

于玲玲,赵贵元,崔婧婧,等.施用生物炭对玉米田土壤呼吸及水分利用效率的影响[J].江苏农业科学,2022,50(3):209-213.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.03.034

# 施用生物炭对玉米田土壤呼吸及水分利用效率的影响

于玲玲<sup>1</sup>,赵贵元<sup>2</sup>,崔婧婧<sup>3</sup>,郭强<sup>3</sup>

(1. 河北省唐山市农作物种子站,河北唐山 063000; 2. 河北省农林科学院棉花研究所,河北石家庄 050051;

3. 唐山市农业科学研究院,河北唐山 063001)

**摘要:**为探索施用生物炭对土壤呼吸及玉米生长的影响,试验设置 3 种不同生物炭施用水平: $T_1$  (2 000 kg/hm<sup>2</sup>)、 $T_2$  (7 000 kg/hm<sup>2</sup>) 和  $T_3$  (12 000 kg/hm<sup>2</sup>),以不施用生物炭为对照(CK),研究施用生物炭对玉米田土壤呼吸速率、含水率、养分含量、pH 值以及玉米产量、水分利用效率的影响。结果表明, $T_3$  处理下 2 年平均土壤呼吸速率最高,为 361.4 mg/(m<sup>2</sup>·h),较 CK 增加 182.7%。施用生物炭有利于提高 0~100 cm 土层的土壤含水率,以  $T_2$  和  $T_3$  处理效果最为明显,分别较 CK 增加 14.8% 和 17.3%。施用生物炭可以改善土壤肥力,以  $T_3$  处理最优,其有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾含量 2 年平均值分别较 CK 提高 31.5%、29.3%、47.8%、59.8%。随生物炭施用量增加,土壤 pH 值逐渐升高, $T_3$  处理 2 年平均土壤 pH 值较 CK 提高 1.25%。 $T_2$  处理下玉米产量和水分利用效率的改善效果最优,2 年平均玉米产量和水分利用效率分别较 CK 增加 15.6%、24.2%。通过 2 年研究发现,在玉米田施用生物炭提高了土壤呼吸速率,增强了土壤蓄水保墒能力,改善了土壤养分含量,进而提高了玉米产量和水分利用效率,以生物炭施用量 7 000 kg/hm<sup>2</sup> 效果最优。

**关键词:**生物炭;土壤呼吸速率;土壤水分;土壤养分;水分利用效率;产量

**中图分类号:**S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)03-0209-05

生物炭因具有丰富的孔隙度、巨大的比表面积以及大量的表面负电荷,可以有效改善土壤的理化特性,是一种优良的土壤改良剂。近年来,前人关于生物炭输入对土壤理化特性以及作物产量改良效果进行了大量研究。高惠敏等在河套灌区研究了不同改良剂对土壤指标及向日葵产量的影响,结果表明,生物炭处理可以降低土壤 pH 值、土壤总碱度,增加向日葵产量<sup>[1]</sup>。侯新村等在唐山市曹妃甸区滨海盐碱地研究发现,添加生物炭会使土壤容重降低 3.9% 以上,有机碳含量、毛管孔隙度、田间持水量分别提高 68.3%、4.0%、7.4%,柳枝稷存活率提高了 18.4%<sup>[2]</sup>。施用生物炭主要通过增加有效

穗数和提高结实率来提高水稻产量,同时,施用生物炭可以提高稻米的碾磨品质、糙米率、整精米率、精米率以及食味评分值<sup>[3]</sup>。施用生物炭可以增加土壤中速效氮、有效磷、有效钾和有机碳含量,提高脲酶、蔗糖酶和蛋白酶活性,但土壤 pH 值随生物炭施用量的增加而升高<sup>[4-10]</sup>。张娜等研究表明,施用生物炭可以提高夏玉米的干物质积累量,较低的生物炭施用量有利于玉米生育后期光合作用的维持以及产量的提高<sup>[11]</sup>。

