

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.031

生物炭施用模式生态效益与经济效益耦合协调度研究

刘 慧^{1,2} 温小艳³ 李禹韬⁴ 张鑫鑫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; 4. 东北农业大学生命科学学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究黑土区坡耕地不同生物炭施用模式的生态效益、经济效益以及二者的耦合协调度,以东北黑土区 3° 坡耕地径流小区为研究对象,设置不施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) 5 个处理,于 2015—2018 年开展试验研究,采用熵值法和耦合协调度模型测算不同生物炭施用模式的生态效益、经济效益以及二者的耦合协调度。结果表明: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,生物炭的生态效益最佳。同时,生物炭能够有效提升作物节水增产性能,提高生物炭的收益和利用效率,施炭 1 年、施炭量为 75 t/hm² 时,生物炭的经济效益最佳。耦合协调度测算结果表明,施用生物炭能有效改善生态效益与经济效益的阻抑程度,黑土区最佳的生物炭施用模式为连续施用 3 年、施炭量为 50 t/hm²,此时生物炭的生态效益指数与经济效益指数均较高且二者的协调度达到最佳,分别为 0.684 9、0.634 5、0.574 1。研究结果可为黑土资源的高效利用以及黑土区实际生产提供理论依据。

关键词: 黑土区; 生物炭; 生态效益; 经济效益; 耦合协调度

中图分类号: S156.2; S158.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0287-10 **OSID:** 

Coupling Coordination Degree of Ecological Benefits and Economic Benefits of Biochar Application Models

LIU Hui^{1,2} WEN Xiaoyan³ LI Yutao⁴ ZHANG Xinxin³ 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

4. College of Life Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the ecological benefits, economic benefits, and their coupling coordination degree of different biochar application modes on sloping farmland in the black soil area, an experimental study was carried out from 2015 to 2018, the 3° slope farmland runoff plot in the northeast black soil area was taken as the research object. Five treatments were set up in the experiment: conventional treatment without biochar (C0) and biochar application rates were 25 t/hm² (C25), 50 t/hm² (C50), 75 t/hm² (C75) and 100 t/hm² (C100). The entropy method and the coupling coordination degree model were used to measure the ecological, economic benefits and their coupling coordination degree of different biochar application modes. The results showed that biochar can effectively improve soil structure, enhance soil fertility, and improve soil water and soil conservation capacity. The ecological benefit of biochar was the best when biochar application rate was 50 t/hm² for two consecutive years. Meanwhile, biochar can effectively improve crop water-saving and yield-increasing performance, and increase the income and utilization efficiency of biochar. The economic benefit of biochar was the best when biochar application rate was 75 t/hm² for one year. The results of the coupling coordination degree calculation

收稿日期: 2020-11-04 修回日期: 2020-12-15
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: 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理论与实务研究,E-mail: fanyadong@neau.edu.cn

showed that the application of biochar can effectively reduce the inhibition degree of ecological and economic benefits. The best biochar application mode was to apply 50 t/hm² biochar for three consecutive years in the black soil area. The ecological and economic benefits of biochar were both high, and their coordination was optimal, which was 0.684 9, 0.634 5 and 0.574 1, respectively. The research results can provide a theoretical basis for the efficient use of black soil resources and the actual production in black soil areas.

Key words: black soil area; biochar; ecological benefit; economic benefit; coupling coordination degree

0 引言

黑土是肥力最高、最适宜耕作和最具生产潜力的土壤,是我国宝贵的自然资源和不可再生的环境资源,为我国农业的可持续发展提供了得天独厚的自然优势和重要保障^[1]。东北黑土区作为全球四大黑土区之一,是我国重要的粮食生产功能区,粮食产量占全国 1/4,调出量占全国 1/3,因此,保护利用好黑土地对保障国家粮食安全和促进农业绿色发展意义重大^[2]。但多年来,盲目追求粮食产量、不合理施用化肥、掠夺式农业经营方式和大机械的使用,导致我国黑土区农田生态环境不断恶化,黑土耕层变浅,土壤结构破坏,土地有机质和保水能力下降,水土流失面积扩大,侵蚀强度增加,黑土质量退化日益严重,致使土地生产能力降低,农产品品质降低,农业经济效益低下,严重威胁了黑土区的粮食生产能力。

我国东北地区秸秆资源丰富,但大多以“焚烧、丢弃”等粗放方式处理,不仅造成了严重的资源浪费,而且也对环境产生严重污染。生物炭是作物秸秆、动物粪便等原材料在缺氧的条件下,高温(<700℃)裂解而成的一种高度芳香化、富含碳素的固态产物^[3]。黑土区数量庞大的秸秆是生物炭的理想来源,以生物炭为核心的秸秆炭化还田技术不但为秸秆等农林业废弃物提供了一条变废为宝的出路,更为提高耕地生产能力提供了有效手段^[4],契合高效率利用秸秆资源、减少面源污染的需要。因而生物炭受到了许多学者的关注,房彬等^[5]通过 1 年试验得到施加生物炭可以降低土壤容重,提高土壤 pH 值;勾芒芒等^[6]通过 1 年盆栽试验得到施加生物炭促进了番茄根系发育和产量提高;杜兵杰等^[7]通过主成分分析法探究了不同施炭水平对番茄品质的影响,庞红伟^[8]通过投影寻踪模型,评价了生物炭对节水灌溉水稻生长的影响。目前对于生物炭的研究多是短期试验,中长期试验较少,而且对于施加生物炭的效果研究主要集中在土壤理化性质^[5,9-11]、土壤水分运动^[6,12-14]、作物生长^[7,15-16]等生态效益方面,对施加生物炭经济效益的研究较少,而对于生态效益与经济效益的耦合协调度更是鲜有

