

DOI: 10.11689/sc.2023060601

白计玲, 纪荣云, 王小林, 等. 生物炭添加对黄土旱区土壤水肥环境及谷子产量形成的影响[J]. 土壤与作物, 2024, 13 (2): 225–234.

BAI J L, JI Q Y, WANG X L, et al. Effect of biochar addition on soil water and nutrient contents and yield formation of millet in loess arid region[J]. Soils and Crops, 2024, 13 (2): 225–234.

生物炭添加对黄土旱区土壤水肥环境及 谷子产量形成的影响

白计玲¹, 纪荣云², 王小林^{1,3}, 张雄^{1,3}

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 榆林市蔬菜产业发展中心, 陕西 榆林 719000;

3. 陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 黄土旱区土壤有机质含量偏低, 有限水肥资源难以高效利用。生物炭具有调节土壤孔隙环境和水肥有效性的潜力。有关生物炭调节黄土旱区土壤水肥运移, 提升特色作物谷子产量的关联机制值得深入分析。为明确生物炭添加对陕北黄土旱区土壤水肥环境和谷子产量形成的影响, 探讨生物炭在该地区的增产增效潜力, 本研究以“晋谷 21 号”为材料, 设置 CK (0 t·hm⁻²)、C1 (2 t·hm⁻²)、C2 (4 t·hm⁻²)、C3 (8 t·hm⁻²)、C4 (16 t·hm⁻²) 5 个梯度的施炭处理, 连续等量施炭 2 年, 开展大田定位试验。结果表明: (1) 添加适量生物炭能有效提升土壤含水量, 但高施炭量不利于土壤水分的储存利用。连续施炭 2 年, 谷子拔节期和成熟期 C3 土壤含水量较 CK 分别显著提升 21.4%、30.5%, C4 较 C3 分别降低 8.83%、7.25%, 但无显著差异。(2) 连续 2 年增施生物炭, C4 处理土壤 pH 值、有机质、氨态氮、硝态氮和速效钾含量较 CK 提升 4.28%~29.4%; 土壤速效磷含量随增施生物炭的剂量先增后减, C4 速效磷含量较 CK 显著下降 7.27%。(3) 添加生物炭能有效提升谷子生物量和产量, C3 施炭条件下, 谷子成熟期地上部生物量较 CK 显著提升 17.8%, 谷子产量相较于 CK 显著提升 16.9%。综上, 添加适量生物炭能有效改善陕北黄土旱区土壤水肥环境, 调节谷子生物量积累, 促进碳水化合物转化, 提升谷子产量。

关键词: 干旱; 土壤; 谷子; 生物炭; 产量

中图分类号: S516

文献标识码: A

Effect of biochar addition on soil water and nutrient contents and yield formation of millet in loess arid region

BAI Jiling¹, JI Qiyun², WANG Xiaolin^{1,3}, ZHANG Xiong^{1,3}

(1. College of Life Science, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Vegetable Industry Development Center of Yulin, Yulin

719000, China; 3. Engineering and Technology Research Center of Water Saving for Crops in Arid Area of Northern Shaanxi

Province, Yulin 719000, China)

Abstract: The content of soil organic matter in loess arid region is low, and the limited resources of water and fertilizer in dry farmland lead to low water and nutrient use efficiencies. Biochar has the potential to regulate the soil porosity environment and the availability of water and fertilizer. Therefore, the related mechanisms of biochar promoting the grain yield and regulating the soil water and fertilizer transport in loess arid region are worthy of in-depth exploration. In order to clarify the effect of biochar addition on soil water and nutrient contents, and yield formation of millet in loess arid region in northern Shaanxi Province, "Jingu 21" was used in this study. Five levels of biochar application were applied, i.e. CK (0 t·hm⁻²), C1 (2 t·hm⁻²), C2 (4 t·hm⁻²), C3 (8 t·hm⁻²) and C4 (16 t·hm⁻²), and the same amount of carbon for each level was applied consecutively for 2 years. The results showed that (1)

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2024-01-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41967013, 31751001); 榆林市科技计划产学研合作项目 (CXY-2022-70); 中央引导地方科技发展资金陕西省工程技术研究中心项目 (2022ZY2-GCZX-05); 陕西省农业农村厅农业科技创新驱动项目 (2022NYT01)。

第一作者简介: 白计玲 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事旱区小杂粮节水抗旱研究. E-mail: Baijiling0712@163.com.

通信作者: 王小林 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事旱区土壤水肥高效利用研究. E-mail: wangxl8304@163.com.

Adding proper amount of biochar could effectively increase soil water content, but excessive addition of biochar was not conducive to soil water storage and utilization. The soil water content under C3 at the jointing and maturing stages was significantly increased by 21.4% and 30.5% compared with CK, and of the water content under C4 decreased by 8.83% and 7.25% for respective growth stages compared with C3, but there was no significant difference. (2) Soil pH value, organic matter, ammonium, nitrate and available potassium contents under C4 increased by 4.28% - 29.4% compared with CK after two years of biochar application. The soil available phosphorus content increased first and then decreased with the increase of biochar application, and the available phosphorus content under C4 decreased by 7.27% compared with CK. (3) The addition of biochar effectively improved the biomass and yield of millet. Under C3, the above-ground biomass of millet at the mature stage increased by 17.8% compared with CK, and the yield of millet increased by 16.9% compared with CK. In conclusion, appropriate amount of biochar application can effectively improve the soil water and fertilizer nutrient contents in the loess arid region in northern Shaanxi, and consequently favorite the accumulation of grain biomass, the transformation of carbohydrate and yield gain.

