

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031

# 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价

吴昱<sup>1,2</sup> 赵雨森<sup>1</sup> 刘慧<sup>3</sup> 王艳阳<sup>4</sup> 冯鼎锐<sup>4</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090;  
3. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 4. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 采用径流小区试验, 选取不施用生物炭(CK)、生物炭施用量 25 t/hm<sup>2</sup>(T1)、50 t/hm<sup>2</sup>(T2)、75 t/hm<sup>2</sup>(T3)和 100 t/hm<sup>2</sup>(T4)5 个处理, 分析生物炭施用量对土壤理化性质、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的影响, 建立基于 Gumbel Copula 函数的不同生物炭施用量下黑土区坡耕地生产能力评价模型, 结果表明: 随着生物炭施用量的增加, 土壤容重降低, 孔隙度增大, 养分分布更为均匀, 土壤有效 P、速效 K、pH 值和有机质含量呈线性递增趋势, 土壤铵态 N 含量呈指数增长; 土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎系数和有效水最大含量均与生物炭施用量正相关, 且高施炭量处理对于土壤水分的影响程度明显高于低施炭量处理; 随着生物炭施用量的增加, 年径流深和土壤侵蚀量均呈线性递减, 减流率和减沙率均呈对数函数递增, 而大豆产量和水分利用效率则先增后减, 呈抛物线型变化。基于 Gumbel Copula 函数计算的土壤生产能力评价结果较为理想, 计算的土壤生产能力指数随生物炭施用量的增加呈“S 型”曲线递增, 土壤理化性质、持水能力和水土保持效应指数均呈线性递增, 而节水增产效应指数则呈抛物线型先增后减。

**关键词:** 秸秆生物炭; 黑土区; 土地生产能力; Gumbel Copula 函数; 熵权

**中图分类号:** S156.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0247-10

## Analysis and Evaluation of Influence of Straw Biochar on Soil Productivity of Sloping Land in Black Soil Region

WU Yu<sup>1,2</sup> ZHAO Yusen<sup>1</sup> LIU Hui<sup>3</sup> WANG Yanyang<sup>4</sup> FENG Dingrui<sup>4</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

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

3. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

4. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** With different biochar amount levels of 0 t/hm<sup>2</sup>, 25 t/hm<sup>2</sup>, 50 t/hm<sup>2</sup>, 75 t/hm<sup>2</sup> and 100 t/hm<sup>2</sup>, the runoff plots experiments were conducted to study the influences of biochar supply on the indexes of soil physicochemical properties, water holding capacity, soil and water conservation and the effects of water-saving and yield-increasing, and a model was established based on Gumbel Copula function for black soil productivity evaluation under different straw biochar amounts. The results showed that with the increase of straw biochar amount, the soil bulk density was decreased and porosity were increased, the soil nutrients distribution was uniform. Available P and K, pH value and organic matter content were increased linearly, and ammonium N was increased exponentially. Saturated soil moisture, field capacity, wilting coefficient and the maximum effective water content were all in positive correlation with the straw biochar amount, and the influence degree of high biochar amount on soil moisture was more significant than that of low biochar amount. With the increase of straw biochar amount, the amounts of annual runoff and soil erosion were all decreased linearly, the reduction rates of runoff and sediments were increased logarithmically, while the soybean yield and water use efficiency were increased firstly and then decreased like a parabola going downwards. The evaluation model based on Gumbel Copula function was used to evaluate the soil productivity under different straw biochar amounts, and the result was

收稿日期: 2016-12-07 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)

作者简介: 吴昱(1985—), 女, 博士生, 黑龙江农垦勘测设计研究院工程师, 主要从事坡耕地水土保持技术研究, E-mail: 55206522@qq.com

通信作者: 赵雨森(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治理论与技术研究, E-mail: zhaoy1957@163.com

reasonable. The soil productivity index calculated by the model was increased with the increase of straw biochar amount in an S-shaped curve, the indexes of soil physicochemical properties, water holding capacity, effect of soil and water conservation were increased linearly, and the indexes of water-saving and yield-increasing were increased firstly and then decreased in a parabola shape.

