

生物炭对坡耕地土壤肥力和大豆产量的影响与预测

魏永霞^{1,2} 王鹤¹ 刘慧^{2,3} 吴昱^{4,5}

(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. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090;

5. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 为探究施用生物炭对东北黑土区不同坡度坡耕地土壤肥力和大豆产量影响的持续性,于2016—2018年在3种典型坡度的坡耕地上开展生物炭持续效应试验,分析施加生物炭对土壤团聚体及其稳定性、土壤养分指标、大豆产量及其构成要素影响的持续性,并采用改进的灰色理论预测模型对大豆产量进行预测,进而确定生物炭一次性施入后的增产作用年限。结果表明:施用生物炭使土壤团聚体直径 $d < 0.25$ mm 的土壤团聚体含量明显减少、 $d > 0.25$ mm 的土壤大团聚体含量显著增加;施用生物炭使大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量比例 $R_{0.25}$ 、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)增加,使土壤不稳定团 LT 粒指数 E_{LT} 减小,即土壤团聚体稳定性提高,该稳定性增强幅度随坡度增大、施炭后时间延长而减小;施加生物炭使土壤 pH 值、铵态氮、速效钾、有机质含量这4个指标显著增加 ($P < 0.05$),最大增长率分别为 17.88%、27.23%、20.31%、17.51%,施炭后土壤养分等级有所上升,土壤肥力增强,增强效果与施炭后年限呈负相关,但生物炭对有效磷含量并无明显影响;施加生物炭后,大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量、产量均显著提高 ($P < 0.05$),增产率高达 26.29%,并且坡度越大、施炭年限越长,各指标增加幅度越小,各因素对大豆产量影响由大到小依次为施炭与否、坡度、施炭后年限;改进的多变量灰色预测模型精度较高,预测单次施用生物炭后大豆增产有效时间为 5~6 年。研究结果可为东北黑土区生物炭应用提供理论依据。

关键词: 生物炭; 湿稳性团聚体; 土壤肥力; 大豆产量; 灰色预测; 持续效应

中图分类号: S152.3; S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0302-11

Influences of Biochar on Soil Fertility and Soybean Yield and Its Prediction

WEI Yongxia^{1,2} WANG He¹ LIU Hui^{2,3} WU Yu^{4,5}

(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. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

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

5. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to investigate the prolonged actions of biochar on soil fertility and soybean yield in sloping farm land of the black soil region of Northeast China, an experiment about the prolonged actions of biochar in sloping farm land with three typical slope gradients was conducted in 2016—2018. The prolonged affects of biochar on soil agglomeration and its stability, soil nutrients, soybean yield and its components were analyzed, and the soybean yield was predicted based on an improved grey theory prediction model. And then the affecting period of biochar on yield increasing after one-time application

收稿日期: 2019-01-05 修回日期: 2019-03-07

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: 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,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

was clarified. The results showed that the contents of soil aggregates with diameter of $d < 0.25$ mm and $d > 0.25$ mm were significantly decreased and increased, respectively. The application of biochar made the water-stable aggregate content ratio $R_{0.25}$, the average mass diameter (MWD) and the geometric mean diameter (GMD) all increased and the soil unstable group LT grain index (E_{LT}) decreased, that was the stability of soil aggregates was decreased with the increase of land slope gradients and prolonged period after biochar application. Biochar made the pH value, ammonium nitrogen, available potassium and organic matter content increased significantly ($P < 0.05$), the highest increasing rate of them were 17.88%, 27.23%, 20.31% and 17.51%, and the soil nutrient level was risen, and soil fertility was improved after biochar application, and the effect of them was negatively correlated with the years of biochar application. However, biochar had no significant effect on available pH contents. After applying biochar, the number of pods and grains for per plant, the quality of 100 grains, and yield were significantly increased ($P < 0.05$), and the yield was increased by 26.29%. The bigger the land slope gradients and the longer the biochar applying were, the smaller the increasing amplitude of each index was. The order of the influence degree of various factors on soybean yield from big to small was biochar application, slope gradients and years after biochar application. The improved multivariate grey model had higher precision of yield prediction, and the effective time of biochar for soybean yield increase should be 5 ~ 6 years after biochar application. The results could provide a theoretical basis for the application of biochar in the black soil region of Northeast China.

Key words: biochar; wet-stabilized agglomerates; soil fertility; soybean yield; grey prediction; prolonged effect

0 引言

东北黑土区是世界四大黑土区之一,是我国重要的商品粮基地。东北黑土区土壤肥沃、有机质含量较高、结构性好,有利于农作物生长^[1]。由于水土流失严重,主要耕作区黑土层厚度仅为 20 ~ 40 cm,远低于土地开垦初期(80 ~ 100 cm),土壤有机质含量下降,土壤持水性及稳定性降低,导致作物生长环境恶化^[2],作物产量下降,直接威胁着国家的粮食安全。

生物炭是指在限氧或无氧环境条件下,通过高温(一般小于 700℃)裂解将农作物秸秆等生物质经炭化而形成的一种稳定难溶、高度芳香化、碳含量极其丰富(高达 60%)的固态产物^[3]。秸秆炭化利用可有效减轻东北地区焚烧秸秆所造成的环境污染。早有研究表明,生物炭施入土壤,可降低土壤容重,提高总孔隙率,改善土壤持水性能^[4],提高土壤含水率和降水入渗量^[5],特别是增加土壤中的有效水含量^[6];生物炭还可以提高土壤肥力,创造作物生长的有利条件,进而达到作物增产的目的^[7]。李兴等^[8]探究生物炭对沙壤土水分特征的影响,发现在沙壤土区施用生物炭可以增加土壤持水能力,且干土加 60 g/kg 的生物炭处理效果最好;李昌见等^[9]研究发现,生物炭能改变土壤物理性质、提高水肥利用率、减少肥料淋失,改良砂壤土的最适生物炭用量为 40 t/hm²;胡敏等^[10]研究得出,生物炭显著提高有机质、速效磷、有效钾以及碱解氮等养分含量,通过生物炭对水肥热的改善使得玉米产量增加;文

献^[11-13]发现,添加生物炭后可提高烟草、甘蔗和番茄的产量,施用生物炭后番茄可增产 64% 左右;房彬等^[14]通过大田试验也发现,生物炭处理后玉米产量平均提高 13.9%;黄超等^[15]通过在红壤土中施加不同含量生物炭得出,200 g/kg 处理对黑麦草增产效果最为显著,增产率高达 53%。