研究。因此,本文在 4 年田间试验研究基础上,测算不同生物炭施用模式生态效益与经济效益以及二者之间的耦合协调度,以期得到黑土区最优施炭模式,为黑土区作物持续增产和土壤培肥提供技术支持。

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°2′~48°17′N, 126°47′~127°15′E)进行。该区属寒温带大陆性气候,全年平均降水量 555.3 mm,其中 90% 左右集中在 7—9 月,大于等于 10℃有效积温为 2 254.5℃,年日照时数为 2 364.2 h,无霜期 105 d 左右。该区地处小兴安岭南麓,地势东高西低,坡面较长,坡度为 3°~5°,属丘陵漫岗地带。该区土壤以黑土为主,农作物以水稻、大豆以及玉米为主。

1.2 试验设计

于 2015—2018 年在北安红星农场的径流小区内开展为期 4 年的试验研究。各径流小区坡度为 3°,面积为 100 m²(20 m×5 m),每 2 个小区间隔 1 m 且各小区边界用深入地下 1 m 的铁板隔开,防止侧渗。试验共设置 5 个生物炭水平:0 t/hm²(C0)、25 t/hm²(C25)、50 t/hm²(C50)、75 t/hm²(C75)、100 t/hm²(C100),2 次重复,共计 10 个径流小区。2015—2018 年每年试验开始前将生物炭与表层土壤(0~20 cm 土层)充分混合均匀。除生物炭施加量不同外,其他水肥管理措施均按当地常规方法,即在天然降雨条件下种植,不进行灌水,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,均以基肥形式一次性施入,且 4 年试验保持一致。试验地土壤为草甸黑土,其基础肥力为 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。试验用玉米秸秆生物炭购于辽宁金和福农业开发有限公司,其制备方式为将玉米秸秆在 450℃无氧条件下高温裂解烧制而成,基粒径 1.5~2.0 mm,pH 值为 9.14,全碳质量比为 70.21 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 土壤理化性质

土壤容重、孔隙度采用 DK-1130 型土壤三相仪测定。土壤饱和含水率、田间持水率采用环刀法测定^[17],土壤凋萎系数采用生物法和干燥法测定^[17]。土壤有机碳含量采用 TOC 分析仪测定;铵态 N、有效 P、速效 K 含量分别采用纳氏比色法、Bray 法、醋酸铵-火焰光度计法测定^[18];土壤 pH 值采用电位法测定。

1.3.2 年径流深和土壤侵蚀量

各次降雨的产流量通过安装在每个径流小区末端的径流自动记录系统记录,进而得到年径流深和径流系数;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)测定,在每次降雨产流后,每 5 min 取 1 次泥沙收集系统中水样,将水样静置 24 h,漂去上层清水,用滤纸滤出泥沙,干燥 8 h 称量,经计算得到产沙量,由各次产沙量加和得到年土壤侵蚀量。

1.3.3 产量和水分利用效率

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,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,故生育期耗水量和水分利用效率计算公式为

$$ET = P + \Delta S - \Delta R \tag{1}$$

$$WUE = Y/ET \tag{2}$$

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 土壤储水量差值,mm

ΔR——地表径流量,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、收益以及利用效率

经济效益考虑试验总成本、收益以及生物炭利用效率,计算公式分别为

$$C_0 = Q_{\text{biochar}} P_{\text{biochar}} + C_1 \tag{3}$$

$$R_t = R_{t-1} + Q_t P_t \tag{4}$$

$$BUE = \Delta Q_{\text{soybean}} / Q_{\text{biochar}} \tag{5}$$

式中 C₀——总成本,元/hm²

C₁——除生物炭成本以外的其他成本,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、R_{t-1}——第 t、t-1 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

ΔQ_{soybean}——大豆累积增产量,kg/hm²

BUE——生物炭利用效率,kg/t

1.4 基于熵值法的耦合协调度模型

1.4.1 数据标准化

由于指标的差异性,各类数据量纲不同,故依据各指标对生物炭施用效益的影响分为正向、负向两类进行标准化处理

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & (\text{正向指标}) \\ \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} & (\text{负向指标}) \end{cases} \tag{6}$$

式中 x_{ij}——第 j 种方案的第 i 个指标值

minx_{ij}、maxx_{ij}——所有方案中第 i 个指标的最小值和最大值

1.4.2 生态效益与经济效益

以生态效益为例介绍效益的计算方法。设共有 m 个生态效益指标,采用熵值法确定各指标的权重。第 i 个指标的信息熵 h_i表达式为

$$h_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \tag{7}$$

第 i 个指标的信息熵冗余度 d_i表达式为

$$d_i = 1 - h_i \tag{8}$$

利用熵值法对指标赋权,权重 ω_i表达式为

$$\omega_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i} \tag{9}$$

生态效益 v_j计算式为

$$v_j = \sum_{i=1}^m \omega_i y_{ij} \tag{10}$$

1.4.3 耦合协调度模型

生物炭施用后的生态效益和经济效益是两个动态、交错、非均衡的过程,因此生物炭施用效益的重点不仅在于测算出各效益综合值,还在于对效益间耦合协调关系进行分析。耦合协调度是衡量系统内部各要素在发展过程中彼此协调与否的量值,反映系统由无序向有序变化的趋势^[19]。本文将生物炭施用效益系统耦合协调度视为生态、经济两子系统相互之间作用程度的体现,分析两者耦合与协调发展程度,设第 j 个方案的生态效益和经济效益分别为 v_j和 u_j,则