Keywords: dry; soil; millet; biochar; yield

0 引言

黄土旱区是我国重要的小杂粮优势产区。该区域干旱少雨,季节性降雨分布不均,旱灾多发。长期粗放型农田管理方式及过量化肥的施用加剧了土壤养分失衡,耕地土壤肥力日益下降,农田可持续生产力不足,农业可持续发展受限^[1]。提高黄土旱区土壤水分利用效率,减少化学肥料的无效投入,提高土壤质量,促进土壤健康是黄土旱区农业可持续发展的必然要求^[2]。生物炭作为一种环境友好型土壤改良剂,在改善土壤水肥环境、促进作物生长等方面效果显著,可以有效实现作物提质增产,推动农业生产绿色可持续发展^[3-4]。因此,探讨生物炭在黄土旱区农业发展中蓄水保墒、提高土壤质量的有效性和应用潜力,具有一定的理论意义和生产应用前景。

生物炭是农林废弃物生物质资源在限氧环境下,经过热解得到的一类高度孔隙化、化学性质稳定且含碳量较高的固体有机物质^[5]。土壤添加生物炭是一种新型农林废弃物炭化还田方式,具有“取之于农,用之于农”的特点^[6]。生物炭灰分中含有较多的致碱矿物和碳酸盐,pH值较高^[7]。添加生物炭可以有效提高南方水稻土pH值^[8-9],降低海滨盐碱地土壤容重,提高土壤孔隙度、有机碳含量及田间持水量^[10]。由于生物炭自身活性养分和较大比表面积所吸附的多种营养元素,可以增加土壤有机碳及速效养分含量,提高土壤的保肥性能^[11-12],进而促进作物根系生长,提高作物增产潜力^[13-14]。但也有研究指出,土壤中添加过量的生物炭也可能对土壤水分的储存利用及作物生长起到抑制作用^[15-17]。因此,农业生物炭添加应充分考虑其制备材料、施用剂量、作用的作物种类、土壤类型及施用时间等差异,结合作物生长习性、土壤结构特征和气候变化规律,适时适量、科学合理施用^[18-19],发挥生物炭正效应。

谷子是黄土旱区小杂粮作物的重要代表,旱地谷子高产高效栽培对我国旱地农业可持续发展和饮食结构调整具有重要意义^[20-21]。生物炭在作物栽培中提质增产效果显著,已将其应用于农业生产实践^[22-23],而生物炭在黄土旱区的应用研究目前还多局限于室内观测试验。室内观测试验表明生物炭添加能显著增加黄绵土水分入渗,减少土壤水分蒸发,有效促进谷子生物量的积累^[24-25]。但施用生物炭能否在黄土旱区大田环境下优化土壤水肥环境,促进谷子增产,还有待在大田试验进一步验证。因此,本试验于2019-2020年在陕北黄土旱区采用生物炭梯度施用的方法,针对生物炭对谷子生长中土壤含水量、土壤养分、谷子地上部分生物量及产量的影响进行大田试验研究,旨在进一步明确生物炭施用对陕北黄土旱区土壤水肥环境与谷子产量形成的关联性,为生物炭在该地区谷子及其他作物中的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年5月至2020年10月在陕西省榆林市鱼河峁镇崔焉村(109°93'E, 38°05'N)进行,该

地区属于温带大陆性干旱半干旱季风气候, 夏季高温, 冬季寒冷, 年平均气温 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均日照时数 $2\,925.7\text{ h}$ 。年平均降水量 353.4 mm , 降雨不均, 多集中在每年的 7~9 月, 全年蒸发量为 $2\,000\sim 2\,500\text{ mm}$, 为典型的干旱半干旱雨养农业区。谷子生育期内月平均降雨量与温度见图 1。试验区土壤类型为黄绵土, 土质绵软, 土层较厚。耕层土壤 ($0\sim 30\text{ cm}$) 基本性质: pH 为 8.31, 有机质含量为 $3.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮含量为 $6.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮含量为 $9.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $6.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $56.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

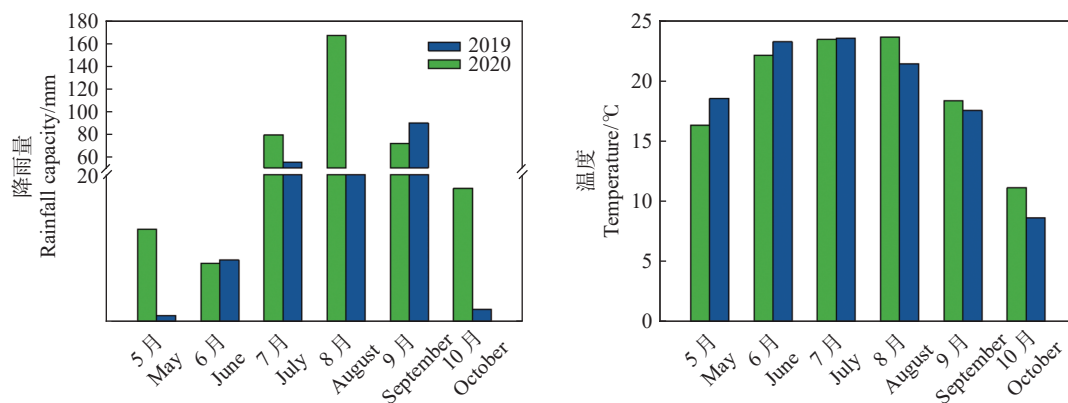


图1 2019—2020年谷子生育期内月平均降雨量与温度

Fig. 1 Average monthly rainfall and temperature during millet growing period from 2019 to 2020

