

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.034

# 生物炭对黑土区坡耕地土地生产力的可持续效应研究

刘 慧<sup>1,2</sup> 温小艳<sup>3</sup> 魏永霞<sup>2,4</sup> 范亚东<sup>5</sup>

(1. 东北农业大学理学院, 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. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

5. 东北农业大学经济管理学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为探究一次性施加生物炭后对黑土区坡耕地生产力的可持续效应,以东北黑土区 3°坡耕地径流小区为研究对象,设置 CK(不施用生物炭)和 BC(2016 年施用 75 t/hm<sup>2</sup>生物炭,2017、2018 年不再施用生物炭)两个处理,于 2016—2018 年开展了试验研究。结果表明:一次性施入生物炭 3 年内,土壤容重显著降低( $P < 0.05$ ),第 1 年降低最明显,为 3.87%,孔隙度和总有机碳、铵态 N、有效 P、速效 K 含量显著提高( $P < 0.05$ ),pH 值则是施炭后前两年显著提高( $P_{2016} = 0.034$ 、 $P_{2017} = 0.038$ ),分别提高了 0.9、0.6,第 3 年与未施炭处理无显著差异( $P_{2018} = 0.067$ );施用生物炭显著提升了土壤的持水能力和保水保土性能,土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数均显著提高( $P < 0.05$ ),最大增长率分别为 5.58%、4.78%、7.29%,年径流深和土壤侵蚀量显著降低( $P < 0.05$ ),年径流深最大减少量为 4.92 mm,土壤侵蚀量最大减小率为 5.71%;大豆产量和水分利用效率显著提高( $P < 0.05$ ),最大增长率分别为 29.01%、16.92%。但生物炭对土地生产力的持续效应逐年减弱,随着生物炭施用年限的延长,BC 处理土壤容重线性递增,pH 值和总有机碳含量呈幂函数递减,孔隙度和铵态 N、有效 P、速效 K 含量线性递减,饱和含水率、田间持水率、凋萎系数线性递减,年径流深和土壤侵蚀量线性递增,大豆产量和水分利用效率分别呈幂函数递减和线性递减。采用改进的 TOPSIS(Technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型和 GM(1,1)模型测算并预测土地生产力指数,结果显示,BC 处理的土地生产力指数均高于 CK 处理,但其值逐年下降,预计到 2021 年与 CK 处理十分接近,表明一次性施用 75 t/hm<sup>2</sup>生物炭对土地生产力的影响可持续 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; 土地生产力; 持续效应; TOPSIS 改进模型; GM(1,1)模型

中图分类号: S156.99; S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0308-10

OSID:



## Sustainable Effect of Biochar on Productivity of Sloping Farmland in Black Soil Area

LIU Hui<sup>1,2</sup> WEN Xiaoyan<sup>3</sup> WEI Yongxia<sup>2,4</sup> FAN Yadong<sup>5</sup>

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

5. College of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to explore the sustainable effect of one-time application of biochar on the productivity of sloping farmland in black soil area, the three-degree slope farmland runoff plot in the black soil area of Northeast China was taken as the research object, the experimental study was carried out during 2016—2018, two treatments of CK (not applying biochar) and BC (2016, 75 t/hm<sup>2</sup> biochar, 2017, 2018, no

收稿日期: 2019-07-06 修回日期: 2019-08-14

**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,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

longer applying biochar) were set, and the biochar sustainable effect of land production capacity was analyzed. The improved technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) model and GM(1,1) model were adopted to calculate and forecast the land productivity index, the results showed that the soil bulk density was decreased significantly ( $P < 0.05$ ) within three years of one-time application of biochar, and the most obvious reduction was 3.87% in the first year. The porosity, total organic carbon, ammonium N, available P, available K content were increased significantly ( $P < 0.05$ ), pH value was significantly increased in the first two years after charcoal application ( $P_{2016} = 0.034$ ,  $P_{2017} = 0.038$ ), and increased by 0.9 and 0.6 respectively, the third year and there was no significant difference in charcoal treatment ( $P_{2018} = 0.067$ ). The application of biochar significantly improved the water holding capacity and soil retention performance of soil, and soil saturation moisture content, field water holding capacity and wilting coefficient were significantly increased ( $P < 0.05$ ), with the maximum growth rates of 5.58%, 4.78% and 7.29% respectively, and the annual runoff depth and soil erosion amount were significantly reduced ( $P < 0.05$ ), the maximum annual runoff depth reduction was 4.92 mm, and the maximum soil erosion reduction rate was 5.71%. Soybean yield and water use efficiency were significantly improved ( $P < 0.05$ ), with maximum growth rates of 29.01% and 16.92% respectively. However, the sustainable effect of biochar on land productivity was weakened year by year. With the extension of biochar application period, the bulk density of BC treatment was increased linearly, the porosity was decreased linearly, and the pH value and total organic carbon were decreased in a power function. Ammonium N, effective P, available K content were decreased linearly, the saturated water content, field water holding capacity and the wilting coefficient were decreased linearly. The annual runoff depth and soil erosion were increased linearly. The soybean yield and water use efficiency showed a power function decline and a linear decrease, respectively. Based on the improved TOPSIS model and GM(1,1) model of grey correlation, the land productivity index was calculated and predicted. The results showed that the BC processed land productivity index was higher than CK, but its value was decreased year by year, and it was very close to CK treatment by 2021. It indicated that the impact of one-time application of 75 t/hm<sup>2</sup> biochar on land productivity can last for about 5~6 years. The research results can provide a theoretical basis for the application of biochar in the black soil region of Northeast China.

