmgaojulin@163.com

soil layers ($P < 0.01$), and their interaction was also significant in two experimental sites. With the increase of biochar application rate, organic C in three soil layers and total N in 0–10 cm and 10–20 cm soil layers were gradually increased in two sites. Applying biochar and N fertilizer could significantly improve microbial biomass C, microbial biomass N, sucrose activity, urease activity, catalase activity, total enzyme activity index in the three soil layers, and had the trend of increase first, then decrease with the increase of biochar and N application rates. The microbial biomass C, microbial biomass N and sucrose enzyme and urease activity in the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers were significantly higher than those in the 20–40 cm soil layer. N fertilizer and biochar could significantly increase grain number per cob, 100-seed weight and the yield of spring maize in Baotou and Tongliao. The maximum yield of 15.51 t/hm² and 16.43 t/hm² in Baotou and Tongliao, respectively, was from the treatment of C₈N₁₅₀. According to the correlation analysis, spring maize yield was mainly related to the microbial biomass and enzyme activity in 0–10 cm and 10–20 cm soil layers. 【 **Conclusions** 】 The appropriate rate of biochar combined with N fertilizer could increase the soil carbon and nitrogen reserves, microbial biomass and enzyme activity in Inner Mongolia, improve the soil micro-ecological environment, and finally increase the yield of spring maize. Combined application of biochar and N fertilizer could improve soil fertility and reduce chemical fertilizer input. From this experiment, the optimal combination was 8 t/hm² of biochar and 150 kg/hm² of N fertilizer.

Key words: biochar; nitrogen fertilizer; soil carbon and nitrogen balance

生物炭 (biochar) 通常指农林废弃物等生物质在缺氧条件下不完全燃烧产生的富碳产物^[1], 炭化后具有多微孔结构和较大的比表面积^[2], 施入土壤后能够降低土壤容重, 改善土壤结构性。生物炭的高度羧酸酯化、芳香化结构特征还使其具备了极强的吸附能力^[3], 可增加土壤中的有效水分、养分, 提升肥料利用率, 成为农业中改善土壤状况、节本增效的理想材料^[4-5]。

近年来, 生物炭作为农业废弃物的再利用资源, 因能够改善土壤水肥状况、增产增效受到广泛关注^[6-7]。由于土壤类型和气候环境的不同, 生物炭对土壤和作物的影响也不尽相同, 但生物炭改善土壤状况、促进作物生长方面的正向效应已受到国内外学者的普遍认可^[8-9]。生物炭施入土壤后可增加土壤有机碳库存^[10-11], 提高土壤供氮能力^[12-13], 增加微生物数量及活性^[14], 改善根际土壤环境, 促进作物生长。战秀梅等^[15]通过 4 年连续定位试验, 研究生物炭对棕壤理化性质的影响, 发现土壤有机碳和全氮分别增加了 27.6% 和 75.6%。Uzoma 等^[16]通过研究生物炭对沙质土壤上玉米产量的影响表明, 施入 15 t/hm² 和 20 t/hm² 生物炭时, 产量分别提高 150% 和 98%。

但众多研究表明, 生物炭的过量施用降低土壤微生物量、酶活性^[14], 甚至导致减产^[17]。通过土壤微生物碳氮平衡原理可知^[18], 维持微生物正常活动的碳氮源存在固定比例, 过量施炭有可能打破这种比例进而抑制微生物数量, 本研究以此为切入点, 探究

生物炭配施氮肥后, 土壤碳氮储量、微生物量及酶活性的变化规律, 旨在为改善土壤微生态环境以及春玉米的增产增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究利用内蒙古自治区东部和西部不同的气候环境及土壤条件, 于 2017 年在内蒙古东部 (通辽市开鲁县小街基镇范家窑村) 和西部 (包头市土默特右旗沟门镇北只图村) 进行试验。2 个试验点位置和春玉米生育期 (4—10 月) 内气候情况以及 0—20cm 土壤基本理化性质见表 1 和表 2。

1.2 试验材料

本试验所用生物炭为玉米秸秆在缺氧条件下 300~350℃ 烧制而成, 由沈阳卡力玛生物炭科技开发有限公司生产, 其 pH 为 10.08, 含碳 71.23%、氮 1.51%、磷 (P) 0.78%、钾 (K) 1.68%。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计, 主区设 3 个氮肥水平, 副区设 4 个生物炭水平, 3 次重复, 共 36 个小区, 每小区长 5 m、宽 6 m。生物炭于播前撒于地表, 同底肥 (P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 45 kg/hm²) 一起均匀旋耕入土于耕层 15 cm 左右, 氮肥按 3 : 7 分别于拔节期、大口期追施尿素。本试验供试品种为先玉 335, 种植密度为 75000 株/hm²。包头于 2017 年 4 月 20 日统一

表 1 试验地经纬度和春玉米生育期内的气候条件

Table 1 The geodetic latitude and climatic conditions in spring corn growth period of experimental sites

试验地 Experimental site	生态区 Ecological region	经纬度 Latitude and longitude	日照时数 (h) Solar radiation	平均气温 (°C) Average temperature	降雨量 (mm) Precipitation
包头 Baotou	土默川平原 Tumochuan plain	40°59'N, 110°56'E	1861.3	18.8	389.6
通辽 Tongliao	西辽河平原 Xiliaohe plain	43°86'N, 121°50'E	1815.8	18.5	266.3

表 2 试验地土壤基础肥力

Table 2 Soil basic fertility of the experimental sites

试验地 Experimental site	土壤类型 Soil type	有机碳 Organic carbon (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效氮 Available N (mg/kg)	有效磷 Olsen P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH	容重 Bulk density (g/cm ³)
包头 Baotou	灌淤土 Anthropogenic-alluvial soil	16.83	0.4	59.5	5.2	167.7	7.2	1.5
通辽 Tongliao	草甸土 Meadow soil	18.09	0.4	55.2	12.7	177.5	7.4	1.4

机播，9月30日收获；通辽于2017年4月27日人工点播，10月3日收获。全生育期间灌水4次，每次灌水定额均为750 m³/hm²。其他管理同大田生产。各处理组合生物炭和氮用量见表3。

1.4 样品采集及指标测定方法

1.4.1 样品的采集 于玉米播种前采集0—20 cm土壤样品，于收获时按每个小区0—10 cm、10—20 cm和20—40 cm分层取100 g左右保存于4℃冰箱中，用于土壤微生物量碳、氮的测定，其余50 g土样于阴凉处风干，供土壤有机碳、全氮和土壤酶活性的测定。

1.4.2 测定指标及方法 土壤基本生物化学性质采用鲍士旦《土壤农化分析》中的方法^[19]测试；土壤有机碳采用K₂Cr₂O₇氧化外加热法测定；土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定；微生物量碳、氮用氯仿熏蒸灭菌—K₂SO₄浸提法测定^[20]；脲酶采用靛酚蓝比色法测定；过氧化氢酶和蔗糖酶采用比色法测定^[21]。