由以上可知,添加生物炭对作物产量以及土壤理化特性等方面的影响已见诸多报道,而添加生物炭对土壤呼吸速率、水分利用效率以及春玉米产量等方面的影响鲜有报道。为此,本研究针对冀东沿海地区土壤肥力差、水分利用效率低和作物产量不高等现状,通过施用不同量的生物炭,研究其对土壤呼吸速率、养分含量、含水率、玉米产量以及土壤水分利用效率的影响,以期为该区域生物炭适量施入和玉米高产、水分高效利用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2019 年 5 月至 2020 年 9 月在唐山市

收稿日期:2021-07-07

基金项目:河北省重点研发计划(编号:20326413D);河北省春夏过渡区玉米综合试验站(编号:HBCT2018020405);唐山市科学技术研究与发展计划(编号:19150221E)。

作者简介:于玲玲(1985—),女,内蒙古赤峰人,硕士,高级农艺师,主要从事农作物栽培技术及种子管理研究,E-mail:351987616@qq.com;共同第一作者:赵贵元(1983—),男,河北赞皇人,硕士,副研究员,主要从事农作物栽培与育种,E-mail:br599u@163.com。

通信作者:郭强,博士,副研究员,主要从事玉米育种和栽培技术研究。E-mail:guoqiang8081@163.com。

农业科学研究院玉米新品种示范基地进行。该基地位于唐山市海港开发区王滩镇(118°97'E、39°28'N),属暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔约 30 m。该区域春季风多雨少,蒸发量大,易旱;夏季高温高湿,雨水集中,多暴雨、冰雹、大风等灾害性气候;秋季气温变化较大,降温较快。年降水量 500 ~ 700 mm,年际间变化较大,无霜期 180 ~ 190 d,年均气温 12.5 ℃。2019 年和 2020 年整个玉米生长季(5—9 月)降水量分别为 462.2、506.9 mm(图 1)。试验区土壤属沙土,0 ~ 40 cm 土层土壤有机质含量为 7.1 g/kg,碱解氮含量为 36.4 mg/kg,有效磷含量为 15.9 mg/kg,速效钾含量为 180.4 mg/kg,pH 值为 8.5,属低肥力水平土壤。

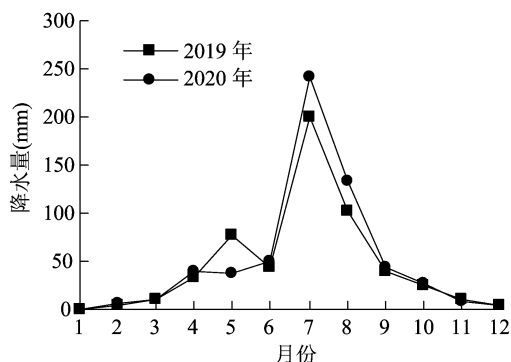


图1 试验基地 2019 年和 2020 年降水量

## 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组试验设计,参照文献[12-13]结合试验地地力情况,生物炭施用量设  $T_1$  (2 000 kg/hm<sup>2</sup>)、 $T_2$  (7 000 kg/hm<sup>2</sup>) 和  $T_3$  (12 000 kg/hm<sup>2</sup>) 3 个水平,以不施生物炭为对照(CK),每个处理 3 次重复,共 12 个小区,小区面积为 30 m<sup>2</sup> (5 m × 6 m)。所有生物炭均在 2019 年播种前随着翻地一次性全部施入。供试玉米品种为君辉 521,播种密度为 3 500 株/667 m<sup>2</sup>。供试肥料为尿素(N 质量分数为 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数为 12%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 质量分数为 60%)。磷、钾肥作为基肥一次性施入,氮肥总量的 40% 作为基肥,其余部分在大喇叭口期追施。2019 年 5 月 15 日播种,9 月 10 日收获;2020 年 5 月 20 日播种,9 月 15 日收获,各小区的田间管理方式基本相同。试验用生物炭购自辽宁金和福农业科技股份有限公司,它以玉米秸秆为原料,经 450 ℃ 厌氧热解生产。基本含量:有机碳含量为 651 mg/g,总氮含量为 19.6 mg/g,有效磷含量为 0.54 mg/g,速效钾含量为 22 mg/g,C/N 为 79.2,pH 值为 9.2。