**Key words:** biochar; land productivity; sustainable effect; improved TOPSIS model; GM(1,1) model

## 0 引言

随着农业保护措施和农业技术的发展,近年来粮食产量呈现逐年递增的势态。但高产的背后是对土地掠夺式的开发和化肥的大量施用,导致土壤板结退化、中低产田数量增加、水体污染日益严重等一系列生态环境问题层出不穷<sup>[1]</sup>。东北黑土区作为我国大宗农产品主产区,在国家粮食安全体系中具有举足轻重的地位<sup>[2]</sup>。每生成 1 cm 黑土需要上百年的时间,现在却在不断流失<sup>[3]</sup>,土壤中流失的氮、磷、钾养分相当于数百万吨化肥,土壤中有機物质含量比开垦前下降近 2/3,土壤板结和盐碱化现象严重,土地生产力逐年下降。东北地区作为农业优化发展区,其生产条件好、潜力大,应坚持生产优先、兼顾生态、种养结合,在确保粮食等主要农产品综合生产能力稳步提高的前提下,实现生产稳定发展、资源永续利用、生态环境友好<sup>[4]</sup>。

东北地区作物秸秆资源丰富,但大部分未被循环利用,通常被露天焚烧,这不仅浪费了秸秆资源,而且还对环境造成严重污染。生物炭作为秸秆还田

的新兴产物,对于农业可持续发展具有重要的意义。生物炭是在缺氧或低氧的环境中,将农作物秸秆、动物粪便等进行缓慢高温裂解得到的一类富含碳的有机质<sup>[3]</sup>。目前对于生物炭应用效应的研究主要集中在生物炭施用当年对土壤理化性质<sup>[5-6]</sup>、作物生长<sup>[7-9]</sup>、土壤水分运动参数<sup>[10-11]</sup>等方面的影响,对于从土地生产力角度进行综合研究的较少,而生物炭对于土地生产力的持续效应更是鲜见报道。鉴于此,本文以 3 年为研究期限,探索黑土区坡耕地一次性施用生物炭后土地生产力的持续效应,采用基于灰色关联的 TOPSIS 模型测算土地生产力指数,并采用 GM(1,1)模型预测 2019—2021 年土地生产力指数,定量论证施用生物炭效应的可持续性,为推进东北黑土区可持续发展提供有益的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2016—2018 年在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地万家试验站(126°36'E,45°43'N,海拔 137 m)进行。试验区属温带大陆性气候,冬季

严寒,夏季炎热,全年平均气温为 $3.1^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期为130~140 d,年降雨量为390~550 mm,全年降雨主要集中在6—9月,约占全年的60%。耕地土壤以壤土为主,土壤质地黏重,不易入渗。主要作物为大豆和玉米。

## 1.2 试验设计

试验在万家试验站的 $3^{\circ}$ 径流小区内进行,小区规格 $2\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。试验共设置施炭(BC)和不施炭(CK)2个处理,3次重复,共计6个小区。所有施炭处理,其生物炭施用量取前期试验中获得最高产量的施用量 $75\text{ t}/\text{hm}^2$ <sup>[12]</sup>,并于2016年试验开始前一次性施入耕层(0~20 cm)土壤中,2017、2018年均不再施用生物炭,以研究施加一次生物炭对黑土区坡耕地土地生产力的可持续效应。供试土壤为壤土,其基本理化性质为:pH值6.3,有机质质量比为 $37.8\text{ g}/\text{kg}$ ,铵态N、有效P、速效K质量比分别为183.9、11.2、159.5 mg/kg。供试大豆品种为黑河三号,供试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、灰分质量分数分别为1.53%、1.66%、0.75%、25.7%。各处理采用相同的水肥管理措施,即除人工降雨试验外,均在雨养条件下种植;同时按照当地大田标准进行施肥,施用尿素 $277\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,二胺 $145\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,全部作为基肥一次性施入,且3年试验保持一致。

## 1.3 观测指标及方法

### 1.3.1 土壤基础理化性质

于每年大豆成熟后取其耕层土壤测定其理化性质,采用DK-1130型土壤三相仪测定土壤容重、孔隙度。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分析仪测定土壤有机碳含量;采用半微量克式法、碳酸氢钠法、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。

### 1.3.2 年径流深及土壤侵蚀量

采用安装在各个径流小区的径流自动记录系统记录各次降雨径流量,通过泥沙收集系统测定各次降雨的产沙量,进而得到年径流深和土壤侵蚀量。

### 1.3.3 大豆产量及水分利用效率

每年于大豆收获时,对每个径流小区进行实收测产。采用水量平衡方程计算大豆生长过程的全生育期耗水量,进而计算大豆水分利用效率,公式为

$$ET = P + I + \Delta S \quad (1)$$

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中  $ET$ ——大豆生育期耗水量,mm

$P$ ——大豆生育期降雨量,mm

$I$ ——大豆生育期灌水量,mm

$\Delta S$ ——收获期与播种期0~100 cm土壤储水量之差,mm

$WUE$ ——水分利用效率, $\text{kg}/\text{m}^3$

$Y$ ——大豆产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$

## 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进行均值比较和回归分析,采用熵权法计算各指标权重,采用基于灰色关联的TOPSIS模型测算土地生产力指数,并采用GM(1,1)模型对生产力可持续性进行预测。显著性水平取0.05。

## 1.5 基于灰色关联的TOPSIS模型

TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution)分析法是依靠评价对象到最优解、最劣解的综合距离来进行排序,如果评价对象离最优解最近,同时离最劣解又比较远,则为最好;否则为最差<sup>[13]</sup>。TOPSIS模型具体步骤参见文献[14]。对于相似的方案TOPSIS法无法体现,对于无典型分布规律的有限样本数据进行分析时TOPSIS法也难以保证有效决策,而灰色关联分析法可以克服这些缺点,它可以使用有限样本所提供的全部信息,将各评价指标平等对待,因此本文将两种多目标决策分析方法相结合,对各试验方案的土地生产力指数进行分析。

### 1.5.1 数据标准化

由于不同指标的差异性,各类数据量纲不同,对此本文依据各指标对黑土区坡耕地生产力的影响分为正向、负向两类进行标准化处理,构建标准化后的矩阵

$$Y = [y_{ij}]_{m \times n} \quad (3)$$

其中

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (\text{正向}) \quad (4)$$

$$y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (\text{负向}) \quad (5)$$

式中  $y_{ij}$ ——第 $i$ 个方案第 $j$ 个指标标准化值

$x_{ij}$ ——第 $i$ 个方案第 $j$ 个指标原始数据

### 1.5.2 标准化矩阵的加权和理想解的确定

对标准化的矩阵加权处理

$$z_{ij} = \omega_j y_{ij} \quad (6)$$

式中  $z_{ij}$ ——第 $i$ 个方案第 $j$ 个指标加权后的标准化值

$\omega_j$ ——第 $j$ 个指标的权重

得到矩阵 $Z = [z_{ij}]_{m \times n}$ ,在矩阵 $Z$ 中选取每个指标的最理想值所对应的 $z_{ij}$ 为参考数列 $z_0$ 的实体,有参考