1.2 试验材料

供试谷子品种选用该地区广泛种植的“晋谷 21 号”。供试生物炭购于河南立泽环保科技有限公司, 原材料为玉米秸秆, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下厌氧热解制得; 该生物炭 pH 为 9.46, 有机碳含量 $510\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $0.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $31.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $258\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $654\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。底肥施用尿素 $380\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷酸二铵 $230\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 试验设计

试验为单因素随机区组设计, 共 5 个处理, 按生物炭施用梯度分别为: 对照不添加生物炭 (CK)、添加 $2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C1)、 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C2)、 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C3)、 $16\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C4) 生物炭, 共 5 个梯度。小区面积 30 m^2 ($5\text{ m}\times 6\text{ m}$), 每个小区 3 次重复, 共 15 个小区。每年试验开始前将基肥和生物炭一次性均匀施入土壤, 用旋耕机翻至 $0\sim 30\text{ cm}$ 耕层土壤中。植株密度约为 $16\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播种深度 $3\sim 5\text{ cm}$, 行距 50 cm , 小区间留存 50 cm 保护行。全生育期为雨养环境, 2 年试验处理位置和施肥水平保持一致。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤含水量测定

在谷子拔节期、孕穗期和成熟期测定土壤含水量。各小区采用随机多点采样法, 用直径 4 cm 的土钻, 每 10 cm 一层, 采至 30 cm , 密封保存; 土壤样品按小区混匀, 称取部分土样装入铝盒, 称重记录鲜土重后在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱条件下持续烘干, 然后再称重记录, 计算土壤含水量 (SWC)。

$$SWC = M_w/M_s \times 100\%$$

式中: SWC 表示土壤含水量; M_w 表示土壤中水的质量; M_s 表示干土重。

1.4.2 土壤养分测定

将谷子成熟期测土壤含水量余下的土样自然风干后过筛, 测定土壤养分^[26]。采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量, 采用酚二磺酸比色法测定土壤硝态氮含量, 采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KCl}$ 浸提-蒸馏法测定土壤铵态氮含量, 采用钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量, 采用 NH_4OAC 浸提-火焰光度法测定速效钾含量。

1.4.3 谷子地上部分生物量及产量测定

在谷子拔节期、孕穗期和成熟期, 每个小区随机选择长势相近的 5 棵植株, 取其地上部分, 在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

的烘箱恒温烘干后称重,测定谷子地上部分生物量。谷子成熟期测产,每小区选取两行进行考种(去除边际效应),分别测量穗长、穗粗、单穗重、千粒重,后按小区全部收获,称重计算产量。

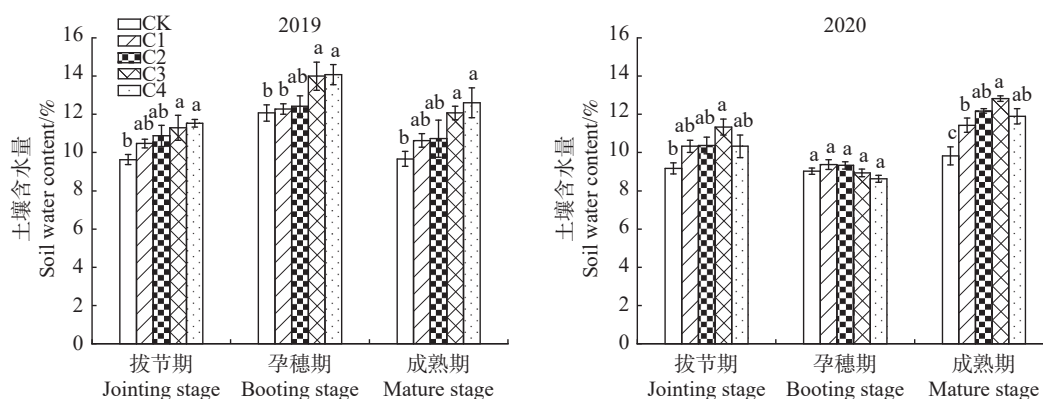
1.5 数据处理

利用软件 Microsoft Office Excel 2010 对采集的数据进行统计;应用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析(Duncan 多重比较)和相关性分析,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$;利用 Origin2021 制图软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用量对谷子耕层土壤含水量的影响

连续添加 2 年生物炭后,谷子不同生育期耕层土壤含水量随施炭量的增加呈先增后减的变化趋势(图 2)。2019 年土壤含水量随着生物炭施用剂量的增加而增加:谷子拔节期, C3、C4 处理土壤含水量较 CK 分别显著增加 17.3%、19.7% ($P<0.05$);孕穗期较 CK 分别显著提升 16.0%、16.6%,而较 C1 显著提升 14.1%、14.7% ($P<0.05$);成熟期, C3、C4 处理土壤含水量较 CK 分别显著增加 24.8%、30.3% ($P<0.05$)。2020 年随生物炭施用剂量的增加,土壤含水量呈先增后减的变化规律:谷子拔节期和成熟期, C3 处理土壤含水量较 CK 分别显著提高 21.4%、30.5% ($P<0.05$),持续增施生物炭至 C4 水平时,两生育期土壤含水量较 C3 处理分别下降 8.83%、7.25%;谷子孕穗期较高施炭量对土壤水分储存存在抑制作用, C3、C4 处理时土壤含水量较 CK 分别下降 1.12%、4.63%,但差异不显著。



注: C1、C2、C3 和 C4 代表施用生物炭的量分别为 $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, CK 为不施生物炭处理。不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平上差异显著。

Note: C1、C2、C3 and C4 indicate biochar application were $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, CK indicates no biochar application. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level during the same period.