$$C_j = \left[\frac{v_j u_j}{(v_j + u_j)^k} \right]^{\frac{1}{k}} \tag{11}$$

$$T_j = \alpha v_j + \beta u_j \tag{12}$$

$$D_j = \sqrt{C_j T_j} \tag{13}$$

式中 C_j——耦合度,取值范围为[0,1],C_j越大,说

明两系统相互作用越强

k ——调节系数,因涉及生态效益与经济效益两个子系统,故 k 取 2

T_j ——经济效益和生态效益的综合协调指数

α, β ——待定系数,本文认为施加生物炭后的生态效益与经济效益同等重要,因此取 $\alpha = \beta = 0.5$

D_j ——生态效益与经济效益的协调度,取值范围为 $[0, 1]$, D_j 越大,说明两系统协调程度越好

耦合度和协调度等级划分如表 1 所示^[20]。通过计算各方案的耦合度和协调度分析施加生物炭的生态效益和经济效益的耦合协调度。

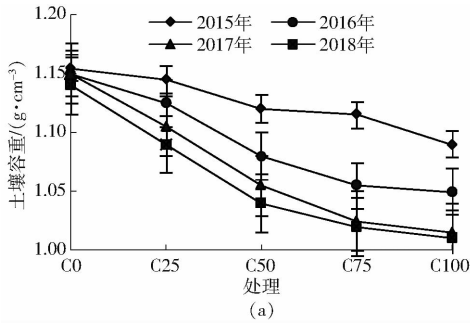
表 1 耦合度和协调度分级

Tab. 1 Coupling degree and coordination degree classification

耦合度	耦合阶段	协调度	协调程度
$0 \leq C \leq 0.3$	低水平耦合	$0 \leq D \leq 0.2$	严重失调
		$0.2 < D \leq 0.3$	重度失调
$0.3 < C \leq 0.5$	拮抗	$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调
		$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调
		$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调
$0.5 < C \leq 0.8$	磨合	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调
		$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调
		$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调
$0.8 < C \leq 1$	高水平耦合	$0.9 < D \leq 1$	优质协调

1.5 数据处理

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 进行统计分析,采用



Tukey 法进行多重比较,显著性水平取 0.05。采用熵值法计算生态效益和经济效益各指标的权重,采用耦合协调度模型分析各处理生态效益与经济效益的耦合度和协调度。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭的生态效益

2.1.1 施加生物炭对土壤结构指标的影响

图 1 为 2015—2018 年各处理土壤容重和孔隙度的变化规律。由图 1a 可知,连续 4 年施加生物炭可以降低土壤容重,且随着施炭量的增加容重逐渐减小。施炭当年,各处理容重分别为对照组的 94.37% ~ 99.13%;连续施炭 2 年,各处理容重分别为对照组的 91.30% ~ 97.83%;连续施炭 3、4 年,各处理容重分别为对照组的 88.26% ~ 96.09%、88.60 ~ 95.61%。同一施炭水平下,土壤容重随试验年限的延长呈逐渐递减的趋势。由图 1b 可知,各施炭处理土壤孔隙度均大于对照组,施炭当年各处理孔隙度分别为对照组的 1.03 ~ 1.11 倍;连续施炭 2 年,各处理孔隙度分别为对照组的 1.08 ~ 1.21 倍;连续施炭 3 年,各处理孔隙度分别为对照组的 1.12 ~ 1.23 倍,连续施炭 4 年,各处理孔隙度分别为对照组的 1.11 ~ 1.25 倍。同一施炭水平下,土壤孔隙度随试验年限的延长呈逐渐递增的趋势。以上变化均取决于生物炭多孔性、容重小且远低于土壤容重的结构特征,将其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。

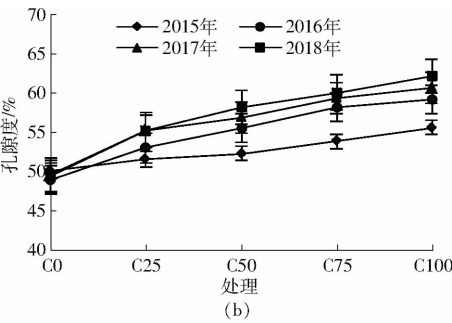


图 1 2015—2018 年不同处理土壤容重和孔隙度变化曲线

Fig. 1 Change curves of soil bulk density and porosity of different treatments in 2015—2018

2.1.2 施加生物炭对土壤养分含量的影响

图 2 为 2015—2018 年各处理土壤养分含量的变化规律。由图 2 可知,随着施炭量的增加,铵态氮含量 2015、2016 年均在 C50 取得最大值,分别为对照组的 1.43、1.51 倍;2017、2018 年均在 C25 处取得最大值,分别为对照组的 1.28、1.18 倍,而 2 年 C100 处理却仅为对照组的 98%、90%。有效磷含

量 2015 年在 C75 取得最大值,为对照组的 2.08 倍;2016 年在 C50 取得最大值,为对照组的 2.02 倍;2017、2018 年均在 C25 取得最大值,分别为对照组的 2.00、2.04 倍,而 2 年 C100 处理仅为对照组的 86%、87%。速效钾含量、总有机碳含量、pH 值 4 年随着施炭量的增加逐渐增大。施加生物炭虽然在一定程度上提高了土壤有效养分的含量,但提高铵态