数列  $z_0 = \{z_{i0} | i = 1, 2, \dots, n\}$ , 即  $z_0 = \{z_{10}, z_{20}, \dots, z_{n0}\}$  作为理想解。

### 1.5.3 灰色关联系数矩阵的确定

计算第  $i$  个方案与理想解关于第  $j$  个指标的灰色关联系数  $\xi_{ij}$ , 得到灰色关联矩阵

$$\xi = [\xi_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

其中 
$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}} \quad (8)$$

$$\Delta_{ij} = |z_{i0} - z_{ij}| \quad (9)$$

式中  $\Delta_{ij}$ —— $z_{i0}$  与  $z_{ij}$  在第  $j$  项指标处的绝对差

$\rho$ ——分辨系数, 取 0.5

### 1.5.4 基于灰色关联矩阵的 TOPSIS 模型

以灰色关联系数矩阵  $\xi$  为新的矩阵构造理想解模型。确定正理想解和负理想解, 正理想解为  $\xi_0^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \xi_{ij}$ , 负理想解为  $\xi_0^- = \min_{1 \leq i \leq m} \xi_{ij}$ 。计算第  $i$  个方案到正理想解和负理想解的距离 ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 到正理想解的距离为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_{ij} - \xi_0^+)^2} \quad (10)$$

到负理想解的距离为

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_{ij} - \xi_0^-)^2} \quad (11)$$

计算各方案的相对贴近度

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (12)$$

将计算的相对贴近度作为各处理土地生产力指数, 其值越大表示方案越优。

## 2 结果与分析

### 2.1 施加生物炭对土壤物理指标的可持续效应

土壤容重和孔隙状况会影响土壤肥力和耕性, 进而影响土地的生产能力。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。由图 1a 可知, 2016 年施加生物炭后土壤的容重显著下降 ( $P = 0.031$ ), 较不施加生物炭降低了 3.87%, 尽管 2017、2018 年未施用生物炭, 但由于前期施用生物炭的持续效应, 使 BC 处理土壤容重仍显著低于 CK ( $P_{2017} = 0.036$ ,  $P_{2018} = 0.038$ ), 但降低幅度相比 2016 年有所减弱, 分别为 2.76%、2.07%。由图 1b 可知, 土壤的毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均呈增加趋势, 2016 年 BC 处理较 CK 处理毛管孔隙度增加 3.18%, 非毛管孔隙度增加 10.68%, 总孔隙度增加 5.18%, 2017 年各项指标分别增加 2.03%、8.86%、3.87%, 2018 年相比于 2017 年较为稳定, BC 处理

比 CK 处理的毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度分别增加 1.77%、8.81%、3.66%。对 3 年两个处理的各项孔隙度指标进行均值比较与检验, 施加一次生物炭后 3 年内 BC 处理毛管孔隙度 ( $P_{2016} = 0.037$ ,  $P_{2017} = 0.040$ ,  $P_{2018} = 0.044$ )、非毛管孔隙度 ( $P_{2016} = 0.029$ ,  $P_{2017} = 0.031$ ,  $P_{2018} = 0.032$ )、总孔隙度 ( $P_{2016} = 0.033$ ,  $P_{2017} = 0.038$ ,  $P_{2018} = 0.045$ ) 均显著高于 CK 处理, 表明施加生物炭 3 年内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。

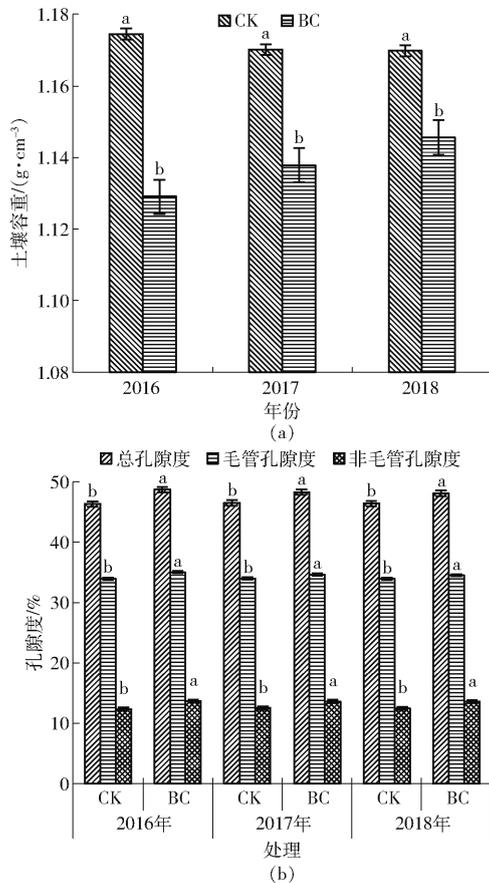


图 1 生物炭对土壤结构的可持续效应

Fig. 1 Sustainable effects of biochar on soil structure

为进一步解析生物炭对土壤结构指标的持续效应, 分别建立 BC 组土壤容重  $Y_1$ 、毛管孔隙度  $Y_2$ 、非毛管孔隙度  $Y_3$ 、总孔隙度  $Y_4$  关于生物炭施用年限  $t$  的回归方程, 分别为

$$Y_1 = 0.008t + 1.1210 \quad (R^2 = 0.998, P = 0.027) \quad (13)$$

$$Y_2 = -0.250t + 35.233 \quad (R^2 = 0.997, P = 0.032) \quad (14)$$

$$Y_3 = -0.050t + 13.733 \quad (R^2 = 0.993, P = 0.049) \quad (15)$$

$$Y_4 = -0.300t + 49.670 \quad (R^2 = 0.994, P = 0.047) \quad (16)$$

4个方程 $R^2$ 均大于0.99, $P$ 值均小于0.05,达显著水平,表明4个方程能较好地反映土壤结构指标随生物炭施用年限的变化规律。土壤容重随生物炭施用年限的延长呈线性递增,生物炭施用年限每延长一年,土壤容重增加 $0.008\text{ g/cm}^3$ ;土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均随生物炭施用年限的延长呈线性递减,生物炭施用年限每延长一年,土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度分别减少0.25、0.05、0.30个百分点。随着生物炭施用年限的延长,其对土壤结构的影响逐渐减弱,这可能是生物炭自身的变化引起的,生物炭自身所含元素会随时间发生降解,其中可以改善土壤结构的有效成分也会随之减少。