## 1.3 测定项目和方法

**1.3.1 土壤呼吸速率** 于玉米播种期(2019 年 5 月 15 日、2020 年 5 月 20 日)、苗期(2019 年 6 月 2 日、2020 年 6 月 8 日)、拔节期(2019 年 6 月 20 日、2020 年 6 月 25 日)、大喇叭口期(2019 年 7 月 7 日、2020 年 7 月 11 日)、灌浆期(2019 年 8 月 13 日、2020 年 8 月 18 日)和成熟期(2019 年 9 月 7 日、2020 年 9 月 11 日),采用 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA)开路式土壤碳通量测定系统测定不同处理下玉米田土壤呼吸速率。

**1.3.2 土壤水分** 测定土壤呼吸速率的同时,采用 TDR 中子仪(型号为 6050XI,生产商为 Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA),原位测定 0 ~ 100 cm 土层的土壤含水量,每间隔 20 cm 土层进行测定,结合降水量、田间灌水量以及水分蒸散量,计算作物的耗水量(mm)。

**1.3.3 土壤养分含量和 pH 值** 2019 年 4 月下旬玉米播种前以及 2019 年和 2020 年玉米收获后,每个处理小区内随机选取 5 点,测定 0 ~ 40 cm 土层的碱解氮、有效磷、速效钾、有机碳含量以及 pH 值。土壤养分指标的测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[14]</sup>,其中,碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用火焰光度法测定;有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定;pH 值采用复合电极法测定。

**1.3.4 水分利用效率计算方法** 土壤贮水量(mm) = 土壤含水量(%) × 土层深度(mm) × 土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);作物耗水量(mm) = 生育期内灌水量(mm) + 生育期内降水量(mm) + 作物利用的地下水量(mm) - 地表径流量(mm) - 土壤渗漏量(mm) - 种前和收获后土壤贮水的变化量(mm);水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup> · mm)] = 作物产量(kg/hm<sup>2</sup>)/作物耗水量(mm)。

整个试验期间不进行人工灌溉,因此玉米生育期灌水量为 0;试验区域地下水深约 7 m,因此整个作物生育期地下水利用量为 0;由于试验地平坦,降雨较少,蒸发作用强烈,因此地表径流量和土壤渗漏量为 0。

**1.3.5 产量测定** 成熟期,调查每个处理小区的实有株数、空秆数和双穗数。每个小区果穗全部收获称质量,依据平均单穗质量,称取 10 个具有代表性的果穗进行室内考种,调查记载项目包括穗粒数和百粒质量,根据 10 穗质量,折算出小区籽粒产量

(籽粒含水量折合成 14%)。

#### 1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 进行数据整理;用 SAS 9.0 进行方差分析,运用 *LSD* 法 ( $P < 0.05$ ) 进行多重比较;用 SigmaPlot 14.0 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用生物炭对土壤呼吸速率的影响

由图 2 可知,在整个测定期间,土壤呼吸速率具有明显的季节变化特征。播种期各处理土壤呼吸速率最小,随着生育进程的推进,不同处理的土壤呼吸速率呈现出递增趋势,灌浆期各处理土壤呼吸速率达到最大值,随后逐渐减小。土壤呼吸速率的年季间变化趋势基本相同。整个测定期间,CK 的土壤呼吸速率变化范围为  $50.4 \sim 295.6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $T_1$  处理为  $162.9 \sim 432.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $T_2$  处理为  $222.7 \sim 521.7 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $T_3$  处理为  $221.4 \sim 574.6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。CK 的土壤呼吸速率均低于同期其他处理,说明添加生物炭对土壤呼吸速率有明显影响。由图 3 可知,2 年平均土壤呼吸速率表现为  $T_3$  [ $361.4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]  $> T_2$  [ $335.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]  $> T_1$  [ $285.8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]  $> \text{CK}$  [ $127.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ];2020 年,  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理的土壤呼吸速率平均值均大于 2019 年,分别增加 7.6%、8.3%、16.9%。可见,随着生物炭添加量的增加,土壤呼吸速率逐渐增大;伴随着时间的推移,不同生物炭添加量对土壤呼吸速率造成的影响不同。