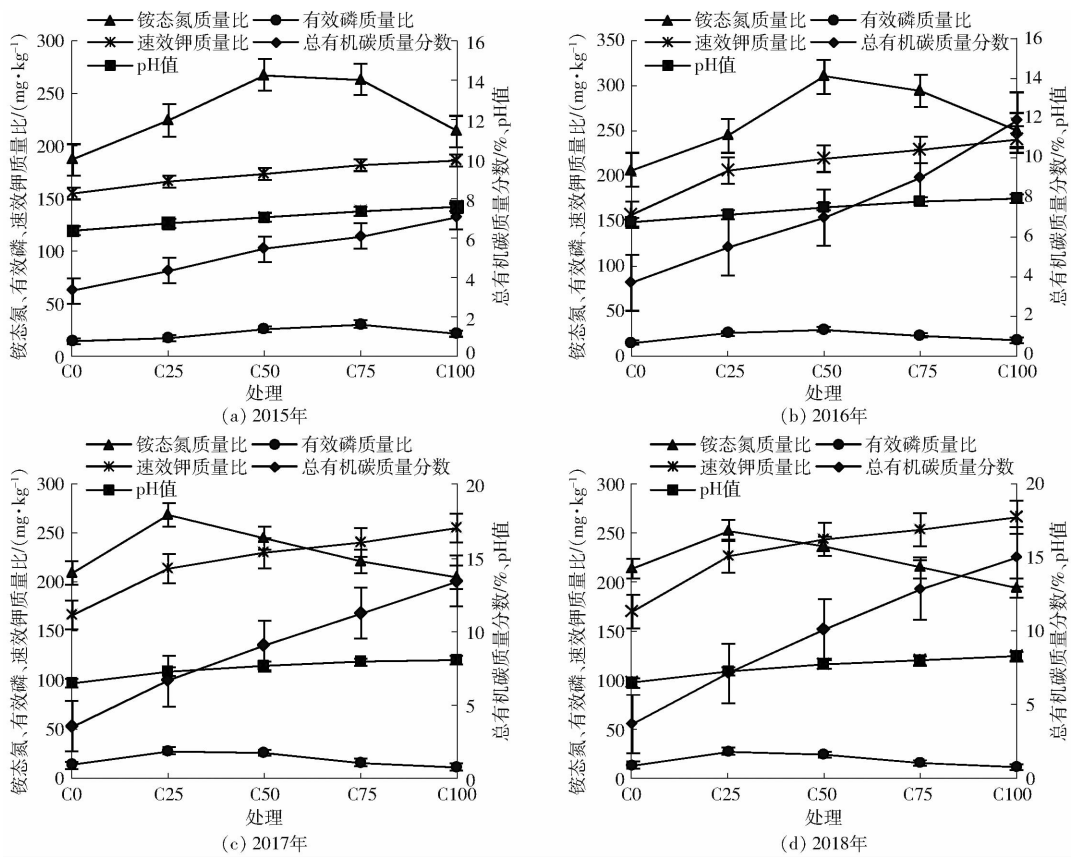


图 2 2015—2018 年不同处理土壤养分含量和 pH 值变化曲线
Fig. 2 Soil nutrient contents and pH value of different treatments in 2015—2018

氮、有效磷含量的效应尚不稳定,甚至在高水平施炭处理下产生了轻微抑制现象。

2.1.3 施加生物炭对土壤持水能力的影响

图 3 为 2015—2018 年各处理土壤水分常数的变化规律。由图 3 可知,随着施炭量的增加,各处理饱和含水率逐渐增大。田间持水率和凋萎系数变化规律相同,2015 年随着施炭量的增加,2 项指标逐渐增大;2016 年和 2017 年 2 指标各处理间由大到小均表现为: C50、C75、C25、C100、C0;2018 年两项指标均在 C25 取得最大值,分别是对照组的 1.08、1.09 倍,而两项指标在 C100 处均低于对照组,这可能是由于适量的生物炭施入土壤后土壤容重随之降低,孔隙度随之升高,从而土壤的含水率和透气性提高,而当累积施炭量过高时会使土壤结构松散、土壤

结构变差,从而使土壤持水能力下降。

2.1.4 施加生物炭对土壤水土流失的影响

由于径流深和土壤侵蚀量受到降雨量的影响,而各年的降雨量存在很大的差异,因此本文采用径流系数和单位降雨量的土壤侵蚀量来消除年际间降雨量差异带来的影响。表 2 为 2015—2018 年各处理径流系数以及单位降雨量的土壤侵蚀量的变化规律。由表 2 可知,施加生物炭在一定程度上可以降低径流系数和单位降雨量的土壤侵蚀量,但并非施炭量或累积施炭量越高减流效果和抗土壤侵蚀效果越佳。径流系数 2015 年 C100 高于 C75,2016 年和 2017 年 C100 仅次于对照组,而 2018 年 C100 则高于对照组;单位降雨量的土壤侵蚀量 2018 年 C75、C100 高于对照组,这可能是随着时间的延长累积施

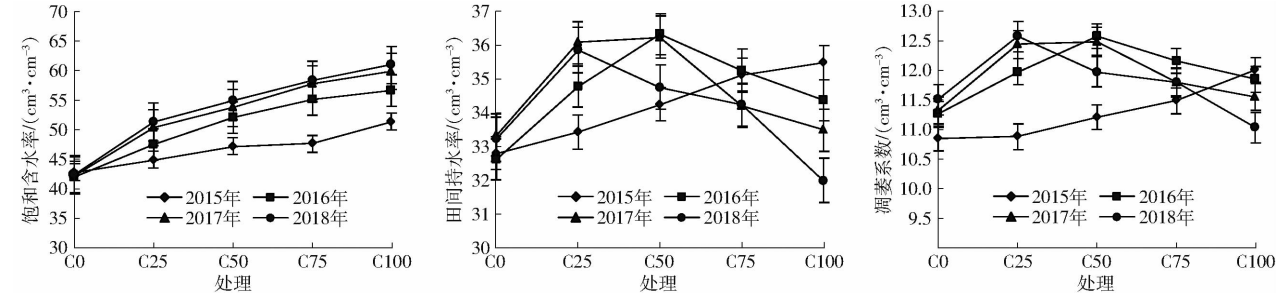


图 3 2015—2018 年不同处理土壤水分常数变化曲线

Fig. 3 Change curves of soil moisture constants of different treatments in 2015—2018

