

氮肥配施生物炭对土壤性状及春玉米根系特性的影响

孙 晨¹, 胡树平², 孙继颖¹, 高聚林¹, 刘 剑², 柏素花³, 邬 永⁴,
张悦忠⁵, 于晓芳¹, 王志刚¹, 杨绣娟¹, 纪 楠¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古 土默特右旗 014109; 3. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109; 4. 内蒙古王爱召农业观光有限公司, 内蒙古 达拉特旗, 014300; 5. 内蒙古扎赉特旗农牧和科技事业发展中心, 内蒙古 扎赉特旗, 137600)

摘 要: 为探究生物炭在土壤氮素分布以及对根系氮素吸收利用与产量形成中所产生的影响, 开展两年(2019–2020)定点试验。试验以先玉335为供试材料, 采用裂区试验设计, 以氮肥为主区, 300 kg/hm²(N300)、150 kg/hm²(N150)、不施氮肥(N0); 以生物炭为副区, 不施生物炭(C0)、8 t/hm²(C8)、16 t/hm²(C16)、24 t/hm²(C24)。结果表明, 在0~15 cm土层内, C8N0、C16N0、C24N0处理组合的有机碳在2019年和2020年较C0N0处理组合分别增加16.27%~31.52%和7.27%~35.57%。在2019年和2020年, C8N150、C16N150、C24N150处理组合较C0N150处理组合的根长分别提升11.22%~51.18%和6.32%~46.17%, 产量分别提升10.70%~23.55%和4.77%~22.68%。综上, 生物炭施炭量在24 t/hm²时, 施氮肥150 kg/hm²对土壤有机质积累分布和根系的发育状况达到最佳状态。

关键词: 春玉米; 生物炭; 氮肥; 土壤性状; 根系; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Nitrogen Fertilizer Combined with Bio-char on Soil Properties and Root Characteristics of Spring Maize

SUN Chen¹, HU Shu-ping², SUN Ji-ying¹, GAO Ju-lin¹, LIU Jian², BAI Su-hua³, WU Yong⁴,
ZHANG Yue-zhong⁵, YU Xiao-fang¹, WANG Zhi-gang¹, YANG Xiu-juan¹, JI Nan¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 2. Vocational and Technical College of Inner Mongolia Agricultural University, Tumote Right Banner 014109; 3. Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109; 4. Wangaizhao Agriculture Tour Company Co., Ltd., Dalate 014300; 5. Agriculture, Animal Husbandry and Science-Technology Development Center of Zhalaite, Zhalaite 137600, China)

Abstract: The field experiments were carried out to study the effects of biochar on soil nitrogen distribution, root nitrogen absorption and utilization, and yield formation with the maize Xianyu335 in two years(2019–2020). A split-plot system in three replications was established to conduct the field trials. Three nitrogen fertilization levels (0, 150, 300 kg/ha) were in the main plots, and four bio-char levels(0, 8, 16, 24 t/ha) were in the sub-plots. The results indicated that compared with C0N0, under the treatment of C8N0, C16N0 and C24N0, the soil organic matter within soil layer of 0–15 cm increased by 16.27%–31.52% in 2019, and 7.27%–35.57% in 2020. Compared with C0N150, under the treatment of C8N150, C16N150 and C24N150, the total root length increased by 11.22%–51.18% in 2019, and 6.32%–46.17% in 2020; and total maize production increased by 10.70%–23.55% in 2019, and 4.77%–22.68% in 2020. In summary, at a bio-char application rate of 24t/ha, N150 achieved the optimal state of soil organic matter accumulation and distribution, as well as root development.

Key words: Spring maize; Bio-char; Nitrogen fertilizer; Soil property; Root; Yield

录用日期: 2023-05-24

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化专项(2020CG0030)、呼和浩特市科技计划项目(2020-农-1)、内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0003)、内蒙古自治区高端外国专家引进项目(美国耐密宜机收玉米品种引进及配套栽培技术研究)、内蒙古草原英才个人项目、国家重点研发计划课题(2017YFD0300802)、农业部华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站(25204120)、财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-02-63)、内蒙古自治区作物栽培与遗传改良重点实验室项目

作者简介: 孙 晨(1996–), 硕士, 主要从事玉米生理生态研究。E-mail: m15894907374@163.com

胡树平和孙继颖为本文通信作者。E-mail: bthsp88@163.com E-mail: nmsunjiying@163.com

玉米作为内蒙古地区的主粮作物之一,在食用、饲用以及工业生产中占据重要地位^[1]。但由于多年连作造成耕层土壤容重增加,团聚体解体,有机质流失严重,土壤蓄肥能力减弱^[2~5]。土壤结构劣化造成了玉米根系下扎和扩展阻力增大^[6],承载力降低导致了肥料流失严重^[7]。生物炭具有孔隙结构丰富、比容重低以及吸附能力强^[8]的特点,在降低土壤容重和紧实度^[9]、提高土壤中稳定大团聚体数量^[10,11]方面具有独特的优势,土壤结构的改善促进了玉米根系的发育^[12],扩大了根系营养吸收空间,产量以及子粒质量得以改善^[13]。氮素参与玉米体内多项生理代谢以及细胞构建和物质合成活动,在玉米生长发育过程中占据不可替代的地位^[14]。但由于土壤承载力降低导致土壤贮肥能力差,肥料流失速率远大于利用速率。有研究显示,氮肥流失率可达52%~60%,利用率仅为30%~35%^[15],为应对实际生产需要,往往有过量施氮的情况出现。过量施氮不仅会使生产成本上升,而且会降低氮素利用效率并产生氮富集的现象,对根系产生毒害作用^[16~18]。研究表明,相对