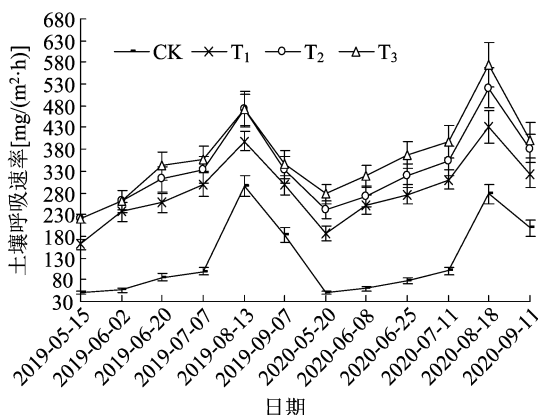


图2 不同处理下土壤呼吸速率

### 2.2 施用生物炭对土壤水分的影响

由图 4 可知,玉米生长前期(苗期—拔节期),2019 年各处理土壤含水率随着土层深度的加深呈逐渐增加的趋势,但各处理之间差异不明显;2020

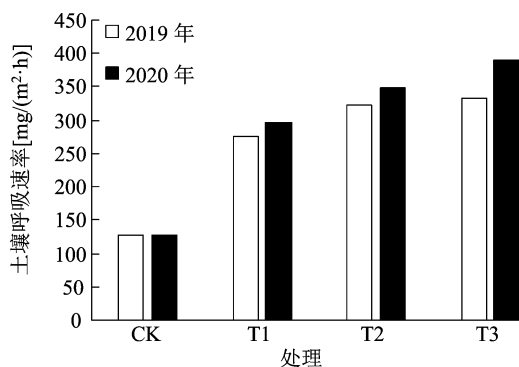


图3 不同处理下土壤呼吸速率的年际变化

年各处理土壤含水率随着土层加深呈逐渐降低的趋势,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理 0 ~ 100 cm 土层平均含水率较 CK 分别提高了 9.8%、9.3%、10.0%。玉米生育中期(小喇叭口期—吐丝期),此阶段为玉米需水旺期,且此阶段降水量较少,因此各处理 2 年的土壤含水率均有所降低。2019 年,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理 0 ~ 100 cm 土层平均含水率较 CK 分别提高了 4.0%、20.2%、24.6%;2020 年各处理 0 ~ 100 cm 土层平均含水量均高于 2019 年,分别提高了 33.1%、35.3%、28.1%;2020 年 CK 处理 0 ~ 100 cm 土层平均含水量最低,  $T_2$  处理最高。玉米生育后期(灌浆期—成熟期),此阶段玉米需水量减少,降雨较多,因此各处理 0 ~ 100 cm 土层含水率均有所上升。  $T_2$  和  $T_3$  处理 0 ~ 100 cm 土层平均含水率明显高于 CK 和  $T_1$  处理。2019 年各处理 80 ~ 100 cm 土层平均含水率明显回升。2020 年各处理 0 ~ 40 cm 土层含水率逐渐上升,40 ~ 100 cm 土层含水率逐渐下降,  $T_2$  和  $T_3$  处理间差异不明显。可见,  $T_2$  和  $T_3$  处理较 CK 和  $T_1$  处理增加了 0 ~ 100 cm 土层的含水率,且  $T_2$  和  $T_3$  处理间差异不明显。

### 2.3 施用生物炭对土壤养分的影响

由表 1 可知,施用生物炭可增加土壤(0 ~ 40 cm)有机碳和碱解氮含量。与试验处理前相比,2 年玉米收获后,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理有机碳含量均显著增加,增幅达 10.7% ~ 45.9%。2019 年  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理下土壤有机碳含量较 CK 显著增加 ( $P < 0.05$ ),增幅分别为 11.2%、19.5%、20.0%,  $T_2$  和  $T_3$  处理间差异不显著,  $T_2$ 、 $T_3$  与  $T_1$ 、CK 之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。2020 年各处理间有机碳含量差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),且 2020 年  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理下有机碳含量均高于 2019 年。添加生物炭可以调节土壤中碱解氮含量,与试验处理前相比,玉米成熟期,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理下碱解氮含量均显著增加,