表 2 2015—2018 年不同处理径流系数和单位降雨量的土壤侵蚀量

Tab.2 Runoff coefficient and soil erosion per unit rainfall of different treatments in 2015—2018

处理	径流系数/%				单位降雨量的土壤侵蚀量/(kg·mm ⁻¹)			
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
C0	24.99 ^a	20.56 ^a	21.45 ^a	25.65 ^{ab}	0.127 4 ^a	0.099 1 ^a	0.101 8 ^a	0.108 8 ^{ab}
C25	23.25 ^{ab}	17.31 ^b	19.42 ^b	22.34 ^b	0.125 8 ^{ab}	0.089 7 ^b	0.096 7 ^a	0.104 5 ^b
C50	21.98 ^b	17.01 ^b	19.15 ^b	23.12 ^b	0.117 9 ^b	0.087 2 ^b	0.097 0 ^a	0.105 2 ^b
C75	21.13 ^b	17.43 ^b	20.14 ^{ab}	24.09 ^b	0.122 4 ^b	0.091 3 ^b	0.100 6 ^a	0.109 1 ^{ab}
C100	21.33 ^b	17.78 ^b	20.29 ^{ab}	25.91 ^a	0.124 2 ^{ab}	0.095 5 ^{ab}	0.101 1 ^a	0.110 6 ^a

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

炭量过多,改变了土壤的结构,使土壤过于松散,抗冲刷能力减弱,使减流效果变弱,侵蚀程度增加。

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

图 4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))为 2015—2018 年各处理作物产量以及水分利用效率变化规律。由图 4 可知,施加生物炭 2 年内能够显著提高大豆产量,但连续 3 年施加 100 t/hm²时大豆产量并不会显著提高,连续 4 年施

加时仅 C25 产量显著高于对照组,C100 产量甚至显著低于对照组。施加生物炭 3 年内能够显著提高水分利用效率,但连续 4 年施加 100 t/hm²时水分利用效率显著低于对照处理。这可能是因为适量的生物炭可以改善土壤结构、提高土壤肥力,有利于提高大豆的保水性能和有机质含量,使其处于最佳生长状态,而随着施炭量或累积施炭量的增加,最佳生长状态被破坏,导致作物增产效果和节水效果减弱。

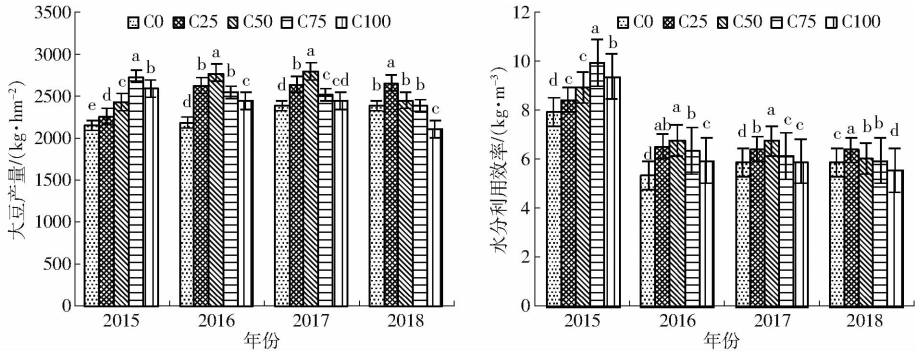


图 4 2015—2018 年不同处理大豆产量和水分利用效率

Fig.4 Soybean yield and water use efficiency of different treatments in 2015—2018

2.2.2 施加生物炭的投入产出

2015—2018 年大豆生产总成本如表 3 所示。分别计算各处理的成本、收益以及生物炭利用效率,结果见表 4。施炭 1 年和连续施炭 2 年收益均在 C75 处取得最大值,分别为 16 923.46、32 274.46 元/hm²;连续施炭 3 年和 4 年收益均在 C50 取得最大值,为

48 661.3、63 336.8 元/hm²,但从生物炭产生的成本和收益来看,目前施用生物炭不经济。连续施炭 2 年,施用量为 25 t/hm²时生物炭利用效率最大,施用年限过长或施用量过大都会导致其利用效率降低,其原因为当施炭量过高或累积施炭量过高时,累积施炭量增加速率远大于产量的增加速率。

表 3 大豆生产总成本

Tab.3 Total production cost of soybean							元/hm ²
年份	种子成本	化肥成本	农药成本	人工成本	土地成本	其他成本	总成本
2015	470.10	814.20	218.40	2 105.85	4 690.05	1 715.25	10 013.85
2016	443.25	769.95	230.70	2 195.85	4 696.50	1 720.50	10 056.75
2017	553.05	679.35	254.40	3 237.75	3 769.35	1 538.10	10 032.00
2018	430.65	853.20	233.40	2 379.15	4 576.35	1 684.50	10 157.25