高氮处理下的玉米产量并不高于相对低氮处理^[19],合理施氮是促进玉米生育期内干物质积累和产量形成的有效策略^[20]。

关于生物炭的研究多集中于土壤重金属离子的去除和土壤结构改良^[21~23],与生物炭调节氮肥在土壤积累和分布以及其对根系发育的炭氮定量关系相关的研究较少。针对土默川平原灌区玉米主产区,从生物炭增量施用条件下研究土壤结构和有机质分布对根系发育及产量形成的作用机制需要进一步探究。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019–2020年在内蒙古农业大学现代农业科技园区(40°33'N,110°31'E)进行。两年分别于2019年4月28日、2020年4月25日播种,2019年10月15日、2020年10月14日收获。定点田间试验,土质为沙壤土,基础地力(0~20 cm)和气象条件见表1。

表1 基础地力与气候条件
Table 1 Soil fertility and climatic conditions

年 份 Year	速效氮 (mg/kg) Available N	速效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	有机质 (g/kg) Organic matter	日照长度 (h) Sunshine hour	平均温度 (℃) Average temperature	年降水量 (mm) Average rainfall	生育期月平均 降水量(mm) Monthly average rainfall
2019	48.64	2.30	112.02	15.59	1 893.6	20.7	213.5	52.29
2020	48.25	2.19	112.61	15.69	1 825.7	21.2	235.7	48.06

1.2 试验设计

试验设计为裂区试验,以氮肥为主区,设置不施氮肥、150 kg/hm²、300 kg/hm²3个水平,分别记为N0、N150、N300;以生物炭为副区,设置不施生物炭、8 t/hm²、16 t/hm²、24 t/hm²4个水平,分别记为C0、C8、C16、C24。共12个处理组合,分别为C0N0、C8N0、C16N0、C24N0、C0N150、C8N150、C16N150、C24N150、C0N300、C8N300、C16N300、C24N300。供试品种为先玉335,采用德国格兰重载型精量播种机(2BMJ-9)进行条播,播种密度为8.25万株/hm²,9行区,行长5 m,行距60 cm,3次重复。105 kg/hm² P₂O₅,45 kg/hm² K₂O在播种时一次性施入;生物炭于2019年播种前一次性施入;氮素为纯氮用量,按照尿素氮含量(46%)进行折算后在大喇叭口期追施。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤容重

环刀取原状土法:于各处理中挖取50 cm深坑

将环刀打入垂直剖面,恒温烘干后称量环刀干重和环刀重并计算土层容重。

$$\text{土壤容重}=(\text{环刀干重}-\text{环刀重})/100 \quad (1)$$

1.3.2 土壤有机碳含量

重铬酸钾容量法—外加热法^[24]:称取1 g土样于试管中,加5 mL 0.8 mol/L重铬酸钾标准溶液,再加5 mL浓硫酸,将试管插入铁丝笼后置于175℃油浴锅内,溶液沸腾5 min后取出。将消煮液及土壤残渣洗入三角瓶内,滴入邻菲罗啉指示剂3~4滴,用0.2 mol/L FeSO₄标准溶液滴定,溶液颜色由橙黄变为砖红色即为终点,记录硫酸亚铁用量(V)。空白标定以石英砂代替土样,其他步骤完全相同,记录硫酸亚铁用量(V₀)。

$$\text{有机碳含量(g/kg)}=C\times(V_0-V)\times10^{-3}\times3.0\times1.1\times1\,000/m \quad (2)$$

C:FeSO₄标准溶液的浓度(mol/L);V:滴定时用去FeSO₄标准溶液的体积(mL);V₀:空白滴定时用去

FeSO₄标准溶液的体积(mL);3.0: ¼ 碳原子的摩尔质量(g/mol);m: 样品质量(g);1.1: 氧化校正系数;10⁻³: 将mL换算为L;

1.3.3 根系特性

大田切片法:以3株长势一致的玉米为中心,挖掘1/2行距×1/2株距范围内深度为50 cm土体的根系,用扫描仪(Agfa, Germany)扫描后获得的图像经分析程序(WinRhizo ProVision 5.0a.Canada)处理获得根系特性;烘干称量得根干重。

1.3.4 测产及考种

于成熟期,去除边行后收获两行,选取穗长均匀的10株,测定行粒数、穗行数、百粒重和含水量(LDS-1G 含水率检测仪),以14%含水量计算玉米产量。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据处理,采用Sigmaplot 14制图,采用SAS 9.4进行方差分析,采用SPSS Statistics 22.0进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥和生物炭及其互作对土壤性状、根系特性及产量的方差分析

