

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.031

黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响

魏永霞^{1,2} 石国新¹ 冯超¹ 吴昱^{3,4} 刘慧^{2,5}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090;

4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明黑土区施加生物炭对土壤持水性能、土壤养分以及大豆生长的影响,以东北黑土区 3°坡耕地田间径流小区为研究对象,进行为期 4 年的观测。按照生物炭施加量,2015 年共设置 C0(0 t/hm²)、C25(25 t/hm²)、C50(50 t/hm²)、C75(75 t/hm²)、C100(100 t/hm²)5 个处理,2016—2018 年分别连续施加等量的生物炭。结果表明:连续 4 年,0~60 cm 土层土壤储水量随施炭量的增加呈先增大、后减小的趋势,而对 60~100 cm 土层土壤储水量影响不显著;连续 4 年,饱和含水率随施炭量的增加呈逐渐增大的趋势;2015 年田间持水率、凋萎系数随施炭量的增加呈逐渐增大趋势,2016—2018 年呈先增加、后减小趋势;连续 4 年,施加生物炭提高了大豆各生育阶段的株高和叶面积,同期相对较优处理分别为 C75、C50、C50、C25;连续 4 年,大豆冠层覆盖度与施炭量呈抛物线变化(R^2 均在 0.89 以上, $P < 0.01$),连续施加 2 年的 C50 处理各生育期提高量最大,与 C0 相比提高了 81.4%、36.7%、31.5% 和 39.6%;连续 4 年,土壤 pH 值和有机质、速效钾含量随施炭量的增加呈逐渐升高趋势,碱解氮、有效磷含量呈先升高、后降低趋势,相对较优处理为 C50、C50、C25、C25。采用改进的内梅罗指数模型计算的土壤综合肥力指数与产量呈正相关($R^2 = 0.8615$, $P = 0.0012$, RMSE 为 0.75),土壤综合肥力水平最高的生物炭施用模式为连续 2 年施加 50 t/hm² 的生物炭。

关键词: 大豆; 生物炭; 土壤储水量; 大豆冠层覆盖度; 改进的内梅罗指数; 土壤综合肥力指数

中图分类号: S157.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)05-0285-10

OSID:



Effects of Applying Biochar on Soil Comprehensive Fertility and Soybean Growth in Black Soil Area

WEI Yongxia^{1,2} SHI Guoxin¹ FENG Chao¹ WU Yu^{3,4} LIU Hui^{2,5}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China

4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

5. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effects of biochar on soil water retention, soil nutrients and soybean growth in the black soil area, a four-year observation experiment was conducted on the runoff plot of 3° sloping farmland in the northeast black soil area. In 2015, C0 (0 t/hm²), C25 (25 t/hm²), C50 (50 t/hm²), C75 (75 t/hm²), and C100 (100 t/hm²) were set according to the amount of biochar applied. For each treatment, the same amount of biochar was continuously applied in 2016, 2017 and 2018. The results showed that the soil water storage in the 0~60 cm soil layer was increased and then decreased with the increase of carbon loading for four consecutive years, but the effect on water storage

收稿日期: 2019-09-10 修回日期: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

作者简介: 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

capacity in 60 ~ 100 cm soil layer was not significant. The saturated water content was increased gradually with the increase of carbon application. In 2015, the water holding capacity and the coefficient of wilting was increased gradually with the increase of carbon application. The growth rate was decreased first and then decreased from 2016 to 2018; applying biochar for four consecutive years increased the plant height and leaf area of soybean growth stages. The optimal treatments were C75, C50, C50 and C25 respectively; the canopy coverage and charcoal content of the four consecutive years showed a parabola change ($R^2 > 0.89$, $P < 0.01$). The continuous increase of C50 treatment for two years had the largest increase in each growth period, which was 81.4%, 36.7%, 31.5% and 39.6% higher than that of C0. The soil pH value, organic matter and available potassium content were increased gradually with the increase of carbon application for four consecutive years. The alkali nitrogen and available phosphorus were increased first and then decreased. The relatively better four-year treatments were C50, C50, C25 and C25. The comprehensive fertility index calculated by the improved Nemerow index model was positively correlated with yield ($R^2 = 0.8615$, $P = 0.0012$, RMSE was 0.75). The biochar application mode with the highest level of soil comprehensive fertility was summarized, that was, 50 t/hm² of biochar applied for two consecutive years. The research result can provide a theoretical basis for the application of biochar in the black soil region.

Key words: soybean; biochar; soil water storage; soybean canopy coverage; improved Nemerow index; soil comprehensive fertility index

0 引言

东北黑土区作为粮食生产的重要基地,其粮食年产量约占全国的1/5^[1]。近年来,由于水土流失及秸秆资源不合理利用,导致土壤肥力降低、水分利用效率低下、农作物产量降低^[2]。因此,对黑土资源进行综合高效治理、提高水分利用效率已迫在眉睫。黑土区秸秆资源丰富,每年大量的秸秆焚烧导致黑龙江省雾霾天气较为严重,研究秸秆资源的高效利用对探索黑土资源的高效利用与保护具有重要意义。

生物炭是以作物秸秆、动物粪便为原材料,在缺氧或低氧条件下缓慢高温裂解获得的一类富含碳的有机质^[3]。生物炭在农业上的应用比较广泛。在土壤理化性质方面,土壤中施加生物炭可以减小土壤容重^[4]、提高土壤孔隙度^[5],改善土壤结构,改善田间小气候^[6-8];在节水增产方面,施加生物炭可以增加水分利用效率^[9],提高产量,增大叶面积指数^[10-12];在持水性能方面,施加生物炭可以提高土壤水分含量^[13]和土壤储水量^[14],提高田间持水率和饱和含水率^[15-16];在土壤肥力方面,施加生物炭可以提高土壤养分,增加土壤有机质含量,进而促进作物生长发育,提高产量^[11,17-19]。

生物炭表面带有亲水基团,具有持水性,大多研究认为,生物炭具有的持水性能是因为自身结构。然而生物炭的持水作用不仅与其本身有关,亦与施加量和施用年限有一定相关性^[9-10]。当施加量过高时,生物炭的持水性能减弱,使用年限过长持水性能也会下降。目前,绝大多数研究都是以短期施加

