

郑云珠,孙树臣. 单季施用生物炭提高土壤肥力及小麦玉米轮作周年产量[J]. 江苏农业科学,2022,50(20):257-264.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.20.039

单季施用生物炭提高土壤肥力及小麦玉米轮作周年产量

郑云珠,孙树臣

(聊城大学地理与环境学院,山东聊城 252059)

摘要:在全球变暖的背景下,生物炭在固碳减排、持水保肥、提高作物产量等方面发挥重要作用,而在小麦玉米轮作系统中关于生物炭施用对土壤养分持留及作物产量持续影响尚不明确。为探明单季生物炭还田对鲁西平原石灰性潮土区冬小麦—夏玉米轮作系统土壤养分及作物产量的影响,通过盆栽试验,设置 4(B1)、8(B2)、16(B3)、24(B4)、32(B5)、40(B6) t/hm² 等 6 种不同的玉米秸秆生物炭(450 ℃)施用量,以未施用生物炭作为对照(CK),研究冬小麦单季施用生物炭对土壤养分、冬小麦及夏玉米产量的影响。结果表明,施用生物炭可以提高土壤养分含量,而对土壤 pH 值、电导率(EC)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量的影响与对照相比差异不显著,B6 处理显著提高了土壤铵态氮(NH₄⁺-N)、速效钾(AK)、有机碳(SOC)及水溶性有机碳(DOC)的含量。施用生物炭可以增加冬小麦—夏玉米籽粒产量,冬小麦季 B4 处理显著增产 50.82%,夏玉米季 B3、B4、B5、B6 处理分别显著增产 45.62%、54.69%、57.97%、65.24%。冬小麦—夏玉米周年产量与土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AK、SOC、DOC 含量呈显著或极显著正相关。综合生物炭施用对土壤肥力、冬小麦—夏玉米籽粒产量及生物炭还田成本等方面进行分析,在冬小麦单季生物炭还田条件下,鲁西平原石灰性潮土区施用 24 t/hm² 玉米秸秆生物炭有利于冬小麦—夏玉米轮作系统作物产量的增加及土壤肥力的提升。

关键词:生物炭;冬小麦;夏玉米;土壤养分;作物产量;轮作

中图分类号:S512.106;S513.06

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2022)20-0257-08

我国作为世界上重要的农业大国之一,秸秆资

源种类丰富、分布范围广,年产量约 10 亿 t,且具有逐年增长的态势^[1-2]。然而,秸秆还田率不足 50%^[3],严重制约了农业发展的可持续性。因此,探寻合理的秸秆资源无害化利用一直是农业发展过程中关注的热点和难点问题。

秸秆中富含农作物生长所需的氮(N)、磷(P)、钾(K)等营养元素^[4],农作物光合作用的产物约有

(1);35-42.

[5]裴占江,刘杰,王粟,等.餐厨垃圾厌氧消化工艺研究[J].可再生能源,2015,33(2):289-295.

[6]孙天姿,王攀,陈锡腾,等.餐厨垃圾厌氧发酵沼液制备的液态菌肥对农田土壤理化性质的影响[J].环境工程,2020,38(8):201-206.

[7]朱诗君,金树权,汪峰,等.典型城市废弃物混合好氧堆肥的基本特征及其育苗应用潜力[J].浙江农业学报,2021,33(6):1069-1077.

[8]Meng X Y,Dai J L,Zhang Y,et al. Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 62-69.

[9]张婷婷.餐厨垃圾不同模式堆肥化处理效果及产品应用研究[D].泰安:山东农业大学,2016.

[10]王站付,邱韩英,陆利民,等.餐厨垃圾堆肥产品施用对水稻产量

及土壤环境的影响[J].江苏农业科学,2020,48(23):93-97.

[11]江苏省质量技术监督局.稻米食味品质评价:DB 32/T 1762—2011[S].

[12]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准食品中污染物限量:GB 2762—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[13]鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

[14]中华人民共和国生态环境部.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[15]国家标准化管理委员会,国家质量监督检验检疫总局.农田灌溉水质标准:GB 5084—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.

[16]满吉勇,林永锋,李丛林,等.餐厨垃圾堆肥对水稻生长、产量及土壤养分含量的影响[J].中国农业大学学报,2021,26(11):165-179.