目前,关于施加生物炭后效果持续性的研究很少。因此,在仅施用一次生物炭后 2 年内不再施加生物炭的试验条件下,本文探究 3 年黑土区大豆增产及土壤肥力改善等后效应,并应用改进的灰色预测模型预测 2019—2021 年各处理大豆产量,探索黑土区坡耕地施加生物炭的持续效应,旨在为东北黑土区的农业水土资源高效可持续利用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省水利科学研究院综合试验基地(北纬 45°43'09",东经 126°36'35"),总面积 55 hm²,属温带大陆性季风气候,多年平均气温 3.1℃,全年无霜期 130 ~ 140 d,多年平均水面蒸发量 796 mm,耕地土壤多以壤土为主,入渗能力弱,典型坡耕地坡度为 2° ~ 5°。年降水量 400 ~ 650 mm,降水集中且历时较短,仅 7—9 月的降水量就占全年降水总量 70% 以上。该区主要粮食作物为大豆和玉米。

1.2 试验材料

供试生物炭购于辽宁金和福开发有限公司,采用玉米秸秆在 450℃ 无氧条件下烧制而成,其基本

理化性质如表1所示。供试大豆品种为黑河3号。供试土壤主要以壤土为主,有效磷(P_2O_5)质量比为16.9 mg/kg,铵态氮(N)质量比为100.9 mg/kg,速

效钾(K_2O)质量比为280.1 mg/kg,pH值6.27,黑土土壤容重为1.22 g/cm³,0~80 cm土层平均田间持水率为29.4%。

表1 生物炭的基本性质

Tab.1 Biochar basic feature

供试生物炭	粒径/mm	全碳质量分数/%	全氮质量分数/%	全磷质量分数/%	全钾质量分数/%	灰量质量分数/%	pH值
玉米秸秆生物炭	1.5~2.0	70.38	1.53	0.73	1.66	25.7	9.36

1.3 试验设计

本试验在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地的径流小区内进行,小区规格为2 m×5 m,坡度选择1.5°、3°、5°共3种在东北黑土区比较有代表性的坡度。每种坡度分别设置施加生物炭和不施加生物炭处理,小区编号分别为T1.5、T3、T5和CK1.5、CK3、CK5,共计6个小区。根据前期研究成果^[16],生物炭施用量选择施用后增产效果较好的75 t/hm²,生物炭仅在2016年施用,2017、2018年不再施加。各径流小区采用相同的施肥方案,化肥施用量与当地农民习惯施加水平一致并以底肥形式一次性施入,生物炭施用方法为2016年播种前将生物炭粉均匀铺洒于土壤表面,人工搅拌至与0~20 cm表层土壤充分均匀混合后静止待用。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 土壤水稳性团聚体各项指标

每年大豆成熟后取各小区耕层土壤为试验样品,根据干筛各级团聚体的质量百分比配比配取土样50 g,放入筛组中进行湿筛,湿筛组由孔径为0.1、0.25、0.5、1、2、5 mm筛子组成,每次振荡20 min,频率为40次/min。湿筛仪器为ZY200-II型土壤团聚体分析仪,测得各筛余量,根据所测数据计算表征团聚体稳定性的各项指标:大于0.25 mm的水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、土壤不稳定团聚指数(E_{LT})、平均质量直径(Mean weight diameter, MWD)以及几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD),计算公式分别为^[17-19]

$$R_{0.25} = \frac{W_{d>0.25}}{W_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{LT} = 1 - R_{0.25} \quad (2)$$

$$P_{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

$$P_{GMD} = \exp \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{d}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

式中 $W_{d>0.25}$ ——粒径大于0.25 mm团聚体质量,g

W_T ——供试土样的总质量,取50 g

\bar{d}_i ——某级团聚体的平均直径,mm

W_i —— i 级团聚体质量,g

P_{MWD} ——平均质量直径,mm

P_{GMD} ——几何平均直径,mm

1.4.2 土壤化学指标

采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量;碱解扩散法测定铵态氮含量;使用Olsen法,采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量;1.0 mol/L NH₄OAc浸提-火焰光度法测定速效钾含量;PHS-3C型酸度计测量pH值。

1.4.3 大豆产量及其构成要素

于各年大豆收获时,统计每个径流小区内大豆总株数,然后于每个小区分别随机取3株大豆植株,测定每株大豆植株的单株荚数、单株粒数,并在收获结束后测量每个径流小区大豆的总产量和百粒质量。

1.5 产量预测方法

本文大豆产量采用改进的多变量灰色预测模型进行预测。

1.5.1 多变量灰色预测模型的改进

1982年邓聚龙教授提出的灰色理论是将原数据累加成具有规律性的数据列,然后根据生产数据列建立白色化形式的微分方程,白色化形式微分方程的解即为灰色预测模型^[20]。灰色模型是基于—阶常微分方程建立的,称—阶—元灰色模型,记GM(1,1)^[21],本试验考虑多变量故将GM(1,1)扩展为GM(1,N),GM(1,N)表示为—阶N元的微分方程的解,可用来表示N个变量的线性动态变化^[22]。经典GM(1,N)模型为

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (5)$$

式中 $x_1^{(0)}(k)$ ——灰导数

$z_1^{(1)}(k)$ ——白化背景值

a ——发展系数

b_i ——驱动项系数

其中 $b_i x_i^{(1)}(k)$ 为驱动项。

式(5)中,模型近似解只有在 $\sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k)$ 变化很小并且近似于常数时才会成立,GM(1,N)以差分方程为基础进行参数估计,但时间响应公式却是微分方程的解获得的,使得经典GM(1,N)模型进行预测的精度不如预期精准。而且在GM(1,N)模型中只有发展系数 a ,并未有从行为序列中挖掘出来的、反映数据变化关系的灰作用量 u 。对经典GM(1,N)模型加以改进,将可以反映系统内涵的灰作用量引入系统内,协调序列以补充信息,减少原数据使用量,提高模型预测精度。

改进后模型变为

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{j=2}^N b_j x_j^{(1)}(k) + u \quad (6)$$

经系列运算可得到复合梯形预测函数为

$$X_1^{(1)}(t) = \begin{cases} X_1^{(0)}(1) = X_1^{(0)}(1) & (t=1) \\ X_1^{(0)}(1) = e^{-a(t-1)} + \frac{1}{2}e^{-a(t-1)}f(1) + \\ u(t-2) \sum_{\tau=2}^{t-1} e^{-a(t-\tau)}f(\tau) + \frac{1}{2}f(t) & (t=2,3,\dots,N) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $f(t)$ ——平滑延时协调函数