由表2可知,氮肥和生物炭对2019年和2020年的总有机碳含量、根长、根表面积、根体积、根干重和产量的影响均达到极显著水平,其互作对2019年的影响达极显著水平,对2020年产量的影响达到显著水平。

表2 氮肥和生物炭及其互作对土壤性状和玉米根系及产量的方差分析

Table 2 Significance analysis of nitrogen fertilization levels, bio-char levels and their interactions on soil properties, root characteristics and yield of maize using ANOVA

年份 Year	来源 Source	总有机碳 Total organic carbon	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根干重 Root dry weight	产量 Yield
2019	N	134.81**	238.53**	291.63**	1905.26**	562.48**	686.46**
	B	55.50**	143.08**	74.20**	589.54**	153.26**	253.53**
	N×B	2.50	3.89*	1.05	37.55**	7.17**	7.61**
2020	N	302.93**	264.15**	366.42**	1827.68**	447.90**	488.05**
	B	82.50**	113.10**	128.62**	631.31**	199.29**	180.52**
	N×B	5.37**	4.82**	5.47**	28.15**	30.53**	3.12*

注:数字是F值,*,**表示在P<0.05,P<0.01水平上的显著性(*=P<0.05,**=P<0.01)。N表示氮肥水平,包括N0、N150、N300;B表示生物炭水平,包括C0、C8、C16、C24。下表同。

Note: Numbers were F-values. Stars indicated the level of significance (*=P<0.05,**=P<0.01). N represented nitrogen fertilization levels, including N0, N150, N300; B represented bio-char levels, including C0, C8, C16, C24. The same below.

2.2 不同土层的土壤性质

由表3可知,2019年和2020年0~15 cm土层内C0N0、C8N0、C16N0、C24N0处理组合的容重依次降

低6.33%、3.56%、5.35%和0.56%、4.15%、5.62%;有机碳依次增加16.27%、11.56%、1.39%和7.27%、14.32%、10.54%。

表3 氮肥和生物炭对土壤性状的影响

Table 3 Effects of nitrogen fertilizer and bio-char on soil properties

年份 Year	施氮量 Nitrogen fertilizer level	施炭量 Bio-char level	容重(g/cm ³) Soil bulk density			有机碳含量(g/kg) Soil organic carbon		
			0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm	0~15 cm	15~30 cm	30~45 cm
2019	N0	C0	1.799±0.01 a	1.840±0.05 a	1.841±0.07a	3.87±0.39 f	1.37±0.23 g	0.99±0.06 cd
		C8	1.685±0.08 b	1.741±0.04 b	1.813±0.06a	4.50±0.42 ef	1.60±0.13 fg	1.02±0.15 c
		C16	1.625±0.03 b	1.691±0.03 bc	1.792±0.06 a	5.02±0.28 e	2.21±0.19 ef	1.00±0.12 c
		C24	1.538±0.01 c	1.655±0.05 c	1.786±0.06 a	5.09±0.40 e	2.23±0.40 ef	0.94±0.07 d
	N150	C0	1.743±0.04 a	1.828±0.04 a	1.808±0.05 a	5.28±0.60 de	2.47±0.42 de	1.12±0.13 bc
		C8	1.659±0.01 b	1.753±0.05 ab	1.800±0.05 a	6.68±0.24 b	2.78±0.09 de	1.03±0.09 c
		C16	1.583±0.04 c	1.673±0.04 bc	1.800±0.06 a	7.23±0.56 b	3.10±0.52 bc	1.18±0.09 bc
		C24	1.517±0.03 d	1.644±0.05 c	1.773±0.02 a	8.19±0.29 a	3.57±0.47 a	1.24±0.29 bc