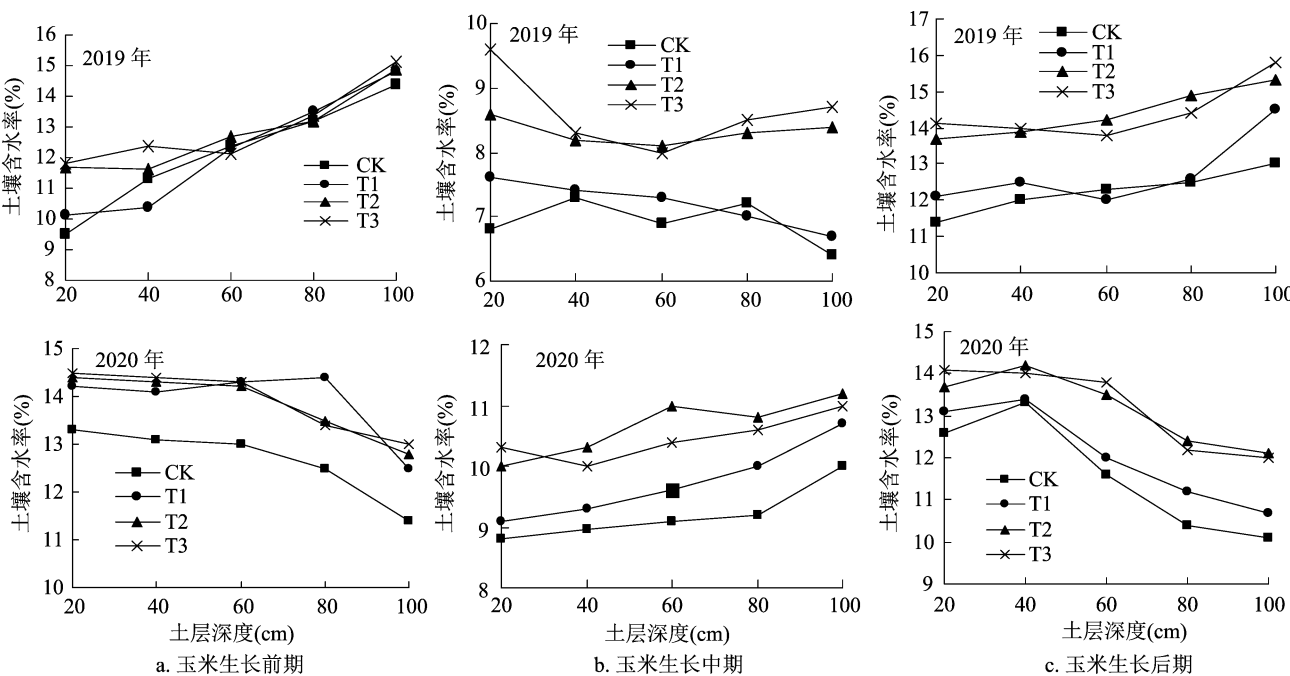


图4 不同理下 0~100 cm 土层土壤含水率变化

表 1 不同生物炭施用量对 0~40 cm 土层土壤肥力的影响

年份	处理	有机碳含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH 值
2019	处理前	4.03 ± 0.22c	27.15 ± 2.11d	10.87 ± 0.33d	110.62 ± 4.89d	7.68 ± 0.32c
	CK	4.01 ± 0.18c	27.32 ± 1.87c	11.05 ± 0.31c	110.98 ± 5.11d	7.66 ± 0.24d
	T <sub>1</sub>	4.46 ± 0.35b	32.51 ± 2.65b	14.89 ± 0.39b	156.62 ± 5.87c	7.70 ± 0.31bc
	T <sub>2</sub>	4.79 ± 0.41a	32.59 ± 2.43ab	15.25 ± 0.49a	171.32 ± 4.52b	7.71 ± 0.35ab
	T <sub>3</sub>	4.81 ± 0.44a	32.66 ± 2.72a	15.41 ± 0.44a	172.32 ± 5.26a	7.72 ± 0.28a
2020	CK	4.11 ± 0.24d	27.10 ± 1.84c	10.89 ± 0.21d	118.98 ± 4.76d	7.62 ± 0.15c
	T <sub>1</sub>	5.19 ± 0.31c	36.54 ± 3.25b	15.76 ± 0.52c	172.39 ± 6.32c	7.67 ± 0.23b
	T <sub>2</sub>	5.69 ± 0.51b	37.51 ± 3.31a	17.82 ± 0.42a	186.32 ± 7.89b	7.73 ± 0.37a
	T <sub>3</sub>	5.88 ± 0.55a	37.66 ± 3.27a	17.01 ± 0.56b	195.32 ± 7.21a	7.75 ± 0.34a

注:同列数据后不同小写字母表示同一年处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

增幅达 19.7%~38.7%,且显著高于 CK,但 T<sub>2</sub> 与 T<sub>3</sub> 处理间差异不显著。

由表 1 可知,施用生物炭可增加土壤(0~40 cm)有效磷和速效钾含量。2 年玉米成熟期,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理土壤有效磷和速效钾含量均显著高于处理前( $P < 0.05$ )。玉米成熟期有效磷含量 2019 年以 T<sub>3</sub> 处理最高,2020 年以 T<sub>2</sub> 处理最高。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理 2 年平均有效磷含量分别较 CK 增加 39.7%、50.7%、47.8%。