

黑土区坡耕地生物炭应用模式综合效益研究

刘 慧^{1,2} 苏 航³ 温小艳³ 龙学毅³ 焦 岩³ 范亚东¹

(1. 东北农业大学经济管理学院, 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. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究黑土区坡耕地不同生物炭应用模式(不同生物炭施用量和施用年限)的综合效益,以东北黑土区坡度为3°耕地径流小区为研究对象,于2015—2018年,设置不加生物炭的常规处理(C0)和生物炭施加量分别为25 t/hm²(C25)、50 t/hm²(C50)、75 t/hm²(C75)、100 t/hm²(C100)共5个处理,分析不同施炭量以及施炭年限的综合效益,结果表明:在生态效益方面,生物炭能够有效改善土壤结构、增强土壤肥力、提高土壤蓄水保土能力,在施炭量为50 t/hm²时,连续施用2年,土壤蓄水保土效果最佳;连续施用3年,土壤结构最为理想;施炭量为100 t/hm²时,连续施用4年,土壤肥力最佳。在经济效益方面,生物炭能够有效提高作物节水增产性能及其经济产值,施用1年、施炭量为75 t/hm²时,水分利用效率最大;连续施用2年、施炭量为25 t/hm²时,生物炭边际生产力最大,施炭量每增加1 t,产量增加11.20 kg;连续施用3年、施炭量为50 t/hm²时,大豆增产效果最佳;连续施用4年、施炭量为50 t/hm²时,收益达到最大。采用改进的模糊综合评价模型测算不同生物炭应用模式的生态效益、经济效益和综合效益,结果显示,连续施用2年、施炭量为72.74 t/hm²时生态效益最大,连续施用3年、施炭量为36.32 t/hm²时经济效益最大。黑土区最佳生物炭施用模式为连续施用3年,施炭量为62.30 t/hm²。

关键词: 黑土区; 生物炭; 应用模式; 模糊综合评价模型; 效益评价

中图分类号: S156.2; S158.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0325-12 OSID: 

Comprehensive Benefit of Biochar Application Modes on Slope Farmland in Black Soil Region

LIU Hui^{1,2} SU Hang³ WEN Xiaoyan³ LONG Xueyi³ JIAO Yan³ FAN Yadong¹

(1. College of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the comprehensive benefits of different biochar application modes (different biochar application amounts and application years) on sloping farmland in the black soil region, a 3° slope farmland runoff plot in the black soil region of Northeast China was taken as the research object, and experimental research was conducted from 2015 to 2018, the conventional treatment without biochar (C0) was set, and the applied amount of biochar were 25 t/hm² (C25), 50 t/hm² (C50), 75 t/hm² (C75), 100 t/hm² (C100) to analyze the comprehensive benefits of different amounts of biochar application and the duration of biochar application, the results showed that in terms of ecological benefits, biochar can effectively improve soil structure, enhance soil fertility, and improve soil water storage and soil conservation capacity. For two years of continuous application, the effect of soil water retention and soil conservation was the best when the amount of biochar applied was 50 t/hm²; for three years of continuous application, the soil structure was optimal when the amount of carbon applied was

收稿日期: 2021-07-23 修回日期: 2021-09-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和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: 刘慧(1981—),女,副教授,博士后,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com
通信作者: 范亚东(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业经济管理研究,E-mail: fanyadong@neau.edu.cn

50 t/hm²; for four years of continuous application soil fertility was the best when the amount of carbon was 100 t/hm². In terms of economic benefits, biochar can effectively improve crop water-saving, yield-generating performance and its economic output value. Applied for one year, when the amount of biochar was 75 t/hm², the water use efficiency reached the maximum. For two consecutive years, when the amount of biochar was 25 t/hm², the marginal productivity of biochar was the largest. For each additional ton of biochar applied, the output was increased by 11.20 kg. For three consecutive years of application, when the amount of biochar applied was 50 t/hm², the soybean yield was the best; for four years of continuous application, when the amount of biochar applied was 50 t/hm², the return reached the maximum value. The improved fuzzy comprehensive evaluation model was used to calculate the ecological benefit, economic benefit and comprehensive benefit of different biochar application models. The results showed that the ecological benefit index reached the maximum value when the biochar application amount was 72.74 t/hm² for two consecutive years of application, the economic benefit index reached the maximum value when the biochar application amount was 36.32 t/hm² for three consecutive years of application. The best biochar application mode in the black soil area was continuous application for three years, and the biochar application amount was 62.30 t/hm².

Key words: black soil region; biochar; application mode; fuzzy comprehensive evaluation model; benefit evaluation

0 引言

我国是世界上人口最多的国家,粮食安全尤为重要,关系到国防安全及民生稳定,制约着我国经济的发展,提升国内粮食自给自足能力已迫在眉睫。黑土是最肥沃的土壤和极为珍贵的农业生产资源,是土地生产力的核心以及粮食安全的根本保障^[1]。东北黑土区作为全球仅存的三大黑土区之一,土层肥沃、生产力强,是我国最主要的粮食生产基地。近年来,由于自然因素制约和人为活动破坏,东北黑土区水土流失日益严重,生态环境日趋恶化。严重的水土流失正使我国肥沃的东北黑土地变得又“薄”又“黄”,有的地方甚至已露出黄土母质,基本丧失了生产能力。

东北黑土区秸秆资源丰富,但秸秆资源的利用率较低,每年有大量秸秆资源被焚烧或丢弃,这不仅造成了资源的巨大浪费,同时还带来了严重的烟尘污染。以生物炭技术为核心的秸秆炭化还田是衔接农业循环链条首尾两端、实现废弃生物质资源化高效利用的重要途径,是推动黑土区农业健康可持续发展的不竭动力^[2]。生物炭是以作物秸秆、动物粪便为原材料在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物^[3]。目前对于生物炭应用效应的研究多是以短期施加生物炭为条件,如使用室内土柱培养试验和田间原位测定或室内盆栽试验定量分析的方法对施加生物炭后的土壤理化性质^[4-5]、作物生长^[6-8]、土壤水分运动^[9-10]等进行分析,而从生态效益、经济效益角度对多年连续施加生物炭后综合效益评价研究较少,且指标覆盖不全面。程功等^[11]以温室气体排放强度(GHGI)为效益指标,对不同梯度生物

炭用量进行试验,认为施用1年、施炭量为15 t/hm²时,综合效益最高。鉴于此,本研究以4年为研究期限,建立反映不同生物炭应用模式(不同生物炭施用量和施用年限)的生态效益、经济效益和综合效益的综合评价指标体系,运用熵值法对模糊综合评价方法进行改进,测算不同生物炭应用模式的效益指数,以期得到黑土区最佳施炭模式,为黑土资源的高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015—2018年在黑龙江省北安红星农场(48°02′~48°17′N,126°47′~127°15′E)进行。试验区气候为寒温带大陆性气候,全年平均降水量555.3 mm,降雨集中在7—9月,约占全年70%。积温2 254.5℃,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°。耕地土壤以黑土为主,土壤表层松散、底土黏重,透水性差。主要农作物为大豆和玉米。

1.2 试验设计

试验在北安红星农场内坡度为3°的径流小区进行,小区规格20 m×5 m,每2个小区间隔1 m。设置不加生物炭的常规处理(C0)和生物炭施放量分别为25 t/hm²(C25)、50 t/hm²(C50)、75 t/hm²(C75)、100 t/hm²(C100)共5个处理,2次重复,共计10个径流小区,每个小区选取2个取样点(共4次重复)。2015年试验开始前将生物炭施入表层土壤(0~20 cm),反复搅拌,混合均匀,2016—2018年分别在上一年度的试验基础之上加入等量的生物