生物炭为背景研究生物炭对持水性能的影响,而对于中长期的生物炭效应尚不明晰。本研究以连续4年施加生物炭为背景,研究施加生物炭后土壤水分常数、土壤养分和大豆各生育期的株高及叶面积指数等效应指标的变化规律,通过建立改进的内梅罗指数模型计算土壤综合肥力指数,以确定对提高土壤综合肥力水平效果最优的生物炭施用模式,并用产量进行验证,以期对黑土区施加生物炭提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省北安市(48°2'~48°17'N, 126°47'~127°15'E),属于寒温带大陆性气候。全年平均降水量555.3 mm,降雨集中在7—9月,约占全年90%。积温2254.5℃,无霜期110~115 d。耕地多为丘陵漫岗,土质肥沃,地势由东向西倾斜,岗顶平缓,坡面较长,坡度为3°~5°。土壤为草甸黑土,土壤疏松、通透性好,但水土流失严重,黑土层厚度薄,土壤结构恶化。主要农作物为大豆、玉米、水稻。

1.2 试验设计

试验于2015—2018年在北安市红星农场坡度为3°的径流小区进行。小区规格20 m×5 m,每两个小区间隔1 m。为了防止侧渗,各小区边界用深入地下1 m的铁板隔开。每个小区埋设TDR管,埋深1.8 m。小区末端设有径流自动记录系统和泥沙收集系统(BLJW-ZXY型),自动记录后的径流排入区外排水沟。试验共设5个处理,即不加生物炭

的常规处理 C0(对照处理),和生物炭施加量分别为 C25(25 t/hm²)、C50(50 t/hm²)、C75(75 t/hm²)、C100(100 t/hm²)的处理,2次重复,共计10个径流小区。试验开始前将生物炭均匀铺撒于土壤表面并反复搅拌,使其与表层土壤(0~20 cm 土层)混合均匀。试验连续4年种植大豆。2016—2018年分别在上一年试验的基础上加入等量的生物炭,并做相同的处理。

供试土壤为草甸黑土,理化性质为 pH 值 6.3,有机质质量比 34.83 g/kg,全氮质量比 1.1 g/kg,全磷质量比 0.45 g/kg,全钾质量比 0.35 g/kg。供试大豆品种为黑河三号。供试玉米秸秆生物炭购于辽宁金和福农业开发有限公司,制备方式为无氧条件 450℃ 高温裂解,基粒径 1.5~2.0 mm,生物炭性质为 pH 值为 9.14,全碳质量比为 0.70 mg/kg,全氮质量比为 1.53 mg/kg,硫质量比为 0.78 mg/kg,钾质量比为 1.68 mg/kg,灰分质量分数为 31.8%。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤储水量

连续4年在大豆的各生育阶段采用 TDR 测量土壤深度 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 的土壤含水率,每个土层重复测量3次,计算土壤储水量^[20],公式为

$$W = \frac{\theta_m \rho_b h}{\rho_w} \quad (1)$$

式中 W ——土壤储水量,mm
 θ_m ——土壤体积含水率,%
 ρ_b ——土壤容重,g/cm³
 h ——土层厚度,mm
 ρ_w ——水密度,g/cm³

0~100 cm 土层储水量为每层土壤储水量之和。

1.3.2 土壤水分常数

于大豆收获期每个小区选取2个取样点(共4次重复),田间持水率和饱和含水率采用室内环刀法测定;凋萎系数采用生物法测定。

1.3.3 大豆株高、叶面积指数和冠层覆盖度

分别在大豆各生育阶段每小区选择长势相同5株大豆挂牌定株,采用卷尺测量每片叶子的宽和长(叶片最宽、最长处),计算单株叶面积、叶面积指数^[21]和冠层覆盖度,公式分别为

$$LAI = 0.0001 \rho L_A \quad (2)$$

$$\text{其中 } L_A = \sum_{k=1}^m a L_k W_k \quad (3)$$

$$C_c = 1.005(1 - \exp(-0.6LAI))^{1.2} \quad (4)$$

式中 L_A ——单株叶面积,cm²
 L_k ——第 K 片叶子的长度,cm

W_k ——第 K 片叶子的宽度,cm

a ——叶面积回归系数,取 0.75

LAI ——叶面积指数

ρ ——种植密度,株/cm²

C_c ——冠层覆盖度

1.3.4 土壤肥力

于大豆收获期末取耕层(0~20 cm)土壤测定土壤养分含量。每个处理随机取样3次。土壤 pH 值采用 PHS-3C 型酸度计测定;碱解氮含量使用碱解扩散法测定;有效磷含量采用 Olsen 法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定。

1.3.5 土壤综合肥力

内梅罗指数是一种兼顾极值或突出最大值的多因子环境质量指数,是国内外进行综合污染指数计算的常用方法之一,常用于计算空气、水质及土壤重金属等综合污染指数^[22]。内梅罗指数是由单因子指数演化而来,传统的内梅罗指数公式为

$$P_{total} = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{imax}^2}{2}} \quad (5)$$

$$\text{其中 } P_{imax} = \max(c_i / y_{ij}) \quad (6)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{y_{ij}}}{n} \quad (7)$$

式中 P_{total} ——土壤综合肥力指数
 P_{imax} ——第 i 个肥力指标标准值的最大值
 \bar{P} ——各项肥力指标标准值的平均值
 c_i ——第 i 个肥力指标的实测值
 y_{ij} ——第 i 个肥力指标在 j 种标准下的标准值,具体分级标准见文献[23]

传统的内梅罗指数计算土壤综合肥力指数时,在计算 P_{imax} 和 \bar{P} 时,采用第 i 个肥力指标标准值的最大值和标准值的平均值,但由于不同土壤肥力指标之间存在一定的影响以及土壤肥力各指标对土壤的影响不同,会对计算结果造成一定的影响。为解决上述问题,对内梅罗指数进行一定的改进。

(1)采用熵权法和相关系数法^[24-25]加权平均计算的平均值代替各肥力指标标准值的平均值,设熵权法和相关系数法确定各肥力指标的权重为 w 和 v ,则二者平均权重及加权计算平均值为

$$w' = \frac{w + v}{2} \quad (8)$$

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^n w' p_i \quad (9)$$

式中 \bar{p} ——熵权法和相关系数法加权计算的平均值

w'_i ——熵权法和相关系数法加权平均权重

p_i ——单项值平均值

(2)采用权重 w' 最大的肥力指标的标准值和传统法确定的各肥力指标标准值最大值的平均值计算式为

$$p'_{imax} = \frac{p_{imax} + p_w}{2} \quad (10)$$

式中 p_w ——采用权重 w' 最大的肥力指标的标准值

则土壤综合肥力指数为

$$P_{total} = \sqrt{\frac{p'^2 + p'^2_{imax}}{2}} \quad (11)$$

1.4 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.5 对数据进行处理与绘图,并对产量和土壤综合肥力指数进行回归分析。采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析, LSD 法进行多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤储水量的影响