2019 年 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理速效钾含量显著高于 CK( $P < 0.05$ ),以 T<sub>3</sub> 处理增幅最大,为 55.3%,其次为 T<sub>2</sub>、T<sub>1</sub> 处理;2020 年以 T<sub>3</sub> 处理增幅最大,为 64.2%,其次为 T<sub>2</sub> 和 T<sub>1</sub> 处理,增幅分别为 56.6%、44.9%;T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理 2 年平均速效钾含

量较 CK 分别增加了 43.0%、55.5%、59.8%。

由表 1 可知,使用生物炭可增加土壤(0~40 cm)pH 值。玉米成熟期,T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理土壤 pH 值均显著高于处理前( $P < 0.05$ ),T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理间差异未达到显著水平。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理 2 年平均 pH 值较 CK 分别增加了 0.59%、1.05% 和 1.25%。由以上可知,施用生物炭可以显著增加耕层(0~40 cm)土壤养分,提高土壤肥力,同时,施用生物炭可以提高土壤 pH 值。

2.4 施用生物炭对玉米产量以及水分利用效率的影响

不同生物炭施用量对玉米产量、耗水量和水分利用效率的影响不同。由表 2 可知,施用生物炭可

以增加玉米产量。2019 年 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理籽粒产量分别较 CK 增加 9.2%、13.8%、9.8%。2020 年 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理籽粒产量分别较 CK 增加 11.3%、17.4%、13.3%。综合 2 年试验结果,T<sub>2</sub> 处理 2 年平均产量最高,较 CK 增加了 15.6%。穗粒数和百粒质量是影响玉米籽粒产量的主要因子,2 年试验结果表明,T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理下玉米穗粒数显著高于 CK 和 T<sub>1</sub> 处理( $P<0.05$ );不同处理间百粒质量差异显著( $P<0.05$ ),2 年平均百粒质量表现为 T<sub>2</sub>>T<sub>1</sub>>CK>T<sub>3</sub>,T<sub>2</sub> 处理 2 年平均百粒质量较 CK 增加了 11.0%。2020 年降水量(506.9 mm)略高于 2019 年(462.2 mm),2020 年玉米耗水量明显高于 2019 年,