## 2.2 施加生物炭对土壤养分含量的可持续效应

土壤的营养成分是关系农作物产量和质量的重要因素,其含量与土壤质量和土地生产力密切相关。由图2a可知,2016—2018年施炭处理的土壤pH值比未施炭处理的土壤pH值分别增加了0.9、0.6、0.1,土壤pH值的增加为大豆提供了更好的生长环境,有利于其生长,其中2016、2017年两个处理间差异显著( $P_{2016}=0.034$ 、 $P_{2017}=0.038$ ),2018年则未达显著差异( $P_{2018}=0.067$ ),表明在生物炭施用当年和第2年,生物炭能够有效改良土壤酸碱度,提高土壤pH值,但这种作用在生物炭施用第3年已不显著。2016年施加生物炭后土壤的总有机碳含量显著增加( $P_{2016}=0.021$ ),较不施加生物炭增加71.74%,之后两年不再施加生物炭,土壤的总有机碳含量较CK仍显著增加( $P_{2017}=0.033$ 、 $P_{2018}=0.037$ ),分别增加37.00%、23.17%。生物炭对土壤pH值的影响和持续效应弱于总有机碳含量,这可能是由于生物炭是一种富含碳素的多孔固体颗粒物质,使得土壤碳库潜力增大,在施加第3年仍可显著提高总有机碳含量。由图2b可知,施加生物炭可以有效提高土壤中铵态N、有效P、速效K含量。2016年BC处理比CK处理铵态N质量比平均增加了 $20.0\text{ mg/kg}$ ,增加率为10.59%,有效P质量比平均增加了 $3.1\text{ mg/kg}$ ,增加率为28.19%,速效K质量比平均增加了 $26.5\text{ mg/kg}$ ,增加率为16.72%。2017、2018年各指标变化趋势与2016年一致,只是增长的趋势减慢,2017年BC处理较CK处理土壤中铵态N、有效P、速效K含量分别增加了7.78%、11.61%、12.40%;2018年则分别增加了4.48%、5.36%、6.37%。对2016—2018年各处理的铵态N、有效P、速效K含量进行均值比较与检验,仅施加一次生物炭BC处理铵态N( $P_{2016}=0.040$ 、 $P_{2017}=0.043$ 、 $P_{2018}=$

0.048)、有效P( $P_{2016}=0.021$ 、 $P_{2017}=0.033$ 、 $P_{2018}=0.046$ )、速效K( $P_{2016}=0.039$ 、 $P_{2017}=0.042$ 、 $P_{2018}=0.044$ )含量均显著高于CK,表明生物炭有改善土壤肥力的作用,且作用效果会随时间的延长逐渐减弱。

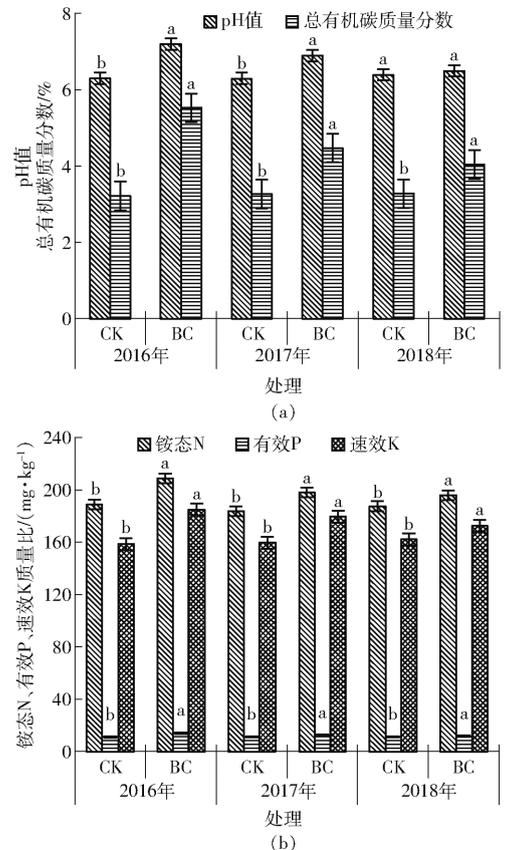


图2 生物炭对土壤养分含量的可持续效应

Fig.2 Sustainable effects of biochar on soil nutrient content

采用幂函数拟合BC处理pH值 $Y_5$ 和总有机碳含量 $Y_6$ 随时间的变化规律,回归方程为

$$Y_5 = 7.238t^{-0.090} \quad (R^2 = 0.995, P = 0.044) \quad (17)$$

$$Y_6 = 5.513t^{-0.288} \quad (R^2 = 0.998, P = 0.02) \quad (18)$$

2个方程 $R^2$ 均大于0.99, $P$ 值均小于0.05,回归方程拟合效果理想。随着施炭年限的增加土壤pH值和总有机碳含量均呈递减趋势,且降低的速率先快后慢,直至与未施炭处理间无显著差异。造成这一现象的原因可能是生物炭所含元素随时间发生降解,其可改善土壤pH值和总有机碳含量的有效成分随之减少。