表 1 为连续 4 年施加生物炭后 0~100 cm 土层土壤储水能力。由表 1 可知,连续 4 年各生育阶段 0~60 cm 土壤储水量均随施炭量的增加呈先升高后降低的趋势,2015 年各生育阶段各处理均在 C75 处理最大,施加生物炭各处理与 C0 相比均达到显著性差异 ($P < 0.05$),2016、2017 年各生育阶段均在 C50 处理土壤储水量提高最多,差异均显著 ($P < 0.05$),2018 年 C25 处理为各生育阶段土壤储水量提高量最大的处理,而 C100 处理各生育阶段土壤储水量均低于 C0 处理,降低率为 3%、8.5%、5.2%、6.7%,未达到显著水平 ($P > 0.05$)。连续 4 年各生育阶段 60~100 cm 土壤储水量没有明显的变化规律。综合 4 年试验分析,施用生物炭主要影响了 0~60 cm 土层的土壤储水量,且在第 2 年施加

表 1 2015—2018 年 0~100 cm 土层土壤储水量

Tab.1 Soil water storage in 0~100 cm of soil layer from 2015 to 2018

mm

生育阶段	处理	0~60 cm				60~100 cm			
		2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
苗期	C0	142.2 ^c	132.1 ^c	138.5 ^c	134.1 ^c	94.8 ^{ab}	96.2 ^a	78.6 ^b	86.3 ^b
	C25	171.3 ^b	172.7 ^b	182.3 ^b	222.4 ^a	96.5 ^{ab}	84.2 ^{ab}	70.8 ^{bc}	89.8 ^b
	C50	200.5 ^{ab}	225.9 ^a	226.5 ^a	204.8 ^b	101.3 ^a	80.6 ^b	81.3 ^{ab}	94.2 ^b
	C75	223.6 ^a	213.7 ^b	211.9 ^{ab}	164.7 ^b	97.2 ^a	92.3 ^a	94.2 ^a	101.7 ^a
	C100	201.4 ^{ab}	211.5 ^b	196.4 ^b	130.1 ^c	95.6 ^{ab}	116.2 ^a	96.5 ^a	82.5 ^{bc}
分枝期	C0	145.4 ^c	147.9 ^c	156.5 ^c	154.4 ^c	93.5 ^{ab}	122.3 ^a	95.6 ^{ab}	92.4 ^{ab}
	C25	177.7 ^b	179.8 ^b	193.6 ^b	216.7 ^a	101.8 ^a	101.1 ^b	97.2 ^{ab}	94.3 ^a
	C50	213.7 ^{ab}	239.5 ^a	226.4 ^a	193.1 ^b	96.5 ^{ab}	91.8 ^{bc}	81.3 ^b	88.9 ^b
	C75	232.2 ^a	224.4 ^{ab}	211.4 ^{ab}	166.3 ^b	111.2 ^a	93.7 ^{bc}	95.2 ^{ab}	85.2 ^b
	C100	191.1 ^b	212.8 ^b	191.1 ^b	141.2 ^c	96.5 ^{ab}	97.6 ^c	106.4 ^a	92.2 ^{ab}
开花结荚期	C0	151.4 ^c	143.6 ^c	151.5 ^c	156.7 ^c	94.3 ^{ab}	90.3 ^c	105.3 ^a	88.6 ^b
	C25	194.7 ^b	171.7 ^b	191.4 ^b	223.7 ^a	95.6 ^{ab}	88.9 ^c	96.2 ^{ab}	89.6 ^b
	C50	221.4 ^b	230.1 ^a	235.3 ^a	191.4 ^b	103.2 ^a	101.5 ^{ab}	94.2 ^{ab}	94.2 ^a
	C75	236.6 ^a	221.4 ^{ab}	213.1 ^{ab}	171.6 ^{bc}	114.1 ^a	106.5 ^{ab}	92.3 ^{ab}	85.3 ^b
	C100	225.6 ^{ab}	210.2 ^b	164.8 ^{bc}	148.9 ^c	103.2 ^{ab}	121.2 ^a	88.1 ^b	95.2 ^a
鼓粒期	C0	145.3 ^c	134.7 ^c	143.4 ^c	144.8 ^c	84.1 ^{ab}	105.1 ^a	88.6 ^b	80.3 ^c
	C25	176.2 ^b	190.3 ^b	179.4 ^b	216.1 ^a	100.5 ^a	94.3 ^{ab}	84.2 ^{ab}	101.6 ^a
	C50	201.4 ^b	224.7 ^a	224.1 ^a	161.7 ^b	102.8 ^a	91.3 ^{ab}	103.2 ^a	92.8 ^b
	C75	224.8 ^a	209.8 ^b	203.0 ^b	151.4 ^{bc}	106.3 ^a	88.6 ^b	101.4 ^a	82.3 ^c
	C100	194.7 ^b	189.7 ^b	166.6 ^{bc}	135.1 ^c	98.2 ^a	85.2 ^c	92.1 ^{ab}	91.5 ^b

注:表中所有数据均是各处理重复的均值($n=6$),同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

50 t/hm²的生物炭对 0~60 cm 土层土壤储水量提高效果最优,苗期、分枝期、开花结荚期、鼓粒期较 C0 处理分别提高 71%、61.9%、60.2% 和 66.8%,而过高的施炭量蓄水保水效果减弱。

2.2 施加生物炭对土壤水分常数的影响

表 2(表中土壤水分常数均为质量含水率)为连

续施加 4 年生物炭后,土壤持水性指标的变化规律。连续 4 年饱和含水率均随施炭量的增加呈逐渐增加的趋势,与同年 C0 处理相比差异均显著 ($P < 0.05$),最高提高了 43.63%。4 年田间持水率与凋萎系数呈相同的变化趋势,其中 2015 年田间持水率随施炭量的增加呈逐渐增加的趋势,施加生物炭各

处理与 C0 相比均达到显著性差异 ($P < 0.05$), 2016—2018 年呈先增大后减小的趋势, 相对较优处理分别为 C50、C50 和 C25, 较同年 C0 处理分别提高了 11.34%、8.67% 和 7.91%, 差异均达显著性水平 ($P < 0.05$)。另一方面, 2018 年 C100 处理田间

持水率和凋萎系数均低于对照处理, 降低了 3.7% 和 4.1%, 与 C0 相比差异不显著 ($P > 0.05$)。由此可见, 不同的施炭量和施用年限对土壤持水性能的影响不同, 过高的施炭量会使土壤持水性能减弱, 甚至当累积施炭量过高时会产生负效应。