用同一土层整个供试土样酶活性的平均值为参比，分别计算各土样酶活性的相对值，然后累加即为各土样的总体酶活参数。

$$\text{总体酶活参数 (Et)} = \sum \text{Xi}/\text{X}$$

式中：Xi为供试样品第i种酶活性实测值；X为同种酶活性平均值^[22]。

于玉米生理成熟期，田间每小区选取无缺苗断垄且长势整齐的两行实收，待果穗风干后考种，逐穗测定穗粒数后全部脱粒，测定百粒重，并计算籽粒理论产量。

1.5 数据处理

采用SPSS 17.0统计软件对数据进行两因素方差分析，LSD法进行多重比较 ($P = 0.05$)，采用Sigma Plot 12.0进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 生物炭配施氮对土壤有机碳、全氮及碳氮比的影响

对2个试验点相同处理的有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 和碳氮比 (C/N) 取均值进行两因素方差分析，由表4可知，生物炭和氮用量对0—10 cm、10—20 cm和20—40 cm土层的有机碳和碳氮比均有极显著影响 ($P < 0.01$)，且二者间交互作用极显著；仅生物炭对0—10 cm和10—20 cm土层全氮有极显著影

表 3 各处理生物炭和氮用量

Table 3 Biochar and nitrogen input in different treatments

处理 Treatment	氮 (kg/hm ²) Nitrogen	生物炭 (t/hm ²) Biochar	处理 Treatment	氮 (kg/hm ²) Nitrogen	生物炭 (t/hm ²) Biochar	处理 Treatment	氮 (kg/hm ²) Nitrogen	生物炭 (t/hm ²) Biochar
N ₀ C ₀	0	0	N ₁₅₀ C ₀	150	0	N ₃₀₀ C ₀	300	0
N ₀ C ₈	0	8	N ₁₅₀ C ₈	150	8	N ₃₀₀ C ₈	300	8
N ₀ C ₁₆	0	16	N ₁₅₀ C ₁₆	150	16	N ₃₀₀ C ₁₆	300	16
N ₀ C ₂₄	0	24	N ₁₅₀ C ₂₄	150	24	N ₃₀₀ C ₂₄	300	24

表 4 生物炭配施氮肥对土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 和碳氮比 (C/N) 的影响

Table 4 Effects of combined application of biochar and nitrogen on soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and carbon/nitrogen (C/N)

地点 Site	处理 Treatment	SOC (g/kg)			TN (g/kg)			C/N		
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
包头 Baotou	N ₀ C ₀	11.55 d	11.34 d	9.27 d	1.16 ab	0.90 b	1.00 a	9.99 c	12.54 a	9.24 d
	N ₀ C ₈	12.75 c	12.08 c	11.05 c	1.07 c	0.96 b	1.01 a	11.92 b	12.58 a	10.89 c
	N ₀ C ₁₆	13.89 b	13.09 b	12.05 b	1.12 bc	1.20 a	1.02 a	12.43 a	10.91 b	11.76 b
	N ₀ C ₂₄	14.47 a	14.07 a	13.84 a	1.20 a	1.25 a	1.02 a	12.11 a	11.29 b	13.55 a
	N ₁₅₀ C ₀	11.64 d	11.87 c	10.44 d	1.00 c	0.92 c	1.11 a	11.61 b	12.87 a	9.40 c
	N ₁₅₀ C ₈	12.72 c	12.93 b	11.19 c	1.08 b	1.10 b	1.04 b	11.73 ab	11.79 b	10.80 b
	N ₁₅₀ C ₁₆	13.93 b	14.81 a	12.06 b	1.14 ab	1.24 a	1.11 a	12.22 a	11.94 b	10.88 b
	N ₁₅₀ C ₂₄	14.87 a	15.40 a	13.74 a	1.21 a	1.28 a	1.07 ab	12.24 a	12.00 b	12.79 a
	N ₃₀₀ C ₀	11.54 c	11.11 c	10.91 c	1.02 c	0.94 d	1.13 a	11.35 b	11.82 a	9.61 b
	N ₃₀₀ C ₈	13.03 b	11.71 bc	11.67 b	1.11 b	1.01 c	1.12 a	11.75 b	11.63 a	10.40 a
	N ₃₀₀ C ₁₆	14.59 a	12.19 b	12.93 a	1.15 b	1.16 b	1.13 a	12.65 a	10.52 b	11.41 a
	N ₃₀₀ C ₂₄	15.13 a	13.87 a	13.01 a	1.22 a	1.29 a	1.16 a	12.41 a	10.75 b	11.23 a
通辽 Tongliao	N ₀ C ₀	11.51 d	11.29 c	10.26 c	1.05 b	1.07 b	1.13 a	10.92 b	10.54 b	9.12 d
	N ₀ C ₈	12.64 c	12.68 b	11.10 b	1.05 b	1.12 b	1.13 a	12.04 a	11.29 a	9.86 c
	N ₀ C ₁₆	13.45 b	13.94 a	12.67 a	1.13 a	1.20 a	1.14 a	11.87 a	11.62 a	11.15 b
	N ₀ C ₂₄	14.68 a	14.49 a	13.27 a	1.19 a	1.25 a	1.12 a	12.31 a	11.58 a	11.85 a
	N ₁₅₀ C ₀	12.02 d	11.71 d	10.59 c	1.06 b	1.08 b	1.14 ab	11.39 b	10.80 c	9.26 c
	N ₁₅₀ C ₈	13.04 c	12.84 c	11.63 b	1.06 b	1.13 b	1.08 b	12.25 a	11.39 b	10.76 ab
	N ₁₅₀ C ₁₆	13.90 b	14.02 b	12.20 ab	1.15 a	1.23 a	1.15 a	12.05 a	11.39 b	10.59 b
	N ₁₅₀ C ₂₄	15.06 a	15.21 a	12.79 a	1.20 a	1.26 a	1.13 ab	12.59 a	12.03 a	11.34 a
	N ₃₀₀ C ₀	12.23 d	11.78 d	10.57 c	1.06 b	1.09 b	1.18 a	11.54 b	10.76 b	8.94 c
	N ₃₀₀ C ₈	13.04 c	13.24 c	11.73 b	1.07 b	1.14 b	1.16 a	12.18 a	11.61 a	10.11 b
	N ₃₀₀ C ₁₆	14.64 b	13.80 b	12.22 b	1.18 a	1.22 a	1.16 a	12.40 a	11.30 a	10.56 ab
	N ₃₀₀ C ₂₄	15.33 a	14.89 a	13.15 a	1.21 a	1.28 a	1.18 a	12.63 a	11.59 a	11.11 a
C	**	**	**	**	**	NS	**	**	**	
N	**	**	**	NS	NS	NS	**	**	**	
C × N	**	**	**	NS	NS	NS	**	**	**	

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层相同施氮量下不同生物炭处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in the column are significantly different at the 0.05 probability level among different biocar treatments of same layer under same nitrogen rate. **— $P < 0.01$; NS—Not significant.