BC组铵态N含量 $Y_7$ 、有效P含量 $Y_8$ 、速效K含量 $Y_9$ 均随施炭年限 $t$ 的延长呈线性递减,回归方程为

$$Y_7 = -6.450t + 213.900 \quad (R^2 = 0.994, P = 0.045) \quad (19)$$

$$Y_8 = -1.150t + 15.100 \quad (R^2 = 0.997, P = 0.032) \quad (20)$$

$$Y_9 = -6.250t + 191.500 \quad (R^2 = 0.995, P = 0.044) \quad (21)$$

3 个方程  $R^2$  均大于 0.99,  $P$  值均小于 0.05, 达显著水平。施炭年限每延长一年, 铵态 N、有效 P、速效 K 质量比分别减少 6.450、1.150、6.250 mg/kg, 直至与 CK 处理间无显著差异。随着时间的增加生物炭对土壤各项养分含量的影响逐渐减弱, 这可能是由于组成生物炭的有效成分随着时间的增加逐渐减少。

### 2.3 施加生物炭对土壤持水能力的可持续效应

土壤的持水能力与土壤的质量、水分的流失以及作物的产量密切相关, 是反映土地生产力水平的重要因素。生物炭自身疏松多孔, 比表面积大, 有利于改善土壤的通气性和透水性, 从而提高土壤的持水性能<sup>[15]</sup>。由图 3 可知, 施加生物炭可以使土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数显著提高。2016 年 BC 处理土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数分别较 CK 处理增加 5.58%、4.78%、7.29%。由于后两年未再次添加生物炭, 导致 2017、2018 年这 3 项指标的提高程度逐年降低, 2017 年分别提高了 3.84%、2.72%、6.13%, 2018 年分别提高了 1.86%、2.07%、5.27%。均值比较及检验显示, 3 年 BC 处理土壤饱和含水率 ( $P_{2016} = 0.023$ 、 $P_{2017} = 0.039$ 、 $P_{2018} = 0.041$ )、田间持水率 ( $P_{2016} = 0.033$ 、 $P_{2017} = 0.043$ 、 $P_{2018} = 0.048$ )、凋萎系数 ( $P_{2016} = 0.011$ 、 $P_{2017} = 0.018$ 、 $P_{2018} = 0.023$ ) 均显著高于 CK 处理, 表明 3 年内生物炭对土壤持水能力的提高仍然有效。

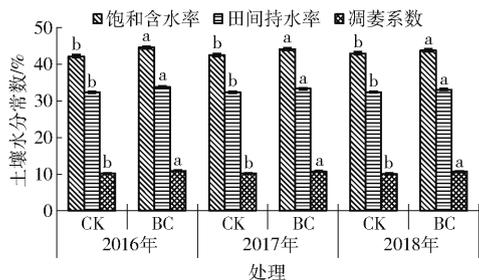


图 3 生物炭对土壤持水能力的可持续效应

Fig. 3 Sustainable effect of biochar on soil water holding capacity

BC 组饱和含水率  $Y_{10}$ 、田间持水率  $Y_{11}$ 、凋萎系数  $Y_{12}$  关于施炭年限  $t$  的变化规律均可以采用线性方程进行拟合, 回归方程为

$$Y_{10} = -0.375t + 44.830 \quad (R^2 = 0.999, P = 0.015) \quad (22)$$

$$Y_{11} = -0.380t + 34.083 \quad (R^2 = 0.996, P = 0.036) \quad (23)$$

$$Y_{12} = -0.155t + 11.043 \quad (R^2 = 0.999, P = 0.012) \quad (24)$$

3 个方程  $R^2$  均大于 0.99,  $P$  值均小于 0.05, 达显著水平, 表明 3 个方程能较好地反映土壤水分常数随施炭年限的变化规律。土壤水分常数均随施炭年限的延长呈线性递减, 施炭年限每延长一年, 饱和含水率、田间持水率、凋萎系数分别降低 0.375、0.380、0.155 个百分点。随着施炭年限的延长, 其对土壤持水能力的改善作用逐渐减弱, 这可能是由于生物炭对土壤结构的改善作用逐渐减弱, 从而使土壤持水能力也随之发生相应的变化。

### 2.4 施加生物炭对水土流失的可持续效应

表 1 为各年不同处理年径流深及土壤侵蚀量变化情况。由表 1 可知, 在相同年份, BC 处理较 CK 处理的年径流深、土壤侵蚀量均有所下降。2016 年施加生物炭的土壤年径流深减少 4.92 mm, 径流系数降低 2.17 个百分点, 土壤侵蚀量降低 5.71%; 2017 年 BC 处理较 CK 处理年径流深降低了 3.8 mm, 径流系数下降了 0.56 个百分点, 土壤侵蚀量下降了 1.89%; 2018 年年径流深与 2016、2017 年的变化趋势相同, 只是变化的程度减弱, 年径流深仅下降了 1.57 mm, 径流系数下降了 0.48 个百分点, 土壤侵蚀量下降了 1.32%。对 3 年不同处理的年径流深和土壤侵蚀量进行均值比较和检验, 在施加一次生物炭后 3 年内年径流深 ( $P_{2016} = 0.028$ 、 $P_{2017} = 0.030$ 、 $P_{2018} = 0.037$ ) 和土壤侵蚀量 ( $P_{2016} = 0.033$ 、 $P_{2017} = 0.043$ 、 $P_{2018} = 0.047$ ) 均显著低于 CK, 表明施加一次生物炭 3 年内可以有效减少水土流失。

表 1 不同年份不同处理下年径流深及土壤侵蚀量

Tab. 1 Annual runoff depth and soil erosion amount changes in different years

年份	处理	年径流深/ mm	径流系数/ %	土壤侵蚀量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )
2016	CK	87.77 <sup>a</sup>	20.37 <sup>a</sup>	28.90 <sup>a</sup>
	BC	82.85 <sup>b</sup>	18.20 <sup>b</sup>	27.25 <sup>b</sup>
2017	CK	87.59 <sup>a</sup>	21.88 <sup>a</sup>	29.68 <sup>a</sup>
	BC	83.79 <sup>b</sup>	21.32 <sup>b</sup>	28.38 <sup>b</sup>
2018	CK	86.20 <sup>a</sup>	22.90 <sup>a</sup>	28.78 <sup>a</sup>
	BC	84.63 <sup>b</sup>	22.52 <sup>b</sup>	28.63 <sup>b</sup>