图 2 2019—2020 年谷子不同生育期土壤 (0~30 cm) 含水量

Fig. 2 Soil water contents of soil (0–30 cm) in different growth stages of millet during 2019 to 2020

2.2 生物炭施用量对谷子耕层土壤 pH 值和养分含量的影响

随生物炭施用量的增加,土壤 pH 值、有机质、铵态氮、硝态氮、速效钾含量逐渐递增,土壤速效磷含量呈先增后减趋势(表 1)。连续施炭 2 年后,2020 年 C4 处理土壤 pH 值、有机质、铵态氮、硝态氮、速效钾含量较 CK 分别显著提升 4.28%、28.7%、14.2%、29.4%、6.93% ($P<0.05$),土壤速效磷含量较 CK 和 C3 处理分别显著降低 7.27% 和 10.1% ($P<0.05$),这说明添加较高量的生物炭会降低土壤的速效磷含量。综合来看,两年的施炭处理中,相同处理的 pH 值、有机质、氨态氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量相较上一年度均有所增加,说明生物炭施入土壤后能对土壤养分的提升起到持续的积极作用。

2.3 生物炭施用量对谷子地上部生物量的影响

谷子不同施炭处理地上部生物量积累均高于 CK(图 3)。随生物炭施用量的增加,2019 年谷子拔节期、孕穗期及成熟期 C4 地上部生物量较 CK 分别显著提升 43.1%、45.4% 和 24.8% ($P<0.05$)。2020 年

表 1 2019—2020 年不同施炭处理耕层土壤养分含量和 pH 值

Table 1 Nutrient contents and pH values of topsoil under different biochar treatments in 2019 to 2020

年份 Year	处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
2019	CK	8.38±0.03 b	4.74±0.20 b	3.43±0.06 a	6.37±0.28 c	6.28±0.03 c	88.4±0.96 c
	C1	8.61±0.01 a	4.98±0.08 b	3.62±0.12 a	6.85±0.24 bc	6.50±0.16 b	92.4±1.01 c
	C2	8.61±0.05 a	5.91±0.08 a	3.69±0.14 a	7.49±0.10 ab	7.32±0.06 a	103±1.59 b
	C3	8.63±0.05 a	5.99±0.10 a	3.73±0.06 a	7.85±0.20 a	7.05±0.04 a	105±1.23 ab
	C4	8.66±0.04 a	6.10±0.12 a	3.75±0.13 a	8.04±0.12 a	6.20±0.07 bc	107±1.76 a
2020	CK	8.41±0.08 b	5.47±0.10 c	3.59±0.08 b	6.71±0.20 b	7.70±0.10 c	105±0.70 ab
	C1	8.63±0.10 ab	5.79±0.10 c	3.79±0.04 ab	7.64±0.26 ab	8.67±0.10 a	106±2.29 b
	C2	8.74±0.09 ab	6.39±0.08 b	3.96±0.04 ab	8.01±0.22 a	8.30±0.08 b	107±2.61 ab
	C3	8.76±0.04 a	6.76±0.18 a	3.98±0.11 ab	8.43±0.24 a	7.94±0.04 c	110±2.63 ab
	C4	8.77±0.03 a	7.04±0.04 a	4.10±0.16 a	8.68±0.24 a	7.14±0.09 d	112±1.43 a
处理 Treatment (T)		NS	**	**	*	**	**
年份 Year (Y)		NS	**	*	**	**	**
处理×年份 T×Y		NS	NS	NS	NS	**	NS

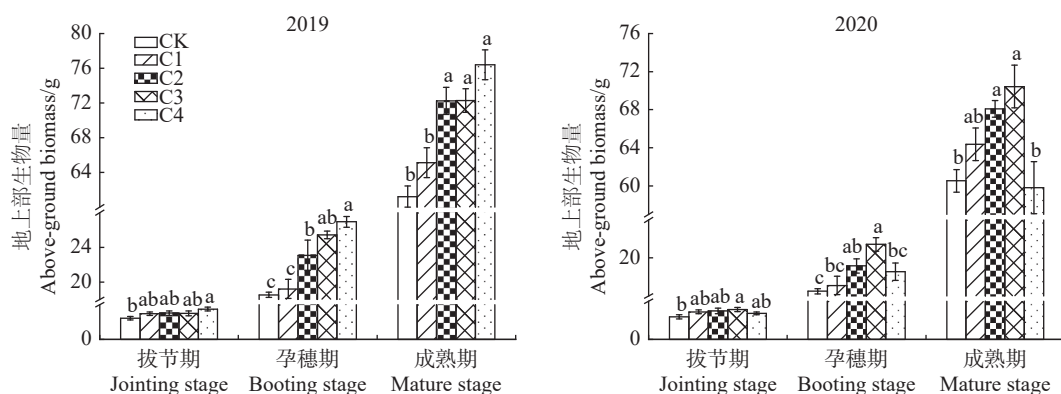
注：C1、C2、C3和C4代表施用生物炭的量分别为2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻²和8 t·hm⁻²，CK为不施生物炭处理。不同字母表示处理间在0.05水平上差异显著，*和**表示在0.05和0.01水平上差异显著，NS表示在0.05水平上差异不显著。

Note: C1、C2、C3 and C4 indicate biochar application were 2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻² and 8 t·hm⁻²，CK indicates no biochar application. Different letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, NS indicates no significant difference at 0.05 level.