**Key words:** straw biochar; black soil region; soil productivity; Gumbel Copula function; entropy weight

## 引言

土地生产能力是衡量土壤质量的重要依据<sup>[1]</sup>。东北黑土区是我国最主要的粮食生产基地,其在保障我国粮食安全和农业可持续发展中具有不可取代的重要地位。然而随着水资源日益短缺、水土流失日益严重和过度的人为开垦,东北这一中国最大的粮仓的产能正在遭受无法挽回的损失<sup>[2]</sup>。黑土严重退化,土壤养分含量下降,土壤容重增大,导致土壤持水能力和保肥能力降低,土地生产力下降。

生物炭(Biochar)是一种由农作物秸秆、木质材料、禽畜粪便等有机物在有限供氧的密闭环境中经热解(通常小于700℃)碳化所产生的一类富含碳素、性质稳定、具有不同程度芳香化的固态物质<sup>[3]</sup>。与传统木炭相区别,生物炭着重强调其在农业生产和生态环境领域的功能与应用<sup>[4-5]</sup>。生物炭在土壤中的综合作用能间接提高土壤养分含量和生产力<sup>[6]</sup>。目前对生物炭的研究主要围绕生物炭对土壤理化性质<sup>[7-9]</sup>、土壤水分运动参数<sup>[10-14]</sup>、作物生长<sup>[15-19]</sup>等方面的影响,并已取得一定的成果,但对上述影响的定量描述还存在分歧,不同生物炭施用量对土地生产能力的影晌尚缺乏精准可靠的综合评价方法。本文采用试验评价与模型评价相结合的方法,深入解析秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力的影晌。以大豆为研究对象,借助径流小区试验,定量描述不同生物炭施用量对土壤理化性质、持水能力、水土保持效应、作物生长等指标的影响,探索黑土区坡耕地生产能力对生物炭施用量的响应规律。以试验数据为依托,建立基于Gumbel Copula函数的评价模型,对不同生物炭施用量的土地生产能力进行评价,并与基于熵权的TOPSIS模型和模糊物元模型的评价结果进行比较,以期黑土区坡耕地生产能力评价提供一种新方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于2015年在东北典型黑土带上的黑龙江省农垦北安分局红星农场试验基地(126°99'N、48°14'E,海拔高度298 m)进行。试验区位于小兴安岭西麓向松嫩平原的过渡地带,为丘陵漫岗地区,

地势由东向西倾斜,岗顶平缓,坡面较长,坡度3°~5°。该区属中温带湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷漫长,多年平均降水量555.3 mm,其中70%~80%集中在7—9月份,2015年试验期间(5月1日—10月10日)降水量为442.1 mm。耕层土壤以黑土为主,表层松散,底土黏重,透水性较差。耕地植被以玉米、大豆为主,农业生产基本处于靠天吃饭状态,抵御自然灾害的能力差,再加上当地降水集中且历时短、强度大,使得该地区坡耕地水土流失严重,土地生产力下降。

### 1.2 试验设计

试验在坡度为3°的径流小区内进行,共设5个处理,分别为生物炭施用量25 t/hm<sup>2</sup>(T1)、50 t/hm<sup>2</sup>(T2)、75 t/hm<sup>2</sup>(T3)、100 t/hm<sup>2</sup>(T4)以及不施用生物炭(CK),每个处理2次重复,共计10个小区。小区规格为20 m×5 m,每2个小区间隔1 m,所有小区具有相同的坡向。各小区提前埋设TDR管,埋深1.8 m。在小区末端设有径流自记系统和泥沙收集系统,自动记录后的径流由区外排水沟排出。为了防止侧渗的影响,各小区边界用深入地下1 m的PVC板隔开。播种前将生物炭均匀铺撒在各小区土壤表面并充分搅拌,使其与耕层土壤(0~20 cm土层)混合均匀,起垄静置。供试土壤为草甸黑土,土壤容重1.15 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度49.71%,田间持水率为35.19%,pH值为6.5。供试生物炭为秸秆生物炭,购于辽宁金和福农业开发有限公司,其基本理化性质为:粒径1.5~2.0 mm,pH值9.14,含碳量70.38%,全氮1.53%,硫含量0.78%,氢含量1.68%,灰量31.8%(均为质量分数)。供试作物为大豆,品种为黑河3号,水肥管理同当地大田处理,即不进行灌水,均在雨养条件下种植;化肥采用N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O质量分数分别为13%、28%和10%的复合肥,用量为450 kg/hm<sup>2</sup>,全部在大豆播种时按基肥施入,并尽量保证各试验小区肥料用量一致。

### 1.3 观测指标与方法

#### 1.3.1 土壤理化性质及持水性能

采用环刀法测定土壤容重、饱和含水率和田间持水量;采用DIK-1130型土壤三相仪测定孔隙度,压力测量范围:0~100 kPa,体积测量范围:0~100 mL,最小分辨率0.05 mL;采用TDR测定土壤含