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

采用线性函数拟合年径流深  $Y_{13}$  和土壤侵蚀量  $Y_{14}$  随时间的变化规律, 回归方程为

$$Y_{13} = 0.89t + 81.980 \quad (R^2 = 0.999, P = 0.021) \quad (25)$$

$$Y_{14} = 0.69t + 26.707 \quad (R^2 = 0.995, P = 0.038) \quad (26)$$

2 个方程  $R^2$  均大于 0.99,  $P$  值均小于 0.05, 回归方程拟合效果理想。随着生物炭施用年限的延

长,年径流深及土壤侵蚀量均呈线性递增,直至与CK处理间无显著差异,这可能是因为随着时间的增加,生物炭对土壤容重、孔隙度的影响减弱,从而减少降雨的入渗量,同时土壤的抗冲刷能力减弱,使减流效果减弱,侵蚀程度增加。

## 2.5 施加生物炭对节水增产的可持续效应

作物产量是农业生产的直接成果,也是反映土地生产力的直接因素。水分利用效率是衡量农业资源高效利用状况的一项重要指标。提高作物水分利用效率对农业可持续发展具有重要意义。我国东北地区水资源短缺,因此在保证农作物产量的前提下提高作物田间水分利用效率至关重要。3年两个处理大豆产量及水分利用效率如图4所示。由图4a可知,2016年BC处理大豆产量显著增加( $P = 0.025$ ),较CK处理增产29.01%,2017、2018年BC处理增加幅度相比2016年有所减弱,但仍显著高于CK( $P_{2017} = 0.031$ ,  $P_{2018} = 0.039$ ),分别增加23.48%、18.43%。由图4b可知,2016—2018年BC比CK的水分利用效率分别提高16.92%、14.63%、11.75%,均达显著水平( $P_{2016} = 0.032$ ,  $P_{2017} = 0.035$ ,  $P_{2018} = 0.043$ ),表明3年内生物炭在节水增

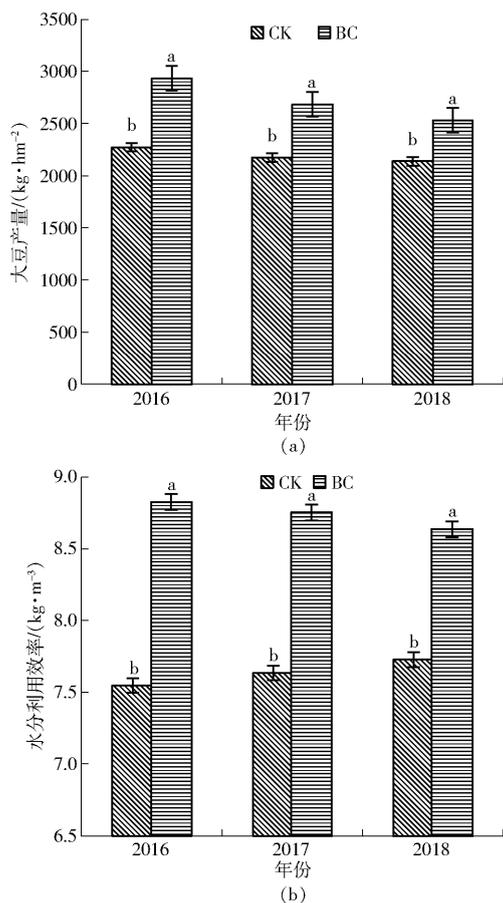


图4 生物炭对节水增产的可持续效应

Fig. 4 Sustainable effects of biochar on water saving and yield increase

产方面的正效应依然存在。

BC处理大豆产量 $Y_{15}$ 随时间的变化规律可用幂函数进行拟合,方程为

$$Y_{15} = 2938.465t^{-0.134} \quad (R^2 = 0.999, P = 0.024) \quad (27)$$

方程 $R^2 = 0.999$ ,  $P = 0.024$ ,回归方程达显著水平。随着生物炭施用年限的延长,BC处理大豆产量呈幂函数降低,且降低的速率先快后慢,直至与未施炭处理间无显著差异。造成这一现象的原因可能是生物炭对土壤养分的持续效应逐年减弱的缘故。

BC处理大豆水分利用效率 $Y_{16}$ 关于生物炭施用年限的变化规律可以用线性方程进行拟合,方程为

$$Y_{16} = -0.095t + 8.927 \quad (R^2 = 0.994, P = 0.049) \quad (28)$$

方程 $R^2 = 0.994$ ,  $P < 0.05$ ,方程拟合效果好,随着生物炭施用年限的延长,大豆水分利用效率较上一年平均降低 $0.095 \text{ kg/m}^3$ 。大豆产量和水分利用效率关于生物炭施用年限的变化规律有所不同,这可能是由于施用生物炭在提高了各年大豆产量的同时,也增加了大豆可消耗的水分。

## 2.6 基于灰色关联的TOPSIS模型的土地生产力指数

### 2.6.1 土地生产力指标体系

选取土壤理化性质、土壤持水能力、水土保持效应、节水增产效应等能够反映土地生产能力的指标作为衡量土地生产力的一级指标,每个一级指标下又选取若干个二级指标,如表2所示。为使计算结果更为科学客观,采用熵权法计算各指标的权重,结果见表2。

表2 土地生产力的构成指标

Tab. 2 Constituent indexes of land productivity

一级指标	二级指标	指标属性	权重
土壤理化性质	容重 $x_1 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	-	0.023
	总孔隙度 $x_2 / \%$	+	0.025
	pH值 $x_3$	+	0.049
	总有机碳质量分数 $x_4 / \%$	+	0.225
	铵态N质量比 $x_5 / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	+	0.041
	有效P质量比 $x_6 / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	+	0.109
土壤持水能力	速效K质量比 $x_7 / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	+	0.060
	饱和含水率 $x_8 / \%$	+	0.023
	田间持水率 $x_9 / \%$	+	0.023
水土保持效应	凋萎系数 $x_{10} / \%$	+	0.031
	年径流深 $x_{11} / \text{mm}$	-	0.062
节水增产效应	土壤侵蚀量 $x_{12} / (\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	-	0.085
	产量 $x_{13} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	+	0.167
	水分利用效率 $x_{14} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	+	0.077