谷子地上部生物量随生物炭施用剂量的增加呈先增后减的变化趋势，谷子拔节期、孕穗期及成熟期 C3 地上部生物量较 CK 分别显著提升 31.6%、29.9%、17.8%，孕穗期及成熟期 C4 地上部生物量较 C3 分别显著下降 13.5%、14.1% ($P<0.05$)。

2.4 不同生物炭施用量对谷子产量及其构成要素的影响

生物炭施用量对谷子产量构成具有明显调控作用，促进了产量的提升，并存在年际间差异（表 2）。



注：C1、C2、C3 和 C4 代表施用生物炭的量分别为 2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻² 和 8 t·hm⁻²，CK 为不施生物炭处理。不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平上差异显著。

Note: C1、C2、C3 and C4 indicate biochar application were 2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻² and 8 t·hm⁻²，CK indicates no biochar application. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level during the same period.

图 3 2019—2020 年谷子不同生育期地上部生物量

Fig. 3 Above-ground biomass of millet at different growth stages from 2019 to 2020

2019 年, 随生物炭施用剂量的增加, 谷子穗长、穗粗、单穗粒重、千粒重和产量逐渐递增, C4 各项参数指标较 CK 分别显著提升 25.6%、34.9%、44.3%、20.2% 和 15.2% ($P<0.05$)。2020 年, 同一施炭处理谷子各项参数指标较上一年度均有所下降, 但 2020 年各施炭处理谷子各参数指标均较 CK 均有所提升, 且随生物炭添加剂量先增后减。C3 谷子穗长、穗粗、单穗粒重及产量较 CK 分别显著增长 34.6%、38.7%、42.7%、16.9% ($P<0.05$), C4 谷子穗粗、单穗粒重较 C3 分别显著下降 8.61%、15.3% ($P<0.05$), 穗长、千粒重及产量较 C3 下降 8.03%、8.78%、1.56%, 但差异不显著。

表 2 生物炭添加对谷子产量及其构成要素的影响
Table 2 Effects of biochar addition on millet yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/mm	单穗粒重 Grain weight per panicle/g	千粒重 Thousand seed weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
2019	CK	16.2±1.03 b	15.0±1.50 b	11.4±1.35 b	2.77±0.17 b	3 677±54.8 b
	C1	18.6±0.36 ab	19.4±0.63 a	11.6±0.47 b	3.00±0.08 ab	3 758±23.5 b
	C2	18.0±0.67 ab	20.0±0.28 a	14.2±0.16 a	3.21±0.13 ab	4 099±128 a
	C3	19.3±0.70 a	20.2±0.43 a	15.2±0.46 a	3.24±0.16 ab	4 195±43.6 a
	C4	20.4±0.71 a	20.3±0.49 a	16.5±0.55 a	3.33±0.16 a	4 235±39.2 a
2020	CK	14.5±0.36 b	14.3±0.58 c	10.9±0.66 c	2.60±0.38 a	3 576±24.3 b
	C1	17.7±0.78 a	18.4±0.33 ab	10.7±0.68 c	2.90±0.13 a	3 658±26.3 b
	C2	17.6±0.64 a	18.8±0.80 ab	13.0±0.12 b	3.14±0.07 a	4 073±83.0 a
	C3	19.6±0.65 a	19.9±0.27 a	15.6±0.65 a	3.19±0.14 a	4 179±17.5 a
	C4	18.0±0.46 a	18.3±0.23 b	13.2±0.16 b	2.91±0.08 a	4 114±38.8 a
处理 Treatment (T)		**	**	**	*	**
年份 Year (Y)		*	*	*	NS	NS
处理×年份 T×Y		NS	NS	NS	NS	NS

注: C1、C2、C3和C4代表施用生物炭的量分别为 2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻²和 8 t·hm⁻², CK 为不施生物炭处理。不同字母表示处理在 0.05 水平上差异显著, *和**表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著, NS 表示在 0.05 水平上差异不显著。

Note: C1、C2、C3 and C4 indicate biochar application were 2 t·hm⁻²、4 t·hm⁻²、6 t·hm⁻² and 8 t·hm⁻², CK indicates no biochar application. Different letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level. * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels. NS indicates no significant difference at 0.05 level.