炭,同时施加重茬肥并做相同的处理。供试土壤为黑土,理化性质为 pH 值 6.3,土壤容重 1.15 g/cm³,有机质质量比 34.83 g/kg,全氮质量比 1.10 g/kg,全磷质量比 0.45 g/kg,全钾质量比 0.35 g/kg。供试作物为大豆,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,粒径为 1.5~2.0 mm,其基本理化性质为:pH 值 9.24,全氮、全钾、全磷、灰质质量分数分别为 1.53%、1.66%、0.75%、25.7%。水肥管理同当地大田标准,即不进行灌水,均在雨养条件下种植,化肥采用 N、P₂O₅、K₂O 质量分数分别为 13%、28% 和 10% 的复合肥,用量为 450 kg/hm²,全部作为基肥一次性施入,且 4 年试验保持一致。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤理化性质

于每年大豆成熟后取其耕层土壤测定理化性质,采用 DK-1130 型土壤三相仪测定土壤容重、孔隙度以及土壤三相比,土壤三相比偏离值 R (所测土壤样品三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值)计算式为^[12]

$$R = \frac{100 \sqrt{0.4(X_s - 0.5)^2 + (X_L - 0.25)^2 + 0.6(X_G - 0.25)^2}}{1}$$

(1)

式中 X_s ——固相体积分数,大于 25%
 X_L ——液相体积分数,%
 X_G ——气相体积分数,%

采用环刀法测定土壤饱和含水率、田间持水率,采用生物法和干燥法测定土壤凋萎系数。采用 TOC 分析仪法测定土壤有机碳含量;采用纳氏比色法、Bray 法、醋酸铵-火焰光度计法分别测定铵态 N、有效 P、速效 K 含量;采用电位法测定土壤 pH 值,并采用土壤质量退化指数计算土壤营养指数^[13],计算式为

$$SQDI = \sum_{i=1}^n [(x_i - x_{i0}) / x_{i0}] / n \times 100\%$$

(2)

式中 $SQDI$ ——土壤营养指数,%
 x_{i0} ——C0 处理土壤第 i 个属性值
 x_i ——其他处理土壤第 i 个属性值
 n ——选择的土壤属性数量

1.3.2 年径流深和土壤侵蚀量

采用安装在每个径流小区的径流自动记录系统记录各次降雨的产流量,进而得到年径流深;产沙量通过安装在每个径流小区末端的泥沙收集系统 (BLJW-ZXY 型)测定,在每次降雨产流后,每 5 min 取一次水样,静置 24 h,漂去上层清水,用滤纸滤出泥沙,干燥 8 h 称量,计算得到产沙量,由各次产沙

量加和得到年土壤侵蚀量。

1.3.3 产量及水分利用效率

于每年大豆收获期,对各个径流小区进行产量测定。采用水量平衡方程计算大豆全生育期耗水量,进而计算大豆水分利用效率,由于试验区地下水埋深 40 m 且试验期内未灌水,故不考虑地下水交换量和作物生育期内灌水量,公式为

$$ET = P + \Delta S$$

(3)

$$WUE = Y / ET$$

(4)

式中 ET ——大豆生育期耗水量,mm
 P ——大豆生育期降雨量,mm
 ΔS ——收获期与播种期 0~100 cm 土壤储水量之差,mm
 Y ——大豆产量,kg/hm²
 WUE ——水分利用效率,kg/m³

1.3.4 生物炭成本、收益以及边际生产力

试验总成本、收益以及生物炭利用效率计算公式分别为

$$C_0 = Q_{\text{biochar}} P_{\text{biochar}} + C_1$$

(5)

$$R_t = R_{t-1} + Q_t P_t$$

(6)

$$BUE = Q_{\text{soybean}} / Q_{\text{biochar}}$$

(7)

式中 C_0 ——总成本,元/hm²
 C_1 ——除生物炭成本外的其他成本,元/hm²
 Q_{biochar} ——生物炭累积施加量,t/hm²
 P_{biochar} ——生物炭价格,元/t
 R_t ——第 t 年累积收益,元/hm²
 Q_t ——第 t 年大豆产量,kg/hm²
 P_t ——第 t 年大豆价格,元/kg
 Q_{soybean} ——大豆累积增产量,kg/hm²
 BUE ——生物炭利用效率,kg/t

1.4 数据处理方法

各指标均采用平均值,采用 Excel 2010 进行数据处理和绘图,利用 SPSS 20.0 进行多重比较、方差分析以及回归分析,多重比较采用 LSD 法,显著性水平取 0.01 和 0.05。采用熵值法计算各指标权重,采用模糊综合评价模型评价各处理的生态效益、经济效益和综合效益。

1.5 基于熵值法改进的模糊综合评价模型

模糊综合评价法是将一些边界不清、不易定量的因素定量化,利用多个因素对所评价事物的隶属情况做出综合决策的方法。其基本原理是:根据被评价对象的特点选取因素集和评语集,寻找因素集中各元素对评价集的隶属关系,建立模糊评价矩阵,最终结合各因素的权重计算出综合评价价值^[14]。在传统的模糊综合评价模型中,指标

权重系数一般采用层次分析法、专家分析法等方法确定,具有较大的主观性,没有考虑实际综合评价问题的客观性。熵值法则是一种客观赋权方法,可以克服传统模糊综合评价法权重确定的主观性,考虑了实际搜集到的指标数据的实时性、客观性和动态性,因此本文将两种方法相结合,对各试验方案的综合效益进行评价分析,具体步骤如下^[15-17]:

(1) 依据指标参数建立效益指标集 I ,表达式为

$$I = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 x_{ij} ——第 j 种方案的第 i 个评价指标值
 m ——评价指标个数
 n ——评价方案数目

(2) 效益评价等级 A 建立

由于指标体系所涉及的指标覆盖范围较广,各指标的优劣标准并不一致,而目前尚不存在一个系统的等级标准,因此本文以所有方案中各指标的最优值作为评价的最优值,通过比较不同方案的综合效益进行评价。因此,评价等级 A 只包含 1 个因子,记为 a_c ,表示“最优”等级。

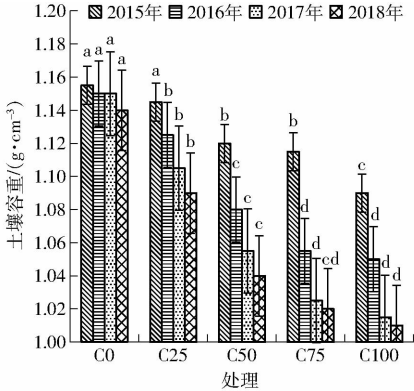
(3) 建立模糊相关矩阵 U ,表达式为

$$U = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 d_{ij} ——第 j 种方案的第 i 个评价指标对于“最优”等级的隶属度

正向指标(越大越优型)