响。2 个试验点 3 个土层土壤有机碳在各施氮水平下, 随生物炭施用量的增加而增加, 包头和通辽 2 个试验点均以 C₂₄ 为最大值, 3 个土层分别较 C₀ 显著增加 25.21%~31.12%、24.03%~29.87% 和 19.33%~49.42% ($P < 0.05$)。2 个试验点 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤全氮在各施氮水平下随生物炭施用量的增加而增加, 包头和通辽 2 个试验点均

以 C₂₄ 为最大值, 分别较 C₀ 处理显著增加 3.39%~21.17% 和 11.36%~39.07%; 20—40 cm 土层, 各施炭水平, 包头施氮处理 (N₁₅₀、N₃₀₀) 较不施氮处理 (N₀) 显著增加 2.16%~13.40%, 通辽各施氮处理间差异不显著。包头的 0—10 cm 和 20—40 cm 土层, 通辽的 3 个土层, 同一施氮水平, 施炭处理 (C₈、C₁₆、C₂₄) 均显著增加了土壤碳氮比; 同一施

生物炭水平下, 各施氮处理间差异不显著。

2.2 生物炭配施氮对土壤微生物量及微生物商的影响

对 2 个试验点相同处理的微生物量碳 (SMBC)、微生物量氮 (SMBN) 和土壤微生物商 (SMQ) 取均值进行两因素方差分析, 由表 5 可知, 生物炭和氮对

0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土层的 SMBC、SMBN 和 SMQ 均有极显著影响 ($P < 0.01$), 且二者间交互作用极显著。2 个试验点 3 个土层 SMBC 在同一施氮水平, 随生物炭施用量的增加呈先增后减的趋势。0—10 cm 和 10—20 cm 土层, 各施氮水平下, 包头施炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 较不施炭处理 (C_0) 显著增加 9.10%~32.78% 和 22.35%~128.82% ($P <$

表 5 生物炭配施氮对土壤微生物量碳 (SMBC)、微生物量氮 (SMBN) 和微生物商 (SMQ) 的影响

Table 5 Effects of combined application of biochar and nitrogen on soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), soil microbial quotient (SMQ)

地点 Site	处理 Treatment	SMBC (mg/kg)			SMBN (mg/kg)			SMQ		
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
包头 Baotou	N_0C_0	89.87 c	117.66 d	103.27 c	31.32 b	23.49 c	21.69 b	8.52 b	10.37 c	11.15 a
	N_0C_8	111.17 a	175.00 a	107.76 bc	37.58 a	33.49 a	22.46 ab	8.72 a	14.49 a	9.75 b
	N_0C_{16}	106.41 ab	167.53 b	125.71 a	25.45 d	27.38 b	22.69 ab	7.66 c	12.80 b	10.43 ab
	N_0C_{24}	102.33 b	143.97 c	112.49 b	28.53 c	27.71 b	23.58 a	7.07 d	10.23 c	8.13 c
	$N_{150}C_0$	113.42 c	142.98 c	109.93 b	42.02 c	30.59 d	19.27 c	9.74 b	12.04 b	10.53 b
	$N_{150}C_8$	150.60 a	193.78 a	170.06 a	55.70 a	61.89 a	43.66 a	11.84 a	14.99 a	15.19 a
	$N_{150}C_{16}$	125.94 b	179.30 b	109.66 b	50.74 b	53.65 b	40.36 b	9.04 c	12.10 b	9.09 c
	$N_{150}C_{24}$	105.09 d	176.50 b	102.67 b	30.72 d	36.87 c	20.44 c	7.07 d	11.46 c	7.47 d
	$N_{300}C_0$	106.57 d	75.81 c	74.86 b	50.73 b	26.02 b	21.83 c	9.24 b	6.82 d	6.86 c
	$N_{300}C_8$	135.98 a	158.09 b	79.40 b	59.08 a	46.27 a	37.87 a	10.44 a	13.50 b	6.80 c
通辽 Tongliao	N_0C_0	120.88 b	173.47 a	118.09 a	40.74 c	49.87 a	29.91 b	8.28 c	14.23 a	9.13 a
	N_0C_8	116.26 c	167.39 a	111.28 a	32.25 d	28.27 b	23.43 c	7.69 d	12.07 c	8.55 b
	N_0C_{16}	64.29 d	96.73 b	55.82 c	14.44 c	27.54 b	11.04 d	5.59 d	8.57 b	5.44 c
	N_0C_{24}	108.78 c	130.19 a	66.55 b	39.82 a	35.48 a	18.51 c	8.61 b	10.27 a	6.00 b
	$N_{150}C_0$	133.10 a	98.37 b	89.95 a	32.25 b	36.09 a	28.44 a	9.90 a	7.06 c	7.10 a
	$N_{150}C_8$	119.64 b	90.91 c	64.39 b	31.32 b	28.90 b	26.48 b	8.15 c	6.27 d	4.85 d
	$N_{150}C_{16}$	101.71 c	117.48 c	69.26 c	37.59 c	39.95 c	18.32 c	8.46 c	10.03 c	6.54 c
	$N_{150}C_{24}$	148.83 a	157.53 a	99.81 a	52.32 a	59.63 a	36.08 a	11.41 a	12.27 a	8.59 a
	$N_{300}C_0$	131.12 b	155.71 a	94.01 a	50.05 a	57.71 ab	34.56 a	9.43 b	11.10 b	7.71 b
	$N_{300}C_8$	130.93 b	122.44 b	83.34 b	43.46 b	54.12 b	27.68 b	8.70 c	8.05 d	6.51 c
	$N_{300}C_{16}$	98.03 c	111.08 b	77.09 b	27.32 c	22.55 c	17.02 d	8.02 c	9.43 b	7.29 a
	$N_{300}C_{24}$	128.82 a	144.19 a	79.64 ab	66.00 a	36.19 a	33.45 b	9.88 a	10.89 a	6.79 b
	C	132.01 a	114.61 b	84.81 a	42.10 b	38.95 a	37.04 a	9.02 b	8.31 c	6.94 ab
	N	117.67 b	112.87 b	80.98 ab	40.42 b	29.11 b	20.69 c	7.68 d	7.58 d	6.16 c
	C × N	**	**	**	**	**	**	**	**	**

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层同一施氮量下不同生物炭处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in the column are significantly different at the 0.05 probability level among different biocar treatments of same layer under same nitrogen fertilizer rate. **— $P < 0.01$.