表 2 2015—2018 年土壤水分常数指标

Tab.2 Soil water constant index from 2015 to 2018

%

处理	田间持水率				饱和含水率				凋萎系数			
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
C0	32.81 ^c	32.64 ^c	33.35 ^c	33.23 ^c	42.82 ^c	42.03 ^c	42.29 ^c	42.47 ^c	10.85 ^c	11.26 ^c	11.32 ^c	11.51 ^c
C25	33.43 ^b	34.78 ^b	36.09 ^a	35.86 ^a	44.93 ^b	47.54 ^b	50.40 ^b	51.38 ^b	10.88 ^b	11.98 ^b	12.44 ^a	12.58 ^a
C50	34.26 ^b	36.34 ^a	36.24 ^a	34.76 ^b	47.17 ^b	52.13 ^b	53.80 ^b	54.96 ^b	11.21 ^a	12.58 ^a	12.49 ^a	11.98 ^a
C75	35.13 ^a	35.27 ^{ab}	34.22 ^b	34.23 ^b	47.72 ^b	55.23 ^a	57.82 ^a	58.36 ^a	11.49 ^a	12.16 ^{ab}	11.80 ^b	11.80 ^b
C100	35.48 ^a	34.39 ^b	33.5 ^{bc}	32.00 ^c	51.38 ^a	56.78 ^a	59.93 ^a	61.00 ^a	12.01 ^a	11.85 ^b	11.55 ^b	11.03 ^c

2.3 施加生物炭对大豆生长动态的影响

2.3.1 施加生物炭对大豆株高和叶面积的影响

图 1(图中不同小写字母表示同一处理不同生育期差异显著 ($P < 0.05$)) 为 2015—2018 年大豆各生育阶段株高和叶面积指数 (LAI)。由图 1 可知, 施加生物炭对大豆株高和叶面积指数有一定的影响。2015 年苗期在 C75 处理株高最高, 较 C0 处理高 8%, 其他处理株高由高到低依次为 C50、C25、C100, 较 C0 处理分别提高了 4.8%、3.2% 和 1.6%, 均未达到显著差异水平 ($P > 0.05$)。分枝期、开花结荚期、鼓粒期也均在 C75 处理株高达到最高, 与 C0 相比分别提高了 46.1%、36.2% 和 26.4%, 差异显著 ($P < 0.05$), 其他施加生物炭各处理与 C0 处理相比均达显著性差异 (开花结荚期除外), 但开花结

荚期和鼓粒期 C100 处理较 C0 处理降低了 10% ($P > 0.05$) 和 12.2% ($P < 0.05$)。2016—2017 年与 2015 年的变化规律大体相同, 但在 C50 处理大豆各生育阶段的株高最高, 各生育阶段的 C25 处理较 C0 处理提高了 5.7%、38.5%、20.1% 和 16.8%, 同时在分枝期开始, C100 处理低于 C0 处理。由图 1 可知, 大豆叶面积指数与株高随施炭量的变化规律相同, 连续 4 年叶面积指数随施炭量的增加呈倒“L”形, 2015 年 C75 处理曲线处于最高, 2016、2017 年 C50 处理曲线处于最高, 而 2018 年 C25 处理曲线处于最高。综上分析可知, 适量的生物炭会提高大豆株高和叶面积指数, 而施炭量过高或累积施炭量过高均会使株高降低, 叶面积指数变小。

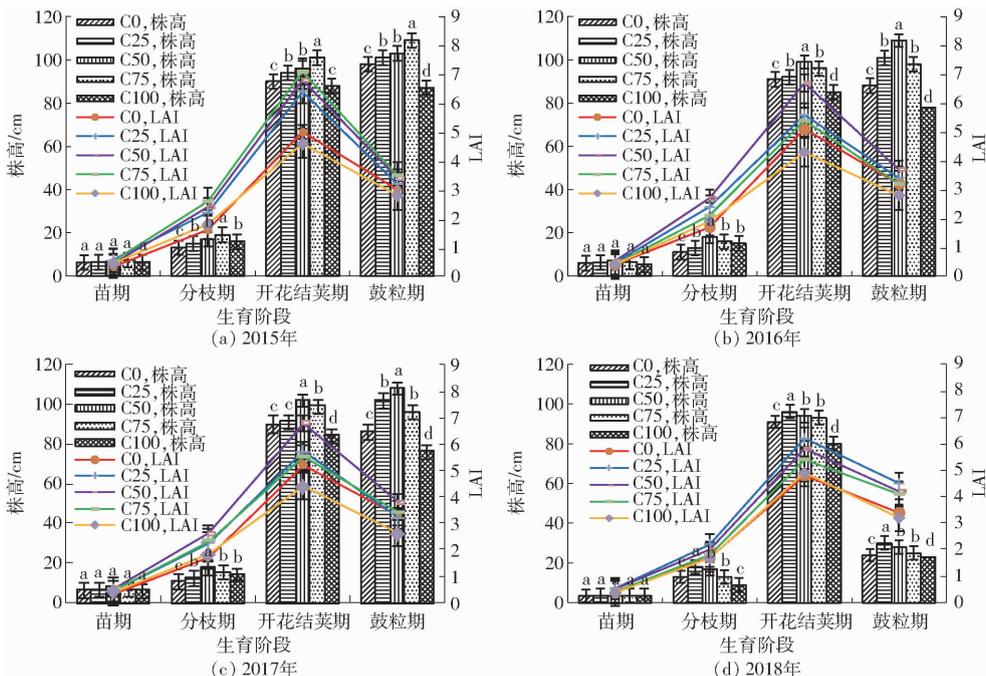


图 1 2015—2018 年大豆株高和叶面积指数

Fig. 1 Plant height and LAI of soybean from 2015 to 2018

2.3.2 施加生物炭对冠层覆盖度的影响

图2为不同施炭量和施用年限下大豆的冠层覆盖度。由图2可知,连续4年施加生物炭对大豆冠层覆盖度有一定的影响。2015年各生育阶段大豆的冠层覆盖度均随施炭量的增加呈先增加后减小抛物线变化(R^2 均在0.93以上, P 均小于0.01),其中各生育阶段均以C75处理最大,苗期、分枝期、开花结荚期和鼓粒期分别较C0处理增长了33.3%、36.3%、21.8%和21.5%。2016、2017年大豆冠层覆盖度随施炭量的变化也呈先增后减的抛物线(R^2 均在0.91以上, $P < 0.01$)变化,各生育阶段均在C50处理冠层覆盖度最大;各生育阶段中大豆冠层