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (10)$$



负向指标(越小越优型)

$$d_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (11)$$

(4) 指标权重确定

由于不同指标的差异性,各类数据量纲与单位不同,对此本文采用线性法进行标准化,由于其正向、负向指标标准化计算式与式(10)和式(11)在形式上完全一样,因此得出的标准化值与隶属度在数值上相同,第 i 个指标的效用值表达式为

$$h_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (12)$$

式中 y_{ij} ——第 j 个评价方案第 i 个指标标准化值
利用熵值法对指标赋权,权重 ω_i 表达式为

$$\omega_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (13)$$

(5) 计算综合评价得分 v ,计算式为

$$v = \omega_i U \quad (14)$$

2 结果与分析

2.1 施加生物炭的生态效益

2.1.1 施加生物炭对土壤物理指标的影响

土壤容重和孔隙度是判断土壤结构状况的重要指标。各年不同处理土壤容重和孔隙度如图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。随着施炭年限和施炭量的增加,土壤容重逐渐降低,除 2015 年 C25 处理与同年 C0 处理间差异不显著($P = 0.058$)外,其余各年各施炭处理土壤容重与 C0 差异均达显著水平($P < 0.05$)。随着施炭年限的延长,各处理土壤容重降低速率逐渐减小。随着施炭年限和施炭量的增加,土壤孔隙度逐渐增大。同一年份随着施炭量的增加,土壤孔隙度逐渐增大,且各处理与 C0 差异均达显著水平($P < 0.05$)。随着施炭年限的延长,各处理土壤孔隙度增加速率逐渐减小。以上变化均由生物炭多孔

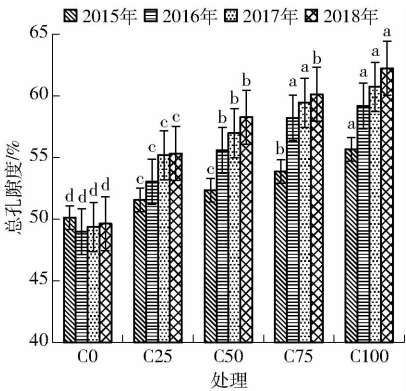


图 1 2015—2018 年不同处理土壤容重和孔隙度

Fig. 1 Soil bulk density and porosity of each treatments in 2015—2018

性、容重小且远低于土壤容重的结构特征引起,施入土壤后可以有效地改善土壤的孔隙结构,提高土壤的透气性和透水性。双因素方差分析结果显示,施炭年限、施炭量对土壤容重、孔隙度均有极显著影响 ($P < 0.01$),二者的交互作用对土壤容重影响极显著 ($P < 0.01$),对土壤孔隙度影响显著 ($P < 0.05$)。

土壤三相比是衡量土壤松紧程度和结构的重要指标,土壤三相比偏离值 R 是综合反映土壤结构优良性的指标,其值越小,表明土壤结构越接近理想状态。各年各处理的 R 如表 1 所示。施炭年限、施炭量以及二者的交互作用均对 R 有极显著的影响 ($P < 0.01$),其中以 2017 年的 C50 处理 R 最小,此时土壤的三相比与理想三相比最为接近。适量施加生物炭可以有效地调节土壤三相比,显著降低 R ($P < 0.05$);但当生物炭累积施用量过高时,土壤质地过于松散,结构变差,三相比偏离理想状态,故而 2017、2018 年 C100 处理 R 高于同年 C0 处理,但二者差异不显著 ($P > 0.05$)。另外,在累积施炭量相同的条件下,逐年施入对土壤结构的改良效果优于一次性施入,如连续 2 年施加 25 t/hm^2 生物炭的 R ($3.624\ 2$) 小于一次性施入 50 t/hm^2 的 R ($4.430\ 0$)。

2.1.2 施加生物炭对土壤养分含量的影响

土壤养分含量是影响作物生长的重要因素。4 年不同处理的土壤养分含量和 pH 值如图 2 所示。相同年份,随着生物炭施用量的增加,土壤 pH 值、

表 1 2015—2018 年不同处理 R 值

Tab.1 Three-phase R value of each treatment in 2015—2018

处理	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
C0	6.770 6 ^a	6.801 1 ^a	6.637 7 ^a	6.491 6 ^a
C25	5.270 5 ^b	3.624 2 ^c	3.161 1 ^{bc}	2.821 9 ^c
C50	4.340 0 ^{bc}	1.631 2 ^d	1.445 2 ^c	1.958 7 ^d
C75	3.850 2 ^c	3.537 7 ^c	4.442 8 ^b	5.093 1 ^b
C100	3.096 0 ^c	5.251 0 ^b	7.162 6 ^a	8.066 6 ^a

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

总有机碳含量、速效 K 含量逐渐递增;铵态 N 含量、有效 P 含量则呈先增后减的变化规律,2017、2018 年 C100 处理铵态 N、有效 P 含量较同年 C0 处理分别降低 1.67%、13.54% 和 9.51%、12.73%。随着连续施炭年限的延长,相同处理的土壤 pH 值、总有机碳含量、速效 K 含量逐渐递增,而铵态 N 含量呈先增后减的变化规律;低施炭量处理 (C25、C50) 有效 P 含量先增后减,而高施炭量处理 (C75、C100) 有效 P 含量逐渐递减。尽管施加生物炭在一定程度上提高了土壤有效养分的含量,但对于铵态 N、有效 P 含量的效应尚不稳定,甚至在高施炭量处理下产生了轻微抑制现象。双因素方差分析结果显示,施炭年限、施炭量以及二者的交互作用对铵态 N 含量、有效 P 含量、速效 K 含量、pH 值、总有机碳含量均有极显著影响 ($P < 0.01$)。