0.05), 通辽仅 C_8 处理较 C_0 处理显著增加了 20.04%~107.03% 和 1.61%~34.59%; 各施炭水平下, 仅 N_{150} 处理较 N_0 处理显著增加 2.70%~58.20% 和 7.03%~58.29%。2 个试验点 3 个土层 SMBN 在同一施氮水平, 随生物炭量增加呈先增后减趋势, 施炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 均显著大于不施炭处理 (C_0)。0—10 cm 和 10—20 cm 土层, 仅 C_8 在各施氮水平较 C_0 显著增加 20.00%~175.70% 和 28.84%~102.34%; 各施炭水平, N_{150} 处理和 N_{300} 处理较 N_0 处理显著增加 2.70%~58.20% 和 7.03%~58.29%。SMQ 是指 SMBC 与 SOC 的比值, 用来表征土壤碳库的活性特征。2 个试验点 0—10 cm 和 10—20 cm 的 SMQ 在各施氮水平, 仅 C_8 处理较 C_0 处理显著增加了 12.98%~54.08% 和 15.52%~97.93%; 各施炭水平, 仅 N_{150} 处理较 N_0 处理显著增加了 6.75%~51.39% 和 3.43%~57.33%。

各炭氮处理组合的 SMBC 和 SMQ, 包头 10—20 cm 土层显著大于 20—40 cm 土层, 通辽 0—10 cm 和 10—20 cm 土层显著大于 20—40 cm 土层; 各炭氮处理组合的 SMBN, 2 个试点 0—10 cm 和 10—20 cm 土层均显著大于 20—40 cm。

2.3 生物炭配施氮对土壤酶活性的影响

对 2 个试验点相同处理的蔗糖酶 (Su)、脲酶 (Ur) 和过氧化氢酶 (Cat) 取均值进行两因素方差分析, 由表 6 可知, 生物炭和氮肥对 0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土层的三种酶活性均有极显著影响 ($P < 0.01$), 且二者交互影响极显著。

2 个试验点 3 个土层蔗糖酶活性在各施氮水平下, 随着施炭量的增加呈先增后减的趋势, C_8 和 C_{16} 处理均显著大于 C_0 处理 ($P < 0.05$); 各施炭水平, N_{150} 和 N_{300} 处理均显著大于 N_0 处理, 2 个施氮量间差异不显著。包头 3 个土层分别以 $N_{150}C_{16}$ 、 $N_{150}C_{24}$ 、 $N_{150}C_8$ 配施为最大值, 通辽 3 个土层均以 $N_{150}C_8$ 为最大值, 较不施肥处理 (N_0C_0) 分别增加 76.19%、77.90%、30.21% 和 75.06%、45.62%、164.79%。

2 个试验点 0—10 cm 和 10—20 cm 土层脲酶活性在各施氮水平, 随着施炭量的增加呈先增后减的趋势, 施加生物炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 的脲酶活性较不施炭处理 (C_0) 显著增加 3.10%~118.78% 和 9.43%~141.58%; 各施炭水平, 随着施氮量的增加呈先增后减趋势, 均以 N_{150} 为最大值, 较 N_0 显著增加 8.06%~104.13% 和 4.08%~67.11%。20—40 cm 土层, 仅通辽在 C_8 和 C_{16} 处理, 施氮处理 (N_{150} 和 N_{300}) 显著大于不施氮 (N_0)。2 个试验点 0—20 cm (将 0—10 cm 和 10—20 cm 取均值) 和 20—40 cm 土层, 各炭氮配施

处理均以 $N_{150}C_8$ 土壤脲酶活性为最大值, 包头较不施肥 (N_0C_0) 显著增加 188.14%、117.31%, 通辽显著增加 80.44%、153.45%。

2 个试验点 0—10 cm 土层过氧化氢酶活性在施加生物炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 时, 施氮处理 (N_{150} 和 N_{300}) 较不施氮处理 (N_0) 显著增加 24.07%~141.67%。10—20 cm 和 20—40 cm 土层在各施氮水平, 随着生物炭用量的增加呈先增后减趋势, 均以 C_8 处理为最大值, C_8 较 C_0 处理显著增加 52.53%~145.31% 和 9.33%~51.80%; 各施炭水平, 包头 N_{150} 和 N_{300} 处理均小于 N_0 处理。

土壤总体酶活参数 (Et) 用来表征供试土壤中土壤总体酶活性的大小, 通过将实测值转化为相对值, 综合评价了不同量纲酶活性的总体变化规律^[23]。由图 1 可知, 2 个试验点 0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤总体酶活参数在同一施氮水平, 随生物炭量的增加呈先增后减趋势, 施加生物炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 较不施炭处理 (C_0) ($P < 0.05$) 显著增加 5.80%~94.30%、2.69%~59.91% 和 6.11%~64.33%。0—10 cm 和 10—20 cm 土层, 包头的各施炭水平, N_{150} 较 N_0 显著增加 28.28%~84.53% 和 19.36%~29.27%; 通辽仅在 C_8 水平, N_{150} 较 N_0 处理显著增加 85.46% 和 38.68%; 20—40 cm 土层随炭氮用量变化不一致。

2.4 土壤碳氮与生物学性质的相关分析

由表 7 可知, SOC 与 TN、C/N、SMBC、SMBN、Su、Ur 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); C/N 与 SMBC、SMBN、Su、Ur 呈极显著正相关; SMBC 与 SMBN、SMQ、Su、Ur、Et 极显著正相关; SMBN 与 SMQ、Su、Ur、Cat、Et 极显著正相关; SMQ 与 Su、Ur、Et 极显著正相关; Su 与 Ur 极显著正相关, 与 Et 显著正相关 ($P < 0.05$); Ur 与 Et 极显著正相关, 与 Cat 显著正相关; Cat 与 Et 极显著正相关。

2.5 生物炭配施氮肥对春玉米产量的影响以及产量与土壤生物化学性质的相关分析

由表 8 可知, 生物炭配施氮肥可显著增加春玉米穗粒数、百粒重及产量 ($P < 0.05$), 且两者的交互作用达到显著水平。2 个试验点穗粒数在各施氮水平, 施炭处理 (C_8 、 C_{16} 、 C_{24}) 较不施炭处理 (C_0) 显著增加 1.01%~5.17%; 在各施炭水平, 施氮处理 (N_{150} 、 N_{300}) 较不施氮处理 (N_0) 显著增加 7.15%~12.64%, 但两个施氮水平间差异不显著。包头百粒重在各施

表 6 生物炭配施氮对土壤酶活性的影响

Table 6 Effects of combined application of biochar and nitrogen on soil enzyme activities