覆盖度均在开花结荚期变化幅度最大。2018年大豆冠层覆盖度变化规律与前3年相同(R^2 均在0.89以上, $P < 0.01$),各生育阶段均在C25处理冠层覆盖度最大,与C0相比分别提高了43.8%、30.6%、30.9%和38.1%,但各生育阶段的C100处理均低于C0处理,降低率为3.2%、2.7%、5.3%和9.5%。对比4年试验数据分析,连续施加2年50 t/hm²的生物炭对各个生育阶段大豆冠层覆盖度的影响最大,与C0相比提高了81.4%、36.7%、31.5%、39.6%,由此可知,施加适量的生物炭可有效地提高大豆冠层覆盖度,而过高的施炭量或累积施炭量过高均会使冠层覆盖度减小。

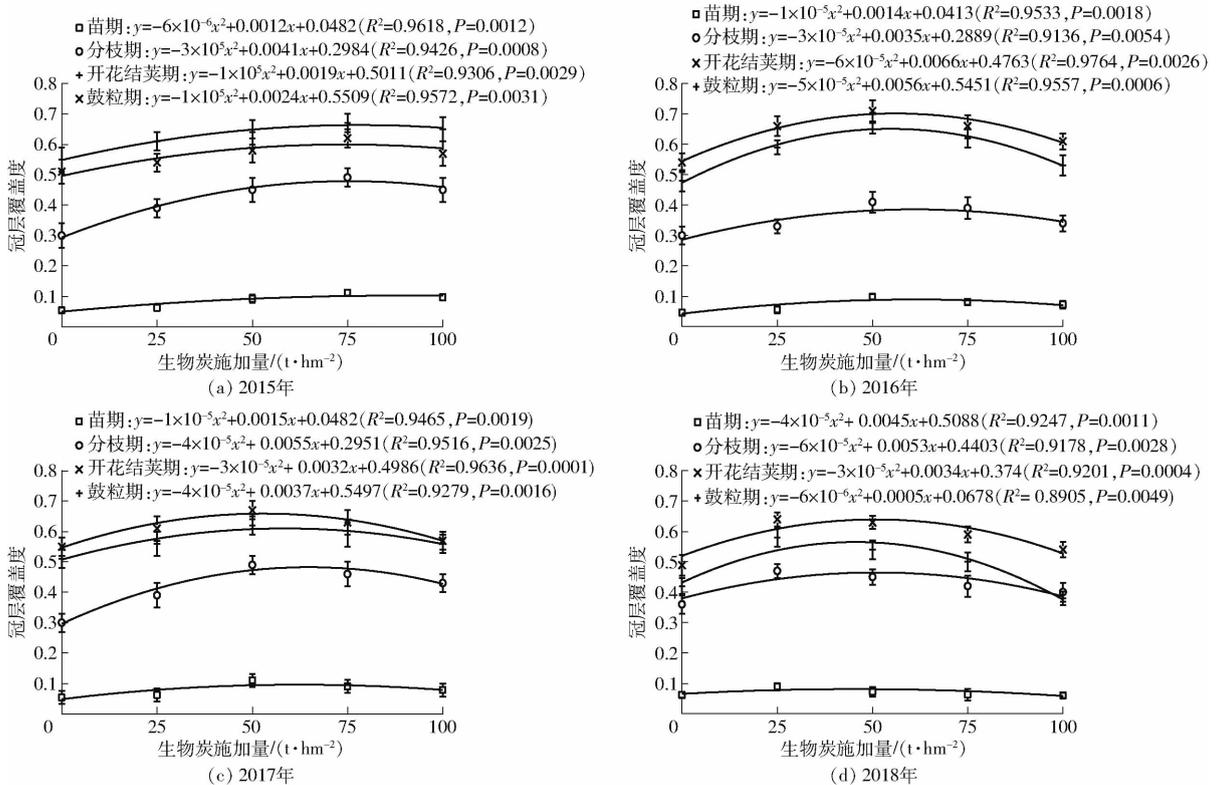


图2 2015—2018年大豆冠层覆盖度

Fig. 2 Canopy coverage of soybean from 2015 to 2018

2.4 施加生物炭对土壤肥力的影响

2.4.1 施加生物炭对土壤养分的影响

表3为连续4年施加生物炭的土壤养分指标及方差分析。由表可知,连续4年土壤pH值和有机质、速效钾含量随施炭量的增加呈逐渐升高的趋势,且随着年限的增加增长的速率加快。土壤碱解氮、有效磷含量随施炭量的增加均呈先升高后降低趋势,2015、2016年在C50处理土壤碱解氮和有效磷提高最多,2017、2018年在C25处理提高效果最好,但2017、2018年的C100处理土壤碱解氮、有效磷含量均低于对照处理4.5%、7.3%和10.8%、9.5%,差异不显著($P > 0.05$)。综上分析,施加生物炭会提高土壤pH值,土壤有机质和速效钾含量,施加适

量的生物炭会提高碱解氮和有效磷含量,而施炭量过高或累积施炭量过高均会导致碱解氮和有效磷含量降低。由表亦可知,施炭量和施用年限对土壤pH值和有机质、碱解氮、速效钾含量均有极显著的影响($P < 0.01$),施炭量对有效磷含量也有极显著的影响($P < 0.01$),但施用年限对有效磷含量影响不显著($P > 0.05$)。另外,施炭量和施用年限的交互作用对土壤养分各指标均有极显著的影响($P < 0.01$)。

2.4.2 土壤综合肥力分析

选取连续4年5个施炭量水平下土壤有机质质量比($X_1, \text{g/kg}$)、碱解氮质量比($X_2, \text{mg/kg}$)、有效磷质量比($X_3, \text{mg/kg}$)、速效钾质量比($X_4, \text{mg/kg}$)、pH