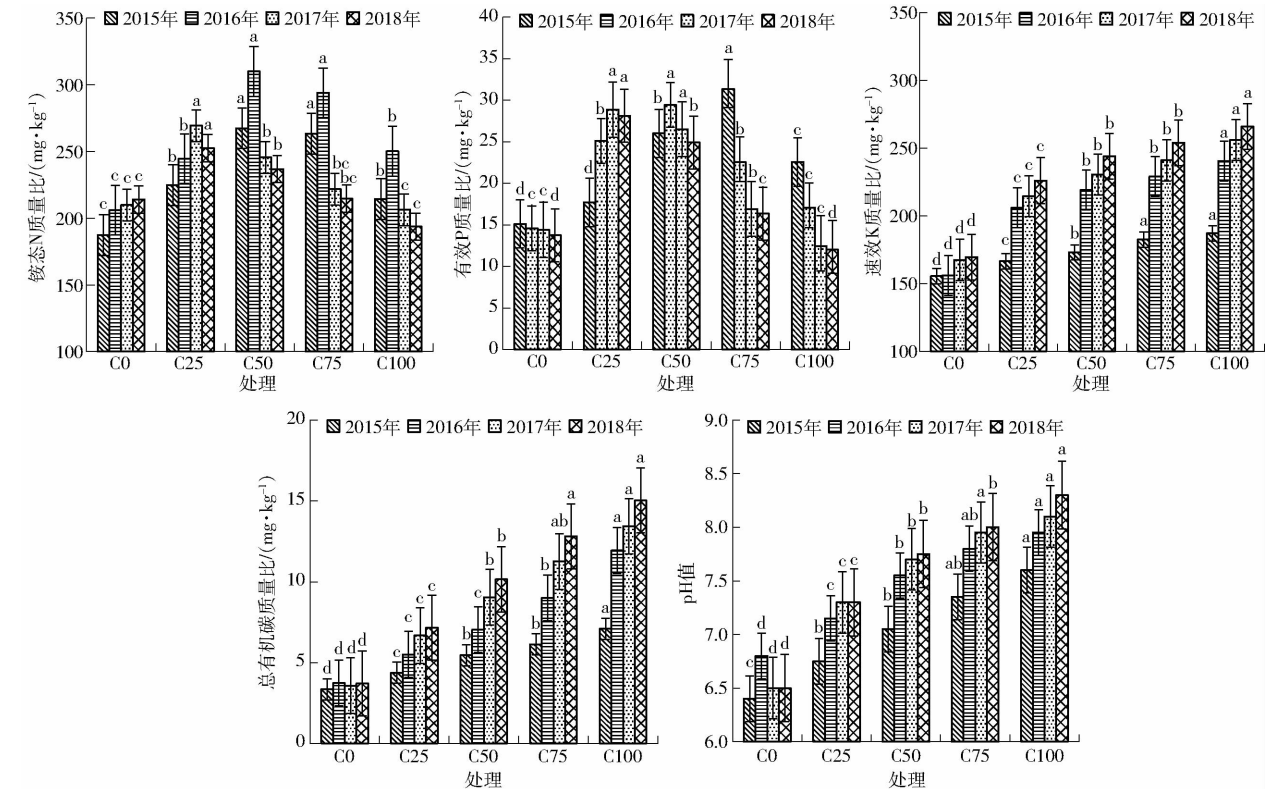


图 2 2015—2018 年不同处理土壤养分含量和 pH 值

Fig.2 Soil nutrient contents and pH value of each treatment in 2015—2018

土壤营养指数可以定量描述土壤营养的高低,营养指数为负值表明土壤肥力有下降的趋势,正值表明土壤肥力有所改善^[18-20]。本研究以各年 C0 处理作为基准土壤类型,故其土壤营养指数为 0,选取总有机碳、pH 值、铵态 N 含量、有效 P 含量、速效 K 含量 5 个指标,采用式(2)计算 2015—2018 年各处理的土壤营养指数,结果如表 2 所示。施用生物炭使各处理土壤营养指数较 C0 处理显著提高($P < 0.05$)。除 2015 年 C75 处理外,随着施炭量的增加和施用年限的延长,土壤营养指数逐渐增大。双因素方差分析结果显示,施炭年限和施炭量对土壤营养指数有极显著影响($P < 0.01$),二者的交互作用对土壤营养指数影响显著($P < 0.05$)。

表 2 2015—2018 年不同处理土壤营养指数
Tab.2 Soil nutrient index of each treatment in 2015—2018 %

处理	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
C0	0 ^d	0 ^d	0 ^d	0 ^d
C25	16.04 ^c	35.21 ^c	51.21 ^c	52.27 ^c
C50	39.87 ^b	58.52 ^b	62.07 ^b	65.85 ^b
C75	52.65 ^a	60.14 ^b	63.93 ^{ab}	67.70 ^b
C100	42.91 ^b	65.94 ^a	67.71 ^a	73.75 ^a

2.1.3 施加生物炭对土壤持水能力的影响

土壤水分是作物生长发育的重要环境因子,提高土壤持水能力可有效促进农业增产增收。由图 3 可知,2015 年随着施炭量的增加田间持水率和凋萎系数均呈逐渐递增的趋势,2016—2018 年两项指标则呈先增后减的变化规律;土壤饱和含水率 4 年均随着施炭量的增加逐渐增大,分别较同年 C0 处理增加 4.93% ~ 11.99%、13.11% ~ 35.09%、19.18% ~ 41.71% 和 20.98% ~ 43.63%,差异均达显著水平($P < 0.05$)。当施炭量相同而施用年限不同时,随着施炭年限的延长,土壤饱和含水率逐渐递增;C25、C50、C75 处理田间持水率呈先增后减的变

化规律,而 C100 处理随着施炭年限的延长逐渐递减;C25 处理凋萎系数随着施炭年限的延长逐渐递增,其余各处理与田间持水率呈相同的变化规律。适当施加生物炭可以有效改善土壤结构,进而提高土壤持水能力,但当土壤中生物炭含量过高时会使土壤结构松散、土壤结构变差,使土壤持水能力下降。双因素方差分析结果显示,施炭年限、施炭量及其交互作用对田间持水率、饱和含水率以及凋萎系数 3 项指标均有极显著的影响($P < 0.01$)。

2.1.4 施加生物炭对土壤水土流失的影响

径流深和土壤侵蚀量作为 2 个较为重要的水土保持指标,可以直接反映土壤水土流失的程度。由于不同年份间降雨量差异较大,不宜直接比较年际间径流深和土壤侵蚀量,故本研究采用径流系数和单位降雨量土壤侵蚀量描述生物炭对土壤水土流失的影响。图 4 为 2015—2018 年不同处理径流系数及单位降雨量土壤侵蚀量的变化情况。由图 4a 可知,相同年份,径流系数随着施炭量的增加先减后增,4 年分别以 C75、C50、C50 和 C25 处理减流效果最佳,与同年 C0 处理差异显著($P < 0.05$);2018 年 C100 处理径流系数较 C0 增加了 1.04 个百分点,未达显著差异($P > 0.05$)。随着施炭年限的延长,不同施炭量处理均在 2016 年减流效果最佳,可能是随着时间的延长累积施炭量过多,改变了土壤的结构,使土壤的抗冲刷能力减弱,促进径流的形成。由图 4b 可知,适量施加生物炭可有效减少径流对土壤的冲刷,单位降雨量土壤侵蚀量随着施炭量的增加先减后增,但过高的累积施炭量使 2018 年 C75、C100 处理单位降雨量土壤侵蚀量较 C0 增加了 0.26%、1.60%。随着施炭年限的延长,不同施炭量处理单位降雨量土壤侵蚀量均在 2016 年达到最小,表明随着生物炭在土壤中的累积效应,表层土壤更为稀松,导致土壤结构变差,雨水形成的径流将更易携带表层土壤,从而造成土壤的流失。双因素方差

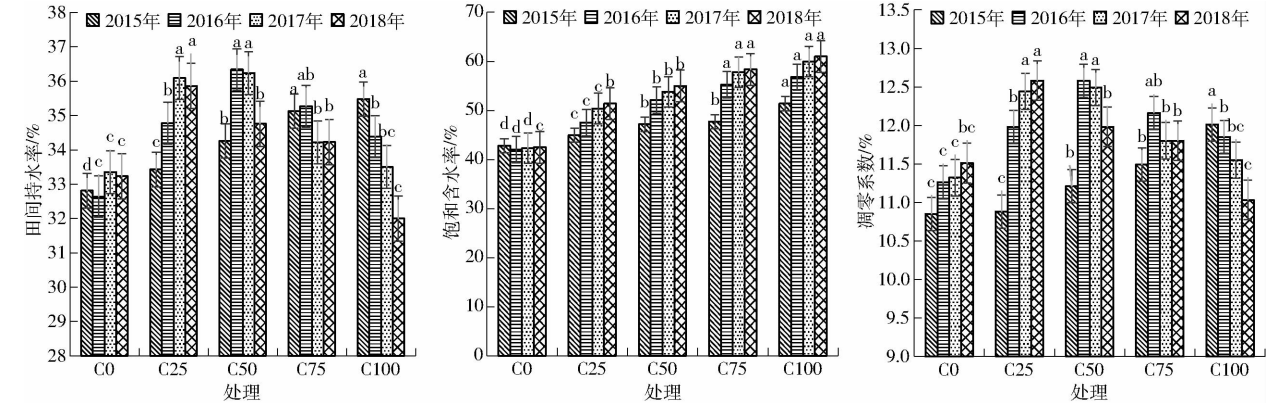
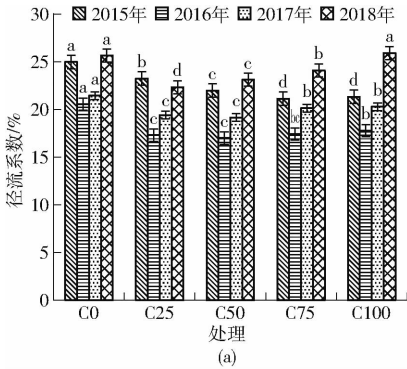