地点 Site	处理 Treatment	Su [mg/ (g·d)]			Ur [mg/ (g·d)]			Cat [mg/ (g·d)]		
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
包头 Baotou	N ₀ C ₀	23.06 c	21.00 c	9.93 b	1.21 c	1.15 c	0.52 c	1.12 a	1.27 b	1.39 b
	N ₀ C ₈	26.90 b	25.24 b	11.42 ab	2.35 a	1.63 a	0.91 b	1.04 b	1.99 a	2.11 a
	N ₀ C ₁₆	28.11 ab	26.84 ab	11.83 a	2.38 a	1.50 b	0.92 b	1.08 ab	1.83 a	2.06 a
	N ₀ C ₂₄	30.30 a	27.83 a	11.13 ab	1.90 b	1.43 b	1.19 a	1.02 b	1.31 b	2.02 a
	N ₁₅₀ C ₀	30.38 c	31.13 b	10.59 b	2.47 c	1.01 c	0.65 c	1.09 d	1.18 b	1.01 d
	N ₁₅₀ C ₈	39.59 a	36.18 a	12.93 a	4.61 a	2.19 b	1.13 a	1.73 b	1.97 a	1.31 c
	N ₁₅₀ C ₁₆	40.63 a	37.36 a	12.51 a	4.18 b	2.44 a	1.12 a	2.61 a	1.34 c	1.97 a
	N ₁₅₀ C ₂₄	35.02 b	37.48 a	12.18 a	2.49 c	2.35 a	0.73 b	1.45 c	1.16 d	1.46 b
	N ₃₀₀ C ₀	31.45 b	29.46 c	10.76 c	1.81 c	1.06 b	0.74 b	1.67 b	0.64 c	1.38 b
	N ₃₀₀ C ₈	38.21 a	35.14 a	12.87 a	3.96 a	1.18 a	1.01 a	1.29 c	1.57 a	2.05 a
	N ₃₀₀ C ₁₆	38.21 a	35.33 a	11.85 b	3.09 b	1.20 a	1.04 a	2.07 a	1.26 b	1.29 c
	N ₃₀₀ C ₂₄	37.93 a	32.82 b	11.72 c	1.46 d	1.16 a	1.03 a	1.62 b	1.57 a	1.00 d
通辽 Tongliao	N ₀ C ₀	29.55 c	26.74 c	12.27 c	1.24 c	1.47 a	0.58 c	1.32 b	1.00 c	1.39 c
	N ₀ C ₈	32.84 b	31.00 b	21.64 ab	1.33 c	1.49 a	0.71 b	1.30 b	1.90 a	2.02 b
	N ₀ C ₁₆	34.97 b	34.70 a	20.99 b	1.88 a	1.29 b	0.75 b	1.54 a	1.66 b	2.64 a
	N ₀ C ₂₄	41.16 a	31.44 b	22.49 a	1.68 b	1.22 b	0.91 a	1.23 b	1.57 b	0.80 d
	N ₁₅₀ C ₀	38.43 b	29.44 d	17.92 c	1.34 c	1.53 c	0.66 d	1.15 d	1.58 b	1.93 b
	N ₁₅₀ C ₈	51.73 a	38.94 a	32.49 a	2.40 a	2.49 a	1.47 a	2.93 b	2.41 a	2.11 a
	N ₁₅₀ C ₁₆	50.14 a	35.28 b	23.40 b	2.41 a	1.69 b	1.06 b	3.64 a	1.26 c	2.00 ab
	N ₁₅₀ C ₂₄	39.21 b	32.23 c	22.96 b	1.59 b	1.57 bc	0.71 c	1.95 c	0.75 d	1.54 c
	N ₃₀₀ C ₀	24.46 c	28.88 b	21.17 b	1.29 b	1.04 b	0.56 b	1.23 c	1.02 b	1.50 c
	N ₃₀₀ C ₈	37.69 b	31.10 a	26.00 a	1.54 a	1.67 a	1.05 a	2.01 a	1.78 a	1.81 b
	N ₃₀₀ C ₁₆	42.35 a	32.13 a	25.90 a	1.33 b	1.50 a	1.07 a	2.01 ab	1.70 a	2.25 a
	N ₃₀₀ C ₂₄	36.65 b	27.56 b	25.54 a	1.50 a	1.47 a	1.06 a	1.92 b	1.68 a	1.91 b
C	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
N	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
C × N	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层同一施氮量下不同生物炭处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in the column are significantly different at the 0.05 probability level among different biochar treatments of same layer under same nitrogen fertilizer rate. **— $P < 0.01$.

氮水平, 施炭处理较不施炭处理显著增加 1.60%~5.52%, 通辽仅在 N₁₅₀, 施炭处理显著大于不施炭处理。2 个试验点产量均以 N₁₅₀C₈ 为最大值, 包头和通辽分别较不施肥处理 (N₀C₀) 显著增加 26.06% 和 22.48%, 较单独施氮处理 (N₁₅₀C₀) 显著增加 20.07% 和 15.59%。同一施氮水平, 产量随生物炭用量的增加先增后减, 以 C₈ 处理为最大值, 3 个氮水平 (N₀、N₁₅₀、N₃₀₀), 包头和通辽分别较 C₀ 处理增加

4.99%、10.31%、4.99% 和 5.96%、7.83%、2.79%; 同一施炭水平, 施氮处理 (N₁₅₀、N₃₀₀) 产量均显著大于不施氮 (N₀), 且均以 N₁₅₀ 处理为最大值, 包头和通辽分别较 N₀ 处理显著增加 14.28%~20.86% 和 13.58%~15.59%。

由表 9 可知, 产量与 0—10 cm 土层的 SMBC、SMBN、Su、Cat、Et 极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 SMQ、Ur 显著相关 ($P < 0.05$); 产量与 10—20 cm