表 3 2015—2018 年土壤肥力指标及方差分析

Tab.3 Soil fertility index and variance analysis

from 2015 to 2018

年份	处理	pH 值	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾
			质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)
2015	C0	6.3 ^c	44.0 ^c	185.2 ^c	15.4 ^c	160 ^c
	C25	6.6 ^b	76.0 ^b	234.8 ^b	18.9 ^b	172 ^b
	C50	6.9 ^b	107.0 ^{ab}	270.6 ^a	27.2 ^a	175 ^b
	C75	7.2 ^{ab}	132.0 ^{ab}	268.9 ^b	24.2 ^b	186 ^a
	C100	7.5 ^a	135.0 ^a	209.4 ^c	21.5 ^b	188 ^a
2016	C0	6.8 ^c	46.0 ^c	216.7 ^c	16.4 ^c	162 ^c
	C25	7.2 ^b	81.0 ^b	240.5 ^b	24.6 ^b	207 ^b
	C50	7.6 ^b	109.0 ^b	317.4 ^a	30.4 ^a	221 ^b
	C75	7.7 ^{ab}	133.0 ^a	301.4 ^b	25.3 ^b	228 ^b
	C100	7.9 ^a	137.0 ^a	241.1 ^{bc}	16.7 ^c	235 ^a
2017	C0	6.4 ^c	52.0 ^c	207.3 ^c	13.7 ^c	175 ^c
	C25	7.4 ^b	83.0 ^b	275.8 ^a	27.5 ^a	213 ^b
	C50	7.8 ^b	117.0 ^b	250.6 ^b	25.7 ^b	232 ^b
	C75	7.8 ^b	136.0 ^a	219.9 ^{bc}	14.4 ^c	239 ^b
	C100	8.1 ^a	138.0 ^a	197.9 ^c	12.7 ^c	260 ^a
2018	C0	6.3 ^c	53.0 ^c	204.6 ^c	12.6 ^c	177 ^c
	C25	7.2 ^b	84.2 ^b	253.4 ^a	25.6 ^a	221 ^b
	C50	7.7 ^b	122.0 ^b	241.2 ^b	24.2 ^b	243 ^b
	C75	7.8 ^b	137.0 ^a	211.6 ^{bc}	13.8 ^c	254 ^b
	C100	8.2 ^a	142.0 ^a	182.5 ^c	11.4 ^c	271 ^a

双因素方差分析					
施炭量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
年份	<0.01	<0.01	<0.01	0.195	<0.01
施炭量 × 年份	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

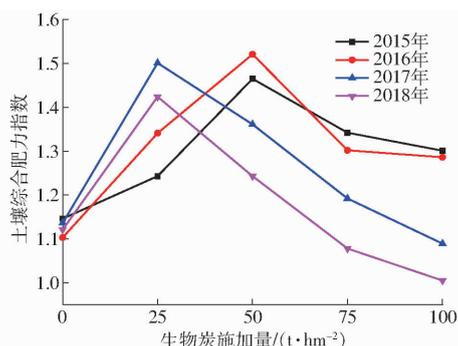


图 3 土壤综合肥力指数变化曲线

Fig.3 Changing curves of soil fertility index

表可知,土壤 pH 值和有机质、速效钾含量与大豆产量有显著的相关性,土壤碱解氮、有效磷含量与大豆产量有极显著的相关性。因而,不同施炭量对土壤肥力的影响可能是大豆产量变化的原因。已有大量研究表明,土壤肥力是影响产量的关键因素^[26]。为验证计算的土壤综合肥力指数,将产量与土壤综合肥力指数进行回归分析(图 4),经过回归分析可知,产量与肥力综合指数呈良好的线性关系。由此可知,连续施加 2 年 50 t/hm² 的生物炭土壤中土壤养分处于平衡状态,此时产量最大。

表 5 2015—2018 年土壤肥力各指标与产量的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient between soil fertility index and yield from 2015 to 2018

指标	pH 值	有机质 含量	碱解氮 含量	有效磷 含量	速效钾 含量
相关系数	0.633 2 *	0.645 3 *	0.899 2 **	0.922 6 **	0.661 8 *

注: **表示在 0.01 水平上显著, * 表示在 0.05 水平上显著。

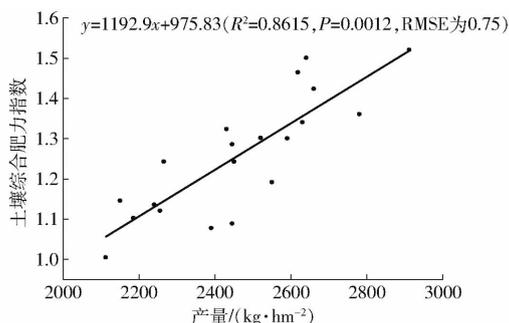


图 4 产量与土壤综合肥力指数回归分析

Fig.4 Regression analysis of yield and soil fertility index

值(X_5)为肥力指标,采用改进的内梅罗指数法对土壤综合肥力指数进行计算,其中熵权法、相关系数法以及二者加权平均计算肥力指标的权重如表 4 所示,计算的综合指数如图 3 所示。由图 3 可知,连续 4 年土壤综合肥力指数均呈先升高后降低的趋势,2015、2016 年在 C50 处理最大,2017、2018 年在 C25 处理最大,而 2018 年 C75、C100 处理的土壤综合肥力指数最小,低于同年的对照处理,对比 4 年结果可知,连续施加 2 年 50 t/hm² 的生物炭土壤综合肥力水平最好,此时土壤中养分均处于适中状态,最有利于大豆生长。

表 4 肥力指标权重

Tab.4 Weight coefficient of evaluation index

方法	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
熵权法	0.234	0.192	0.221	0.181	0.172
相关系数法	0.232	0.184	0.215	0.191	0.178
二者加权平均	0.233	0.188	0.218	0.186	0.175

2.4.3 土壤肥力指数计算验证

表 5 为土壤养分各指标与产量的相关系数。由

3 讨论

生物炭由于自身疏松多孔,有较强的吸附能力和保水性,施入土壤后可改善土壤结构,增加土壤水分^[27]。本试验结果显示,连续 4 年施加生物炭后,可以增加 0~60 cm 土层的土壤储水量,但施炭量过高或累积施炭量过高会导致储水量下降,在结荚开花期土壤储水量变化最明显,这与魏永霞等^[14]的研究结果一致,产生这种现象的原因是生物炭可以吸

附降雨,提高土壤储水量,但这种蓄水保水能力是有限度的,当施炭量过高时,会超过生物炭的最大蓄水能力,导致储水量降低^[28]。另外,在结荚开花期雨水较少,所以在降雨时生物炭可以快速吸附雨水,增加储水量,当天气较为干旱时,生物炭将吸附的雨水传递给土壤,储水量减小的速率较缓,而60~100 cm土层与表层距离较远,受生物炭的影响不大。但王湛等^[28]认为,施加生物炭可以增加0~40 cm土层土壤储水量,而50~70 cm土层土壤储水量出现降低趋势,这可能是由于生物炭的施加量不同和土壤种类不同。在土壤持水性能方面,潘全良等^[29]通过6年试验研究得出,施加生物炭可以提高田间持水率,但最优施炭量和施用年限却没有明确给出;颜永毫等^[30]认为田间持水率与施炭量呈正相关;在本试验中饱和含水率和凋萎系数随施炭量的增加呈逐渐升高的趋势,田间持水率在施加第1年呈逐渐升高趋势,在施加2~4年呈先升高后降低的趋势,以连续施加2年的50 t/hm²田间持水率最大,这是因为生物炭自身结构特性,具有一定的持水能力,增加土壤中有效水量,延长作物的凋萎时间,但施炭量过高会使土壤的持水能力减弱^[9,14],导致田间持水率下降。