一半贮存于秸秆中^[5]。秸秆还田作为提高秸秆资源综合利用的重要途径,不仅可以有效改善土壤环境、促进作物增产^[4,6-7],同时还可以减轻由于焚烧和丢弃导致的资源浪费及大气、水体等污染^[8],对于改善农村生态环境及秸秆资源的再利用具有重要意义。然而有研究指出,秸秆还田会加大下茬作物灌溉水量、农田病虫害发生率及农药使用量等不利影响,从而增加种植成本^[9]。也有研究指出,秸秆还田虽然可以显著提高农田碳的固定,同时也增加了农田甲烷排放、氨挥发以及养分渗漏损失等负面影响^[10]。因此,如何保证在秸秆还田效益最大化的同时降低其不利影响,不断增加农业收益成为当前秸秆资源无害化利用亟待解决的重要问题。

近几十年来,随着对生物炭认识的不断加深,秸秆炭化还田在实现作物增产、固碳减排、修复土壤污染等方面发挥巨大优势而日益成为国内外学者研究的热点^[11-13]。生物炭是农林废弃物等生物质在厌氧条件下经高温裂解(一般 $<700\text{ }^{\circ}\text{C}$)形成的高含碳量物质,具有丰富的营养物质、较大的比表面积、发达的孔隙结构以及丰富的含氧官能团等特性^[14-15]。生物炭作为一种绿色土壤改良剂,可以降低土壤容重、增加土壤孔隙度和持水能力^[16],同时有利于增加土壤养分含量^[17-18],进一步改善农作物生长所需的土壤环境,从而提高小麦^[19]、玉米^[20]、水稻^[21]、大豆^[22]等作物产量。在粉砂质黏壤土的麦玉轮作系统中,施用 16 t/hm^2 生物炭并配施化肥,可以显著增加冬小麦、夏玉米地上生物量及籽粒产量,且促进效果优于 8 t/hm^2 生物炭并配施化肥处理^[23]。而在沙土的研究中发现,施用生物炭虽然可以提高土壤水分,但对大豆产量却没有影响^[24]。生物炭对作物增产的效果具有一定范围,施用适量果树枝生物炭(5 t/hm^2)可以更好地促进潮褐土中玉米增产以及对土壤养分的吸收利用,而过量施用生物炭则导致增产效果减弱^[25]。在壤土中施用小麦秸秆生物炭,小麦产量对生物炭施用量也具有同样的响应,施用 $3\ 600\text{ kg/hm}^2$ 生物炭增产效果最好^[26]。魏永霞等在黑土区一次性施用 75 t/hm^2 玉米秸秆生物炭后(后期不再施加),研究发现4年研究期内的施炭处理可以提高土壤中有机质、铵态氮、速效钾含量,而随着时间的推移养分含量有所降低,但施炭处理仍高于对照^[27]。因此,农作物产量及土壤肥力与生物炭施用量、土壤类型、施用方式及施用年限等因素密切相关,如何科学地

利用生物炭资源以实现作物增产及土壤改良的双重效益至关重要。

鲁西平原作为华北平原的重要组成部分,冬小麦—夏玉米轮作是该地区主要的农业种植模式,同时也是我国重要的粮食生产区。然而该区域高强度的麦玉轮作,导致土壤肥力下降,为实现农作物增产而过度使用化学肥料,随之带来农作物品质降低、土壤酸化、环境污染等负面影响^[28]。因此,进一步实现鲁西平原农作物的增产稳产对保障我国粮食安全具有重要意义。目前关于该地区麦玉轮作系统对秸秆生物炭还田的响应结论尚未统一,且关于单季施入生物炭对两季农作物的持续性影响尚不明确。因此,本研究通过盆栽试验,探讨冬小麦季一次施用不同水平玉米秸秆生物炭量对冬小麦—夏玉米产量及土壤肥力的影响,以明确玉米秸秆生物炭对土壤肥力的影响,对比分析单季施用玉米秸秆生物炭对冬小麦、夏玉米两季农作物产量的影响,揭示土壤肥力指标与作物产量之间的相互作用关系,从而为鲁西平原的农作物秸秆资源更加合理应用于麦玉轮作系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于山东省聊城市聊城大学土壤生态环境教学科研基地($36^{\circ}43'\text{N}$, $116^{\circ}01'\text{E}$)进行。该区属温带大陆性季风气候,年平均气温约为 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量约为 540.4 mm ,夏季降水量约占全年降水量的60%。本试验研究期内的日均气温与日总降水量如图1所示,冬小麦季(2019年11月至2020年5月)的平均气温和总降水量分别为 $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 145.6 mm ,夏玉米季(2020年6—9月)的平均气温和总降水量分别为 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 682.1 mm 。

1.2 试验材料

供试土壤为石灰性潮土,pH值为8.81,有机质含量为 10.87 g/kg ,全氮含量为 0.72 g/kg ,有效磷含量为 18.50 mg/kg ,速效钾含量为 100.44 mg/kg 。生物炭为玉米秸秆在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下裂解2h制成,pH值为7.44,全氮含量为 15.45 g/kg ,有效磷含量为 $1\ 151.85\text{ mg/kg}$,速效钾含量为 $5\ 300.21\text{ mg/kg}$ 。供试小麦品种为济麦22,玉米品种为郑单958。