续表3 Continued 3

年 份 Year	施氮量	施炭量	容重(g/cm ³)			有机碳含量(g/kg)			
	Nitrogen	Bio-char	Soil bulk density			Soil organic carbon			
	fertilizer level	level	0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 45 cm	0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 45 cm	
2019	N300	C0	1.802±0.02 a	1.839±0.05 a	1.812±0.06 a	5.26±0.47 de	2.33±0.38 de	0.94±0.22 c	
		C8	1.617±0.08 b	1.781±0.02 a	1.762±0.03 a	5.84±0.35 cd	2.40±0.29 de	1.12±0.21 bc	
		C16	1.602±0.02 b	1.697±0.04 b	1.738±0.04 a	5.92±0.49 c	2.89±0.31 cd	1.36±0.18 a	
		C24	1.565±0.04 b	1.685±0.01 b	1.738±0.06 a	6.98±0.50 b	3.44±0.38 ab	1.32±0.14 ab	
	变异来源								
	氮肥(N)		2.29	1.05	3.41	86.27**	42.11**	4.34*	
	生物炭(B)		54.77**	26.55**	2.59	33.83**	18.90**	1.97	
	氮肥×生物炭 (N×B)		1.15	0.17	0.30	2.78*	0.50	1.37	
	2020	N0	C0	1.781±0.02 a	1.849±0.03 a	1.831±0.02 a	3.71±0.40 f	1.71±0.14 f	0.93±0.08 d
			C8	1.780±0.03 a	1.773±0.03 b	1.824±0.05 a	3.98±0.30 ef	2.22±0.07ef	1.04±0.10 cd
C16			1.706±0.01 b	1.734±0.01 bc	1.788±0.01 a	4.55±0.49 de	2.07±0.17de	0.85±0.09 cd	
C24			1.610±0.04 c	1.685±0.03 c	1.775±0.05 a	5.03±0.14 d	2.23±0.11d	0.97±0.13 cd	
N150		C0	1.799±0.02 a	1.860±0.02 a	1.782±0.02 a	6.08±0.47 c	2.63±0.24 c	1.21±0.09 bc	
		C8	1.771±0.02 a	1.749±0.05 b	1.793±0.06 a	6.47±0.69 c	2.92±0.39 c	1.21±0.11 b	
		C16	1.653±0.02 b	1.713±0.05 bc	1.787±0.06 a	7.64±0.23 b	3.58±0.58 b	1.23±0.09 a	
		C24	1.583±0.04 c	1.651±0.02 c	1.804±0.03 a	8.81±0.47 a	3.85±0.42 a	1.18±0.08 a	
N300		C0	1.819±0.06 a	1.802±0.04 a	1.800±0.06 a	5.86±0.21 c	2.39±0.33 c	0.97±0.10 bc	
		C8	1.736±0.03 b	1.741±0.04 ab	1.818±0.05 a	6.10±0.18 c	2.44±0.15 c	1.11±0.12 bc	
		C16	1.643±0.01 c	1.710±0.02 b	1.751±0.03 a	7.25±0.37 b	2.48±0.31 b	1.20±0.06 bc	
		C24	1.565±0.02 d	1.647±0.01 c	1.765±0.01 a	8.33±0.19 a	3.5±0.34 a	1.20±0.10 a	
变异来源									
氮肥(N)		2.29	3.02	0.77	228.37**	51.37**	20.75**		
生物炭(B)		77.22**	39.63**	1.59	65.37**	17.44**	1.27		
氮肥×生物炭 (N×B)		1.61	0.48	0.73	2.74*	3.14*	1.99		

2.3 土壤总有机碳含量

施用氮肥后土壤总有机碳显著提升(图1),N150和N300处理的总有机碳在两年内较N0处理分别提升46.93%、33.33%和59.34%、45.63%。在N150水平

上,C0、C8、C16、C24处理下的总有机碳两年内依次增加18.15%、9.73%、12.95%和6.86%、17.56%、11.16%。

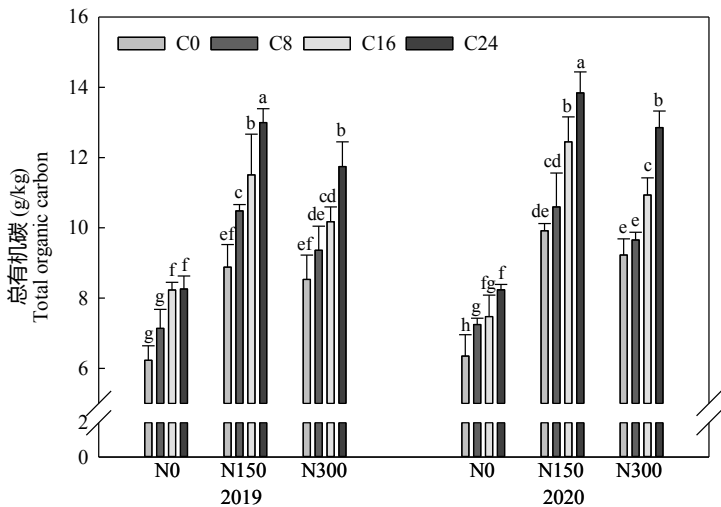


图1 氮肥和生物炭配施对土壤总有机碳含量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen fertilizer and bio-char on total soil organic carbon content

2.4 根系特征

如图2可知,C0N0、C8N0、C16N0、C24N0处理组合下的根长在2020年内依次提升1.47%、19.39%、22.88%;根表面积在2019年依次提升24.08%、22.47%、18.35%;根体积依次提升20.56%、12.79%、16.20%。

2.5 根系干物质重量

如图3所示,2019年N150水平上根系总干重较N300和N0处理提升24.76%,92.93%。C0N0、C8N0、C16N0、C24N0处理组合在2020年内依次提升17.05%、10.86%、8.02%。