$u(t-2)$ ——单位阶跃函数

1.5.2 灰色预测模型检验

预测结束后利用所得的预测结果进行事后检验,误差在一定范围内才可应用于预测问题分析。

(1) 事前检测

$$\text{检验原数据中所有点的级别 } \delta(t) = \frac{x^{(0)}(t-1)}{x^{(0)}(t)}$$

是否都落在区间 $(e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}})$ 中,级别在该区间时,建立灰色模型才有意义。

(2) 残差检验

绝对误差

$$\varepsilon^{(0)}(t) = x^{(0)}(t) - \hat{x}^{(0)}(t) \quad (t=1,2,\dots,n)$$

相对误差

$$\Delta(t) = \frac{\varepsilon^{(0)}(t)}{x^{(0)}(t)} \times 100\% \quad (t=1,2,\dots,n)$$

$\Delta(t)$ 越小越好,一般要求 $\Delta(t) < 20\%$ 。

(3) 关联度检验

关联系数

$$\eta(t) = \frac{\min|\varepsilon(t)| + \rho \max|\varepsilon(t)|}{|\varepsilon(t)| + \rho \max|\varepsilon(t)|}$$

式中 ρ ——分辨系数,通常取 0.5

关联度

$$R = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \eta(t)$$

当 $R > 0.6$ 时,说明模型基本可以达到较为满意的预测效果。

(4) 后验差检验

残差序列的标准差 S_2 与原数据序列的标准差 S_1 的比值 C 为后验差比值, $p = P(|\varepsilon(t) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745S_1)$ 为小概率误差。

灰色模型精度检验标准参照文献[23]。

1.6 数据处理方法

采用 Excel 2010、Origin 9.0 进行基本数据处理和绘图,利用 SPSS 20.0 进行显著性分析和回归分析,显著性水平为 0.05、0.01,使用最小显著极差法(LSD法)进行多重比较,采用改进的多变量灰色理论模型预测未来3年大豆产量。各年相关参数测定按坡上、坡中、坡下3点取样,3次重复,取其平均值。

2 结果与分析

2.1 生物炭对坡耕地土壤水稳性团聚体的影响

2.1.1 生物炭对土壤团聚体数量的影响

土壤团聚体指土壤中大小、形状不一、且具有不同孔隙度、机械稳定性和水稳定性的结构单位,一般把粒径大于 0.25 mm 的结构单位称为土壤大团聚体。图 1 为各处理各级土壤团聚体含量(质量分数)的变化,由图 1 可知,无论施炭与否土壤团聚体

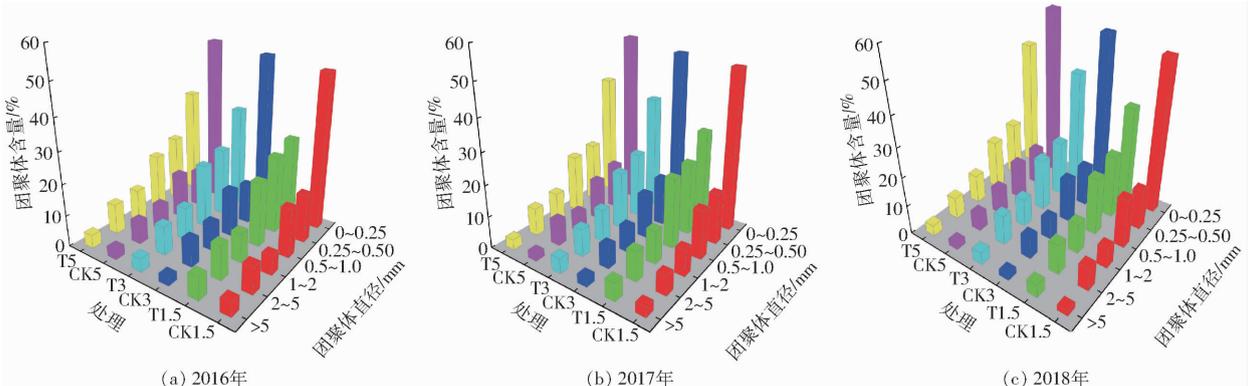


图 1 各处理各级土壤团聚体含量的变化

Fig. 1 Changes in content of soil agglomerates at all levels

中直径 $d < 0.25$ mm 的团聚体含量均为最高,施炭组最高范围在 27.34% ~ 43.62% 之间,未施炭组最高范围在 49.98% ~ 57.40%,土壤团聚体中 $d > 5$ mm 的团聚体含量最少,为 2% ~ 4.78%。

2016 年在相同坡度时,施炭处理 $d < 0.25$ mm 的团聚体含量较未施炭处理明显下降,其余直径的团聚体含量施炭组均比未施炭组有所增加;当 $d < 0.25$ mm 时,各坡度团聚体含量由大到小依次为 T5、T3、T1.5,当 $d > 0.25$ mm 时,各级团聚体含量均随坡度增大而减少。2016 年施加生物炭后 2017、2018 年虽未施炭,但各级团聚体含量的比例变化关系同 2016 年一致,唯一不同之处是施炭处理的变化幅度有所弱化。当 $d < 0.25$ mm 时,2016 年 CK1.5、CK3、CK5 团聚体含量分别为 49.98%、52.28%、54.58%, T1.5、T3、T5 含量分别为 27.34%、33.18%、35.32%, 1.5° 、 3° 、 5° 各坡度减小率为 60.63%、57.56%、54.53%,2017 年 T1.5、T3、T5 比 CK1.5、CK3、CK5 团聚体含量分别减小了 59.07%、43.59%、38.61%, T1.5、T3、T5 比 CK1.5、CK3、CK5 团聚体含量减小率在 2018 年分别为 56.12%、39.15%、31.59%, $d < 0.25$ mm 的团聚体含量随年份增加减小程度逐渐减弱。当 $d > 0.25$ mm (土壤大团聚体)时,施炭处理比未施炭处理的大团聚体含量增加,相同处理不同年份间大团聚体含量随年份增加而减少, 1.5° 坡度在 2016、2017、2018 年施炭组大团聚体的含量较未施炭组增加率达 46.31%、44.31%、38.97%, 3° 坡度各年增加率为 42.40%、34.74%、33.35%, 5° 坡度时各增加率分别为 40.03%、34.66%、32.35%,各坡度的增加幅度也随年限增加而减弱,这主要可能与施加生物炭后的时间有关,生物炭自身所含元素随时间发生降解,对土壤结构的有效成分也随年限增加而减少。

2.1.2 生物炭对土壤团聚体稳定性指标的影响

常用的反映水稳性团聚体稳定性状况基本指标有 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 和 E_{LT} 等, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 越大说明土壤团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[24], E_{LT} 随土壤退化程度增强而增大, E_{LT} 越小说明土壤团聚体越稳定^[25],不同处理对土壤团聚体稳定性指标的影响见表 2。