注:表中+、-表示正向、负向。

## 2.6.2 黑土区坡耕地土地生产力指数分析

采用式(3)~(12)测算2016—2018年两个处理的土地生产力指数,结果如表3所示。由表3可知,BC处理3年土地生产力指数均高于CK,表明施用生物炭能有效改善作物生长的水土环境,提高土地生产能力。但两个处理间的土地生产力指数的差异逐年缩小,这可能是由于生物炭对各项指标的持续效应逐年减弱,导致BC处理的土地生产力指数也逐年减小。

表3 2016—2018年各处理土地生产力指数

Tab.3 Land productivity indexes of each treatment from 2016 to 2018

处理	2016年	2017年	2018年
CK	0.737 0	0.736 8	0.738 3
BC	0.759 0	0.752 0	0.749 8

## 2.6.3 基于GM(1,1)模型预测的土地生产力指数分析

为了进一步给出一次性施用75 t/hm<sup>2</sup>生物炭其效应的持续时间,采用GM(1,1)模型<sup>[16]</sup>预测2019—2021年土地生产力指数的变化趋势。本试验中GM(1,1)模型精度检验合格,CK处理和BC处理的小概率误差均大于0.95,后验比均小于0.35,因此可以使用GM(1,1)模型对本试验中的土地生产力指数进行预测,预测结果如表4所示。随着生物炭施用年限的延长,BC处理土地生产力指数逐渐下降,且与CK处理间的差异逐渐缩小,在2021年BC处理土地生产力指数降至0.743 0,已经与未施加生物炭的CK处理土地生产力指数十分接近。根据预测结果,在试验区一次性施入75 t/hm<sup>2</sup>生物炭,其对土地生产能力的改善作用可持续5~6年。

表4 GM(1,1)模型预测未来3年的土地生产力指数

Tab.4 GM(1,1) model predicted land productivity indexes in next three years

处理	2019年	2020年	2021年
CK	0.739 8	0.741 3	0.742 8
BC	0.747 6	0.745 4	0.743 0

## 3 讨论

土地生产力作为土地最本质的属性,是土地在一定条件下可能达到的生产水平,既反映土壤质量,又表明土地的生产能力<sup>[17]</sup>。土地生产力研究关系到一个区域的社会经济发展方向,是区域土地利用和生态环境建设的重要基础条件,它的变化是全球变化的重要指标,也一直是国际上备受关注的农业问题和人类发展问题的核心<sup>[18-19]</sup>。

生物炭疏松多孔,具有强大的吸附能力,可以改善土壤结构,增强土壤肥力。本试验结果显示,在一次性施用生物炭后3年内,土壤容重显著降低( $P < 0.05$ ),土壤孔隙度、总有机碳含量、铵态N含量、有效P含量、速效K含量显著增加( $P < 0.05$ ),pH值则是施炭后前两年显著提高( $P_{2016} = 0.034$ 、 $P_{2017} = 0.038$ ),第3年与未施炭处理无显著差异( $P_{2018} = 0.067$ )。生物炭对土壤理化性质的改善效果随着生物炭施用年限的延长逐渐减弱,土壤容重、铵态N含量、有效P含量、速效K含量呈线性递增,孔隙度呈线性递减,pH值和总有机碳含量呈先快后慢的幂函数递减趋势。这一结论与文献[18-19]的研究基本一致,但与聂新星等<sup>[20]</sup>认为的生物炭对于土壤pH值没有显著影响存在一定的差异,这可能是由于施加生物炭的种类和供试土壤的理化性质不同造成的。

多数学者认为生物炭可以提高土壤的持水能力<sup>[21-23]</sup>,但对于生物炭施加后对土壤持水性能的影响时间尚未有明确结论。DUGAN等<sup>[15]</sup>的研究结果显示,生物炭可以提高土壤的持水能力,勾芒芒等<sup>[8]</sup>通过试验研究表明生物炭可以提高土壤的含水率和田间持水率,但都没有提出这种效应的维持年限。本研究中,土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数在施加一次生物炭后3年内都显著提高( $P < 0.05$ )。但随着施炭年限的延长,生物炭对土壤持水能力的改善效果逐渐减弱,且各项指标均呈线性递减趋势,这表明一次性施入生物炭后其对土壤持水能力的影响可持续3年以上。

在水土保持方面,多数学者认为,由于施用生物炭能够提高土壤孔隙度,增强土壤的透水透气性,促进雨水入渗,因而可以有效减少年径流深和土壤侵蚀量,其减流减沙效果随生物炭施用量和连续施用年限的不同而有所差异<sup>[8,10-12,24]</sup>,但对于施加一年生物炭后水土保持效应可以维持的年限并没有明确的结论。本研究中,一次性施入75 t/hm<sup>2</sup>生物炭后3年内BC处理年径流深和土壤侵蚀量均显著低于CK处理( $P < 0.05$ )。BC处理年径流深和土壤侵蚀量随时间变化均呈线性递增趋势,施炭时间每延长一年年径流深增加0.89 mm,而土壤侵蚀量增加0.69 t/hm<sup>2</sup>。3年内两个处理年径流深和土壤侵蚀量间的差距逐年缩小,这可能是由于随着时间的延长,生物炭在土壤中的有效成分逐渐减少,使土壤容重和孔隙度的改善程度逐渐减弱,土壤的抗冲刷能力减弱,减流效果减弱,造成土壤侵蚀量的增加。

在节水增产方面,现有研究多集中于施炭当年的效应上。勾芒芒等<sup>[8]</sup>通过一年的试验研究发现,施加生物炭的番茄产量明显高于未施加生物炭的番

茄产量。HOSSAIN 等<sup>[9]</sup>和 ZWIETEN 等<sup>[25]</sup>的试验结果也表明小麦和番茄等作物的产量在施加生物炭后都会有显著的提高。本研究中,施加一次生物炭后3年内 BC 处理大豆的产量和水分利用效率相较于 CK 处理均显著提高( $P < 0.05$ ),与已有结果一致<sup>[7,24]</sup>,可见,生物炭可以改善作物的生长环境,促进作物生长,提高作物产量和水分利用效率。但随着施炭年限的增加,生物炭对两个指标的影响逐渐减小,大豆产量随施炭时间的延长呈先快后慢的幂函数递减趋势而水分利用效率则呈均匀变化的线性递减趋势,这可能是由于大豆产量增加的同时其所消耗的水分也随之增加。