图 3 2015—2018 年不同处理土壤水分常数
Fig.3 Soil moisture contents of each treatment in 2015—2018

分析结果显示,施炭年限和施炭量对 2 项指标均有极显著的影响 ($P < 0.01$),两者的交互作用对径流



系数有显著影响 ($P < 0.05$),对单位降雨量土壤侵蚀量影响不显著 ($P > 0.05$)。

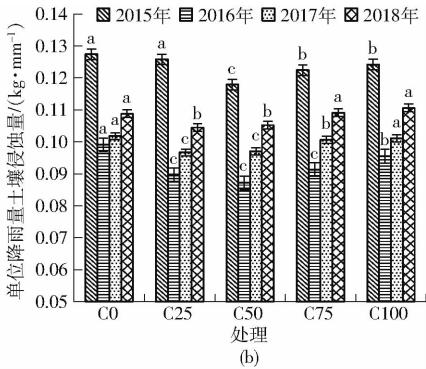


图 4 2015—2018 年不同处理径流系数及单位降雨量土壤侵蚀量
Fig.4 Runoff coefficient and soil erosion per unit rainfall of each treatment in 2015—2018

2.2 施加生物炭的经济效益

2.2.1 施加生物炭的节水增产效应

作物产量是农业生产的直接成果,提高水分利用效率是节水农业研究的重要目标,实现作物产量和水分利用效率的同步提高是当今可持续农业所追求的一个主要目标。图 5 为 4 年不同处理的大豆产量及水分利用效率。由图 5a 可知,当施炭年限相同而施炭量不同时,随着施炭量的增加大豆产量呈先增后减的变化规律,4 年分别以 C75、C50、C50 和 C25 处理产量最大,较同年 C0 处理增产显著 ($P < 0.05$)。随着施炭年限的延长,C25 处理大豆产量逐渐递增,C50 处理大豆产量先增后减,且在 2017 年达到最大值,而 C75、C100 处理大豆产量则逐渐递减,且 C100 处理在 2018 年较 C0 减产 11.45%,表

明当累积施炭量过高时对土壤的理化性质、持水能力等的影响减弱进而使作物产量降低。由图 5b 可知,当施炭年限相同而施炭量不同时,大豆水分利用效率随着施炭量的增加呈先增后减的变化趋势,4 年分别在 C75、C50、C50、C25 处理达到最大,较同年 C0 处理分别提高 25.03%、27.39%、15.36% 和 9.22%,差异均达显著水平 ($P < 0.05$);当施炭量相同而施炭年限不同时,随着施炭年限的延长,各处理水分利用效率逐渐递减。双因素方差分析结果显示,施炭年限对大豆产量有极显著影响 ($P < 0.01$),对水分利用效率有显著影响 ($P < 0.05$),施炭量对两项指标均有极显著影响 ($P < 0.01$),施炭年限和施炭量的交互作用对产量有极显著影响 ($P < 0.01$),而对水分利用效率影响不显著 ($P > 0.05$)。

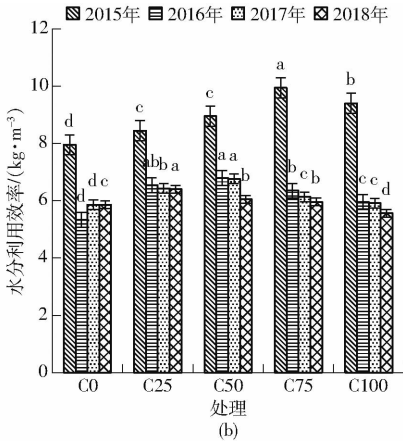
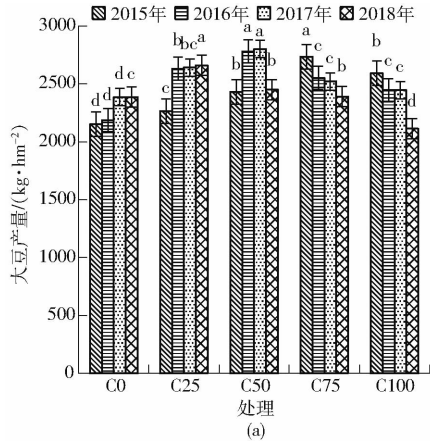


图 5 2015—2018 年不同处理大豆产量和水分利用效率
Fig.5 Soybean yield and water use efficiency of each treatment in 2015—2018

2.2.2 施加生物炭的投入产出

采用式(5)~(7)计算不同的生物炭施用模式的成本、收益及生物炭利用效率,结果见表 3。由表 3 可知,随着施用年限和施炭量的增加,各施炭模式的成本逐渐递增,收益呈先增后减的变化规律,施用 1 年和 2 年生物炭时,施炭量为 75 t/hm² 收益最

高;连续施用 3 年和 4 年生物炭时,施炭量为 50 t/hm² 收益最高。不同施用年限的生物炭利用效率随着施炭量的增加均呈先增后减的变化趋势,连续施用 2 年生物炭,每年施用量为 25 t/hm² 时生物炭利用效率最大,此时每增加 1 t 大豆产量施炭量增加 11.20 kg。施用年限过长或累积施炭量过高时,累

表 3 2015—2018 年不同处理生物炭成本、收益以及利用效率

Tab. 3 Biochar costs, benefits and utilization efficiency for each treatment in 2015—2018

连续施用 年限/a	施用量/ (t·hm ⁻²)	成本/ (元·hm ⁻²)	收益/ (元·hm ⁻²)	生物炭利 用效率/ (kg·t ⁻¹)
1	0	10 014	13 309	
	25	15 014	14 020	4. 60
	50	20 014	15 042	5. 60
	75	25 014	16 923	7. 79
	100	30 014	16 032	4. 40
2	0	20 071	26 462	
	25	35 071	29 853	11. 20
	50	50 071	31 778	8. 75
	75	65 071	32 274	6. 33
	100	80 071	30 751	3. 50
3	0	30 103	40 844	
	25	60 103	45 772	10. 87
	50	90 103	48 661	8. 60
	75	120 103	47 470	4. 82
	100	150 103	45 494	2. 53
4	0	40 110	55 130	
	25	90 110	61 706	10. 90
	50	140 110	63 337	6. 78
	75	190 110	61 786	3. 63
	100	240 110	58 146	1. 22

积施炭量增加速率远大于产量的增加速率,导致生物炭的利用效率逐渐降低。

2. 3 基于熵值法的生物炭应用效益评价

2. 3. 1 评级指标确定及权重赋值

构建能够综合反映生物炭生态效益和经济效益的评价指标体系,如表 4 所示,其中生态效益指标包括土壤理化性质、土壤持水能力、水土保持效应 3 类二级指标;经济效益指标包括节水增产效应、投入产出 2 类二级指标,各二级指标下包含若干三级指标。采用式(10)~(13)计算三级指标的权重,根据熵的可加性^[21],对三级指标的效用值进行求和,分别求出二级指标和一级指标的权重,结果见表 4。

2. 3. 2 黑土区坡耕地生物炭应用效益指数

分别测算 2015—2018 年不同处理的效益指数,结果如图 6 所示。生态效益方面,第 1 年随着施炭量的增加生态效益指数逐渐递增,而连续施用 2、3、4 年生物炭生态效益指数则呈先增后减的变化规律,且均在施炭量为 50 t/hm²时达到最大。当低施炭量时,土地质量取决于土壤自身结构,因此随着生物炭施加量的增加,生态效益指数逐渐增大;当施炭量达到一定程度时,过高的生物炭施加量使土壤结构遭到破坏,生态效益指数降低。经济效益方面,4 年随着生物炭施加量的增加经济效益指数均呈先增后减