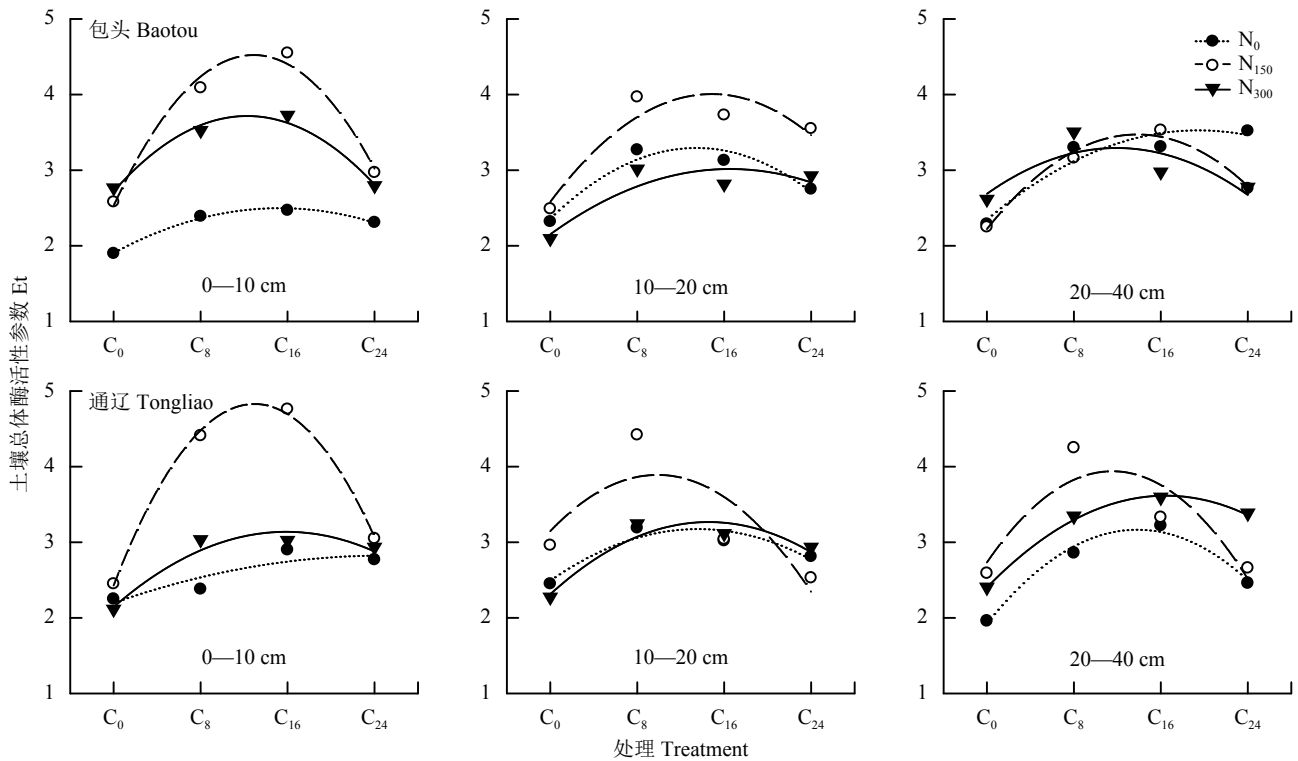


图 1 生物炭配施氮肥对春玉米土壤总体酶活性参数 (Et) 的影响

Fig. 1 Effects of combined application of biochar and nitrogen on total enzyme activity index (Et)

表 7 土壤碳氮与生物学性质的相关分析

Table 7 Correlation analysis of soil carbon, nitrogen and biological property

项目 Item	SOC	TN	C/N	SMBC	SMBN	SMQ	Su	Ur	Cat	Et
SOC	1									
TN	0.700**	1								
C/N	0.763**	0.074	1							
SMBC	0.498**	0.237	0.478**	1						
SMBN	0.466**	0.141	0.515**	0.701**	1					
SMQ	0.038	-0.124	0.161	0.883**	0.547**	1				
Su	0.631**	0.245	0.655**	0.702**	0.827**	0.472**	1			
Ur	0.494**	0.102	0.592**	0.621**	0.891**	0.443**	0.886**	1		
Cat	0.089	0.04	0.087	0.231	0.479**	0.219	0.193	0.369*	1	
Et	0.311	0.16	0.287	0.565**	0.730**	0.475**	0.417*	0.598**	0.820**	1

注 (Note) : *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

土层的 SMBN、Su 极显著正相关, 与 SMBC、Ur 显著相关; 产量与 20—40 cm 土层的 Su 极显著正相关, 与 SMBN 显著相关。

3 讨论

3.1 生物炭配施氮肥对土壤碳、氮的影响

生物炭和氮肥均可显著增加 SOC 含量, 其中生

物炭起主导作用。生物炭一般含有 60% 以上的碳元素^[2], 且具有稳定的芳香烃结构, 施入土壤后成为土壤中最难分解的 SOC^[23], 在短期内不会发生明显的化学变化, 起到碳封存的作用^[24-26]。生物炭显著增加 TN 含量主要因为多孔结构和较大的比表面积使其具备了极强的吸附力^[27], 可吸附大量的铵离子, 降低氮素损失, 进而提高土壤全氮含量^[15]。高德才等^[28]通过

表 8 生物炭配施氮肥对包头和通辽春玉米产量及构成因素的影响

Table 8 Effects of combined application of biochar and nitrogen on grain yield and component factor of Baotou and Tongliao

地点 Site	处理 Treatment	亩穗数 (穗/hm ²) Ears number per hectare	穗粒数 (粒/穗) Grains per spike	百粒重 (g) 100-seed weight	产量 (t/hm ²) Yield
包头 Baotou	N ₀ C ₀	74250.34	565.20 bc	34.51 b	12.31 c
	N ₀ C ₈	73875.36	579.33 a	35.52 a	12.92 a
	N ₀ C ₁₆	73778.10	570.90 b	35.64 a	12.76 ab
	N ₀ C ₂₄	74667.00	562.27 c	35.20 a	12.56 bc
	N ₁₅₀ C ₀	73444.79	613.67 c	36.70 c	14.06 c
	N ₁₅₀ C ₈	74861.45	642.33 a	37.94 b	15.51 a
	N ₁₅₀ C ₁₆	74305.93	625.87 b	38.72 a	15.31 ab
	N ₁₅₀ C ₂₄	74097.57	625.40 b	38.55 a	15.18 b
	N ₃₀₀ C ₀	73972.55	612.07 bc	36.79 c	14.16 b
	N ₃₀₀ C ₈	73569.78	625.40 a	38.01 a	14.86 a
	N ₃₀₀ C ₁₆	74105.90	619.20 ab	38.02 a	14.83 a
	N ₃₀₀ C ₂₄	75417.03	611.33 c	37.38 b	14.65 a
通辽 Tongliao	N ₀ C ₀	75411.52	588.20 c	35.57 a	13.41 b
	N ₀ C ₈	75555.96	618.60 a	35.76 a	14.21 a
	N ₀ C ₁₆	74611.49	617.67 ab	35.86 a	14.05 ab
	N ₀ C ₂₄	75167.08	610.07 b	35.76 a	13.94 ab
	N ₁₅₀ C ₀	75667.00	662.47 b	35.77 c	15.24 c
	N ₁₅₀ C ₈	75983.65	683.93 a	37.19 a	16.43 a
	N ₁₅₀ C ₁₆	76500.40	681.40 a	36.08 b	15.99 b
	N ₁₅₀ C ₂₄	74911.52	687.20 a	36.36 b	15.91 b
	N ₃₀₀ C ₀	75222.61	654.93 b	35.95 a	15.05 a
	N ₃₀₀ C ₈	74555.91	673.33 a	36.23 a	15.46 a
	N ₃₀₀ C ₁₆	74722.61	671.47 a	36.04 a	15.37 a
	N ₃₀₀ C ₂₄	75367.08	653.67 b	36.04 a	15.09 a
	C	NS	**	**	**
	N	NS	**	**	**
	C × N	NS	**	**	*

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一施氮量下不同生物炭处理间差异达 0.05 显著水平 Values within a column followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level among different biocar treatments under same nitrogen fertilizer rate. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—Not significant.

大田试验表明, 生物炭配施氮肥较单独施氮显著降低了各种形式的氮素径流流失, 并且通过土柱试验^[29]证明, 生物炭可推迟 NO₃⁻ 和总氮淋失达到高峰的时间, 起到缓释氮肥的作用, 这对提高氮肥利用效率具有重要意义。本试验中, 在 0—10 cm 和 10—20 cm 施炭土层, 生物炭显著增加了 C/N, 是由于生物炭性质稳定一般不发生垂直方向的迁移, 施入后直接

提高了 0—20 cm 土层 SOC 含量, 而生物炭对氮素的吸附作用小于对 SOC 的直接补充, 对全氮提升幅度小于 SOC 导致 C/N 的增加。

3.2 生物炭配施氮肥对土壤生物学性质的影响

生物炭和氮肥在增加土壤碳氮储量的同时, 也提供了微生物生存和繁殖所需的碳氮养分来源, 但碳氮源单一过量会使微生物的碳氮比例失衡, 因一

表 9 各层土壤有机碳、全氮、微生物生物量、酶活性与产量的相关分析

Table 9 Correlation analysis of soil organic carbon, total nitrogen, microbial biomass, enzyme activity and yield of different soil layers