土地生产力是一个综合指标,是土壤质量和生产能力的综合体现。由于本研究试验周期较短,获取的时序资料有限,故结合灰色关联分析对传统的 TOPSIS 模型进行改进,用以测算两个处理3年的土地生产力指数,得到2016—2018年 BC 处理土地生产力指数分别为0.759 0、0.752 0、0.749 8,均高于同年 CK,表明施用生物炭能够显著提高土地生产能力。但也应看到,BC 处理土地生产力指数逐年下降,表明生物炭对土地生产力的提升作用逐年降低。为进一步探究一次性施用生物炭后其对土地生产力的持续效应,利用 GM(1,1)模型预测了2019—2021年土地生产力指数,结果表明,2021年 BC 处理的土地生产力指数与 CK 的土地生产力指数已十分接近,因此可以估计施加一次生物炭后其效应可持续5~6年。由于试验年限较短,该预测结果的可靠性有待进一步验证。

## 4 结论

(1)一次性施入生物炭3年内,土壤容重显著

降低,土壤孔隙度和总有机碳、铵态 N、有效 P、速效 K 含量显著增加,pH 值则是施炭后前两年显著提高,第3年与未施炭处理无显著差异。生物炭对各指标的影响逐年减弱,随着生物炭施用年限的延长,BC 处理土壤容重线性递增,pH 值和总有机碳含量呈幂函数递减,孔隙度和铵态 N、有效 P、速效 K 含量线性递减。

(2)一次性施用生物炭显著提高了土壤持水性能,进而起到保水保土的作用。3年内 BC 处理土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数均显著高于 CK 处理,而年径流深和土壤侵蚀量则显著低于 CK 处理。随着生物炭施用年限的延长,其保水保土效果逐渐减弱,土壤饱和含水率、田间持水率、凋萎系数线性递减,而年径流深和土壤侵蚀量则线性递增。

(3)一次性施入生物炭3年内,可以有效提高大豆节水增产性能,BC 处理大豆产量和水分利用效率均显著高于 CK 处理。随着生物炭施用年限的延长,其节水增产性能逐渐减弱,BC 处理大豆产量呈幂函数递减,水分利用效率则呈线性递减。

(4)采用基于灰色关联的 TOPSIS 模型测算2016—2018年土地生产力指数,3年 BC 处理的土地生产力指数分别为0.759 0、0.752 0、0.749 8,均高于同年 CK 处理,表明施用生物炭能够显著提高土地生产能力;但 BC 处理土地生产力指数逐年下降,表明生物炭对土地生产力的提升作用逐年降低。采用 GM(1,1)模型预测未来3年土地生产力指数的变化趋势,预计到2021年 BC 处理土地生产力指数为0.743 0,与 CK 处理已十分接近,说明一次性施入生物炭其效应可持续5~6年。

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 刘振举,蔡强国,李国强. 东北黑土区水土流失胁迫下的生态安全评价指标体系的建立[J]. 水土保持通报,2009,29(6):64-69.  
LIU Zhenju, CAI Qiangguo, LI Guoqiang. Establishment of evaluation index system of ecology security under soil and water loss stress in black soil region of northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6):64-69. (in Chinese)
- [3] 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.  
DU Jinying, LIU Fuchen. Protecting black land and building stable big grain storehouse—a review of “BBS of sustainable utilization and protection of black soil resources”[J]. Struggle, 2015(11):34-36. (in Chinese)
- [4] 赵经平.《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》发布[J]. 江西农业,2015(5):17.  
ZHAO Jingping. National plan for sustainable agricultural development (2015—2030)[J]. Jiangxi Agriculture, 2015(5):17. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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]. *Ecological and Environment Sciences*, 2014, 23(8):1292 – 1297. (in Chinese)
- [7] 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 Zongyi. 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)
- [8] 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](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140122&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7):247 – 256. 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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7):247 – 256. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170731&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170731&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031. (in Chinese)
- [13] WANG E, ALP N, SHI J, et al. Multi-criteria building energy performance benchmarking through variable clustering based compromise TOPSIS with objective entropy weighting[J]. *Energy*, 2017, 125:197 – 210.
- [14] 刘锋, 魏光辉. 基于灰色关联的水利工程方案模糊优选[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(1):10 – 14, 26. LIU Feng, WEI Guanghui. Fuzzy optimization of hydraulic project scheme based on improved grey relation analysis[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(1):10 – 14, 26. (in Chinese)
- [15] DUGAN E, VERBOEF 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 Solution for a Changing World, 2010.
- [16] 曾盛. 灰色系统 GM(1,1) 模型的研究与应用[D]. 长春:吉林大学, 2007. ZENG Sheng. Research on GM(1,1) model of grey system and its application[D]. Changchun:Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [17] 张洁瑕, 陈佑启, 万利, 等. 我国土地生产力研究进展与展望[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(3):135 – 144. ZHANG Jiexia, CHEN Youqi, WAN Li, et al. Main progress and prospects of land productivity research in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(3):135 – 144. (in Chinese)
- [18] 李相玺, 尹忠东, 何长高. 土地生产潜力研究综述[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(5):33 – 36. LI Xiangxi, YIN Zhongdong, HE Changgao. Review on the study of land potential productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(5):33 – 36. (in Chinese)
- [19] MILESI C, ELVIDGE C D, NEMANI R R, et al. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3):401 – 410.
- [20] 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)
- [21] LIANG Feng, LI Guitong, LIN Qimei, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):525 – 532.
- [22] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永豪, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2):101 – 104. WANG Dandan, ZHENG Jiyong, YAN Yonghao, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):101 – 104. (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] 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)
- [25] ZWIETEN V L, KIMBER S, DOWNIE A, et al. A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with N in a sandy soil[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6):569 – 576.