2.3 生态与经济效益耦合协调度

2.3.1 效益指标及权重

分别选取能够反映生物炭生态效益的 12 个指标和经济效益的 5 个指标,采用熵值法计算各指标

的权重,结果见表 5。

2.3.2 生态与经济效益及其耦合协调度分析

表 6 为各处理生态效益指数与经济效益指数及其耦合协调度测算结果。生态效益测算结果显示,

表 4 2015—2018 年不同处理生物炭成本、收益以及利用效率

Tab.4 Biochar costs, earnings and utilization efficiency of different treatments in 2015—2018				
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	10 013.85	13 308.50	0
	25	15 013.85	14 020.35	4.60
	50	20 013.85	15 041.70	5.60
	75	25 013.85	16 923.46	7.79
	100	30 013.85	16 032.10	4.40
2	0	20 070.60	26 462.20	0
	25	35 070.60	29 852.95	11.20
	50	50 070.60	31 777.30	8.75
	75	65 070.60	32 274.46	6.33
	100	80 070.60	30 751.00	3.50
3	0	30 102.60	40 843.75	0
	25	60 102.60	45 772.15	10.87
	50	90 102.60	48 661.30	8.60
	75	120 102.60	47 470.06	4.82
	100	150 102.60	45 494.35	2.53
4	0	40 109.85	55 129.90	0
	25	90 109.85	61 705.55	10.90
	50	140 109.85	63 336.80	6.78
	75	190 109.85	61 786.16	3.63
	100	240 109.85	58 145.23	1.22

表 5 效益指标及权重
Tab.5 Benefit indexes and weights

效益	指标	指标属性	权重
生态效益	容重(g/cm ³)	-	0.102
	总孔隙度(%)	+	0.084
	铵态氮质量比(mg/kg)	+	0.078
	有效磷质量比(mg/kg)	+	0.100
	速效钾质量比(mg/kg)	+	0.092
	总有机碳质量分数(%)	+	0.113
	pH 值	+	0.070
	饱和含水率(cm ³ /cm ³)	+	0.096
	田间持水率(cm ³ /cm ³)	+	0.054
	凋萎系数(cm ³ /cm ³)	+	0.075
	径流系数(%)	-	0.068
	单位降雨量的土壤侵蚀量(kg/mm)	-	0.068
经济效益	产量(kg/hm ²)	+	0.141
	水分利用效率(kg/m ³)	+	0.275
	成本(元/t)	-	0.268
	收益(元/hm ²)	+	0.237
	生物炭利用效率(kg/t)	+	0.079

注：+ 表示正向指标，- 表示负向指标。

施炭当年随着施炭量的增加生态效益指数逐渐递增,连续施用 2~4 年生态效益指数呈先增后减的变化规律,且均当施炭量为 50 t/hm²时取得最大值。经济效益测算结果显示,4 年随着施炭量的增加经

济效益均呈先增后减的变化规律,4 年分别在施炭量为 75、50、50、25 t/hm²时取得最大值,且连续 3、4 年施用 100 t/hm²生物炭时经济效应低于不施炭处理。说明适量的生物炭可以有效提高生态效益和经济效益,但随着施炭量的增加或累积施炭量的增加此种效果逐渐减弱甚至出现轻微的抑制作用,因此合理的施炭量以及施炭年限至关重要。

表 6 2015—2018 年各处理生态效益与经济效益耦合协调度

Tab.6 Coupling coordination degree of ecological and economic benefits of different treatments in 2015—2018					
年份	处理	生态效益 指数	经济效益 指数	耦合度	协调度
2015	C0	0.044 3	0.432 1	0.290 3	0.263 0
	C25	0.165 5	0.515 0	0.429 0	0.382 0
	C50	0.344 0	0.585 4	0.482 8	0.473 7
	C75	0.432 2	0.725 6	0.483 7	0.529 1
	C100	0.447 7	0.629 8	0.492 8	0.515 3
2016	C0	0.161 9	0.335 6	0.468 5	0.341 4
	C25	0.482 2	0.577 0	0.498 0	0.513 6
	C50	0.709 4	0.597 3	0.498 2	0.570 5
	C75	0.708 9	0.491 8	0.491 8	0.543 4
	C100	0.679 4	0.402 2	0.483 3	0.511 2
2017	C0	0.153 6	0.466 8	0.431 6	0.365 9
	C25	0.591 9	0.618 8	0.499 9	0.550 1
	C50	0.684 9	0.634 5	0.499 6	0.574 1
	C75	0.658 3	0.472 1	0.493 2	0.528 0
	C100	0.648 0	0.382 9	0.483 2	0.499 1
2018	C0	0.139 0	0.525 0	0.406 8	0.367 5
	C25	0.575 7	0.664 3	0.498 7	0.556 1
	C50	0.634 7	0.521 1	0.497 6	0.536 2
	C75	0.634 4	0.415 4	0.489 0	0.506 6
	C100	0.597 3	0.241 5	0.452 8	0.435 8

耦合度测算结果显示,除 2015 年 C0 处理耦合度为 0.290 3,属低水平耦合阶段外,其余各处理均处于拮抗阶段,表明两系统处于一种过程阻碍另一种过程的状态,但从耦合度数值上看施用生物炭能够改善阻碍的程度,4 年各施炭处理耦合度均高于 C0,4 年施炭量分别为 100、50、25、25 t/hm²时耦合度最高。协调度测算结果显示,第 1 年随着施炭量的增加,两种效益的协调度由重度失调逐渐转变为勉强协调;后 3 年随着施炭量的增加,两种效益的协调度均由轻度失调逐渐转变为勉强协调。施炭当年随着施炭量的增加,当施炭量为 75 t/hm²时协调度最高,连续施炭 2、3 年均当施炭量为 50 t/hm²时协调度最高,连续施炭 4 年当施炭量为 25 t/hm²时协调度最高。连续 3 年施加 50 t/hm²生物炭可使生物炭的生态效益与经济效益的协调度最佳,且此时生