项目 Item	SOC	TN	C/N	SMBC	SMBN	SMQ	Su	Ur	Cat	Et
产量与 0—10cm 土层 Yield and 0—10cm soil layer	0.286	0.045	0.513	0.737**	0.883**	0.611*	0.796**	0.691*	0.746**	0.784**
产量与 10—20cm 土层 Yield and 10—20cm soil layer	0.326	0.272	0.146	0.647*	0.783**	0.497	0.877**	0.604*	0.061	0.537
产量与 20—40cm 土层 Yield and 20—40cm soil layer	0.299	0.458	0.668	0.421	0.718*	0.293	0.731**	0.512	-0.003	0.486

注 (Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

方的缺失而不能满足微生物正常活动, 抑制了微生物的数量和活性。研究表明^[18], 维持微生物正常活动需要消耗 20~25 份碳和 1 份氮, 当碳源过剩而氮源相对不足, 土壤固有的碳氮比例失衡时, 微生物只能根据氮的数量来形成细胞物质, 微生物数量达不到最高值, 有机质的分解也受到影响, 如果此时向土壤加入无机氮以补充氮的不足, 则微生物数量可有所增加。在本研究中, 单独施加生物炭可显著提高 SMBC 和 SMBN。这是由于生物炭较大的表面积和极强的吸附力能够保存更多可供微生物利用的能量物质^[30-31]; 生物炭的多孔结构为微生物提供了物理保护^[32]。但生物炭过量时 C/N 比过大, SMBC 和 SMBN 有所下降 (图 2), 这是由于碳源过量打破了微生物碳氮平衡。根据本试验结果, 在配施 150 kg/hm² 氮肥后, SMBC 和 SMBN 均显著大于单独施炭, 说明补充的氮源重新满足了微生物活动所需的碳氮比例, 同时碳氮源数量的增多显著提高了微生物数量。另外, 施用 16 t/hm² 和 24 t/hm² 生物炭降低了 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SMQ, 是因为生物炭可以直接提高 SOC, 而 SMBC 是 SOC 中可以被微生物利用的少数活性有机碳, 当 SMBC 增幅小于

SOC 增幅时, 它们的比值 SMQ 开始下降。

土壤酶是微生物的主要产物, 也是土壤微生态环境的重要组成部分, 其活性能够反映土壤中各种生物化学过程的强度和方向, 被认为是可以表征土壤肥力的重要指标。当前, 生物炭和氮肥对于土壤酶活性的研究主要集中在与土壤碳、氮循环以及微生物活性有关的几种酶上。Su 参与 SOC 循环, 且能够促进糖类的水解; Ur 催化尿素水解成氨, 可表征土壤的供氮强度; Cat 通过酶促反应水解过氧化氢, 一定程度上可以反映土壤生物氧化过程的强弱以及土壤腐质化强度。陈心想等^[33]研究指出, 生物炭可显著提高小麦-玉米轮作两季作物土壤 Ur 和 Cat 活性, 但对 Su 影响不显著。顾美英等^[34]通过生物炭对新疆沙土土壤酶活性的研究表明, 添加 67.5~112.5 t/hm² 生物炭能够显著提高沙土土壤 Su 和 Cat 活性, 但对 Ur 影响不明显。也有研究表明, 玉米秸秆生物炭对提高 Ur 活性影响显著^[35]。前人研究结果不尽相同, 这主要由于生物炭对土壤酶活性的影响受其制备过程、土壤类型以及生物活性因子等众多因素共同决定。

本研究结果表明, 2 个试验点施加生物炭和氮肥均可显著提高土壤 Su、Ur 活性以及 Et。这是由于生

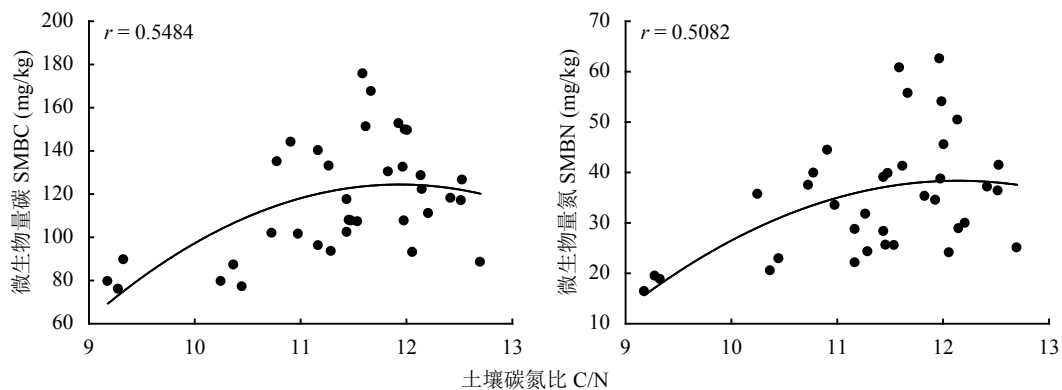


图 2 微生物量碳、微生物量氮与土壤碳氮比的关系

Fig. 2 Relationship between soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and carbon/nitrogen

物炭显著增加了土壤的活性有机碳含量^[36-37], 碳源的增加加快了微生物的繁殖, 加速了有机质分解, 进而为土壤酶提供了更多底物; 施加氮肥使 Ur 水解的氮源增加进一步提高了 Ur 活性。炭氮配施提高了 0—10 cm 土层 Cat 活性是由于表层土壤是微生物最活跃的地方, Cat 是表征生物活性的关键酶, 微生物活动增加影响了 Cat 活性。炭氮配施较单独施炭或氮对土壤酶活性的提升更明显, 这是由于碳氮源的增加促进了微生物数量和活性, 且合理的炭氮配施使土壤碳氮比满足了微生物生长和繁殖的需求, 从而提高了作为微生物产物的土壤酶活性。另外, 本研究中 Su 和 Ur 活性随着土层的加深逐渐减少是因为本试验生物炭主要存在于 0—20 cm 土层, 且一般不发生垂直方向的移动, 而 20—40 cm 土层土壤养分较少, 水分和较大的容重也不利于微生物的生长, 最终导致土壤酶活性下降。近年来的研究主要集中在单独施炭对土壤酶活性的影响, 而炭氮配施的研究鲜有报道, 本试验中, 生物炭在配施氮肥后, Su、Ur 活性以及 Et 均大于单独施炭处理, 这说明过量施炭而氮源不足打破了微生物的碳氮平衡, 当配施氮肥补充了土壤氮素, 重新达到平衡, 微生物数量显著增加, 土壤酶活性也随之增加。通过对土壤碳氮与微生物量和酶活性的相关分析发现, 由于生物炭配施氮肥直接提高了 SOC 和 TN 含量, 进而影响了土壤 C/N, C/N 与多数土壤生物化学性质极显著正相关, 说明生物炭配施氮肥通过直接影响土壤 C/N, 从而间接增加了土壤微生物量及酶活性, 这与上述结论基本一致。