相同年份, $R_{0.25}$ 由大到小依次为 T1.5、T3、T5、CK1.5、CK3、CK5;不同年份, $R_{0.25}$ 均以 1.5° 坡度的施炭处理最大,分别为 72.66%、70.02%、66.88%。2016、2017、2018 年 MWD 在 T1.5 处理时最大,分别高达 1.119 2、0.967 8、0.914 1 mm,同一年中,3 个坡度施炭处理的 MWD 显著增加,MWD 由大到小依次为 1.5° 、 3° 、 5° 。3 年 GMD 在施加生物炭的处理较

表 2 不同处理的土壤团聚体稳定性指标

Tab.2 Stability index of soil agglomerates treated differently

年份	处理	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	$E_{LT}/\%$
2016	CK1.5	49.66 ^b	0.785 2 ^b	0.251 7 ^c	50.34 ^{ab}
	T1.5	72.66 ^a	1.119 2 ^a	0.367 1 ^a	27.34 ^c
	CK3	47.72 ^{bc}	0.701 9 ^b	0.240 6 ^c	52.28 ^a
	T3	66.82 ^{ab}	0.953 7 ^{ab}	0.321 2 ^b	33.18 ^b
	CK5	45.42 ^c	0.697 7 ^c	0.232 5 ^c	54.58 ^a
2017	T5	64.68 ^{ab}	0.929 0 ^{ab}	0.307 9 ^b	35.32 ^b
	CK1.5	48.92 ^b	0.679 5 ^b	0.241 5 ^b	51.08 ^a
	T1.5	70.02 ^a	0.967 8 ^a	0.335 1 ^a	29.98 ^{bc}
	CK3	47.36 ^b	0.654 8 ^{bc}	0.227 5 ^b	52.64 ^a
	T3	63.34 ^{ab}	0.886 7 ^{ab}	0.314 6 ^a	36.66 ^b
2018	CK5	44.66 ^c	0.653 5 ^{bc}	0.214 5 ^c	55.34 ^a
	T5	60.14 ^b	0.855 7 ^{ab}	0.284 1 ^{ab}	39.86 ^b
	CK1.5	47.98 ^{bc}	0.648 2 ^b	0.232 7 ^{bc}	52.02 ^{ab}
	T1.5	66.88 ^a	0.914 1 ^a	0.325 4 ^a	33.12 ^c
	CK3	45.76 ^{bc}	0.634 3 ^b	0.216 5 ^c	54.24 ^{ab}
2018	T3	61.02 ^{ab}	0.857 5 ^a	0.301 1 ^{ab}	38.98 ^c
	CK5	42.60 ^c	0.609 1 ^{bc}	0.209 5 ^c	57.40 ^a
	T5	56.38 ^b	0.784 8 ^{ab}	0.277 7 ^b	43.62 ^b

注:同一年不同小写字母表示同一年各处理差异显著,下同。

未施炭处理均显著增加,年份相同时,坡度越小 GMD 越大;年份不同时,同一坡度年份越小 GMD 越大。 E_{LT} 3 年中均以 1.5° 小区施加生物炭处理最小,2016、2017、2018 年 E_{LT} 最小分别为 27.34%、29.98%、33.12%;同一年 1.5° 、 3° 、 5° 坡度施炭后 E_{LT} 逐渐增加。说明 2016、2017、2018 年施炭处理的 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 较未施用处理均显著增加 ($P < 0.05$), E_{LT} 显著减小 ($P < 0.05$),且各稳定性指标随着坡度、施炭年限的增加各变化幅度减弱。表明施用生物炭可以增强土壤结构的稳定性,且稳定性随施炭后年限延长而减弱,也就是说仅施用一次生物炭对土壤团聚体稳定性的促进效果逐年削弱。

2.2 生物炭对坡耕地土壤 pH 值及养分的影响

2.2.1 生物炭对土壤 pH 值的影响

2016、2017、2018 年不同处理土壤 pH 值变化如图 2 所示,年份相同时,施用生物炭处理比未施用生物炭处理的土壤 pH 值增大,且施炭处理的土壤 pH 值增长幅度随地形坡度增大而减小,2016、2017、2018 年均以 1.5° 坡度的土壤 pH 值增加率最大,分别为 17.88%、17.68%、14.63%;对 2016、2017、2018 年各处理进行显著性分析可知, $P_{2016} = 0.007$ 、 $P_{2017} = 0.025$ 、 $P_{2018} = 0.040$,说明 2016 年施炭处理与对照处理间差异极显著 ($P < 0.01$),2017、2018 年差异显著 ($P < 0.05$)。表明仅施加一次生物炭后,在施用当年对土壤 pH 值作用极显著,施用次年和第 3 年对土壤 pH 值作用显著,但不及施用当年,可能是

由于生物炭施到土壤中逐渐降解,虽自身呈碱性,但第 1 年施入土壤改善 pH 值后并没有持续施炭,仅有施用当年剩余生物炭,导致对土壤 pH 值的影响也逐渐减弱。

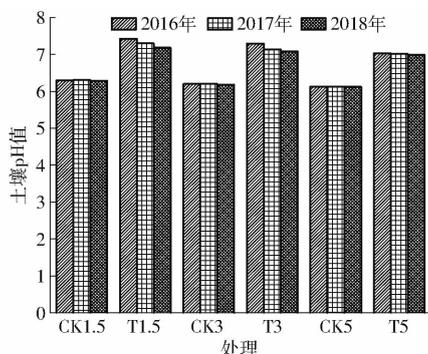


图 2 不同处理的土壤 pH 值变化

Fig. 2 Soil pH value of different treatments

2.2.2 生物炭对土壤养分的影响

土壤养分含量直接影响土壤作物生长环境,养分含量越高作物生长条件越佳,作物产量也会越高。表 3 为 3 年不同处理养分指标的变化。2016 年铵态氮质量比平均增加 27.27 g/kg,增长率为 27.23%,铵态氮显著增加($P=0.00014$),速效钾质量比增量的平均值为 56.67 g/kg,增长率为 20.31%,速效钾显著增加($P=0.001$),有机质质量比平均增加量为 14.2 g/kg,增加了 17.51%,有机质显著增加($P=0.013$)。施炭后对铵态氮、速效钾含量影响极显著,对有机质影响达显著水平,3 个指标中施加生物炭对铵态氮影响最显著,其次是速效钾,最后为有机质,但施炭处理的土壤有效磷含量较未施炭处理无显著差异($P=0.103$)。铵态氮、速效钾、有机质含量增加主要是由于生物炭表面带有丰富的负电荷以及强吸附性,可以使其对土壤中养分离子有较强的吸附性和保持性,尤其是对 NH_4^+ 的吸附与保持作用,其次生物炭孔隙结构十分发达,富含有机大分子,于土壤中能够促使形成较大团聚体,进而增加土壤有机质含量。施用生物炭处理各养分等级有所变化(表 4),施炭后铵态氮、有机质等级均由原来的 3 级上升为 2 级,有效磷保持在 3 级标准,速效钾等级仍保持 1 级标准,说明土壤肥力在施用生物炭后有所提高。