水率;采用生物法和烘干法测定土壤凋萎系数;采用化学方法测定土壤养分,其中土壤有机质(g/kg)采用重铬酸钾-硫酸法<sup>[20]</sup>;全 N(g/kg)采用凯氏定氮法<sup>[20]</sup>;全 P(g/kg)采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法<sup>[20]</sup>;全 K(g/kg)采用氢氧化钠熔融-火焰光度法<sup>[20]</sup>;铵态 N(mg/kg)采用 2 mol/L KCl 浸提-靛酚蓝比色法<sup>[20]</sup>;速效 P(mg/kg)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[20]</sup>;速效 K(mg/kg)采用醋酸铵浸提-火焰光度法<sup>[20]</sup>。土壤养分空间变异数据引自文献[21-22]。

### 1.3.2 年径流深及土壤侵蚀量

采用安装在每个径流小区出口的翻斗式流量计自动记录年内各次降雨径流过程,得到逐次降雨产流量,进而得到年径流深;在开始产流后,每 5 min 取一翻斗水样,将水样静置 24 h,漂去上层清水,余下的用滤纸滤出泥沙,干燥 6 h 称量,经计算获取产沙量。由各次产沙量计算年土壤侵蚀量。

### 1.3.3 大豆产量及水分利用效率

于考种时测定大豆产量。采用水量平衡方程计算大豆全生育期耗水量(ET),进而得到大豆水分利用效率(WUE)。计算式分别为

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

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (2)$$

式中  $P$ ——大豆全生育期降水量

$I$ ——大豆全生育期灌水量

$\Delta S$ ——收获期与播种期 0~100 cm 土壤储水量的变化量

$\Delta R$ ——地表径流量  $Y$ ——大豆产量

## 1.4 数据处理方法

各指标均采用平均值,用 Excel、SAS V9、Mathematica 5.0、SPSS 12 等软件对实测数据进行基本处理和统计分析。建立基于 4 种 Copula 函数的评价模型,采用基于非线性优化思想的参数估计方法进行参数估计及拟合优度检验,选取合适的评价模型用以计算不同秸秆生物炭施用量对黑土区坡耕地生产能力的影响指数。由于评价指标过多不利于模型参数的求解,采用熵权法进行降维处理。显著性水平取  $p < 0.05$ 。

### 1.5 基于 Copula 函数的评价模型

Copula 函数是由多个随机变量的边缘分布函数连接得到多元联合分布的联结函数,其基本性质、常用的函数类型等参照文献[23-26]。由于 Copula 函数的单调递增性,当评价指标标准化的数值越大时,其输出值越大,故可以用其作为评价对象的综合评价指数。基于 Copula 函数的评价模型是以

Copula 函数为综合评价函数,以各评价指标标准化数值为输入变量,以 Copula 输出值作为各评价对象综合评价指数的一种评价方法。该方法的基本步骤是:

(1)恰当选取评价指标,构建评价指标体系。为消除量纲的影响,对各指标的量值进行标准化。

(2)确定各评价指标边缘分布函数  $u_j = F_j(x_j)$ 。

(3)构造评价指标的多元联合分布函数即 Copula 函数  $C(\cdot, \cdot, \dots, \cdot)$ ,得到各评价对象评价指标值的多元联合分布函数值,即为该评价对象的综合评价指数。

本研究共选取 4 个一级指标、17 个二级指标探索不同生物炭施用量对土地生产能力的影响。为简化计算,采用熵权法计算二级指标在对应的一级指标中的权重,进而计算不同处理的一级指标值,作为评价指标值。选取 4 个常用的 Archimedean Copulas 函数进行参数估计和拟合优度检验,最终确定合适的 Copula 评价模型。

Copula 函数的参数估计是该方法的关键点,目前常用的方法有相关性指标法和极大似然估计,但这 2 种方法都具有一定的局限性,例如相关性指标法只适用于三维以下的 Copula 函数,对于本研究提出的四维 Copula 函数不再适用;而极大似然估计计算繁琐,难以推广。本研究选取一种基于非线性优化思想的参数估计方法<sup>[27]</sup>。为方便起见,以二维 Gumbel Copula 函数为例加以说明。二维 Gumbel Copula 函数的表达式为

$$C(u, v) = e^{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}} \quad (\theta \geq 1) \quad (3)$$

$\theta$  为待估参数。设共有  $n$  组样本观测值  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,构造非线性函数

$$h(\theta) = \sum_{i=1}^n \{e^{-[(-\ln u_i)^\theta + (-\ln v_i)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}} - H_i\}^2 \quad (4)$$