3.3 生物炭配施氮肥对春玉米产量的影响

当前研究普遍认为, 生物炭配施氮肥对作物产量表现为正效应, 适量生物炭配施氮肥可提高作物产量, 但其最佳施用量因生物炭的制备过程以及试验土壤性质不同而有所差异^[38-40]。本研究表明, 生物炭和氮肥均能够显著提高春玉米穗粒数、百粒重及产量, 但 N₁₅₀ 和 N₃₀₀ 间差异不显著。春玉米产量随生物炭和氮肥施用量的增加呈先升高后降低的趋势, 2 个试验点均以 8 t/hm² 生物炭配施 150 kg/hm² 氮对产量提升最为明显, 高量施炭会导致减产是因为生物炭含碳量高, 施入后土壤中的 C/N 过高, 降低了土壤氮素的有效性, 进而导致了作物减产^[41]; 另外, 生物炭过多会导致 SOC 增加, 微生物活性增加与作物根系竞争土壤氮^[42]。通过产量与各土层的相关分析表明, 产量与 0—10 cm 和 10—20 cm 施炭土层的多数生物性质极显著正相关, 说明, 生物炭配施

氮肥主要通过提高 0—20 cm 土层微生物量及酶活性而影响春玉米产量。另有研究表明, 生物炭对作物产量的提升随时间的延长有一定的累加效果, Major 等^[43]通过生物炭施加对玉米大豆轮作的多年试验发现, 20 t/hm² 生物炭在第 1 年对产量影响并不显著, 但在第 2~4 年产量逐年提升, 在第 4 年提升了 140%, 本研究为一年两点试验, 仅考虑了地域差异, 而对于生物炭配施氮肥是否具有累加效应有待进一步研究。

4 结论

生物炭和氮肥配施可显著提高土壤碳氮储量, 进而改变土壤碳氮比; 生物炭配施氮肥可显著增加土壤微生物量、微生物商、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性以及土壤总体酶活, 但炭或氮过量会使微生物数量及土壤酶活性降低; 炭氮配施可显著增加春玉米穗粒数、百粒重及产量, 以 8 t/hm² 生物炭配施 150 kg/hm² 氮肥增产效果最明显。生物炭和氮肥合理配施是提升土壤肥力、增加春玉米产量的关键。

参 考 文 献:

- [1] Jr M J A, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [2] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [3] Braida W J, Pignatello J J, Lu Y, *et al.* Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(2): 409-417.
- [4] Kleiner K. The bright prospect of biochar[J]. *Nature Reports: Climate Change*, 2009, 3(6): 72-74.
- [5] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, *et al.* Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174: 105-112.
- [6] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1352-1360.
Zhang A P, Liu R L, Gao Q, *et al.* Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1352-1360.
- [7] Zwieter L V, Kimber S, Morris S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant & Soil*, 2010, 327(1-2): 235-246.
- [8] Robertso F A, Thorburn P J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2006, 45(1): 13-23.

- [9] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral: fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central amazonian upland soil[J]. *Plant & Soil*, 2007, 291: 275–290.
- [10] 宋大利, 刁向银, 黄绍敏, 等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 369–379.
- Song D L, Xi X Y, Huang S M, *et al.* Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 369–379.
- [11] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—A review[J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395–419.
- [12] 高德才, 刘强, 张玉平, 等. 添加生物黑炭对玉米产量、品质、肥料利用率及氮磷径流损失的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (5): 72–76.
- Gao D C, Liu Q, Zhang Y P, *et al.* Effects of adding biochar on yield, quality, fertilizer utilization of summer maize and nitrogen and phosphorus runoff losses from field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (5): 72–76.
- [13] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤CO₂、CH₄、N₂O排放及其环境效益的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3615–3624.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3615–3624.
- [14] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1173–1181.
- [15] 战秀梅, 彭靖, 王月, 等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1633–1641.
- Zhan X M, Peng J, Wang Y, *et al.* Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physiochemical properties and peanut yields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1633–1641.
- [16] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, *et al.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use & Management*, 2011, 27(2): 205–212.
- [17] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对土壤酶活性和糜子产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(2): 146–158.
- Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil enzyme activities and millet yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 146–158.
- [18] 黄巧云, 林启美, 徐建明. 土壤生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- Huang Q Y, Lin Q M, Xu J M. *Soil biochemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [20] 吴金水, 林启美. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- Wu J X, Lin Q M. *Determination of soil microbial biomass and its application*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- Guan S Y. *Soil enzymes and their research methods*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1987.
- [22] 何文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1232–1236.
- He W X, Tan X P, Wang X D, *et al.* Preliminary study on the soil total enzyme activity index[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1232–1236.
- [23] Poirier N, Derenne S, Rouzau J N, *et al.* Chemical structure and sources of macromolecular, resistant, organic fraction isolated from a forest soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 813–827.
- [24] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34: 349–355.
- Zhang X D, Liang C, Zhuge Y P, *et al.* The role of black carbon in soil organic carbon biogeochemical cycle[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34: 349–355.
- [25] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, Bol R. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research [R]. CSIRO Land and Water Science Report, 2009: 1–56.
- [26] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–794.
- [27] Lehmann J, Silva J P D, 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 & Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [28] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 不同施肥模式对旱地土壤氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 209–213.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Effects of different fertilization modes on soil nitrogen runoff in dryland field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 209–213.
- [29] 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.
- [30] Downie A, Crosky A, Munroe P. *Physical properties of biochar*[M]. London: Earthscan, 2009.
- [31] 刘小虎, 赖鸿雁, 韩晓日, 等. 炭基缓释花生专用肥对花生产量和土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 698–702.
- Liu X H, Lai H Y, Han X R, *et al.* Effects of charcoal-based slow release peanut specific fertilizer application on peanut yield and soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 698–702.
- [32] Ogawa M. Symbiosis of people and nature in the tropics[J]. *Farming in Japan*, 1994, 128: 10–34.
- [33] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后塬土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 751–758.
- Chen X X, Geng Z C, Wang S, *et al.* Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 751–758.
- [34] 顾美英, 葛春辉, 马海刚, 等. 生物炭对新疆沙土微生物区系及土壤

- 酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 225–230.
- Gu M Y, Ge C H, Ma H G, *et al.* Effects of biochar application amount on microbial flora and soil enzyme activities in sandy soil of Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 225–230.
- [35] 郭俊姆, 姜慧敏, 张建峰, 等. 玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 33(4): 751–758.
- Guo J M, Jiang H M, Zhang J F, *et al.* Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 33(4): 751–758.
- [36] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509–517.
- Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 509–517.
- [37] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202–214.
- [38] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 468–475.
- Yuan J J, Tong Y A, Lu S H, *et al.* Effects of biochar and nitrogen fertilizer application on soil fertility and jujube yield and quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 468–475.
- [39] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15–21.
- [40] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [41] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendment on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 443–449.
- [42] Yao F X, Arbestain M C, Virgel S, *et al.* Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified Soxhlet reactor[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(7): 724–732.
- [43] Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant & Soil*, 2010, 333(1–2): 117–128.