1.3 试验设计

采用盆栽试验,以不施用生物炭作为对照(CK),6种施用生物炭处理分别为B1(4 t/hm^2)、

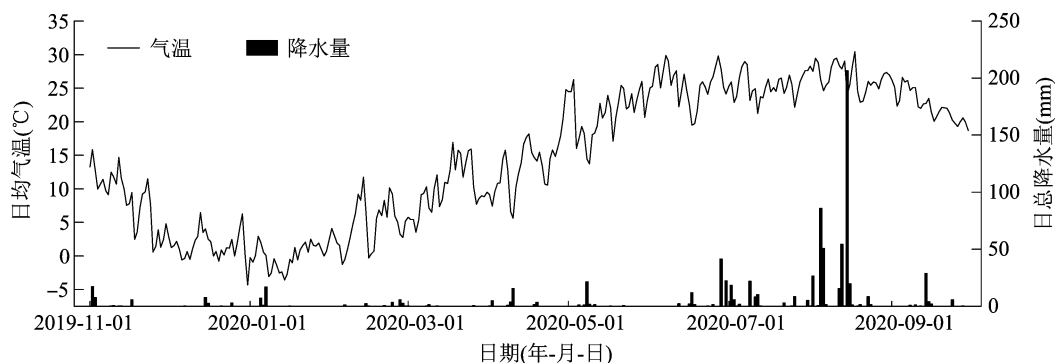


图1 研究区研究期内日均气温和日总降水量

B2 (8 t/hm²)、B3 (16 t/hm²)、B4 (24 t/hm²)、B5 (32 t/hm²)、B6 (40 t/hm²), 每个处理 3 次重复, 共计 21 个处理。盆栽桶选用内径为 27 cm、高为 30 cm 的塑料花盆。盆栽土过 5 mm 筛并自然风干, 每个盆栽桶风干土质量均为 11 kg, 冬小麦种植前各盆栽桶先装入风干土至 5 cm 高处并压实, 再将剩余风干土与肥料、生物炭 (过 2 mm 筛) 充分混合后装入盆栽至 25 cm 高处。所有盆栽桶装填完成后灌溉相同量的水分, 静置 1 周后于 2019 年 11 月 6 日在每个盆栽桶中部播种 20 粒小麦, 冬小麦收获时间为 2020 年 5 月 27 日。夏玉米播种前将肥料与 0 ~ 20 cm 土壤充分混合后, 于 2020 年 6 月 15 日在盆栽桶中部播种 2 粒玉米, 待出苗后定苗为 1 株, 夏玉米于 9 月 27 日收获。冬小麦季 N、P、K 施用量分别为 225、125、90 kg/hm², 夏玉米 N、P、K 施用量分别为 225、150、150 kg/hm², 其他田间管理措施与当地大田一致。

1.4 测定项目与方法

分别于冬小麦、夏玉米成熟期测定二者株高及夏玉米穗位高, 全部收获后于 105 °C 杀青 30 min, 之后于 75 °C 烘干至恒质量。冬小麦测定地上干物质量、有效穗数、穗长、穗粒数、百粒质量及籽粒产量。夏玉米测定地上干物质量、穗长、秃尖长、穗粒数、百粒质量及籽粒产量。轮作周年产量即冬小麦与夏玉米 2 种作物产量之和。

于夏玉米收获后使用土钻钻取各盆栽桶 0 ~ 20 cm 土样, 自然风干后测定土壤化学指标^[29]。土壤 pH 值采用酸度计测定 (水土比为 5 : 1); 土壤电导率 (EC) 采用电导法测定; 土壤硝态氮 (NO₃⁻ - N) 含量采用氯化钙浸提, 紫外分光光度法测定; 土壤铵态氮 (NH₄⁺ - N) 含量采用靛酚蓝比色法测定; 土壤有效磷 (AP) 含量采用碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色

法测定; 土壤速效钾 (AK) 含量采用乙酸铵浸提, 原子吸收分光光度法测定; 土壤有机碳 (SOC) 含量采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤水溶性有机碳 (DOC) 含量采用超纯水浸提法测定 (水土比 10 : 1)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行处理, 用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析, 多重比较采用 Duncan's 新复极差法检测处理间的差异显著性, 各测定指标间的相关性采用 Pearson's 相关系数表示, 用 Origin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤 pH 值和电导率的影响

各生物炭处理下土壤 pH 值、电导率与对照相比均无显著差异 (表 1)。生物炭处理中除 B2 处理外, 其余处理对土壤 pH 值均具有略微降低的影响。生物炭处理土壤电导率 (EC) 均高于对照, 且随生物炭施用量的增加呈先增加后降低的趋势, B3 处理下 EC 最大。

表 1 不同生物炭施用量对土壤 pH 和电导率的影响

处理	pH 值	EC (μS/cm)
CK	8.71 ± 0.14a	225.50 ± 38.89a
B1	8.65 ± 0.29a	231.50 ± 54.11a
B2	8.72 ± 0.26a	238.81 ± 45.08a
B3	8.70 ± 0.26a	241.44 ± 52.58a
B4	8.67 ± 0.24a	239.31 ± 65.35a
B5	8.66 ± 0.24a	238.33 ± 51.43a
B6	8.68 ± 0.06a	228.87 ± 56.56a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 生物炭对土壤养分的影响