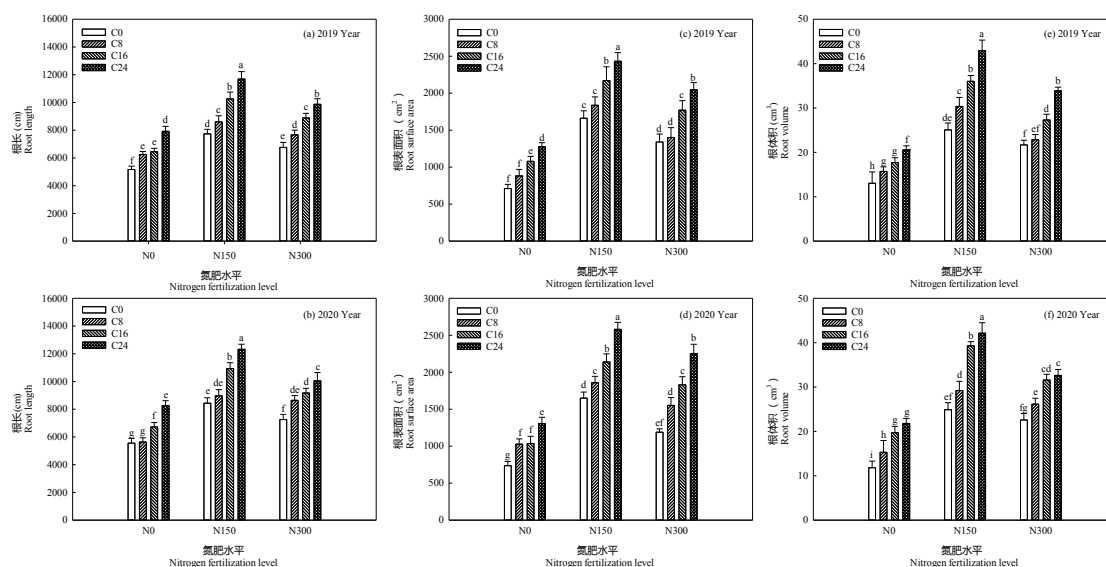


图2 氮肥和生物炭对玉米根系特性的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer and bio-char on root characteristics of maize

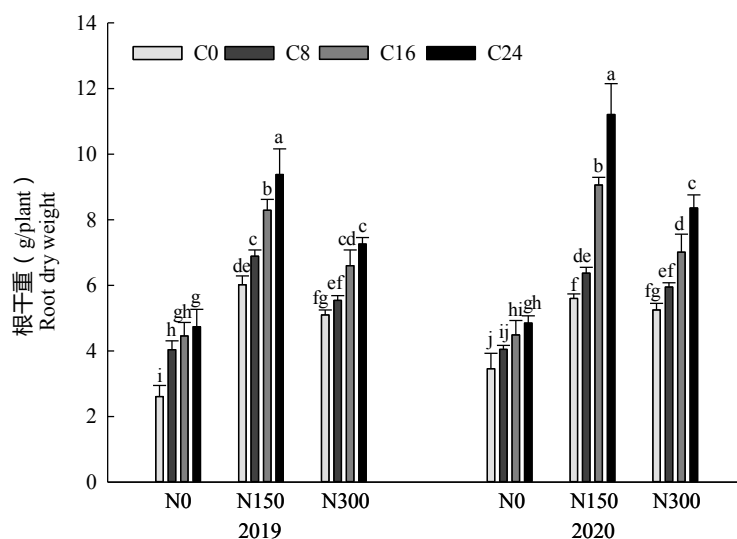


图3 氮肥和生物炭对玉米根系干重的影响

Fig.3 Effects of nitrogen fertilizer and bio-char on root dry weight of maize

2.6 生物炭和氮肥对玉米产量的影响

如图4可知,C0N0、C8N0、C16N0、C24N0处理组合下的产量在两年内依次提升11.49%、5.96%、7.48%和7.68%、6.29%、9.60%。2019年和2020年N150水平上总产量较N300和N0分别提升4.60%、26.50%和4.30%、26.18%。

2.7 玉米根系和产量的相关性分析

由表5可知,两年内土壤容重与总有机碳含量、根系特性、产量均呈极显著负相关。2019年和2020年总有机碳含量与根长均呈极显著正相关,相关系数为0.964和0.959。