2017 年施炭处理比未施炭处理的土壤铵态氮、速效钾、有机质含量各自平均增加 25.99%、18.11%、16.69%;2018 年施炭处理铵态氮、速效钾、有机质较未施炭处理平均分别增加了 25.45%、17.71%、13.45%,2017、2018 年各指标变化趋势与 2016 年一致,3 个指标影响显著性从大到小顺序依旧为铵态氮、有效钾、有机质,有效磷含量施炭组与

表 3 3 年不同处理的土壤养分质量比

Tab. 3 Soil nutrient content treated differently within three years g/kg

年份	处理	铵态氮	有效磷	速效钾	有机质
2016	CK1.5	101.9 ^b	18.7 ^{ab}	282 ^c	28.0 ^b
	T1.5	129.5 ^a	19.3 ^a	346 ^a	33.1 ^a
	CK3	100.3 ^b	18.6 ^{ab}	280 ^c	27.4 ^{bc}
	T3	128.4 ^a	19.4 ^a	335 ^{ab}	32.1 ^a
	CK5	98.2 ^c	18.9 ^{ab}	275 ^c	25.7 ^{bc}
	T5	124.3 ^a	18.8 ^{ab}	326 ^b	30.1 ^{ab}
2017	CK1.5	100.4 ^b	18.6 ^{ab}	281 ^c	27.5 ^b
	T1.5	126.7 ^a	18.9 ^{ab}	344 ^a	31.6 ^a
	CK3	100.0 ^b	18.7 ^{ab}	282 ^c	26.4 ^b
	T3	123.4 ^a	19.1 ^a	328 ^b	30.7 ^a
	CK5	96.7 ^{bc}	18.3 ^{ab}	271 ^c	24.6 ^b
	T5	122.6 ^{ab}	18.5 ^{ab}	313 ^b	29.3 ^a
2018	CK1.5	99.9 ^b	19.1 ^a	280 ^{bc}	26.8 ^b
	T1.5	125.8 ^a	18.9 ^{ab}	341 ^a	29.4 ^a
	CK3	98.7 ^b	18.7 ^{ab}	279 ^c	24.5 ^b
	T3	123.6 ^a	19.0 ^a	325 ^b	27.7 ^a
	CK5	96.1 ^{bc}	18.6 ^{ab}	271 ^c	23.8 ^{bc}
	T5	121.9 ^{ab}	18.8 ^{ab}	311 ^b	28.1 ^a

表 4 土壤养分等级分级标准

Tab. 4 Grading standard of soil nutrient grade

分级	铵态氮	有效磷	速效钾	有机质
1 级	>150	>40	>200	>40
2 级	120~150	20~40	150~200	30~40
3 级	90~120	10~20	100~150	20~30
4 级	60~90	5~10	50~100	10~20
5 级	30~60	3~5	30~50	6~10
6 级	0~30	0~3	0~30	0~6

对照组差异不显著。不同之处是 3 年施炭组铵态氮、速效钾、有机质含量增加幅度随年限增长递减,施炭年限增加致使生物炭对土壤改良效果减弱,因为土壤大团聚体含量增长率减少,使得含养土团减少,导致各养分指标含量减小;2018 年施炭后铵态氮养分等级由原来的 3 级上升为 2 级,有机质、有效磷都保持在 3 级标准,速效钾等级仍保持 1 级标准,说明仅施加一次生物炭后随年限增加对土壤肥力的改善能力减弱,表明生物炭的作用随时间的延长会逐渐衰减,目前本试验数据显示 3 年生物炭对养分的影响仍然有效。

2.3 生物炭对坡耕地大豆产量及其构成要素的影响

2.3.1 生物炭对大豆产量构成要素的影响

表 5 为 3 年各处理大豆产量的构成要素。对于单株荚数,2016 年 T1.5、T3、T5 比相同坡度对照组分别增加 35.14%、27.78%、25.71%,2017 年分别增加 26.32%、25%、22.86%,2018 年分别增加

23.68%、21.62%、14.29%。2016年施炭后单株粒数增长率在21.79%~30.12%之间,2017、2018年分别为21.05%~28.05%、19.74%~27.16%,3年内均以T1.5处理的单株粒数增加最大。施用生物炭在1.5°坡度时3年对大豆百粒质量的增加率分别为20.40%、18.58%、18.40%,3°坡度各年百粒质量的增加率分别为17.78%、17.23%、17%,5°坡度各年增长了15.04%、14.93%、13.54%。说明单次施用生物炭对大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量均有增加效果,且同坡度呈负相关,2016、2017、2018年单株荚数与坡度相关系数分别为-0.285、-0.334、-0.481,3年单株粒数与坡度相关系数为-0.329、-0.36、-0.343,3年百粒质量与坡度的相关系数分别为-0.301、-0.303、-0.342;同时从大豆各产量构成要素增加率可以得出,施炭后年限越长各构成要素指标增加幅度越小,这是因为施炭后年限越长土壤结构稳定性增强效果越弱,土壤养分含量改善效果越弱,致使土壤肥力逐年相对减弱,进而使得大豆各构成要素增幅减弱。

表5 3年各处理大豆产量构成要素

Tab.5 Constituent factors of soybean yield for each treatment in three years

年份	处理	单株荚数/个	单株粒数/粒	百粒质量/g
2016	CK1.5	37 ^b	83 ^c	19.31 ^b
	T1.5	50 ^a	108 ^a	23.25 ^a
	CK3	36 ^b	80 ^c	18.78 ^{bc}
	T3	46 ^a	99 ^b	22.12 ^a
	CK5	35 ^b	78 ^{cd}	18.55 ^{bc}
	T5	44 ^a	95 ^b	21.34 ^a
2017	CK1.5	38 ^b	82 ^c	19.27 ^b
	T1.5	48 ^a	105 ^a	22.85 ^a
	CK3	36 ^b	79 ^{cd}	18.69 ^{bc}
	T3	45 ^a	100 ^a	21.91 ^a
	CK5	35 ^b	76 ^{cd}	18.42 ^{bc}
	T5	43 ^a	93 ^b	21.17 ^a
2018	CK1.5	38 ^b	81 ^c	19.18 ^b
	T1.5	47 ^a	103 ^a	22.71 ^a
	CK3	37 ^b	78 ^{cd}	18.53 ^{bc}
	T3	45 ^a	97 ^b	21.68 ^a
	CK5	35 ^b	76 ^{cd}	18.31 ^{bc}
	T5	40 ^a	91 ^b	20.79 ^a