施用不同生物炭量可以不同程度地提高土壤养

分含量(表 2)。B6 处理对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AK、DOC 含量的提升效果最佳,分别比对照高 19.24%、44.91%、33.74%、19.95%。AP 及 SOC 含量均表现为随生物炭施用量的增加呈先增加后减小的变化规律,二者均在 B4 处理达到最大值,并分别显著比对照高 39.60%、14.22%。

表 2 不同生物炭施用量对土壤养分含量的影响

处理	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 (mg/kg)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量 (mg/kg)	AP 含量 (mg/kg)	AK 含量 (mg/kg)	SOC 含量 (g/kg)	DOC 含量 (mg/kg)
CK	16.53 ± 1.95a	3.34 ± 0.02b	9.09 ± 0.14b	107.00 ± 7.35c	6.82 ± 0.27b	15.14 ± 1.42b
B1	18.22 ± 2.03a	3.63 ± 0.61b	10.62 ± 2.55ab	117.59 ± 18.70bc	6.96 ± 0.13b	16.51 ± 2.56ab
B2	18.12 ± 0.89a	4.23 ± 0.62ab	10.89 ± 1.87ab	116.06 ± 24.10bc	7.54 ± 0.25a	16.60 ± 0.99ab
B3	18.43 ± 3.49a	4.25 ± 0.59ab	11.62 ± 2.91ab	127.90 ± 26.45ab	7.67 ± 0.47a	16.72 ± 1.59ab
B4	18.36 ± 2.23a	4.14 ± 0.57ab	12.69 ± 2.83a	131.23 ± 18.80ab	7.79 ± 0.14a	17.24 ± 2.20ab
B5	18.67 ± 2.25a	4.06 ± 1.12ab	10.75 ± 2.00ab	132.34 ± 12.16a	7.73 ± 0.28a	17.41 ± 2.04ab
B6	19.71 ± 0.19a	4.84 ± 1.20a	10.66 ± 2.14ab	143.10 ± 13.34a	7.57 ± 0.21a	18.16 ± 2.03a

2.3 生物炭对冬小麦、夏玉米产量的影响

2.3.1 对冬小麦生长及产量的影响 不同生物炭施用量对冬小麦株高的影响各异,除 B6 处理外,其余生物炭处理均提高了冬小麦的株高,其中 B1 处理的株高显著比对照高 8.98% (表 3)。与对照相比,施用生物炭可以显著提高地上部干物质量

19.93% ~ 27.08%,而生物炭处理间无显著性差异。不同生物炭施用量均可以促进冬小麦的产量构成要素(有效穗数、穗长、穗粒数和百粒质量)的增加,从而实现冬小麦增产 18.65% ~ 50.82%,具体表现为 B4 > B3 > B2 > B5 > B6 > B1 > CK,其中 B4 处理籽粒产量显著高于对照。

表 3 不同生物炭施用量对冬小麦植株及籽粒产量的影响

处理	株高 (cm)	地上部干物质量 (g/盆)	有效穗数 (穗/盆)	穗长 (cm)	穗粒数 (粒)	百粒质量 (g)	籽粒产量 (g/盆)
CK	50.66 ± 0.75bc	17.91 ± 3.24b	20.00 ± 0.00a	6.45 ± 0.11b	27.50 ± 1.31d	1.95 ± 0.03b	8.58 ± 2.48b
B1	55.21 ± 3.38a	22.24 ± 2.62a	21.17 ± 1.17a	7.10 ± 0.30a	30.76 ± 0.98b	3.03 ± 0.52a	10.18 ± 1.80ab
B2	53.15 ± 1.96ab	22.27 ± 4.72a	21.14 ± 1.86a	7.08 ± 0.18a	30.73 ± 0.54b	3.23 ± 0.09a	11.74 ± 2.46ab
B3	52.51 ± 1.47ab	22.17 ± 4.14a	21.71 ± 1.70a	7.18 ± 0.20a	31.74 ± 0.85ab	3.37 ± 0.47a	12.10 ± 2.79ab
B4	52.63 ± 1.74ab	22.76 ± 3.27a	22.00 ± 1.63a	7.30 ± 0.12a	32.09 ± 0.86a	3.57 ± 0.08a	12.94 ± 2.60a
B5	52.43 ± 2.79ab	21.86 ± 2.68a	21.00 ± 1.22a	7.10 ± 0.24a	30.68 ± 0.63b	3.30 ± 0.39a	11.34 ± 1.44ab
B6	49.89 ± 2.52bc	21.48 ± 1.44a	20.20 ± 1.92a	6.64 ± 0.41b	28.55 ± 0.91c	3.16 ± 0.23a	10.65 ± 1.63ab