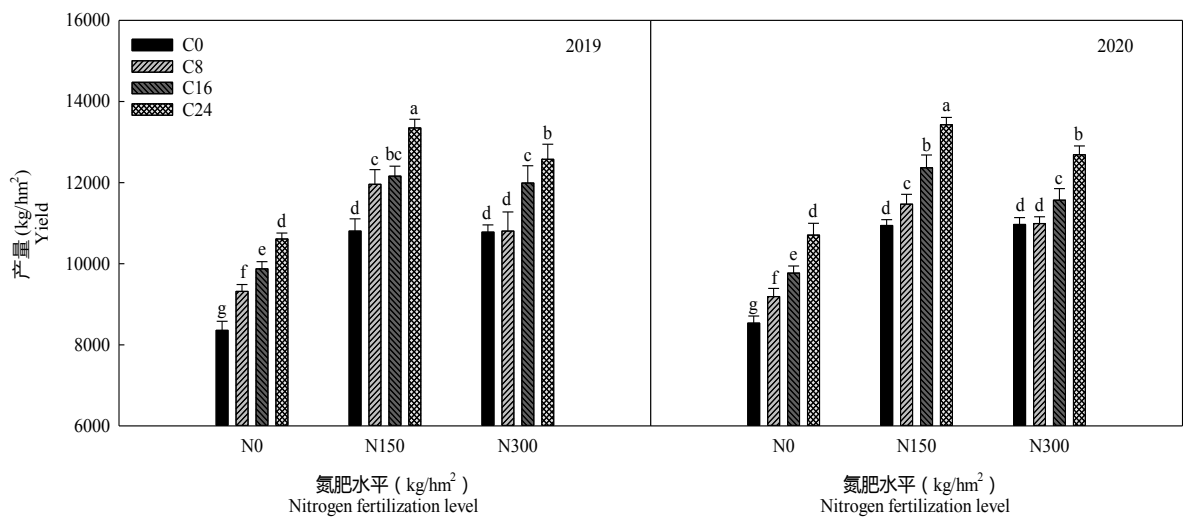


图4 氮肥和生物炭对玉米产量的影响
Fig.4 Effects of nitrogen fertilizer and bio-char on maize yield

表5 土壤性状、玉米根系和产量的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of soil properties, root characteristics and yield of maize

年 份 Year	指 标 Index	容 重 Soil bulk density	总有机碳 Total organic carbon	根 长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根干重 Root dry weight	产 量 Yield
2019	容 重	1						
	总有机碳	-0.572**	1					
	根 长	-0.642**	0.964**	1				
	根表面积	-0.577**	0.979**	0.967**	1			
	根体积	-0.576**	0.972**	0.977**	0.976**	1		
	根干重	-0.580**	0.972**	0.967**	0.970**	0.974**	1	
	产 量	-0.618**	0.969**	0.956**	0.968**	0.960**	0.945**	1
2020	容 重	1						
	总有机碳	-0.648**	1					
	根 长	-0.690**	0.959**	1				
	根表面积	-0.652**	0.986**	0.969**	1			
	根体积	-0.634**	0.970**	0.980**	0.965**	1		
	根干重	-0.675**	0.966**	0.964**	0.960**	0.970**	1	
	产 量	-0.652**	0.980**	0.967**	0.966*	0.964**	0.944**	1

注:土壤容重为0~15 cm土层内的容重。
Note: The soil bulk density is within the 0-15 cm soil layer.

3 结论与讨论

由于生物炭具有疏松多孔、比表面积大、比容重小等结构特点,决定了其在降低土壤容重方面具有显著的作用^[25]。也有研究表明,生物炭对耕层内有机碳含量、速效钾含量具有提升作用,且其提升效果与炭量呈正相关^[26]。本研究表明,生物炭对有机碳含量的提升有显著作用,且作用效果与施炭量的增加而逐渐增强,N150处理对有机碳含量积累的促进

作用优于N300处理。李林认为^[27],氮素施用量在300 kg/hm²时会造成土壤有机质分解,提升有机碳含量的氮素施用量阈值为225 kg/hm²。
根系是植物获取土壤中水分和养分的主要器官,在水分养分循环中具有极其重要的作用^[28]。根系长度的增加有利于植株吸收土壤深层水分养分,根系表面积的扩大可增加根系的总吸收面积和活跃吸收面积^[29]。通过前人研究来看,施用生物炭可提高生育期内根系总长度,扩大根系表面积和体积,提

高根系活力^[30]。郭雄飞认为,生物炭的施用对根系干重的增加有显著作用,根长、根表面积和根体积随生物炭的施用量呈正相关^[31]。此外,配施氮肥后,玉米总根长、根总表面积和活跃吸收面积得到进一步提升,进而增强了根系活力,延缓了玉米细根的衰老^[32]。本研究结果表明,生物炭的施入可明显改善根系的生长状况,根系各项指标的增长与生物炭施用量呈正相关,原因是由于生物炭多孔低容重的特殊结构有效改善土壤物理环境,为根系下扎与扩展提供了良好的条件。但由于生物炭本身养分含量较低,不能为玉米根系发育提供必要的营养物质,因此,适量氮肥的施入弥补了这一缺陷。

从生物炭与产量形成的角度来看,多数研究均表明,生物炭与作物产量构成因素及产量存在明显的正相关^[33]。本试验中,N150和N300处理均能够对根系发育和产量形成起到促进作用,但是N300处理的提升效果并不及N150处理,因此,外源氮素介入过多时,C/N平衡也会受到影响而使作物难以发挥其最大生长潜力。只有适量的氮素介入,才会促成土壤中最适C/N平衡,保证产量的增长。适量氮肥的应用首先能够弥补生物炭养分不足的缺陷,其次又能改善由于生物炭的施入而造成土壤碳氮比失衡的情况,最后相较于300 kg/hm²的氮肥投入节约了资源。因此,本研究从炭氮协调、土壤C/N平衡和资源节约的角度出发,选用C24N150处理组作为促进玉米根系发育、稳产增产的最佳炭氮定量关系。