2.3.2 生物炭对大豆产量的影响

施用生物炭最根本目的是通过生物炭来调节土壤结构、持水性能、养分含量等,进而达到增产的作用。由图3可知,相同年份各坡度施炭处理较未施炭处理产量均增加显著($P < 0.05$),并且随坡度增加增产率逐渐减小;不同年间相同坡度大豆增产率随年限增加而减小(图4),2016、2017、2018年大豆

产量的最大增产率分别为26.29%、25.90%、25.24%。施炭与否、坡度、施炭后年限3个因素对大豆产量均有影响,为进一步探究三者对增产的显著程度,建立产量(y)关于施炭与否、坡度和施炭后年限的回归方程,其中施炭与否(x_1)为定性变量, x_1 取0表示不施用生物炭,取1表示施用生物炭,坡度因子(x_2)和施炭后年限因子(x_3)为定量变量,得回归方程

$$y = 479.778x_1 - 61.829x_2 - 59.5x_3 + 2242.13$$

$$(R^2 = 0.964, F = 151.193, P < 0.001) \quad (8)$$

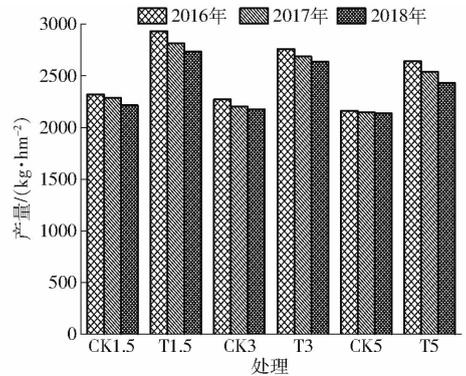


图3 3年各处理的大豆产量

Fig.3 Soybean production treated in three years

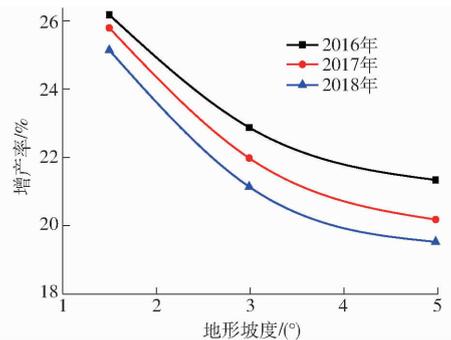


图4 3年各处理大豆增产率的变化曲线

Fig.4 Changes in yield increase of soybeans treated in each of three years

回归方程的 R^2 大于0.9,表明回归方程拟合效果较好; $F = 151.193, P < 0.001$,表明由自变量施炭与否、坡度、施炭后年限和因变量大豆产量建立的线性回归模型具有极显著的统计学意义; t 检验的回归系数显著性值 $P_1 = P_2 < 0.001, P_3 = 0.001$,进一步说明有统计学意义。从回归系数显著性值无法比较出3个自变量对产量的显著程度,施炭与否、坡度、施炭后年限3个自变量的标准系数分别为0.908、-0.335、-0.184,绝对值越大代表在此回归方程中自变量对大豆产量的解释力度越强,因此3个自变量对大豆产量影响由大到小依次为施炭与否、坡度、施炭后年限。

2.4 基于灰色理论模型的大豆产量预测

本试验中对模型精度检验结果见表6。经模型

精度检验后,各检验结果均在符合标准范围内,可以用灰色预测模型对本试验中产量加以预测,结果如表7所示。生物炭的增产潜力随施用年限的延长逐渐减弱,2021年5°小区的产量为2 223 kg/hm²,已经与未施炭区大豆产量十分接近。根据预测产量加上已有3年试验,大体上可以确定施加一次生物炭其对作物的有效时间为5~6年。

表6 灰色预测模型精度检验结果

	平均相对 误差/%	关联系数	后验差比值	小概率 误差/%
数值	38.00	0.712 4	0.378 9	77.31
等级	2级	3级	2级	3级

表7 灰色预测模型预测2019—2021年大豆产量

	kg/hm ²					
年份	CK1.5	T1.5	CK3	T3	CK5	T5
2019	2 199	2 687	2 178	2 588	2 167	2 401
2020	2 182	2 564	2 169	2 493	2 158	2 319
2021	2 174	2 479	2 155	2 401	2 146	2 223

3 讨论

东北黑土区作为国家大粮仓,增加其作物产量对东北区乃至全国都至关重要。生物炭施入土壤后通过改善土壤结构状况、土壤养分环境、土壤肥力,进而达到大豆增产目的。

适合作物生长的水稳性团聚体粒径在0.25~5 mm之间,这个范围中团聚体有利于土壤水分固持、植物根系部分呼吸以及土壤养分的吸收与释放。生物炭施入土壤后改变土壤物理结构,增加土壤微生物活性,进而促进土壤团聚体的形成并增加其稳定性^[26]。本试验生物炭施加使 $d < 0.25$ mm的土壤微团聚体含量明显减少, $d > 0.25$ mm的土壤大团聚体含量显著增加,且变化幅度随坡度、施炭后年限增加逐渐减弱,同王恩武等^[27]研究结果相同。土壤团聚体良好状态以水稳性团聚体稳定性加以衡量,土壤结构稳定指标也是反映土壤抗侵蚀能力的重要指标^[17],本试验施炭处理 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD增大, E_{LT} 减小,土壤团聚体稳定性增强,与文献[18-19]研究结果一致,3年中施炭处理各稳定性指标变化幅度随年份增加均呈减小状态,说明生物炭3年内均能提高团聚体稳定性,有效期大于3年,具体有效期有待进一步增长试验年限加以验证。