3 讨 论

生物炭因具有多孔结构、较大比表面积及大量高密度的电荷, 在改善土壤结构的同时能够提高土壤的持水能力^[27]。添加适量生物炭还会对土壤水分蒸发起到抑制作用^[28-29], 但高剂量的生物炭会降低土壤持水性能^[30]。本研究结果表明, 2019 年, 随生物炭施用量的增加, 土壤含水量逐渐增加, 而 2020 年 C4 施炭条件下, 谷子拔节期和成熟期土壤含水量较 C3 分别下降 8.83%、7.25%, 孕穗期土壤含水量较 CK 下降 4.23% (图 2)。连续性增施生物炭, 土壤累积的生物炭量过高, 使得土壤孔隙度过度增大, 可能不利于土壤水分保持和储存; 另一方面可能是因为 2020 年谷子孕穗期, 区域降雨量偏少, 高温增加土壤表面蒸发, 添加中高剂量生物炭产生的土壤水分吸附力难以补偿土壤孔隙度变大后水分蒸发的速度, 导致出现土壤含水量下降的不利现象。Zhang 等^[31]研究表明, 4%~6% 的生物炭添加会加速土壤干裂, 进一步加快蒸发速率。詹舒婷等^[32]研究表明, 添加生物炭会提升土壤温度, 显著加速后期土壤水分蒸发。所以生物炭对土壤的保水性一方面受到生物炭施用量的影响, 另一方面也受降雨量及温度等外界环境的影响。黄土旱区夏季旱热同期, 在没有灌溉的条件下, 添加大量生物炭存在阻碍土壤水分保持的风险, 所以黄土旱区农业生产中, 生物炭适量施用、提升旱地作物根际用水还有待深入探索。

生物炭本身含氮、磷、钾等矿质养分, 且其较强的吸附能力, 能有效提高土壤中阳离子交换量, 进而提高土壤肥力^[33-35]。本研究结果表明, 连续施用2年生物炭后, 土壤pH、有机质、铵态氮、硝态氮、速效钾含量随施炭量的增加逐渐递增, 土壤速效磷含量则随生物炭施用量的增加先增后减。黄土旱区土壤多呈碱性, 全磷的含量虽然相对较高, 但由于土壤中大量游离碳酸钙的存在, 大部分磷成为难溶性的磷酸钙盐, 能被作物吸收利用的有效磷并含量不足^[36]。生物炭具有调节土壤物理、化学环境, 优化土壤矿物质转化效率, 激发土壤中营养成分释放的作用, 少量生物炭添加可为土壤补充有效磷含量。但在土壤中施入较高量的生物炭后, 生物炭的吸附能力变强, 生物炭会吸持土壤中的水分, 使土壤中氧化还原电位降低^[37], 较低的阳离子交换量(CEC)会降低磷的活性^[38], 可能导致土壤中速效磷含量降低, 影响作物生理功能。土壤磷含量在作物光合、能量转换等方面具有重要作用, 生物炭施用量对陕北黄土旱区土壤中速效磷含量的影响机制仍需明确。

土壤水肥环境是作物生长和增产的基础和保障^[39], 生物炭的添加改变了黄土旱区土壤水肥环境, 不同生物炭施用量下, 其对谷子生物量及产量具有显著的调控和再分配作用。本研究结果表明, 2年试验中谷子所有施炭处理地上部生物量和产量较CK均有所增加。2019年地上部生物量和产量随着生物炭施用量的增加而增加, 2020年C3处理时, 谷子不同生育期地上部生物量和产量均达到峰值, 持续添加生物炭至C4处理时, 地上部生物量和产量较C3下降。一般认为生物炭在 $20 \sim 40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可获得高作物产量^[40-41]。本研究表现为连续施炭2年, 施用量为 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时显著提升了谷子生物量和产量。Jin等^[42]研究表明, 添加 $11.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 能够获得最高作物产量。梁嘉萍等^[13]在南疆盐碱地连续3年施用生物炭, 结果认为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是棉花和甜菜种植的合理施炭量。适量生物炭的添加能提高土壤保水保肥性能^[43], 其养分吸附与缓释作用又能进一步提高土壤养分利用率, 对作物生长起到持续的促进作用, 进而提高作物产量^[44], 但高剂量的生物炭可能会改变土壤酸碱度, 与作物产生养分和水分的竞争关系, 不利于作物根系生长和养分吸收利用。同时, 增施生物炭显著提高土壤碳氮比值, 影响土壤微生物群落结构和功能^[45-46], 从而不利于作物地上部生物量的积累和产量的提高。此外, 2020年谷子地上部生物量和产量较2019年均有所下降, 这主要是因为2020年降雨量较少, 在雨养环境下土壤中水分亏缺, 生物炭效应和水分胁迫会叠加降低作物对土壤养分的吸收和利用, 影响作物生长^[47]。但同一年度相同生长环境下, 各施炭处理所对应的谷子地上部分生物量和产量仍得到不同程度的提升, 充分说明生物炭对黄土旱区谷子生长发育有正面影响和应用潜力, 可为生物炭施用技术和梯度搭配, 激发作物增产增效潜力研究提供科学参考。

4 结 论

两年连续性研究说明生物炭添加可有效调控黄土旱区土壤水肥环境, 优化旱作谷子生物量分配和产量构成, 主要结论如下:

(1) 适量生物炭的添加能有效提升黄土旱区土壤含水量, 但施用过量生物炭会削弱甚至抑制其对土壤水分储存利用的作用; (2) 生物炭能有效提升土壤有机质、铵态氮、硝态氮、速效钾含量, 但在黄土旱区土壤中添加过量生物炭会降低土壤速效磷含量; (3) 生物炭能有效提升黄土旱区谷子地上部分生物量及产量, 连续施用2年、施炭量为 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 谷子不同生育期地上部生物量较CK提升17.8%~31.6%, 谷子产量相较于CK显著提升16.9%。综合而言, 生物炭对黄土旱区土壤水分含量及土壤中的部分养分含量的提升具有积极作用, 且具有增产效应, 故生物炭在黄土旱区作物栽培中有应用研究价值, 值得深入研究探讨。

参考文献 (References):

- [1] 潘占东, 马倩倩, 陈晓龙, 等. 添加生物炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 14-24.
PAN Z D, MA Q Q, CHEN X L, et al. Effects of biochar addition on nutrient levels and humus and its components in dry farmland soils on the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(2): 14-24.