其中  $H_i = P(X \leq x_i, Y \leq y_i)$

$$u_i = \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx \quad v_i = \int_{-\infty}^{y_i} g(y) dy$$

式中  $f(x)$ 、 $g(y)$ ——评价指标的边缘密度函数

$H_i$ ——评价指标的联合经验频率

则参数  $\theta$  的估计问题转换为求函数  $h(\theta)$  的极小值问题。该思想可以推广到三维以上的 Gumbel Copula 函数以及其他形式的 Copula 函数的参数估计中。

模型的拟合优度检验采用离差平方和最小准则(OLS),其公式为

$$O_{LS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - P_i)^2} \quad (5)$$

式中  $P_i$ ——理论频率

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力的影

#### 2.1.1 秸秆生物炭对土壤理化性质的影响

土壤理化性质是影响作物生长的因素之一,也是衡量土地生产能力的重要指标。生物炭具有多孔结构和较大的吸附能力,能够改善土壤结构和性能。由图1可知,随着生物炭施用量的增加,土壤容重逐渐降低,各处理土壤容重较CK分别降低2.23%、4.31%、4.79%和5.24%。随着土壤容重的降低,土壤孔隙度逐渐增大,且随生物炭施用量的增加呈线性递增,其中T4处理较CK土壤孔隙度增加12.90%。尽管生物炭自身的孔隙对提高土壤孔隙度的贡献极为有限<sup>[11-12]</sup>,但是施用生物炭后改变

了土壤的团聚作用,使得生物炭施用量每增加1 t/hm<sup>2</sup>,土壤孔隙度增加0.058个百分点,土壤空隙更为丰富,通气性和透水性增强。生物炭本身的养分含量很少,但是其多孔结构使其具有强大的吸附能力,能够吸持土壤中的有机物质,减少养分流失,提高土壤肥力和土壤养分可利用性。随着生物炭施用量的增加,土壤有效P、速效K、pH值和有机质含量均呈线性递增,且其对生物炭施用量的敏感度由大到小依次为:速效K、有效P、有机质、pH值;土壤铵态N的含量随生物炭施用量的增加呈指数增长,意味着生物炭施用量每增加1 t/hm<sup>2</sup>,土壤中铵态N的含量将会以更大的速率增长。土壤养分和pH值的提高为作物提供了更多可以利用的养分来源,满足作物生长发育需要,可促进作物生长。

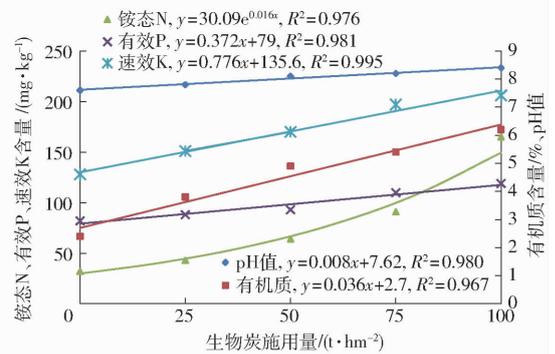
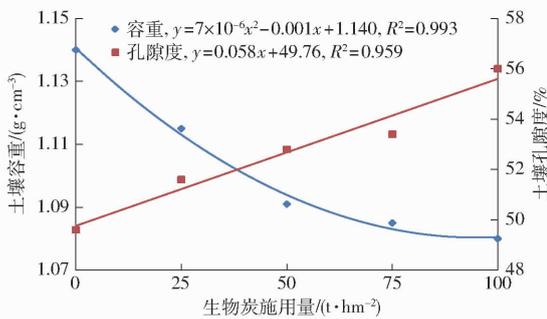


图1 土壤理化性质随生物炭施用量的变化

Fig. 1 Changes of soil physicochemical property with straw biochar amount

从土壤养分的空间变异特征看,施用生物炭能够使土壤养分分布趋于一致,降低处理内不同位置土壤养分差异,进而降低处理内作物生长的差异。以CK和T4处理土壤铵态N的空间分布为例,由图2可知(小区长度刻度为0 m处为坡下,20 m处为坡上),随着降雨径流的冲刷,CK处理铵态N向坡下运移,表现为坡上较坡下贫瘠的现象。T4处理不仅使土壤铵态N的含量较CK高,而且在分布上也更均匀,减小了坡度对土壤养分分布的影响。