2.3.2 对夏玉米生长及产量的影响 不同生物炭施用量对夏玉米生长、籽粒产量及产量构成要素的影响见表 4。生物炭处理对夏玉米株高影响的变化规律与穗位高一致,施用生物炭均可以促进夏玉米株高及穗位高的提高,并均表现为随生物炭施用量的增加呈先增后减的趋势(B4 处理达到最大值)。施用生物炭处理显著增高了夏玉米株高 7.07% ~ 12.75%,B3、B4 处理的穗位高分别显著高于对照 12.26%、13.07%。施炭处理均可促进夏玉米地上部干物质量的增加,但生物炭处理与对照之间未表现出显著性差异。生物炭施用在促进夏玉米穗长、穗粒数和百粒质量增加的同时,也促进了秃尖长的增加。夏玉米籽粒产量随生物炭施用量

的增加而逐渐增加,且生物炭处理间无显著差异,B3、B4、B5、B6 处理分别显著比对照高 45.62%、54.69%、57.97%、65.24%。

2.3.3 生物炭对冬小麦—夏玉米周年产量的影响

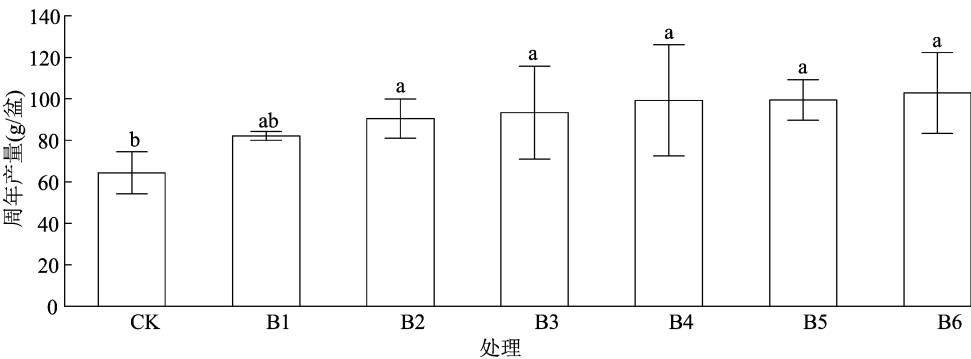
由图 2 可以看出,施用生物炭可以增加冬小麦—夏玉米轮作的周年产量,并表现为随生物炭施用量的增加而逐渐增加,B2、B3、B4、B5、B6 处理周年产量分别显著比对照高 40.57%、45.00%、54.15%、54.50%、59.74%,施用生物炭处理间的作物周年产量无显著性差异。

2.4 冬小麦—夏玉米周年产量与土壤化学性质的相关分析

冬小麦—夏玉米轮作系统周年产量与土壤

表 4 不同生物炭施用量对夏玉米植株及籽粒产量的影响

处理	株高 (cm)	穗位高 (cm)	地上部干物质 (g/盆)	穗长 (cm)	秃尖长 (cm)	穗粒数 (粒)	百粒质量 (g)	籽粒产量 (g/盆)
CK	204.00 ± 9.90b	112.50 ± 16.26b	115.20 ± 8.39a	10.93 ± 0.78c	0.73 ± 0.25b	275.67 ± 24.01c	29.46 ± 0.52c	55.79 ± 8.43b
B1	218.43 ± 4.58a	120.86 ± 4.10ab	130.00 ± 11.57a	12.27 ± 1.30bc	1.69 ± 0.95ab	328.40 ± 44.08bc	30.59 ± 0.87bc	71.92 ± 3.25ab
B2	219.67 ± 3.39a	123.43 ± 10.31ab	124.32 ± 9.79a	12.36 ± 0.77bc	1.86 ± 1.04ab	335.00 ± 25.77b	30.86 ± 0.21b	78.77 ± 10.42ab
B3	221.11 ± 6.68a	126.29 ± 5.31a	149.42 ± 29.95a	12.84 ± 1.37b	1.76 ± 0.65ab	341.14 ± 44.30b	33.81 ± 0.30a	81.24 ± 20.39a
B4	230.00 ± 13.54a	127.20 ± 12.36a	135.58 ± 58.64a	13.98 ± 1.72ab	1.30 ± 0.98ab	382.99 ± 45.51b	33.52 ± 0.43a	86.30 ± 25.60a
B5	224.00 ± 4.43a	121.29 ± 11.47ab	136.08 ± 31.52a	13.58 ± 0.33ab	1.35 ± 0.42ab	453.50 ± 22.78a	32.69 ± 1.30a	88.13 ± 9.72a
B6	222.63 ± 11.06a	121.22 ± 7.95ab	159.17 ± 42.70a	14.62 ± 1.19a	2.20 ± 0.87a	458.75 ± 28.28a	32.76 ± 0.30a	92.19 ± 19.24a



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
图2 不同生物炭施用量对作物周年产量的影响

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AK、SOC、DOC 含量均具有显著或极显著的正相关性(表 5),其中与 DOC 含量相关性最高(相关系数达 0.953),表明施用生物炭对土壤肥力的改善是冬小麦—夏玉米轮作系统周年产量增加的重要原因。除土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量外,土壤

pH 值与其他土壤化学指标及周年产量均呈负相关,这可能与施用生物炭后略微降低土壤 pH 值有关。此外,除土壤 pH 值外,其他土壤各化学指标之间呈现出不同程度的正相关。