- [2] 王娟玲. 有机旱作农业——中国旱区特色农业发展之路[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41 (3): 5–10.
WANG J L. Organic dryland farming: development of characteristic agriculture in arid areas of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41 (3): 5–10.
- [3] 刘慧, 苏航, 温小艳, 等. 黑土区坡耕地生物炭应用模式综合效益研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (7): 325–336.
LIU H, SU H, WEN X Y, et al. Comprehensive benefit of biochar application modes on slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (7): 325–336.
- [4] 孔繁艺, 卢升高. 基于文献计量分析生物炭的发展情况[J]. 浙江农业科学, 2022, 63 (6): 1182–1187+1191.
KONG F Y, LU S G. Bibliometric analysis on the development of biochar[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63 (6): 1182–1187+1191.
- [5] 闻艺, 王昌梅, 张无敌, 等. 生物炭的研究现状与农业推广应用分析[J]. 安徽农业科学, 2021, 49 (22): 10–13+17.
WEN Y, WANG C M, ZHANG W D, et al. Research status and analysis in agricultural extension application of biochar[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49 (22): 10–13+17.
- [6] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 783–796.
ZHANG J L, ZHANG J Z, SHEN J B, et al. Soil health and agriculture green development: opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (4): 783–796.
- [7] 王玲玲, 曹银贵, 王凡, 等. 生物炭对重构土壤化学性质及苜蓿抗旱性的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28 (6): 105–114.
WANG L L, CAO Y G, WANG F, et al. Effect of biochar on reconstructed soil chemical properties and drought resistance of *Medicago sativa*[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28 (6): 105–114.
- [8] 廖萍, 汤军, 曾勇军, 等. 生物炭和石灰对酸性稻田水稻产量、土壤性状和经济效益的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25 (1): 44–8.
LIAO P, TANG J, ZENG Y J, et al. Effects of biochar and lime on yield, soil properties and economic benefit of double rice cropping system[J]. China Rice, 2019, 25 (1): 44–8.
- [9] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (7): 1361–1369.
LI M, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (7): 1361–1369.
- [10] 邓晓, 武春媛, 杨桂生, 等. 椰壳生物炭对海南滨海土壤的改良效果[J]. 生态环境学报, 2022, 31 (4): 723–731.
DENG X, WU C Y, YANG G S, et al. Improvement effect of coconut-shell biochar on coastal soil in Hainan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31 (4): 723–731.
- [11] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报, 2014, 40 (7): 1259–1273.
LUO J J, OU Q M, YE C L, et al. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40 (7): 1259–1273.
- [12] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20 (4): 779–785.
YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (4): 779–785.
- [13] 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.
- [14] LIU X Y, ZHANG A F, JI C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data[J]. Plant and Soil, 2013, 373 (1): 583–594.
- [15] 朱自洋, 段文焱, 陈芳媛, 等. 干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 352–359.
ZHU Z Y, DUAN W Y, CHEN F Y, et al. The mechanism of biochar facilitate ryegrass growth in arid soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (1): 352–359.
- [16] 阚正荣, 刘鹏, 李超, 等. 施用生物炭对华北平原土壤水分和夏玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27 (1): 142–150.
KAN Z R, LIU P, LI C, et al. Effects of biochar on soil water and growth of summer corn in the North China Plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27 (1): 142–150.
- [17] BEESLEY L, DICKINSON N. Carbon and trace element fluxes in the pore water of an urban soil following greenwaste compost, woody and biochar amendments, inoculated with the earthworm *Lumbricus terrestris*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43 (1): 188–196.