#### 2.1.2 秸秆生物炭对土壤持水能力的影响

水分是作物生长必不可少的要素,土壤持水能

力直接关系到土壤质量和土壤水分流失,进而影响作物生长。生物炭疏松多孔、比表面积大,能够改善土壤通气性和透水性,进而提升土壤的持水性能<sup>[28]</sup>。由表1可知,土壤饱和含水率、田间持水量、凋萎系数和有效水最大含量均随生物炭施用量的增加而增大,其中土壤饱和含水率对生物炭施用量的响应最为敏感,除T2与T3处理之间无显著差异外,其余各处理均呈现出显著的差异性。其次是田间持水量,当生物炭施用量较低时,田间持水量增加不显著,T1处理仅比CK增加0.32%;随着生物炭施用量的增加,其对田间持水量的影响逐渐显现,T2、T3处理较CK分别增加3.17%和5.71%;T4处理田间

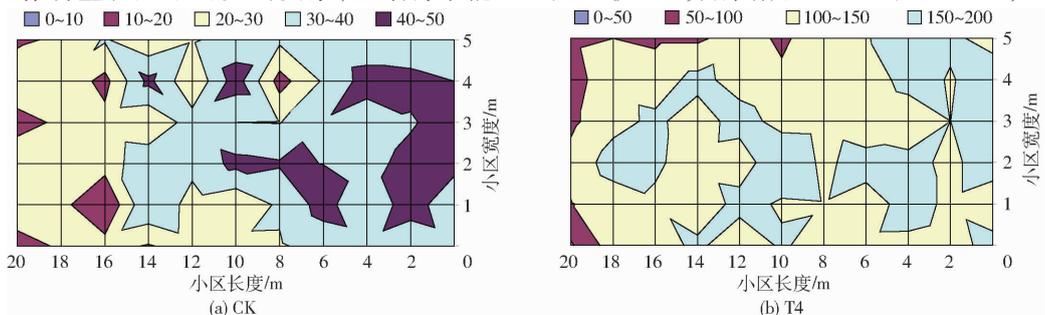


图2 土壤铵态N空间分布(单位:mg/kg)

Fig. 2 Spacial distribution of ammonium N

持水量显著高于其他处理,较 CK 增加 10.48%。另外,T4 处理的土壤有效水最大含量也显著高于其他处理,较 CK 增加 10.36%。尽管随着生物炭施用量的增加,凋萎系数也有所增加,但各处理间差异不显著。综合各处理看,随着生物炭施用量的增加,4 个反映土壤持水性能的指标响应敏感度也增加,表明高施炭量处理对于土壤水分的影响程度要明显高于低施炭量处理。

表 1 土壤持水能力随生物炭施用量的变化

Tab.1 Change of water holding capacity with straw biochar amount		%		
处理	饱和含水率	田间持水量	凋萎系数	有效水最大含量
CK	49.3 <sup>a</sup>	31.5 <sup>a</sup>	10.85 <sup>a</sup>	20.65 <sup>a</sup>
T1	54.8 <sup>b</sup>	31.6 <sup>a</sup>	10.88 <sup>a</sup>	20.72 <sup>a</sup>
T2	59.8 <sup>c</sup>	32.5 <sup>b</sup>	11.21 <sup>a</sup>	21.29 <sup>a</sup>
T3	60.3 <sup>c</sup>	33.3 <sup>b</sup>	11.49 <sup>a</sup>	21.81 <sup>a</sup>
T4	63.6 <sup>d</sup>	34.8 <sup>c</sup>	12.01 <sup>a</sup>	22.79 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.1.3 秸秆生物炭的水土保持效应

试验区降雨历时短、强度大且降雨集中,来不及入渗的降雨会形成地表径流,冲刷地表泥沙并带走养分,使得当地水土流失日益严重。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。由图 3 可知,各处理均具有一定的蓄水保土效果,随着生物炭施用量的增加,试验区年径流深和土壤侵蚀量均呈线性递减趋势,生物炭施用量每增加  $1 \text{ t/hm}^2$ ,可以减少  $0.019 \text{ mm}$  径流深和  $0.009 \text{ t/hm}^2$  土壤侵蚀量。高施炭量处理的减流减沙作用优于低施炭量处理,主要是由于高施炭量可以更有效地维持土壤结构,减少土壤收缩,降低土壤容重,从而使土壤在降雨过程中表现出更高的抗蚀性。从减流率和减沙率 2 项指标看,随着生物炭施用量的增加,减流率和减沙率均呈递增趋势,其中 T4 处理年径流深