表 5 周年产量与土壤化学性质的相关性分析结果

项目	相关系数							
	EC	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量	AP 含量	AK 含量	SOC 含量	DOC 含量	周年产量
pH 值	-0.003	-0.423	0.011	-0.247	-0.430	-0.080	-0.458	-0.348
EC		0.291	0.328	0.827 *	0.273	0.779 *	0.322	0.585
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量			0.888 **	0.423	0.918 **	0.667	0.972 **	0.908 **
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量				0.429	0.851 *	0.755 *	0.874 *	0.866 *
AP 含量					0.522	0.793 *	0.493	0.686
AK 含量						0.748	0.954 **	0.908 **
SOC 含量							0.750	0.907 **
DOC 含量								0.953 **
周年产量								

注: ** 表示在 0.01 水平上极显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

土壤是农作物赖以生存的基础,适宜的土壤环

境是农作物稳产增产的保证。大量研究表明,生物炭因其碱性特征及丰富的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等盐离子施入土壤后,可以提高土壤 pH 值及电导率^[30-31]。

而本研究发现生物炭各处理对土壤 pH 值、电导率的影响与对照相比均未达到显著水平,其中生物炭处理(除 B2 处理外)均略微降低土壤 pH 值,这可能是由于本试验所施用的生物炭呈弱碱性且低于土壤 pH 值,施入土壤后对 pH 值具有一定的降低作用。有研究指出施用碱性生物炭可以显著提高酸性土壤的 pH 值^[32],而对本身呈碱性的土壤 pH 值影响不明显^[19,33]。李传哲等通过在碱性土壤中施用酸改性生物炭(pH 值为 7.12)研究发现,施用 15 t/hm²与 30 t/hm²生物炭均可降低 0~10 cm 土层土壤的 pH 值,但降低程度均未达到显著水平,并提高了土壤肥力及作物产量^[34],本研究结果与之相似。本研究施用生物炭后土壤 pH 值略微降低,同时也提高了土壤的养分含量及作物产量,通过相关性分析发现,土壤 pH 值与作物周年产量之间呈负相关,说明施用弱碱性生物炭对土壤 pH 值的降低可能是作物周年产量增加的重要原因之一。

生物炭自身含有一定量的营养元素,且具有巨大的比表面积、丰富的孔隙结构及多种官能团等特征,施入土壤后能够吸附养分并提高土壤的保肥能力,从而促进作物生长和增产^[35-36]。本研究单季施用生物炭,均有效提高了夏玉米收获后土壤中 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AP、AK、SOC、DOC 等养分的含量。有研究表明,施用 1.5~6.0 t/hm²的玉米秸秆生物炭并配施肥料均可以显著提高棕壤中的有效氮、磷、钾等的含量,但土壤养分含量并未随生物炭施用量的增加而逐渐增加,生物炭施用量对土壤养分含量的提高具有一定的范围,施用 3 t/hm²生物炭对土壤养分含量提升效果最佳^[37]。本研究结果表明,生物炭对不同养分的影响随生物炭施用量的增加表现出不同的效果,土壤 AP 和 SOC 含量随生物炭施用量的增加呈先增加后降低的变化趋势,B4 处理可以更好地提升二者含量,而生物炭最高施用量(B6 处理)对土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AK、DOC 含量的提升效果最佳。Karimi 等在钙质土壤中施用 500 ℃玉米秸秆生物炭后发现,2% 施用量对土壤 AK、SOC、DOC 含量的提升效果高于 1% 的生物炭施用量,而对土壤无机氮含量的影响则相反^[38]。陈心想等在新积土中施用 5~20 t/hm²木制生物炭后发现,土壤养分含量随生物炭施用量的增加而增加,施用 20 t/hm²生物炭可以更好地提高土壤中矿质态氮、AP、AK、SOC 含量,但低于施用 10 t/hm²生物炭对小麦增产的效果^[39]。有研究指出作物产量与土壤

SOC、AP、AK 含量均具有显著的正相关性,土壤肥力是影响产量的关键因素^[40-41]。本研究也同样发现,冬小麦—夏玉米轮作周年产量与 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、AK、SOC、DOC 含量均呈显著或极显著的正相关性,说明生物炭对土壤肥力的改善是提高作物产量的有效途径。