施加生物炭可以提高大豆株高和叶面积指数^[31-32],但在施炭量和使用年限上说法尚不一致;在本研究中,在大豆生长的各生育阶段中,连续4年施加生物炭大豆株高、叶面积指数和冠层覆盖度均呈先升高后降低的趋势,均以连续施加2年50 t/hm²提高量最大。这与阚正荣等^[33]的研究结果一致。这是因为生物炭具有保水性,在大豆生长发育初期,大豆水分充足,生长发育良好,枝叶茂盛,当施炭量过高时,土壤储水量减小,大豆水分供应不足,会导致土壤结构变差,碳氮比失调,导致产量降低^[34]。

生物炭由于自身含碳量高及呈碱性的特性,施加生物炭对土壤养分具有一定的影响。李司童等^[35]通过1年试验表明施加生物炭可增加土壤速效养分及有机质含量;李明等^[36]通过1年试验研究可知,在C25处理碱解氮、速效钾含量最大,土壤速效磷含量呈逐渐升高的趋势;而在本文中,土壤pH值和有机质、速效钾含量随施炭量的增加呈逐渐升高的趋势,碱解氮和有效磷含量呈先升高后降低的趋势,但2017、2018年C100处理低于对照处理。这是因为生物炭自身矿物质多的特性,施加到土壤中可增加土壤养分,但施炭量过高导致氮和磷的固定^[9],导致含量降低,由此可见施炭量和施用年限均对土壤养分有影响,为此本研究将施炭量、施用年

限以及二者交互作用对土壤养分含量进行方差分析,结果表明,除了施用年限对有效磷含量没有显著影响外,其余均有极显著影响。上述结果亦可证明施加生物炭可提高土壤养分,但施炭量过高导致pH值过高,土壤中有有机质、速效钾含量过高,氮、磷含量过低,反而不利于大豆的生长,为此寻求土壤养分处于综合性最好的状态是必要且可行的。由于施加生物炭对土壤肥力有一定的影响,亦对产量有一定的提高,为寻求土壤综合肥力水平最优的生物炭施用模式,本试验采用改进的内梅罗指数法对土壤综合肥力指数进行计算,使计算结果具有完全客观性的同时,解决了土壤肥力各指标对土壤环境影响的困扰,并用产量进行计算结果验证。结果表明,连续4年施加生物炭,在2016年C50处理对土壤肥力综合性能提高最好,其次是2017年C25处理;产量与土壤综合肥力指数呈正相关,决定系数为0.8615,均方根误差为0.75,计算结果较为合理。即土壤综合肥力水平最优的生物炭施用模式为连续2年施加50 t/hm²的生物炭。另外,生物炭对其他指标的响应关系及生物炭对各指标产生的后效还有待进一步研究。

4 结论

(1)施加生物炭可提高0~60 cm土层土壤储水量,连续4年,大豆各生育期的土壤储水量随施炭量的增加呈先升高、后降低的趋势,相对较优处理分别为C75、C50、C50、C25,以2016年C50处理提高最大,为71% (苗期)、61.9% (分枝期)、60.2% (开花结荚期)和66.8% (鼓粒期);施加生物炭对60~100 cm土层土壤储水量影响不显著;连续4年,田间持水率随施炭量的增加呈先升高、后降低的趋势,相对较优处理分别为C100、C50、C50、C25,在2016年C50处理提高最多,为11.34%;连续4年,凋萎系数与田间持水率的变化规律相同,4年的相对较优处理也相同,分别为C100、C50、C50、C25;连续4年,饱和含水率均随施炭量的增加呈逐渐增大的趋势,最高提高了43.63%。

(2)连续4年,施加生物炭可以提高大豆各生育阶段的株高和叶面积指数,各生育阶段大豆株高随施炭量的变化呈先升高、后降低趋势,叶面积指数随施炭量的增加呈倒“L”形,相对较优处理分别为C75、C50、C50、C25;各生育阶段的大豆冠层覆盖度与施炭量呈抛物线变化, R^2 均在0.89以上, $P < 0.01$,相对较优处理也为C75、C50、C50、C25。

(3)连续4年,土壤pH值和有机质、速效钾含量随施炭量的增加呈逐渐升高的趋势,碱解氮和有

效磷含量呈先升高、后降低的趋势,相对较优处理为C50、C50、C25、C25。方差分析表明,除施用年限对有效磷含量无显著影响外,其余均有极显著影响。采用改进的内梅罗指数法对土壤综合肥力指数进行

计算,同时用产量进行验证, R^2 为0.8615, P 为0.0012, RMSE为0.75,土壤综合肥力水平最优的生物炭施用模式为连续2年施加50 t/hm²的生物炭。