而且 2020 年玉米产量高于 2019 年,因此 2020 年玉米水分利用效率高于 2019 年。2019 年施用生物炭,玉米耗水量较对照显著增加( $P<0.05$ ),其中 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理玉米耗水量分别较 CK 增加 3.9%、5.0%、4.7%;2020 年各处理间玉米耗水量差异显著,其中 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理玉米耗水量分别较 CK 增加 3.4%、5.1%、4.3%;T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理 2 年平均耗水量分别较 CK 分别增加 3.7%、5.1%、4.5%。不同处理间水分利用效率差异显著( $P<0.05$ ),2 年玉米水分利用效率均以 T<sub>2</sub> 处理最高,分别较 CK 增加 23.1%(2019 年)和 25.2%(2020 年)。

表 2 不同生物炭施用量对玉米产量以及水分利用效率的影响

年份	处理	籽粒产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)	百粒质量 (g)	耗水量 (mm)	水分利用效率 [kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)]
2019	CK	10 839.6±411.8d	575.3±13.2d	31.1±2.9c	555.6±16.1c	18.6±3.1d
	T <sub>1</sub>	11 834.6±456.8c	584.6±10.3c	32.2±3.5b	577.3±15.2b	20.2±2.1c
	T <sub>2</sub>	12 334.2±512.9a	631.2±18.6b	34.3±3.3a	583.2±18.3a	22.9±3.6a
	T <sub>3</sub>	11 900.9±408.9b	633.8±20.7a	30.5±1.8d	581.6±11.8a	21.5±2.4b
2020	CK	10 765.8±400.8d	563.7±11.7c	31.6±2.2c	682.3±27.3d	22.6±2.7d
	T <sub>1</sub>	11 982.6±478.9c	596.7±14.3b	32.8±2.9b	705.3±29.1c	23.4±2.1c
	T <sub>2</sub>	12 634.2±532.6a	644.9±22.9a	35.3±3.8a	717.2±33.6a	28.3±3.6a
	T <sub>3</sub>	12 200.3±511.2b	645.3±26.2a	31.3±1.9d	711.6±30.4b	26.3±2.4b

3 结论

(1)生物炭的施入可以提高玉米田土壤呼吸速率,以施用量 12 000 kg/hm<sup>2</sup> 最为明显;同时,施用生物炭可以提高耕层土壤的含水率以及玉米水分利用效率。

(2)生物炭的施入可以提高土壤碱解氮、速效钾、有机碳含量,增加土壤的 pH 值,以施用量 12 000 kg/hm<sup>2</sup> 最为显著。

(3)生物炭的施入可以增加玉米产量,以施用量 7 000 kg/hm<sup>2</sup> 最为显著,过高的生物炭施用量不利于玉米产量形成,因此生产上要根据作物种类、土壤类型、耕作方式等选择适宜的生物炭施用量。

参考文献:

[1]高惠敏,王相平,屈忠义,等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. 土壤通报,2020,51(5):1172-1179.

[2]侯新村,胡艳霞,孙宇,等. 生物炭添加对滨海盐土柳枝稷生长的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(1):31-37.

[3]牛同旭,郑桂萍,姜玉伟,等. 生物炭对粳梗 5 号产量及品质的影响[J]. 中国稻米,2018,24(6):76-79.

[4]李少朋,陈咄圳,周艺艺,等. 生物炭施用对滨海盐碱土速效养分和酶活性的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(7):1460-1465.

[5]张云舒,唐光木,葛春辉,等. 生物炭对灌耕风沙土土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(6):180-183.

[6]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.

[7]阚正荣,濮超,祁剑英,等. 施用生物炭对华北平原冬小麦土壤水分和籽粒产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(4):1-10.

[8]王义祥,黄家庆,叶菁,等. 生物炭对酸化茶园土壤性状和细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):1967-1977.

[9]何秀峰,赵丰云,于坤,等. 生物炭对葡萄幼苗根际土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):19-26.

[10]黄兆琴,周强,胡林潮,等. 生物炭添加对土壤腐殖物质组成的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(24):285-288.

[11]张娜,李佳,刘学欢,等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(8):1569-1574.

[12]陈进斌,周嘉聪,林勇. 生物炭添加对土壤呼吸和有机碳含量的影响[J]. 广西植物,2014,34(6):788-792.

[13]侯亚红,王磊,付小花,等. 土壤呼吸对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其微生物机制[J]. 工业微生物,2014,44(5):7-13.

[14]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.