生物炭通过影响土壤的物理和化学性质^[42-43],进而影响农作物的生长与发育。生物炭施用量对作物产量的增加效果具有一定范围,过量施用生物炭对作物产量的增加效果减弱^[44],本研究亦得出类似的结果。本研究施用生物炭对冬小麦—夏玉米轮作系统中的冬小麦均具有增产作用,表现出随生物炭还田量的增加呈先增加后降低的变化趋势,B4 (24 t/hm²)处理增产效果最佳,这可能是由于生物炭效应是有阈值的^[45],当施炭量较高时,土壤结构遭到破坏,还可能增加土壤的 C/N,导致氮素利用率降低^[33],反而不利于作物生长。也有研究表明施用生物炭对作物产量无影响^[46],甚至减产的情况发生^[47]。本研究未发现施用生物炭导致作物减产的现象,施用生物炭对冬小麦、夏玉米两季作物产量的增加均具有促进作用,夏玉米籽粒产量更是表现出随生物炭施用量的增加而逐渐增加,且增产效果整体上高于冬小麦,生物炭对作物产量的促进作用随时间推移具有一定累积效应^[23]。在黏土中同样发现玉米产量随生物炭施用量的增加而逐渐增加,19 t/hm²木屑生物炭使玉米产量显著增产 32%^[48]。秦蓓等在盐渍土中一次性施入棉秆生物炭后发现,低量生物炭(1.5 t/667 m²)施用对作物增产主要表现在前 2 年,而高量生物炭(3.0 t/667 m²)对作物增产的效果主要表现在后 2 年^[49]。谢迎新等在沙质潮土麦玉轮作系统中,从每季秸秆炭化还田角度出发研究发现,施用 2.25~11.25 t/hm²生物炭对前 3 季小麦的地上生物量及籽粒产量均无显著性影响,但从第 4 季开始逐渐表现出显著性影响^[50]。本研究在冬小麦种植前一次性施入不同水平的玉米秸秆生物炭量,可以不同程度地增加冬小麦、夏玉米两季的籽粒产量,但发现第 1 季冬小麦仅在 24 t/hm²生物炭处理下籽粒产量显著高于对照 50.82%,第 2 季夏玉米施用 16~40 t/hm²生物炭籽粒产量显著高于对照 45.62%~65.24%,生物炭对作物增产的效果在第 2 季夏玉米表现更为突出,尤其越高生物炭施用量对夏玉米增产的效果更佳,可能是由于生物炭施用量、施用时间、农作物类型等

原因导致两季作物增产效果的差异。

4 结论

本研究采用冬小麦季生物炭还田,夏玉米季不还田的单季还田模式,揭示了施用生物炭对土壤肥力及作物产量的影响。生物炭对土壤 pH 值、EC 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的影响不显著。B4 处理更好地提升了土壤 AP 和 SOC 含量,而 B6 处理对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AK、DOC 含量的提升效果最佳。单季施用玉米秸秆生物炭可以连续提高冬小麦、夏玉米的籽粒产量,施用 24 t/hm^2 生物炭使冬小麦产量显著增加 50.82%, $16 \sim 40 \text{ t/hm}^2$ 生物炭处理使夏玉米产量显著增加 45.62%~65.24%。通过相关性分析发现,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AK、SOC、DOC 含量均显著或极显著地影响了冬小麦—夏玉米周年产量。因此,在鲁西平原石灰性潮土区冬小麦季单季施用玉米秸秆生物炭条件下,施用 24 t/hm^2 生物炭有利于作物连续增产及土壤肥力的提升。

虽然在研究中发现单季施用不同量的玉米秸秆生物炭可以促进冬小麦、夏玉米两季作物的生长、增产以及土壤肥力的提高,并初步得出石灰性潮土区适宜的生物炭施用量。然而,生物炭对冬小麦—夏玉米轮作系统土壤肥力及作物产量的影响受多种因素的综合作用,特别是生物炭还田后的长期影响可能更加复杂,同时田间的实际情况可能比盆栽环境更加复杂多变。因此,未来仍需要进一步加强生物炭还田的长期生态环境效应的田间定位研究。

参考文献:

- [1] 牛新胜,巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1462–1479.
- [2] 李一,王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J]. 中国土壤与肥料,2020(1):119–126.
- [3] 高忠坡,倪嘉波,李宁宁. 我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J]. 农机化研究,2022,44(4):1–6,25.
- [4] 徐莹莹,王俊河,刘玉涛,等. 秸秆还田方式对半干旱区春玉米生长特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):128–132.
- [5] 肖敏,常志州,石祖梁,等. 秸秆过剩原因解析及对秸秆利用途径的思考[J]. 中国农业科技导报,2017,19(5):106–114.
- [6] Huang W, Wu J F, Pan X H, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 236–247.
- [7] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(36): 27942–27952.
- [8] Chen J, Zheng M J, Pang D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1708–1719.
- [9] 尹昌斌,黄显雷,赵俊伟,等. 玉米秸秆还田的受偿意愿分析: 基于河北、山东两省的农户调查数据 [J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 87–95.
- [10] 王德建,常志州,王灿,等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1073–1082.
- [11] 勾芒芒,屈忠义,王凡,等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1–12.
- [12] 郑云珠,田晓飞,翟胜,等. 小麦秸秆生物炭对冬小麦生长及土壤水分的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 84–88.
- [13] Zhang Y P, Yan J, Rong X M, et al. Responses of maize yield, nitrogen and phosphorus runoff losses and soil properties to biochar and organic fertilizer application in a light-loamy fluvo-aquic soil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 314: 107433.
- [14] Sun Q, Meng J, Lan Y, et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth [J]. Catena, 2021, 205: 105460.
- [15] Setiawati E, Yusuf W A. The utilization of durian wood (*Durio zibethinus*) and corn cob (*Zea mays*) biochar on corn yields in acid sulphate soil [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 980(1): 012027.
- [16] Kaur V, Sharma P. Effect of *Prosopis juliflora* biochar on physico-chemical properties of naphthalene and phenanthrene contaminated soil [J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2021, 41(7): 1406–1417.
- [17] Liu X Z, Ma Y Y, Manevski K, et al. Biochar and alternate wetting-drying cycles improving rhizosphere soil nutrients availability and tobacco growth by altering root growth strategy in ferralsol and anthrosol [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150513.
- [18] Gupta R K, Hussain A, Yadvinder-Singh, et al. Rice straw biochar improves soil fertility, growth, and yield of rice-wheat system on a sandy loam soil [J]. Experimental Agriculture, 2020, 56(1): 118–131.
- [19] Iqbal M T, Ortaş I, Ahmed I A M, et al. Rice straw biochar amended soil improves wheat productivity and accumulated phosphorus in grain [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(14): 1605–1623.
- [20] Partovi Z, Etedali H R, Kaviani A. Effects of applying biochar and straw on nitrate leaching and maize yield production [J]. Water and Environment Journal, 2021, 35(3): 943–950.
- [21] Chen X, Yang S H, Ding J, et al. Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation [J]. Water, 2021, 13(2): 209.