表 4 评价指标体系
Tab. 4 Evaluation system

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	三级指标	指标属性	三级指标权重
生态效益	0. 620	土壤理化性质	0. 301	容重 x_1 (g/cm ³)	-	0. 090
				总孔隙度 x_2 (%)	+	0. 074
				三相比偏离值 x_3	-	0. 059
				土壤营养指数 x_4 (%)	+	0. 078
				饱和含水率 x_5 (%)	+	0. 085
		土壤持水能力	0. 199	田间持水率 x_6 (%)	+	0. 048
				凋萎系数 x_7 (%)	+	0. 066
				径流系数 x_8 (%)	-	0. 060
		水土保持效应	0. 120	单位降雨量土壤侵蚀量 x_9 (kg/mm)	-	0. 060
				产量 x_{10} (kg/hm ²)	+	0. 054
经济效益	0. 380	节水增产效应	0. 158	水分利用效率 x_{11} (kg/m ³)	+	0. 104
				生物炭成本 x_{12} (元/t)	-	0. 030
				收益 x_{13} (元/hm ²)	+	0. 090
		投入产出	0. 222	生物炭利用效率 x_{14} (kg/t)	+	0. 102

注:“+”为正项指标,“-”为负项指标。

的变化规律,4 年分别在生物炭施加量为 75、25、25、25 t/hm²时达到最大。综合效益指数与生态效益指数呈相同的变化规律,但在连续施用 4 年生物炭时,施炭量 25 t/hm²时可使综合效益最大化。

分别建立生态效益指数 Y_1 、经济效益指数 Y_2 、综合效益指数 Y_3 关于生物炭施用年限 t 和施炭量 x

的回归方程

$$Y_1 = -0. 000\ 062\ 81x^2 - 0. 054t^2 - 0. 000\ 300\ 4xt + 0. 010x + 0. 332t - 0. 321 \quad (R^2 = 0. 920, P < 0. 000\ 1) \quad (15)$$

$$Y_2 = -0. 000\ 042\ 87x^2 + 0. 003t^2 - 0. 001xt + 0. 006x + 0. 019t + 0. 138 \quad (R^2 = 0. 801, P < 0. 000\ 1) \quad (16)$$

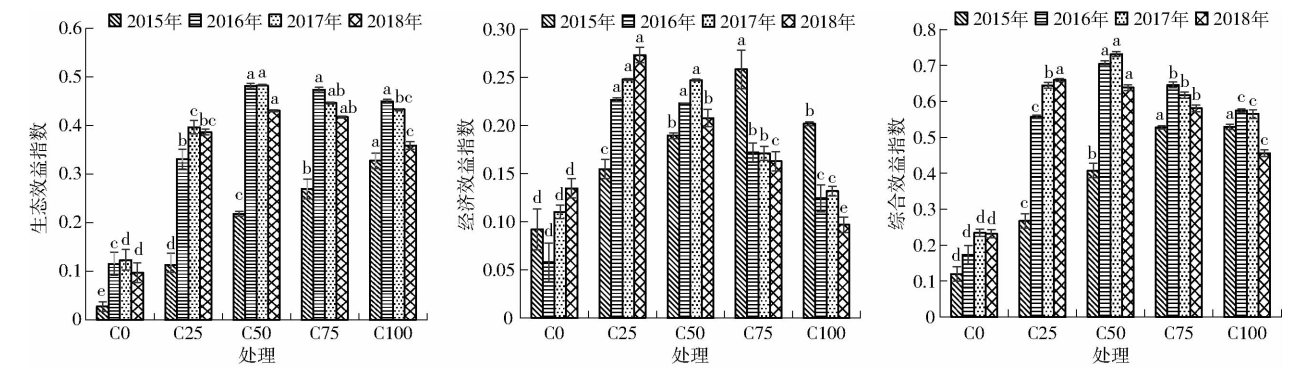


图 6 2015—2018 年不同处理效益指数

Fig. 6 Benefit index of each treatment in 2015—2018

$$Y_3 = -0.0001057x^2 - 0.051t^2 - 0.001xt + 0.016x + 0.351t - 0.258 \quad (R^2 = 0.887, P < 0.0001)$$

(17)

3 个方程 R^2 均大于 0.80, P 均小于 0.0001, 达极显著水平, 表明方程均较好地反映各效益指数随施炭年限和施炭量的变化规律。根据多元函数极值理论, 连续施炭 2 年、施用量为 72.74 t/hm² 时生态效益指数最大, 为 0.5194; 连续施炭 3 年、施用量为 36.32 t/hm² 时经济效益指数最大, 为 0.2744; 连续施炭 3 年、施用量为 62.30 t/hm² 时, 可使综合效益指数达到最大, 为 0.7356。

3 讨论

生物炭孔隙结构丰富, 比表面积大, 理化性质稳定, 可以改善土壤结构。本试验结果显示, 施加生物炭可以显著提高土壤孔隙度, 降低土壤容重 ($P < 0.05$), 且影响程度与施炭量和施炭年限呈正相关。理想状态下, 最适合作物生长的土壤三相比为 50:25:25^[22]。本试验结果显示, 土壤三相比偏离值 R 2015 年逐渐减小, 2016—2018 年则呈先减后增的变化规律。这可能是随着生物炭的施加, 土壤容重发生变化, 固相体积分数随之减小, 液相和气相体积分数随之增大, 从而土壤的通气性增加, 土壤结构趋于合理, R 降低, 而当施炭量过高时, 土壤质地过于松散, 土壤结构变差。对比 4 年 R 值, 2017 年 C50 处理处取得最小值, 为 1.4452, 此时土壤三相比与理想三相比最为接近, 而 2017、2018 年 C100 处理处 R 高于对照组, 说明当施炭量过高时土壤中气体较多, 水分蒸发较快, 导致土壤结构变差, 这与李晓龙等^[22]、魏永霞等^[23] 研究结果一致。另外, 本研究还发现, 在累积施炭量相同的条件下, 逐年施入对土壤结构的改良效果优于一次性施入, 这对于探寻黑土区坡耕地生物炭施用模式具有指导意义。通过对各项指标进行双因素方差分析得到, 施炭量和施炭年限对土壤物理指标均有极显著影响, 二者的交互作

用对土壤孔隙度、固相体积分数有显著影响, 对其他指标均有极显著影响。

生物炭含碳量高以及自身呈碱性, 施入土壤后可以改善土壤养分, 增强土壤肥力。本试验结果显示, 施加生物炭可以显著提高 pH 值、总有机碳含量和速效 K 含量 ($P < 0.05$), 且随着施炭量和施炭年限的增加效果逐渐增强, 这与魏永霞等^[23] 研究结果一致, 但与聂新星等^[24] 对 pH 值无显著影响存在一定的差异, 这可能是由于土壤质地或生物炭种类不同所造成的, 并且有研究表明^[25], 施用生物炭降低土壤的 pH 值, 可能是由于所用生物炭是经硫酸亚铁酸化后的生物炭, 略小于当地土壤的 pH 值, 所以一定程度上降低了土壤的 pH 值。土壤铵态 N、有效 P 含量随着施炭量的增加呈先增后减的变化规律, 铵态 N 含量前两年均在 C50 处理达到最大, 后两年均在 C25 处理取得最大值; 有效 P 含量则 4 年分别在 C75、C50、C25、C25 处理达到最大, 说明施入适量生物炭对土壤铵态 N 含量和有效 P 含量起正效应。但同时也应注意到 2017、2018 年 C100 处理铵态 N、有效 P 含量却低于对照组, 这可能是由于过高的生物炭施用量使铵态 N、有效 P 含量的生物固定, 使其含量降低^[26]。说明适当的生物炭可以有效地提高土壤养分含量, 但当施炭量过高时, 会起到抑制作用。随着施炭量的增加, 各年各处理的土壤营养指数较 C0 处理显著提高, 表明生物炭施入土壤后可以有效地提高土壤养分, 从而提高土壤综合肥力。施炭年限和施炭量对土壤养分指标的双因素方差分析结果表明, 施炭年限、施炭量对土壤养分各项指标均有极显著影响, 二者的交互作用对土壤营养指数有显著影响, 对其他指标均有极显著影响。