土壤pH值是影响土壤肥力的重要因素之一,直接影响着土壤养分的存在形态、转化性和有效性。土壤pH值决定各地区适宜播种的作物种类,东北

黑土区作为中国最大粮仓,主要以大豆等经济作物为主,大豆最适宜pH值在6.5~7.5之间,东北黑土区土壤pH值在5.7~6.4之间,故提高东北黑土区土壤pH值对其大豆生长发育至关重要。本研究施用生物炭显著增大土壤pH值($P < 0.05$),且增大幅度随坡度增大而减小;施用当年生物炭对土壤pH值作用极显著($P_{2016} = 0.007 < 0.01$),施用次年($P_{2017} = 0.025 < 0.05$)和第3年($P_{2018} = 0.040 < 0.05$)对土壤pH值也达显著水平,但不及施用当年,可能是由于生物炭施到土壤中逐渐降解。生物炭增大土壤pH值,主要是由于生物炭的灰分中有K、Ca、Na、Mg、氧化物、氢氧化物、碳酸盐等不同浓度碱性物质,施入土壤后能提高土壤盐基饱和度,降低可交换铝的数量,进而提高土壤pH值^[28-30]。

土壤有机质是土壤团聚体所形成的最为重要的胶结物质,是土壤肥力的重要指标之一,对于改良土壤结构,提升土壤的通气性、透水性,有利于微生物的活动以及增强土壤养分含量等都有巨大作用。SCHMIDT等^[31]认为,生物炭可以提高土壤有机质含量,BRUUN等^[32]、GLASER等^[33]研究发现,生物炭的用量及稳定性可以提高有机质含量的增加程度,主要是生物炭可通过促进土壤有机-矿质复合体的形成来提高土壤团聚体稳定性,进而减少土壤有机质淋失。本试验施用生物炭增加了土壤有机质含量,其增加幅度随着年限增加而减少,这可能是由于年限增加,被包裹或吸附在生物炭空隙和有机-矿质复合体中的微生物生长繁殖速率及活性减弱所造成的,LIANG等^[34]的研究也得到类似结论。坡度对土壤有机质含量的影响不显著。

本研究中生物炭添加提高了土壤铵态氮、速效钾含量,这与有机质含量增多有关,同文献[31]研究结果一致,施炭后3年内铵态氮、速效钾含量增长率均以施用生物炭当年最高,分别为27.23%、20.31%;有效磷含量变化并不显著,与文献[1,28]研究结果不同,可能是由于土壤环境差异所致。生物炭对土壤中铵态氮含量影响最为显著,是因为生物炭独特的表面特性,使其对土壤水溶液中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 有超强吸附性,通过减少溶解和迁移来避免氮元素淋失^[35];另外添加生物炭改善土壤的通气状况,降低厌氧度,故抑制反硝化作用,减少 NO_3^- 经反硝化作用的损失量^[36-37]。施炭后改良了土壤各养分指标,使得土壤养分等级有所上升,土壤肥力增强,增强效果与施炭后年限负相关。

单次施用生物炭对大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量均有增加效果,这与魏永霞等^[16,38]研究结果一致,且各指标同坡度呈负相关;施炭后年限越长各

构成要素指标增加幅度越小,这与生物炭对土壤结构、养分状况的改善情况相一致。施炭处理较未施炭处理大豆产量均增加显著($P < 0.05$),与已有研究结果^[14,16]一致,且随坡度、年限增加增产率逐渐减少。由自变量施炭与否、坡度、施炭后年限和因变量大豆产量建立了线性回归模型,结果表明回归方程拟合效果较好且具有极显著的统计学意义;各自变量对大豆产量影响程度由大到小依次为施炭与否、坡度、施炭后年限。采用灰色预测模型预测未来3年产量,模型的平均相对误差为38.00%,关联系数为0.7124,后验差比值为0.3789,小概率误差为77.31%,各精度检验结果均符合标准范围,证明灰色预测模型可以对本试验中产量进行较准确的预测。2019—2021年产量预测结果呈递减趋势,2021年5°坡度施炭组与未施炭组产量已十分接近。

4 结论

(1)施用生物炭使 $d < 0.25$ mm的土壤团聚体含量明显减少、 $d > 0.25$ mm的土壤大团聚体含量显著增加,且变化幅度随坡度、施炭后年限增加逐渐减

弱;施加生物炭使 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD增加,使 E_{LT} 减小,土壤团聚体稳定性增强,该稳定性增强幅度随坡度增大、施炭后时间延长而减小,生物炭施用当年效果最为显著, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD各指标最大为72.66%、1.1192 mm、0.3671 mm, E_{LT} 最小为27.34%。

(2)施用生物炭可显著提高土壤pH值以及铵态氮、速效钾、有机质含量,各指标增长率分别高达17.88%、27.23%、20.31%、17.51%,但生物炭对有效磷含量影响不显著。施炭后改良了土壤各养分指标,使土壤养分等级有所上升,土壤肥力增强,增强效果与施炭后年限呈负相关。

(3)生物炭对大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量、产量均有明显的正效应,增产率高达26.29%,同时影响因素还有坡度和施炭后年限,对大豆产量影响程度由大到小依次为施炭与否、坡度、施炭后年限,坡度越大、施炭年限越长,各指标增加幅度越弱。

(4)改进的多变量灰色预测模型精度较高,可用于本试验大豆产量的预测,经预测,2021年施炭组产量最低为2223 kg/hm²,与未施炭组产量十分接近,增产有效时间可维持在5~6年。

参 考 文 献

- [1] 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 on soil improvement, 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)
- [2] 郑永照,秦玉波,岳杨,等.近年来黑土耕地土壤肥力变化研究进展[J].农业科技通讯,2016,33(2):166-168.
ZHENG Yongzhao, QIN Yubo, YUE Yang, et al. Research progress on soil fertility change of black land cropland in recent years[J]. Agricultural Science and Technology Newsletter, 2016,33(2):166-168. (in Chinese)
- [3] 张忠河,林振衡,付娅琦,等.生物炭在农业上的应用[J].安徽农业科学,2010,38(22):11880-11882.
ZHANG Zhonghe, LIN Zhenheng, FU Yaqi, et al. Application of biochar in agriculture[J]. Anhui Agricultural Science, 2010,38(22):11880-11882. (in Chinese)
- [4] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008,171(4):591-596.
- [5] 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):81-84.
- [6] CLOTHIER B E, SAUER T, SCOTTER D. Redistribution of water and solute following infiltration from a surface drip source[J]. Water Resources Research, 1991,27(8):2091-2097.
- [7] PICCOLO A, MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil micro aggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Plant and Soil, 1990,123(1):27-37.
- [8] 李兴,勾芒芒,屈忠义,等.生物炭对沙壤土水分特征的影响[J].江苏农业科学,2018,46(12):280-283.
LI Xing, GOU Mangmang, QU Zhongyi, et al. Effects of biochar on water characteristics of sandy loam[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2018,46(12):280-283. (in Chinese)
- [9] 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2187-2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effect of biochar on soil water and fertilizer utilization efficiency and tomato growth[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2014,33(11):2187-2193. (in Chinese)
- [10] 胡敏,苗庆丰,史海滨,等.施用生物炭对膜下滴灌玉米土壤水肥热状况及产量的影响[J].节水灌溉,2018(8):9-13.
HU Min, MIAO Qingfeng, SHI Haibin, et al. Effects of the application of biochar on the thermal status and yield of maize soil