参 考 文 献

- [1] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8. LIU Baoyuan, YAN Baixing, SHEN Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 姚宗路,赵立欣,田宜水,等.黑龙江省农作物秸秆资源利用现状及中长期展望[J].农业工程学报,2009,25(11):288-292. YAO Zonglu, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Utilization status and medium and long-term forecast of crop straw in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 288-292. (in Chinese)
- [3] 勾芒芒,屈忠义.土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1348-1352. GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1348-1352. (in Chinese)
- [4] 方明,任天志,赖欣,等.花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1300-1310. FANG Ming, REN Tianzhi, LAI Xin, et al. Effects of peanut shell biochar on physico-chemical properties and greenhouse gas emission in fluvo-aquic soil and red soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1300-1310. (in Chinese)
- [5] STEFAN A, ANDRE P, STEFFEN T, et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil[J]. Geoderma, 2013, 202-203: 183-191.
- [6] PICCOLO A, MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Annals of Laboratory Medicine, 2014, 34(6): 426-432.
- [7] BAKRY B A, IBRAHIM O M, EID A R, et al. Effect of humic acid, mycorrhiza inoculation, and biochar on yield and water use efficiency of flax under newly reclaimed sandy soil[J]. Agricultural Sciences, 2014, 5(14): 1427-1432.
- [8] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等.生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J].环境科学,2019(7):1-14. LI Qianqian, XU Chenyang, GENG Zengchao, et al. Effects of biochar on the water thermal properties and aggregates stability of loess soil[J]. Environmental Science, 2019(7): 1-14. (in Chinese)
- [9] 魏永霞,张翼鹏,张雨凤,等.黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):284-291,312. WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar's on soil improvement and water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 284-291, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [10] 李中阳,齐学斌,樊向阳,等.生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J].农业工程学报,2015,31(12):119-124. LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 119-124. (in Chinese)
- [11] 殷大伟,王家博,金梁,等.生物炭对白浆土水分渗透性能、养分含量及大豆产量的影响[J].大豆科学,2019,38(1):72-76. YIN Dawei, WANG Jiabo, JIN Liang, et al. Effect of biochar on soil water permeability, nutrient content of albic soil and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 72-76. (in Chinese)
- [12] 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):44-48. LIAO Ping, TANG Jun, ZENG Yongjun, et al. Effects of biochar and lime on yield, soil properties and economic benefit of double ricecropping system[J]. China Rice, 2019, 25(1): 44-48. (in Chinese)
- [13] BASSO A S, MIGUTZ F E, LAIRD D A, et al. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils [J]. GCB Bioenergy, 2013, 5(2): 132-143.
- [14] 魏永霞,冯鼎锐,刘志凯,等.生物炭对黑土区坡耕地水土保持及大豆增产效应研究[J].节水灌溉,2017(5):37-41. WEI Yongxia, FENG Dingrui, LIU Zhikai, et al. The effect of biochar on soil and water conservation and crop yield of the slope farmland in black soil region [J]. Water Saving Irrigation, 2017(5): 37-41. (in Chinese)
- [15] BUSSCHER W J, NOVAK, JEFF M, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14.
- [16] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL].农业机械学报,2014,45(1):137-142. GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137-142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140122&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022. (in Chinese)
- [17] 王彩云,武春成,曹霞,等.生物炭对温室黄瓜不同连作年限土壤养分和微生物群落多样性的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1359-1366. WANG Caiyun, WU Chuncheng, CAO Xia, et al. Effects of biochar on soil nutrition and microbial community diversity under continuous cultivated cucumber soils in greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1359-1366. (in Chinese)
- [18] 李影,李斌,柳东阳,等.生物炭配施菌肥对植烟土壤养分和可溶性有机碳氮光谱特征的影响[J].华北农学报,2018,33(6):227-234. LI Ying, LI Bin, LIU Dongyang, et al. Effects of biochar combined with bacterial fertilizer on nutrients and soluble organic carbon and nitrogen spectra of tobacco planting soils [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(6): 227-234. (in Chinese)
- [19] DAVID L, PIERCE F, WANG Baiqun, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J].

- Geoderma, 2010, 158(3): 436 - 442.
- [20] 白永红, 高志永, 陆静, 等. 模拟干化土壤中的植被生长及土壤水分变化[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 1 - 8, 74. BAI Yonghong, GAO Zhiyong, LU Jing, et al. Effects of simulated dry soil on vegetation growth and soil water variation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 1 - 8, 74. (in Chinese)
- [21] 董勤各, 李悦, 冯浩, 等. 秸秆氮化还田对农田水分与夏玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 220 - 229. DONG Qinge, LI Yue, FENG Hao, et al. Effects of ammoniated straw incorporation on soil water and yield of summer maize (*Zea mays* L) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 220 - 229. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181126&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.026. (in Chinese)
- [22] 康小兵, 刘庆贺, 李科, 等. 修正内梅罗指数法在小型污染场地中的应用[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 111 - 115. KANG Xiaobing, LIU Qinghe, LI Ke, et al. Application of corrected Nemerow index method in the small contaminated site [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(1): 111 - 115. (in Chinese)
- [23] 柴冠群, 秦松, 范成五, 等. 贵州主要火龙果产地土壤肥力特征与评价[J]. 现代园艺, 2018(17): 13 - 15. CHAI Guanqun, QIN Song, FAN Chengwu, et al. Characteristics and evaluation of soil fertility in main dragon fruit producing areas in Guizhou [J]. Modern Horticulture, 2018(17): 13 - 15. (in Chinese)
- [24] 雷勋平, ROBIN Qiu, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243 - 253. LEI Xunping, ROBIN Qiu, LIU Yong. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 243 - 253. (in Chinese)
- [25] 刘慧, 魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 288 - 296. LIU Hui, WEI Yongxia. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 288 - 296. (in Chinese)
- [26] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157 - 163. ZHOU Guopeng, XIE Zhijian, CAO Weidong, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 157 - 163. (in Chinese)
- [27] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113 - 119. WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 113 - 119. (in Chinese)
- [28] 王湛, 李银坤, 王利春, 等. 生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 273 - 280. WANG Zhan, LI Yinkun, WANG Lichun, et al. Effects of biochar on yield, quality and water utilization of organic flowering Chinese cabbage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 273 - 280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181233&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.033. (in Chinese)
- [29] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 115 - 121. PAN Quanliang, CHEN Kun, SONG Tao, et al. Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 115 - 121. (in Chinese)
- [30] 颜永毫, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水率的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 120 - 124, 190. YAN Yonghao, ZHENG Jiyong, ZHANG Xingchang, et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 120 - 124, 190. (in Chinese)
- [31] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡水灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 233 - 241. ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on salt distribution and corn growth in saline soil under salty and shallow rotation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 233 - 241. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190125&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.025. (in Chinese)
- [32] 黄娟, 张兴伟, 王震洪. 添加生物炭对黄壤种植油用牡丹生长的影响[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(2): 74 - 79. HUANG Juan, ZHANG Xingwei, WANG Zhenhong. Effects of biochar addition on the growth of peony in yellow soil planting oil [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2018, 37(2): 74 - 79. (in Chinese)
- [33] 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. KAN Zhengrong, PU Chao, QI Jianying, et al. Effects of biochar on soil water and grain yield of winter wheat in the North China Plain [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4): 1 - 10. (in Chinese)
- [34] 许健, 牛文全, 张明智, 等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3505 - 3513. XU Jian, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effect of biochar addition on soil evaporation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3505 - 3513. (in Chinese)
- [35] 李司童, 毛凯伦, 石锦辉, 等. 生物炭和菜籽饼配施对土壤养分、酶活性及烟叶产质量的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 1429 - 1435. LI Sitong, MAO Kailun, SHI Jinhui, et al. Effects of combining application of biochar and rapeseed cake on soil nutrition, soil enzyme activities, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 1429 - 1435. (in Chinese)
- [36] 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 172 - 178. LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological biochar on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161123&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023. (in Chinese)