态效益指数、经济效益指数及其耦合度均较高。

3 讨论

生物炭由许多紧密堆积且高度扭曲的芳香环片层组成,具有多孔性、比表面积大等特点,施入土壤可以改良土壤结构^[21-23]。本研究发现,随着施炭量和施炭年限的延长,土壤容重逐渐降低,孔隙度逐渐增加,这与 LAIRD 等^[24]研究结果一致。同时,生物炭含有的羟基、羧基、苯环等官能团赋予了其特有的强大吸附能力和较大的离子交换量,这为改良土壤、提高水肥利用效率提供了可能。本研究还发现,施加生物炭可以有效提高土壤肥力和土壤持水能力。随着施炭量增加和施炭年限延长,土壤总有机碳含量、pH 值和饱和含水率逐渐增大。铵态氮、有效磷、速效钾含量、田间持水率和凋萎系数当施炭量较低、施炭年限较短时,随着施炭量增加和施炭年限延长改善效果逐渐增强,但当施炭量或累积施炭量较高时,改善效果逐渐减弱,甚至出现了轻微的抑制作用。这与魏永霞等^[25]研究结果一致,但与聂新星等^[26]认为生物炭对 pH 值无显著影响存在一定的差异,这可能是由于土壤或生物炭种类不同所造成的。由于生物炭能够改善土壤结构,提高土壤的持水能力和渗水性能,因而可以促进降雨入渗,减少径流冲刷和养分流失。当施炭量较低、施炭年限较短时,随着施炭量的增加和施炭年限的延长保水保土效果较好,但当施炭量或累积施炭量较高时,保水保土效果逐渐减弱,甚至水土流失程度超过未施炭处理。这可能是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。

由于生物炭本身有机质含量较高,施入后可增加土壤肥力^[27];同时,生物炭具有比表面积大、多孔及吸附能力强等特点^[28],具有很好的持水、保水性能且对化肥起到了吸附和缓释的作用,能够有效地改善作物的水土环境,有利于作物生长,从而提高作物产量。勾芒芒等^[6]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显著提高。本研究发现,适量的生物炭可以有效地提高作物产量和水分利用效率,但当施炭量较高,或累积施炭量较高时,作物产量和水分利用效率反而降低,甚至低于未施炭处理,说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。由于生物炭技术刚兴起,成本较高,因此随着施炭量的增加成本逐渐升高,这可能也是生物炭技术没有在农田广泛应用的原因。而收益和利用效率

呈先增后减的变化规律,这可能是由于累积施炭量较低时,土壤结构逐渐变好、肥力逐渐增强,使作物处于较好的生长环境,单位生物炭带来的增产效果比较大,收益随之增大;而累积施炭量过高时,土壤结构退化严重,不再适合作物生长,单位生物炭带来的增产效果较小,收益随之减小。农民追求低成本、高收益,因此生物炭技术广泛应用的首要任务就是降低成本。

健康发展的土地的生态效益与经济效益不应“此消彼长,你强我弱”,而是密切联系,相互交织的耦合协调。但退化的土壤与较高的生物炭成本两者之间必然会有冲突,而引入耦合协调度模型旨在寻找两者之间发展的最优组合,使两种效益实现共同提升,最终使生态效益与经济效益协调发展。本研究通过熵值法测算各施炭处理的生态效益和经济效益,得出当连续施炭 2 年,施炭量为 50 t/hm²时生态效益最优;当施炭 2 年,施炭量为 75 t/hm²时经济效益最优。进一步通过耦合协调度模型测算了各施炭模式的耦合度和协调度,得出施加生物炭可以有效地缓解生态效益和经济效益之间的矛盾,但由于生物炭的成本较高,此种缓解效果随着累积施炭量的增加又逐渐减弱,因此适当的施炭量以及施炭年限至关重要。本研究发现,随着施炭量增加,各处理的耦合度和协调度呈先增后减的变化规律。4 年当施炭量分别为 100、50、25、25 t/hm²时耦合度最佳,而当施炭量分别为 75、50、50、25 t/hm²时协调度最佳。连续 3 年施加 50 t/hm²生物炭可使生物炭的生态效益与经济效益的协调度最佳,且生态效益、经济效益及其耦合度均较高。生物炭的效益是一个由经济、生态效益组成的完整系统,只有处理好经济发展与生态环境保护之间的关系,坚持两者协调发展,才能提高综合效益,实现最优效益,促进黑土资源可持续发展。

本文研究了连续 4 年在黑土区坡耕地施加生物炭的生态效益和经济效益及其耦合协调度,而生物炭施加的效果是一个复杂的过程,影响的指标也不仅局限于本文所研究的指标,同时施加生物炭也会产生一定的社会效益。因此在今后的研究中可以将社会效益及更丰富的效益指标纳入研究体系,研究生态-经济-社会三者的耦合协调度,更加全面地反映生物炭的效益。

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。施炭第 1 年生态效益逐渐增加,连续施加 2~4 年生态效益先增后减。

连续施用 2 年、施炭量为 50 t/hm^2 时,生物炭的生态效益最佳。

(2) 适量施用生物炭能够有效提升作物节水增产性能,提高生物炭的收益和利用效率,进而提高其经济效益。4 年内生物炭的经济效益均先增后减。施炭 1 年、施炭量为 75 t/hm^2 时,生物炭的经济效益最佳。