在土壤持水能力方面, 生物炭由于具有多孔结构和强大的吸附能力被许多学者认为可以有效地提高土壤持水能力^[21-22, 27-28], 但不同施炭量以及施炭年限对土壤持水能力的影响程度尚未有明确结论。DUGAN 等^[29] 研究表明, 施加生物炭可以提高土壤

的持水能力;LAIRD 等^[30]和 PICCOLO 等^[31]基于室内试验结果表明生物炭可以使土壤保持更多的水分,但并没有明确提出最佳施炭量和施炭年限。本试验结果显示,随着施炭量的增加,饱和含水率逐渐增大,田间持水率和凋萎系数施炭第 1 年随着施炭量的增加逐渐增大,且显著高于 C0 处理($P < 0.05$),而第 2、3、4 年则随着施炭量的增加呈先增后减的变化规律,这与王艳阳等^[9]结论一致。土壤持水能力的变化与土壤三相相比变化息息相关,表现在施加生物炭后土壤容重降低,土壤固相体积分数随之降低,液相、气相体积分数随之升高,从而土壤的含水率和透气性提高,土壤结构较优, R 减小。双因素方差分析结果显示,施炭年限、施炭量及其交互作用对 3 项指标均有极显著的影响。

在水土保持方面,由于施用生物炭能够改善土壤结构,提高土壤孔隙度,增强土壤的透水透气性,提高降水的入渗量,因而可以有效改善水土流失现象^[7,9,10,32-34]。本试验结果显示,随着施炭量的增加,径流系数和单位降雨量土壤侵蚀量均呈先减后增的变化规律,但达到最佳保水保土效果的施炭模式有所不同,2015—2018 年的最佳减流处理分别为 C75、C50、C50、C25,而单位降雨量土壤侵蚀量 2015—2016 年在 C50 处最小,2017—2018 年在 C25 处最小。另外,2018 年 C100 处理两项指标均高于 C0 处理,这与 SADEGHI 等^[35]研究结果一致,造成该规律的原因可能是当施炭量过高或累积施炭量过高时,生物炭对土壤物理结构指标的影响过大,使土壤质地松散,抗冲刷能力减弱,减流效果变弱,土壤侵蚀量变大。双因素方差分析结果显示,施炭年限和施炭量对两项指标均有极显著影响,二者的交互作用对径流系数有显著影响,对单位降雨量土壤侵蚀量影响不显著。

在节水增产方面,现有研究颇多,但大多集中在短期试验研究,对于中长期不同施炭量以及施炭年限对作物产量以及水分利用效率的研究较为缺乏。勾芒芒等^[7]通过 1 年的试验研究发现,施加生物炭可以显著提高番茄产量。房彬等^[5]的研究表明,施加 1 年生物炭后冬小麦产量和水分利用效率均显著提高。但也有学者认为生物炭对作物产量没有显著影响,崔立强^[36]对水稻和小麦的田间试验研究发现,施加生物炭的水稻和小麦产量没有明显变化,张晗芝等^[37]的研究也发现生物炭对玉米产量没有显著影响。本试验结果显示,大豆产量随着施炭量的增加呈先增后减的变化规律,4 年分别在 C75、C50、C50、C25 处理取得最大值;水分利用效率的变化规律与大豆产量相同。双因素方差分析显示,施炭年

限对大豆产量有极显著影响,对水分利用效率有显著影响,施炭量对两项指标均有极显著影响,二者的交互作用对产量有极显著影响而对水分利用效率影响不显著。综合来看,当施加适量的生物炭时,可以有效改善土壤结构、提高土壤肥力,增强土壤持水能力、减少水土流失,使作物处于最佳的生长环境,因而可以达到增产、稳产的目的,但当施炭量或累积施炭量过高时,作物生长的最优平衡被打破,产量呈下降趋势,因此合理的施炭量以及施炭年限变得至关重要。

在投入产出方面,随着施炭量的增加,生物炭成本逐渐增加,收益呈先增后减的变化规律,施用 1 年和连续施用 2 年均均在施炭量为 75 t/hm^2 时取得最大值,连续施用 3 年和 4 年均均在施炭量为 50 t/hm^2 时取得最大值。边际生产力与收益的变化规律相同,施用第 1 年在施炭量为 75 t/hm^2 时取得最大值,连续施用 2、3、4 年均均在施炭量为 25 t/hm^2 时取得最大值。由于生物炭前期成本较高,短期内很难实现盈利,这可能是生物炭技术推广的主要障碍,但也应该看到生物炭技术的优势,它不仅可以改良土壤,提高土地的生产力,还可以将秸秆变废为宝,实现资源的循环利用,减少秸秆焚烧带来的环境污染,有助于构建低碳、高效、循环经济发展模式,对实现耕地可持续性发展和保障国家粮食、环境安全都具有重要的战略意义。经济利益是农户最为关心的问题,应在保证生态利益的同时提高经济效益,既要满足改善土壤质量的目的,又要满足农户增产的目的,实现土壤改良与节水增产的双赢。鉴于此,国家应加大对生物炭技术的扶持力度,给予秸秆炭化综合利用补贴,降低应用成本,促进生物炭技术的推广应用。

本研究建立了基于熵值法改进的模糊综合评价模型测算了不同施炭模式的生态效益、经济效益和综合效益。连续施用 2 年生物炭,施炭量为 72.74 t/hm^2 时生态效益最大。当低施炭量时,土地质量取决于土壤自身结构,因此随着施炭量的增加,生态效益指数逐渐增大,当施炭量达到一定程度时,过高的施炭量使土壤结构遭到破坏,反而不利于作物生长,生态效益指数逐渐降低。经济效益指数在施用 3 年、施炭量为 36.32 t/hm^2 时达到最大。当低施炭量时,生物炭的成本较低,经济效益随着施炭量的增加逐渐增大,当施炭量逐渐升高时,生物炭成本的增加速率大于作物产出的速率,故经济效益逐渐减小。综合效益受生态效益和经济效益的影响,4 年均随着施炭量的增加呈先增后减的变化规律,连续施用 3 年、施炭量为 62.30 t/hm^2 时取得最大值,为黑土区最佳生物炭施用模式。

本研究通过 4 年的试验研究得出黑土区最佳生物炭施用模式为连续施加 3 年 62.30 t/hm²生物炭。

4 结论

- (1)生物炭能够有效改善土壤结构、增强土壤肥力、提高土壤蓄水保土能力。连续施用 2 年、施炭量为 50 t/hm²时,土壤蓄水保土效果最佳;连续施用 3 年、施炭量为 50 t/hm²时,土壤结构最为理想;连续施用 4 年、施炭量为 100 t/hm²时,土壤肥力最好。
- (2)生物炭能够有效提高作物节水增产性能及

其经济产值。连续施用 3 年、施炭量为 50 t/hm²时,大豆增产效果最佳;施用 1 年、施炭量为 75 t/hm²时,大豆水分利用效率最大;连续施用 4 年,施炭量为 50 t/hm²时,收益最大。

- (3)根据基于熵值法改进的模糊综合评价模型测算的不同施炭模式的生态效益、经济效益和综合效益指数,连续施用 2 年、施炭量为 72.74 t/hm²时生态效益最大;连续施用 3 年、施炭量为 36.32 t/hm²时经济效益最大;黑土区最佳生物炭施用模式为连续施用 3 年,施炭量为 62.30 t/hm²。

参 考 文 献

[1] 国家统计局关于 2016 年粮食产量的公告[R]. 国家统计局,2016.