氮肥有效提升耕层中有机碳含量及其分布。生物炭可降低土壤容重,0~15 cm土层降幅为6.63%~14.51%,15~30 cm土层降幅为5.38%~10.05%。

氮肥和生物炭对根系特性和产量的形成均有显著提升作用,N150处理较N300处理两年内年均提升总根长15.56%、提升产量4.45%。N150水平上随着生物炭施用量的增加,两年内根长提升11.22%~51.18%和6.32%~46.17%,根表面积提升10.55%~46.38%和12.71%~56.47%,根体积提升21.08%~71.30%和17.34%~69.32%,产量提升10.70%~23.55%和4.77%~22.68%。因此,24 t/hm²生物炭与150 kg/hm²纯氮是促进土壤有机碳积累和根系发育及产量形成的最优定量关系。

参考文献:

- [1] 王金梅,姚凤桐.内蒙古玉米生产效率实证研究[J].经贸实践,2017(7):156.
WANG J M, YAO F T. An empirical study on maize production efficiency in Inner Mongolia[J]. Economic and Trade Practice, 2017(7): 156. (in Chinese)
- [2] 景鹏成,王树林,陈乙实,等.不同剂量连作障碍调控肥对土壤物理性质和制种玉米经济效益的影响[J].新疆农业科学,2017,54(2):234-242.
JING P C, WANG S L, CHEN Y S, et al. Effects of different doses of continuous cropping obstacle regulated fertilizer on soil physical properties and economic benefits of seed corn production[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2017, 54(2): 234-242. (in Chinese)
- [3] 尚 杰,耿增超,赵 军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
SHANG J, GENG Z C, ZHAO J, et al. Effects of biochar on hydrothermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1969-1976. (in Chinese)
- [4] 田 超,王米道,王家嘉.土壤有机质与水土流失相关性研究[J].安徽农学通报,2008,14(19):54.
TIAN C, WANG M D, WANG J J. Study on the correlation between soil organic matter and soil erosion[J]. Anhui Agronomy Bulletin, 2008, 14(19): 54. (in Chinese)
- [5] 何佳洋,张 睿,王 楠,等.土壤扩蓄增容肥对小麦产量及品质的影响[J].中国农学通报,2014,30(27):187-191.
HE J Y, ZHANG R, WANG N, et al. Effect of soil storage and capacity increasing fertilizer on wheat yield and quality[J]. China Agronomy Bulletin, 2014, 30(27): 187-191. (in Chinese)
- [6] 吴淑杰,韩喜林,李淑珍.土壤结构、水分与植物根系对土壤能量状态的影响[J].东北林业大学学报,2003,31(3):24-26.
WU S J, HAN X L, LI S Z. Effects of soil structure, water content, and plant roots on soil energy status[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(3): 24-26. (in Chinese)
- [7] 杨 文.秸秆还田条件水肥耦合对水稻生长及土壤总氮流失的干预研究[J].农业与技术,2014,34(4):27.
YANG W. Intervention of coupling water and fertilizer on rice growth and soil total nitrogen loss under straw returning conditions [J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(4): 27. (in Chinese)
- [8] 陈温福,张伟明,孟 军.生物炭与农业环境研究回顾与展望[J].农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.
CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Review and prospect of biochar and agricultural environment[J]. Journal of Agri-environment Science, 2014, 33(5): 821-828. (in Chinese)
- [9] GLASER B, BALASHOV E, HAUMAIER L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7-8): 669-678.
- [10] 黄 超,刘丽君,章明奎.生物炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(4):439-445.
HUANG C, LIU L J, ZHANG M K. The effect of biochar on the properties of red soil and the growth of ryegrass[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Science), 2011, 37(4): 439-445. (in Chinese)
- [11] 张 宏,李俊华,高丽秀,等.生物炭对滴灌春小麦产量及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2016(2):55-60.
ZHANG H, LI J H, GAO L X, et al. Effects of bio-char on spring wheat yield and soil fertility under drip irrigation[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2016(2): 55-60. (in Chinese)
- [12] ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, et al. Effect of bio-char on root morphological and physiological characteristics and yield in

- rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445.
- [13] 张云舒,唐光木,龙晓双,等.施用小麦秸秆炭对灌耕风沙土土壤养分含量及玉米产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019(9): 1677-1683.
- ZHANG Y S, TANG G M, LONG X S, et al. Effects of wheat straw charcoal application on soil nutrient content and maize yield in wind-sand soil under irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019(9): 1677-1683. (in Chinese)
- [14] 王秀波.干旱下氮素营养对不同穗型小麦苗期耐旱性的影响机制[D].中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [15] 胡波.脲铵氮肥是提高氮肥利用率的有效途径[J]. *中国农资*, 2019, 60(11): 2006-2007.
- HU B. Urea ammonium nitrogen fertilizer is an effective way to improve nitrogen fertilizer utilization efficiency[J]. *China Agricultural Means of Production*, 2019, 60(11): 2006-2007. (in Chinese)
- [16] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等.不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J]. *华北农学报*, 2008(1): 154-157.
- DAI M H, TAO H B, WANG L N, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on dry matter production, distribution and transport of spring maize[J]. *Journal of Agronomy of North China*, 2008(1): 154-157. (in Chinese)
- [17] 杨志长,沈涛,罗卓,等.低氮密植对机插双季稻产量形成和氮肥利用率的影响[J/OL]. *作物杂志*: 1-11[2020-03-13].
- [18] 林小兵,周利军,黄尚书,等.不同施氮量下南方红壤花生农艺性状、产量及土壤养分的变化[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(6): 1076-1083.
- LIN X B, ZHOU L J, HUANG S S, et al. Changes in agronomic traits, yield and soil nutrients of peanut in red soil of southern China under different nitrogen application rates[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(6): 1076-1083. (in Chinese)
- [19] 马云祥.氮肥用量对玉米产量、效益及养分吸收的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2014(5): 16-18.
- MA Y X. Effects of nitrogen application rate on yield, benefit and nutrient absorption of maize[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2014(5): 16-18. (in Chinese)
- [20] 淮贺举,张海林,蔡万涛,等.不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2651-2656.
- HUAI H J, ZHANG H L, CAI W T, et al. The effect of different nitrogen application levels on nitrogen utilization of spring maize and soil nitrate nitrogen residue[J]. *Journal of Agri-environment Science*, 2009, 28(12): 2651-2656. (in Chinese)
- [21] MORTAZAVIAN S, MURPH SEH, MOON J. Biochar nanocomposite as an inexpensive and highly efficient carbonaceous adsorbent for hexavalent chromium removal[J]. *Materials(Basel)*. 2022, Sep 1; 15(17): 6055.
- [22] WU L, ZHANG H, XU Z, et al. Biochar-mediated reduction of m-nitrotoluene: Interaction between reduction of m-nitrotoluene and sequestration of contaminants[J]. *Sci. Total Environ*, 2021, 15(773): 145662.
- [23] GINEBRA M, MUNOZ C, CALVELO-PEREIRA R, et al. Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment[J]. *Sci. Total Environ.*, 2022, 1(806): 150465.
- [24] 双龙,妮萨娜,杜江,等.重铬酸钾氧化-外加热法测定化探土壤样品中有机碳含量[J]. *安徽化工*, 2016, 42(4): 110-112.
- SHUANG L, NI S N, DU J, et al. Determination of organic carbon content in geochemical soil samples by potassium dichromate oxidation-external heating method[J]. *Chemical of Anhui*, 2016, 42(4): 110-112. (in Chinese)
- [25] 张林,林庆毅,张梦阳,等.生物炭对不同土壤改良及生态效应影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(15): 54-58.
- ZHANG L, LIN Q Y, ZHANG M Y, et al. Research progress on the influence of bio-char on different soil improvement and ecological effects[J]. *China Journal of Agronomy*, 2019, 35(15): 54-58. (in Chinese)
- [26] 王智慧,殷大伟,王洪义,等.生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *东北农业科学*, 2019, 44(3): 14-19.
- WANG Z H, YIN D W, WANG H Y, et al. Effect of bio-char on soil nutrient, enzyme activity and maize yield[J]. *Northeast Agricultural Science*, 2019, 44(3): 14-19. (in Chinese)
- [27] 李林.不同施氮水平对草甸黑土有机碳稳定性的影响[D].吉林农业大学, 2014.
- [28] 蒋健,王宏伟,刘国玲,等.生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 62-66.
- JIANG J, WANG H W, LIU G L, et al. Effects of bio-char on root characteristics and yield of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 62-66. (in Chinese)
- [29] 张伟明,孟军,王嘉宇,等.生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445-1451.
- ZHANG W M, MENG J, WANG J Y, et al. Effects of bio-char on root morphology, physiological characteristics and yield of rice[J]. *Journal of Crops*, 2013, 39(8): 1445-1451. (in Chinese)
- [30] 梁晓艳,衣葵花,李萌,等.生物炭对盐碱地藜麦根系生长及生理特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(12): 24-29, 38.
- LIANG X Y, YI K H, LI M, et al. Effects of bio-char on root growth and physiological characteristics of chenopodium quinoa in saline-alkali soil[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2020, 52(12): 24-29, 38. (in Chinese)
- [31] 郭雄飞.重金属胁迫下生物炭和间作对刨花润楠生长及根系形态的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 337-344, 351.
- GUO X F. Effects of bio-char and intercropping on growth and root morphology of *Runnan shavings* under heavy metal stress[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 337-344, 351. (in Chinese)
- [32] 隋阳辉,高继平,王延波.生物炭与氮肥联合施用对连作玉米根系衰老及根际微生物群落的影响[C]. *中国作物学会.第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集*, 北京:中国作物学会, 2020: 1.
- [33] 郭刚.不同施肥模式下施用生物黑炭对雨养旱地土壤性质、玉米生长和温室气体排放影响的研究[D].南京:南京农业大学, 2012.

(责任编辑: 栾天宇)