- water and fertilizer under film drip irrigation[J]. *Water-saving Irrigation*, 2018(8): 9–13. (in Chinese)
- [11] BUFON V B, LASCANO R J, BEDNARZ C, et al. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus-2D model[J]. *Irrigation Science*, 2011, 30: 259–273.
- [12] YANG L, LIAO F, HUANG M, et al. Biochar improves sugarcane seedling root and soil properties under a pot experiment [J]. *Sugar Tech.*, 2015, 17(1): 36–40.
- [13] GRABER E R, HAREL Y M, KOLTON M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertile soil less media[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1–2): 481–496.
- [14] 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]. *Journal of Ecological Environment*, 2014, 23(8): 1292–1297. (in Chinese)
- [15] 黄超,刘丽君,章明奎.生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(4): 439–445.
- HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on the properties of red soil and the growth of rye grass[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2011, 37(4): 439–445. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 671–678.
- TAN Qiujin, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al. Stability and organic carbon characteristics of soil agglomerates in different ecosystems of canyon-type Karst[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 671–678. (in Chinese)
- [18] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1969–1976.
- SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on hydrothermal characteristics of loess soil and the stability of agglomerates[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1969–1976. (in Chinese)
- [19] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973–1979.
- ZHOU Hu, LÜ Yizhong, YANG Zhichen, et al. Effects of conservation tillage on the characteristics of soil agglomerates in North China Plain[J]. *Agricultural Science in China*, 2007, 40(9): 1973–1979. (in Chinese)
- [20] 马云倩,郭燕枝,王秀丽,等.基于 LASSO 与 GM(1,N)模型的中国粮食产量预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(7): 30–35.
- MA Yunqian, GUO Yanzhi, WANG Xiuli, et al. Forecast of grain yield in China based on LASSO and GM(1,N) model[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2018, 32(7): 30–35. (in Chinese)
- [21] 刘思峰.灰色系统理论及应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [22] 宋廷山.经济预测与决策方法及其计算机实现[M].长春:吉林大学出版社,2006:203–211.
- [23] 张含瑞,刘晓华.改进多变量灰色模型在山东省粮食产量预测中的应用[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3): 199–207, 244.
- ZHANG Hanrui, LIU Xiaohua. Application of improved multivariate grey model in grain yield prediction in Shandong Province [J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2018, 34(3): 199–207, 244. (in Chinese)
- [24] NIMMO J R, PERKINS K S. Aggregates stability and size distribution[M]//DANE J H, TEPP G C. *Methods of soil analysis, part 4—physical methods*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc., 2002: 317–328.
- [25] 宫阿都,何毓蓉.金沙江干热河谷典型区(云南)退化土壤的结构性与形成机制[J]. *山地学报*, 2001, 19(3): 213–219.
- GONG Adu, HE Yurong. The structure feature and formation mechanism of the degraded soil in dry-hot valley region of the Jinsha River, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(3): 213–219. (in Chinese)
- [26] DOWNIE A, CROSKY A, MUNROE P. Physical properties of biochar[M]//LEHMANN J, JOSEPH S. *Biochar for environmental management: science and technology*. London: Earthscan, 2009: 13–32.
- [27] 王恩武,徐玮,王津军,等.秸秆生物炭对烟区土壤剖面团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *现代农业科技*, 2018(21): 184–186.
- WANG Enwu, XU Wei, WANG Jingjun, et al. Effects of straw biochar on the composition of soil profile agglomerates and organic carbon distribution in tobacco area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(21): 184–186. (in Chinese)
- [28] 刘世杰,窦森.黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 79–82.
- LIU Shijie, DOU Sen. Effects of black carbon on maize growth and soil nutrient absorption and leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 79–82. (in Chinese)
- [29] 何绪生,张树清,余雕,等.生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 16–25.
- HE Xusheng, ZHANG Shuqing, SHE Diao, et al. Effect of biochar on soil fertilizer and its future research[J]. *China*

- Agricultural Bulletin, 2011, 27(15): 16–25. (in Chinese)
- [30] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L. Characterization and evaluation of biochar for their application as a soil amendment[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 516–525.
- [31] SCHMIDT M W, NOACK A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 777–793.
- [32] BRUUN S, EL-ZAHERY T, JENSEN L. Carbon sequestration with biochar-stability and effect on decomposition of soil organic matter[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009.
- [33] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219–230.
- [34] LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206–213.
- [35] LEHMANN J, PEREIRA DA SILVA J, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343–357.
- [36] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1): 235–246.
- [37] YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2007, 53(2): 181–188.
- [38] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201–207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025. (in Chinese)

(上接第 266 页)

- [24] 解白, 汪小帆. 复杂网络中的社团结构分析算法研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3): 1–12.
XIE Wei, WANG Xiaofan. A review of research on community structure analysis algorithms in complex networks[J]. Journal of Complex Systems and Complexity, 2005, 2(3): 1–12. (in Chinese)
- [25] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11): 79–83.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Node shrinkage method for node importance evaluation in complex networks[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(11): 79–83. (in Chinese)
- [26] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 128–131.
WU Jun, TAN Yuejin. Research on the invulnerability measurement of complex networks[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 128–131. (in Chinese)
- [27] 汪小帆, 刘亚冰. 复杂网络中的社团结构算法综述[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 537–543.
WANG Xiaofan, LIU Yabing. A survey of community structure algorithms in complex networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 537–543. (in Chinese)
- [28] 陈关荣. 复杂网络及其新近研究进展简介[J]. 力学进展, 2008, 38(6): 653–662.
CHEN Guanrong. A brief introduction to complex networks and its recent research progress[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(6): 653–662. (in Chinese)
- [29] 朱永宏, 刘建. 复杂网络鲁棒性研究探讨[J]. 科技资讯, 2012(32): 6.
ZHU Yonghong, LIU Jian. Research on robustness of complex networks[J]. Science and Technology Information, 2012(32): 6. (in Chinese)
- [30] 郭本华. 复杂网络鲁棒性的一种基本参数[J]. 安顺学院学报, 2011, 13(5): 123–125.
GUO Benhua. A basic parameter for robustness of complex networks[J]. Journal of Anshun University, 2011, 13(5): 123–125. (in Chinese)