(3) 生物炭能有效改善生态效益与经济效益的耦合协调度。施炭第 1 年耦合度逐渐增加,协调度先增后减;连续施加 2~4 年耦合度和协调度均先增后减。连续施用 3 年、施炭量为 50 t/hm^2 时生物炭的生态效益与经济效益的协调度最佳。黑土区最优生物炭施用模式为连续施加 3 年 50 t/hm^2 生物炭。

参 考 文 献

- [1] 杜金莹,刘福臣. 保护黑土地 筑稳大粮仓——“黑土资源可持续利用与保护高层论坛”综述[J]. 奋斗,2015(11):34-36.
- [2] 陈章全,杨帆,崔勇,等. 加强黑土地保护利用 促进东北农业绿色发展——辽宁、吉林两省黑土地保护利用项目实施调研报告[J]. 农村工作通讯,2019(21):44-47.
- [3] FUERTES A B, ARBESTAIN M C, SEVILLA M, et al. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7):618.
- [4] 孟军,陈温福. 中国生物炭研究及其产业发展趋势[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版),2013,15(1):1-5.
MENG Jun, CHEN Wenfu. China's biochar research and its industrial development trend[J]. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Science Edition), 2013, 15(1):1-5. (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] 杜兵杰,曹红霞,潘小燕,等. 生物炭对亏缺灌溉下温室重壤土栽培番茄产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(4):136-142.
DU Bingjie, CAO Hongxia, PAN Xiaoyan, et al. Effects of biochar on yield and quality of tomato grown in greenhouse heavy loam soil under deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4):136-142. (in Chinese)
- [8] 庞红伟. 生物炭施加对节水灌溉水稻生长影响的 RAGA-PPC 模型评价[J]. 安徽农业科学,2017,45(25):24-26,64.
PANG Hongwei. RAGA-PPC model evaluation of the effects of biochar on the growth of water-saving irrigation rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(25):24-26,64. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 余端,冯牧野,李燕,等. 秸秆生物炭对小白菜生长发育及土壤性质的影响[J]. 南方农业,2019,13(34):45-47.
YU Duan, FENG Muye, LI Yan, et al. Effects of straw biochar on the growth and development of Chinese cabbage and soil properties[J]. Southern Agriculture, 2019, 13(34):45-47. (in Chinese)
- [11] 殷晓燕,程志国,冯涛,等. 施用生物炭对灌漠土理化性质及洋葱产量的影响[J]. 中国水土保持,2019(12):83-86.
YIN Xiaoyan, CHENG Zhiguo, FENG Tao, et al. The effect of biochar application on the physical and chemical properties of irrigated desert soil and onion yield[J]. China Soil and Water Conservation, 2019(12):83-86. (in Chinese)
- [12] 魏永霞,王鹤,肖敬萍,等. 生物炭对黑土区土壤水分扩散与溶质弥散持续效应研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):308-319.
WEI Yongxia, WANG He, XIAO Jingping, et al. Persistent effect of biochar on soil water diffusion and solute dispersion in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):308-319. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200435&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.035. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 贾咏霖,屈忠义,丁艳宏,等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):44-51.
JIA Yonglin, QU Zhongyi, DING Yanhong, et al. Effects of applying biochar under different irrigation methods on soil water and salt transport and water use efficiency of corn[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8):44-51. (in Chinese)
- [15] 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)

[16] 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)

[17] MAO Y. Characteristic analysis of soil moisture constant in Kunming[J]. Journal of West China Forestry Science, 2011, 40(2): 64-68.

[18] 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, 2000:305-336.

[19] 熊建新,陈端吕,彭保发,等.洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J].地理科学,2014,34(9): 1108-1116.
XIONG Jianxin, CHEN Duanlü, PENG Baofa, et al. Time and space differentiation of the coupling coordination degree of ecological carrying capacity system in Dongting Lake area [J]. Geographical Science, 2014, 34(9): 1108-1116. (in Chinese)

[20] 王继军,李慧,苏鑫,等.基于农户层次的陕北黄土丘陵区农业生态经济系统耦合关系研究[J].自然资源学报,2010,25(11):1887-1896.
WANG Jijun, LI Hui, SU Xin, et al. Study on the coupling relationship of agricultural eco-economic system in the loess hilly area of Northern Shaanxi based on the level of farmers[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1887-1896. (in Chinese)

[21] 勾芒芒,屈忠义,王凡,等.生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(7): 1-12.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1-12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180701&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)

[22] 王凡,廖娜,曹贵银,等.基于生物炭施用的土壤改良研究进展[J].新疆环境保护,2020,42(2):12-23.
WANG Fan, LIAO Na, CAO Yingui, et al. Research progress of soil improvement based on biochar application[J]. Xinjiang Environmental Protection, 2020, 42(2):12-23. (in Chinese)

[23] 何振嘉.生物炭对土壤理化特性及作物产量的影响[J].粮食科技与经济,2020,45(5):73-75.
HE Zhenjia. The effect of biochar on soil physical and chemical properties and crop yield[J]. Food Science and Technology and Economy, 2020, 45(5):73-75. (in Chinese)

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

[25] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J/OL].农业机械学报,2020,51(5): 285-294.
WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):285-294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200531&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.031. (in Chinese)

[26] 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)

[27] CHENG C H, LEHMANN J, ENGELHARD M H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(6):1598-1610.

[28] 林洪羽,周明华,张博文,等.生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J].中国生态农业学报,2020,28(1):96-103.
LIN Hongyu, ZHOU Minghua, ZHANG Bowen, et al. Effects of long-term application of biochar and straw on soil aggregate organic carbon in purple soil slope farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1):96-103. (in Chinese)