[2] 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 Wenfu,ZHANG Weiming,MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica,2013,46(16):3324-3333. (in Chinese)

[3] ANTAL M J, GRONLI M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8):1619-1640.

[4] 刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
LIU Xianghong. Effects of biochar application on soil improvement on the Loess Plateau [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[5] 房彬,李心清,赵斌,等.生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(8):1292-1297.
FANG Bin, LI Xinqing, ZHAO Bin, et al. Effects of biochar on soil physicochemical properties and crop yield of dry farmland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(8):1292-1297. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):137-142. (in Chinese)

[8] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere,2010,78(9):1167-1171.

[9] 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)

[10] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(14):135-144.
LI Shuailin, WANG Xia, WANG Shuo, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(14):135-144. (in Chinese)

[11] 程功,刘廷玺,李东方,等.生物炭和秸秆还田对于旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019,27(7):1004-1014.
CHENG Gong,LIU Tingxi,LI Dongfang, et al. Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(7):1004-1014. (in Chinese)

[12] 冀保毅,李潮海,赵亚丽,等.一种用立体几何知识分析土壤三相比数据的方法:103197045A[P]. 2013-07-10.

[13] 王博文,阎秀峰. 应用土壤质量退化指数计算松嫩盐碱草地土壤营养位[J]. 生态学报, 2007, 29(2):662-668.
WANG Bowen, YAN Xiufeng. Soil nutrient level in Songnen saline grassland using soil quality degradation index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 29(2):662-668. (in Chinese)

[14] 陈晓红,杨志慧. 基于改进模糊综合评价法的信用评估体系研究——以我国中小上市公司为样本的实证研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(1):146-153.
CHEN Xiaohong, YANG Zhihui. Research on credit evaluation system based on improved fuzzy comprehensive evaluation method—an empirical study on small and medium-sized listed companies in China[J]. China Management Science, 2015, 23(1):146-153. (in Chinese)

[15] 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[16] 海热提·涂尔逊,王华东,王力红,等.城市可持续发展的综合评价[J]. 中国人口·资源与环境,1997,7(2):46-50.
HAGERTY Durson, WANG Huadong, WANG Lihong, et al. Comprehensive evaluation of sustainable urban development[J]. China Population, Resources and Environment, 1997,7(2):46-50. (in Chinese)

[17] 蓝华,刘微微,于渤. 基于影响要素的科技学术期刊质量模糊综合评价[J]. 中国软科学,2009(1):144-151.
LAN Hua, LIU Weiwei, YU Bo. Fuzzy comprehensive evaluation of quality of sci-tech academic journals based on impact factors[J]. China Soft Science, 2009(1):144-151. (in Chinese)

[18] 刘世梁,傅伯杰,陈利顶,等.两种土壤质量变化的定量评价方法比较[J]. 长江流域资源与环境,2003(5):422-426.

[19] 李新宇,唐海萍,赵云龙,等. 怀来盆地不同土地利用方式对土壤质量的影响分析[J]. 水土保持学报,2004,18(6): 103 – 107.
LI Xinyu,TANG Haiping,ZHAO Yunlong,et al. Effects of land use on soil quality in Huailai Basin,Hebei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(6):103 – 107. (in Chinese)

[20] 王华,黄宇,阳柏苏,等. 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价[J]. 生态学报,2005,25(12):3271 – 3281.
WANG Hua,HUANG Yu,YANG Baisu,et al. Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(12):3271 – 3281. (in Chinese)

[21] 史常亮. 基于“三性”分析的上市商业银行经营绩效评价[J]. 金融发展研究, 2012(12):12 – 15.
SHI Changliang. Evaluation of operational performance of listed commercial banks based on “three characteristics” analysis [J]. Financial Development Research, 2012(12):12 – 15. (in Chinese)

[22] 李晓龙,高聚林,胡树平,等. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4): 1 – 7.
LI Xiaolong,GAO Julin,HU Shuping,et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015,33(4):1 – 7. (in Chinese)

[23] 魏永霞,刘志凯,冯鼎锐,等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 201 – 207.
WEI Yongxia,LIU Zhikai,FENG Dingrui,et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8): 201 – 207. (in Chinese)

[24] 聂新星,李志国,张润花,等. 生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报,2016, 32(9):27 – 32.
NIE Xinxing, LI Zhiguo, ZHANG Runhua, et al. Effects of biochar and its combined application with chemical fertilizers on physical and chemical properties and microbial quantity of fluvo-aquic soil and winter wheat yield[J]. Chinese Agriculture Bulletin, 2016, 32(9):27 – 32. (in Chinese)

[25] 王小芳,李毅,姚宁,等. 生物炭改良棉花-甜菜间作土壤理化性质与盐分效果分析[J]. 农业机械学报,2022,53(4): 352 – 362.
WANG Xiaofang, LI Yi, YAO Ning, et al. Effects of biochar on soil physical and chemical properties and salt in cotton – sugarbeet intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4):352 – 362. (in Chinese)

[26] YING Y, GAO B, ZHANG M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11):1467 – 1471.

[27] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos [J]. Field Crops Research,2009,111(1 – 2): 81 – 84.

[28] 黄明逸,张展羽,徐辉,等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土盐盐转移特征的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(1):238 – 247.
HUANG Mingyi,ZHANG Zhanyu,XU Hui,et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):238 – 247. (in Chinese)

[29] DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Biochar from sawdust, maize stover and charcoal: impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana[C] //19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, 2010: 9 – 12.

[30] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendment on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. Geoderma,2010,158(3 – 4): 443 – 449.

[31] PICCOLO A, PIETRAMELLARA G, MBAGWU J. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils[J]. Soil Use and Management,1996,12(4): 209 – 213.

[32] 吴昱,赵雨森,刘慧,等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J]. 农业机械学报, 2017,48(7):252 – 261.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):252 – 261. (in Chinese)

[33] 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. Effects of biochar on soil and water conservation and soybean yield in sloping farmland of black soil area[J]. Water-saving Irrigation, 2017(5): 37 – 41. (in Chinese)

[34] 张进红,吴波,王国良,等. 生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(8):285 – 294.
ZHANG Jinhong,WU BO,WANG Guoliang,et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):285 – 294. (in Chinese)

[35] SADEGHI S H, HAZBAVI Z, HARCHEGANI M K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse produced biochar[J]. Science of the Total Environment, 2015,541: 483 – 490.

[36] 崔立强. 生物黑炭抑制稻麦对污染土壤中 Cd/Pb 吸收的试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
CUI Liqiang. Experimental study on biological black carbon inhibiting Cd/Pb absorption of rice and wheat in polluted soil[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese)

[37] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2713 – 2717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on the growth, nutrient absorption and soil chemical properties of maize seedling[J]. Journal of Ecological Environment, 2010, 19(11): 2713 – 2717. (in Chinese)