- [18] MUKHERJEE A, LAL R. The biochar dilemma[J]. *Soil Research*, 2014, 52 (3) : 217.
- [19] 魏思洁, 王寿兵. 生物炭制备技术及生物炭在生态环境领域的应用新进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2022, 61 (3) : 365-374.
WEI S J, WANG S B. Biochar preparation technology and the new application progress of biochar in ecological environment[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2022, 61 (3) : 365-374.
- [20] 常晓英. 旱地谷子高产栽培及病虫害防治技术[J]. 农业开发与装备, 2019 (1) : 211+225.
CHANG X Y. High-yield cultivation and pest control techniques of millet in dry land[J]. *Agricultural Development and Equipments*, 2019 (1) : 211+225.
- [21] 张海金. 谷子在旱作农业中的地位和作用[J]. 安徽农学通报, 2007, 13 (10) : 169-170.
ZHANG H J. Millet's position and function on dry farming[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13 (10) : 169-170.
- [22] 刘园, M Jamal Khan, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52 (4) : 849-858.
LIU Y, M J, JIN H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4) : 849-858.
- [23] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013 (5) : 1-5.
GOU M M, QU Z Y. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013 (5) : 1-5.
- [24] 高言, 沈洪政, 杨婷, 等. 不同生物炭添加量对土壤水分运动过程的影响及模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021 (9) : 134-140.
GAO Y, SHEN H Z, YANG T, et al. The effects of different biochar additions on soil water movement[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021 (9) : 134-140.
- [25] 刘慧敏, 张圣也, 郭怀刚, 等. 生物炭对谷子幼苗生长及光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38 (1) : 86-91+116.
LIU H M, ZHANG S Y, GUO H G, et al. Effects of biochar supplement in soil on growth and photosynthetic characteristics of millet seedlings[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38 (1) : 86-91+116.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-126.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-126.
- [27] YANG R Y, ZHOU C X, ZHU J J, et al. Effects of biochar application on phreatic water evaporation and water-salt distribution in coastal saline soil[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42 (10) : 1243-1253.
- [28] ALKHASHA A, AL-OMRAN A, ALGHAMDI A G. Effect of water quality and date palm biochar on evaporation and specific hydrological characteristics of sandy soil[J]. *Agriculture*, 2020, 10 (7) : 300.
- [29] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (05) : 1009-15.
ZENG A, LIAO Y C, ZHANG J L, et al. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural Loessial Soils[J]. *Journal of Agro-Environment Scienc*, 2013, 32 (05) : 1009-15.
- [30] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (24) : 207-213.
GAO H Y, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (24) : 207-213.
- [31] ZHANG Y P, GU K, LI J W, et al. Effect of biochar on desiccation cracking characteristics of clayey soils[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114182.
- [32] 詹舒婷, 宋明丹, 李正鹏, 等. 不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (1) : 294-300.
ZHAN S T, SONG M D, LI Z P, et al. Effects of different straw biochars on soil water infiltration and evaporation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (1) : 294-300.
- [33] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51 (6) : 2061-2069.
- [34] 孟莉蓉, 俞浩丹, 杨婷婷, 等. 2种生物炭对Pb、Cd污染土壤的修复效果[J]. 江苏农业学报, 2018, 34 (04) : 835-41.
MENG L R, YU H D, YANG T T, et al. Immobilization of two biochars to Pb, Cd in contaminated soils[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34 (04) : 835-41.
- [35] 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.
- [36] 王绍中. 黄土丘陵旱区土壤营养元素状况与化肥施用[J]. 河南农林科技, 1984 (10) : 14–9.
WANG S Z. Soil nutrient element status and fertilizer application in loess hilly and arid regions[J]. Henan Agriculture and Forestry Technology, 1984 (10) : 14–9.
- [37] DELUCA T H, GUNDALE M J, MACKENZIE M D, et al. Biochar effects on soil nutrient transformations [M]//Biochar for Environmental Management. Routledge, 2015: 453–486.
- [38] 刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 等. 减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37 (4) : 544–551.
LIU Z Q, LAN Y, YANG T X, et al. Effect of biochar application pattern on soil fertility and enzyme activity under limited fertilization conditions[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37 (4) : 544–551.
- [39] 王庆安, 郭永祥. 获嘉县耕地养分变化分析及施肥对策[J]. 河南农业, 2009 (20) : 55–56.
WANG Q A, GUO Y X. Analysis of cultivated land nutrient change and fertilization countermeasures in Huojia County[J]. Agriculture of Henan, 2009 (20) : 55–56.
- [40] LI B, HUANG W H, ELSGAARD L, et al. Optimal biochar amendment rate reduced the yield-scaled N₂O emissions from Ultisols in an intensive vegetable field in South China[J]. [Science of the Total Environment](#), 2020, 723: 138161.
- [41] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38 (5) : 57–63.
CHEN F, ZHANG K K, GU S C, et al. Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38 (5) : 57–63.
- [42] JIN Z W, CHEN C, CHEN X M, et al. The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield - A five year field trial with biochar addition in upland red soil, China[J]. [Science of the Total Environment](#), 2019, 649: 1467–1480.
- [43] 任芳芳, 张金霞, 刘兴荣, 等. 生物炭添加对农田土壤环境及作物生长影响研究[J]. 水利规划与设计, 2022 (8) : 93–96+127.
REN F F, ZHANG J X, LIU X R, et al. Effect of biochar addition on farmland soil environment and crop growth[J]. Water Resources Planning and Design, 2022 (8) : 93–96+127.
- [44] 李毅, 冯浩, 梁嘉平, 等. 土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (5) : 9–16.
LI Y, FENG H, LIANG J P, et al. Research advances of responses and feedback of soil properties and crop growth to biochar application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (5) : 9–16.
- [45] 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 等. 不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为[J]. 环境科学, 2023, 44 (1) : 540–548.
LI J K, QIU C S, ZHAO J Q, et al. Properties of biochars prepared from different crop straws and leaching behavior of heavy metals[J]. Environmental Science, 2023, 44 (1) : 540–548.
- [46] 唐光木, 侯艳艳, 潘金龙, 等. 棉秆生物炭对棉花根系特性及生理代谢的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31 (3) : 370–378.
TANG G M, HOU Y Y, PAN J L, et al. Effect of cotton stalk-char on root characteristics and physiological metabolism in cotton[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31 (3) : 370–378.
- [47] 吴宗钊, 原保忠. 水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 (4) : 199–207+15.
WU Z Z, YUAN B Z. Effect of water and fertilizer coupling on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31 (4) : 199–207+15.