- [22] Mete F Z, Mia S, Dijkstra F A, et al. Synergistic effects of biochar and NPK fertilizer on soybean yield in an alkaline soil [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 713–719.
- [23] Hu Y J, Sun B H, Wu S F, et al. After-effects of straw and straw-derived biochar application on crop growth, yield, and soil properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) – maize (*Zea mays* L.) rotations; a four-year field experiment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146560.
- [24] Reyes – Cabrera J, Erickson J E, Leon R G. Biochar affects soil water content but not soybean yield in a sandy southeastern US soil [J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2021, 4(3): e20197.
- [25] 俞若涵, 姚奇, 杨明晓, 等. 生物炭对夏玉米农田土壤有效养分垂直分布及作物利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 137–142.
- [26] 阚正荣, 马守田, 祁剑英, 等. 施用生物炭对冬小麦光合潜力和籽粒产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(6): 719–727.
- [27] 魏永霞, 肖敬萍, 王鹤, 等. 施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 305–314.
- [28] Zhuang M H, Zhang J, Kong Z Y, et al. Potential environmental benefits of substituting nitrogen and phosphorus fertilizer with usable crop straw in China during 2000–2017 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122125.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 毛明月, 赵振勇, 王守乐, 等. 5 种盐生植物生物炭产率及其理化性质[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1494–1501.
- [31] 王冲, 王玉峰, 谷学佳, 等. 连续施用生物炭对黑土基础理化性质的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(2): 428–434.
- [32] 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.
- [33] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68–79.
- [34] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3424–3432.
- [35] Ibrahim M, Mahmoud E, Gad L, et al. Effects of biochar and phosphorus fertilizer rates on soil physical properties and wheat yield on clay textured soil in middle Nile Delta of Egypt [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(21): 2756–2766.
- [36] Korai P K, Sial T A, Pan G X, et al. Wheat and maize – derived water – washed and unwashed biochar improved the nutrients phytoavailability and the grain and straw yield of rice and wheat; a field trial for sustainable management of paddy soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113250.
- [37] Gao T Y, Gao M H, Peng J, et al. Effects of different amount of biochar on nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in soil [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 394: 022043.
- [38] Karimi A, Moezzi A, Chorom M, et al. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 450–459.
- [39] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [40] 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.
- [41] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 285–294.
- [42] Bednik M, Medyńska – Juraszek A, Dudek M, et al. Wheat straw biochar and NPK fertilization efficiency in sandy soil reclamation [J]. *Agronomy*, 2020, 10(4): 496.
- [43] 方明, 李洁, 赖欣, 等. 短期生物炭刺激对红壤和潮土微生物群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(11): 250–258.
- [44] Cui Y F, Meng J, Wang Q X, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1064–1074.
- [45] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 159–167.
- [46] Martos S, Mattana S, Ribas A, et al. Biochar application as a win – win strategy to mitigate soil nitrate pollution without compromising crop yields; a case study in a Mediterranean calcareous soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 220–233.
- [47] Liao X, Niu Y H, Liu D Y, et al. Four – year continuous residual effects of biochar application to a sandy loam soil on crop yield and N₂O and NO emissions under maize – wheat rotation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 302: 107109.
- [48] Mahmoud E, El – Beshbesy T, El – Kader N A, et al. Impacts of biochar application on soil fertility, plant nutrients uptake and maize (*Zea mays* L.) yield in saline sodic soil [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23): 1–9.
- [49] 秦蓓, 王雅琴, 唐光木, 等. 施用棉秆炭对新疆盐渍化土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2016, 53(12): 2290–2298.
- [50] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 115–123.