和土壤侵蚀量较 CK 分别减少 2.24% 和 2.20%。同时也可以看出,随着生物炭施用量的增加,这种递增趋势在逐渐变缓,用对数函数拟合效果较为理想。造成这种现象的原因可能是生物炭施用量越大,其土壤容重越低,孔隙度越大,表层土壤越疏松,当遭遇强降雨或持续降雨时,越容易被冲刷进而带走一部分炭土混合物。

### 2.1.4 秸秆生物炭的节水增产效应

产量是土地生产能力的直接体现。由图 4 可知,生物炭施用量对大豆产量和水分利用效率均有一定影响,表现为随着生物炭施用量的增加二者均先增后减,呈抛物线型变化。各处理较 CK 产量分别增加 8.33%、27.27%、29.55% 和 22.73%,水分利用效率分别提高 13.87%、33.21%、35.82% 和 29.59%。造成这种现象的原因可能是由于大豆是对 pH 值敏感的作物,生物炭本身呈碱性,施入土壤会提高土壤 pH 值。当生物炭施用量过大时,土壤 pH 值过高不适宜大豆生长,反而会导致大豆产量降低,水分利用效率下降。采用二次函数拟合大豆产量、水分利用效率关于生物炭施用量的变化规律,拟合效果较为理想。由拟合结果可知,在生物炭施用量约为  $74 \text{ t/hm}^2$  时,大豆产量和水分利用效率达到最佳。

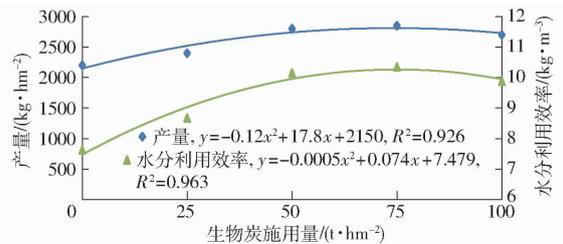


图 4 大豆产量和水分利用效率随生物炭施用量的变化

Fig. 4 Change of soybean yield and water use efficiency with straw biochar amount

## 2.2 基于 Copula 评价法的秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响的评价

### 2.2.1 评价指标的确定

以不同生物炭用量对黑土区坡耕地生产能力的影响为评价对象,选取能够反映土地生产能力的土壤理化性质、土壤持水能力、水土保持效应和节水增产效应为一级指标,每个一级指标包含若干二级指标,见表 2。为降维以简化计算,将二级指标观测值标准化后,采用熵权法计算各二级指标在对应一级指标中的权重,进而计算各处理一级指标值,结果如表 3 所示。

### 2.2.2 边缘分布

对 4 个一级指标进行正态性检验,结果如表 4 所示。由 Kolmogorov - Smirnov 检验和 Shapiro -

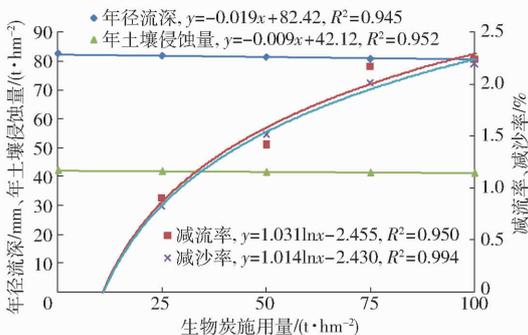


图 3 年径流深、土壤侵蚀量、减流率、减沙率随生物炭施用量的变化

Fig. 3 Change of annual runoff, and soil erosion amounts and reduction rates of runoff and sediments with straw biochar amount

Wilk 检验结果可知,各指标的概率都大于 0.05,通过了正态性检验,可以认为各一级指标的分布服从正态分布。可得各指标边缘分布函数为

$$u_i = P(x \leq x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} dx$$

$$(i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中  $\mu_i$ —— $x_i$  的均值  $\sigma_i$ —— $x_i$  的标准差

### 2.2.3 Copula 函数选取

Copula 函数的形式多样,本研究选取 Archimedean Copulas 函数中常用的 Ali - Mikhail - Haq Copula 函数、Clayton Copula 函数、Frank Copula 函数和 Gumbel Copula 函数<sup>[25]</sup>进行模型参数估计和拟合优度检验,结果见表 5。根据离差平方和最小原则(OLS),选用 Gumbel Copula 函数作为土地生产能力的评价函数,据此计算不同秸秆生物炭施用量的土地生产能力指数,并与基于熵权法的 TOPSIS 模型<sup>[1,29-31]</sup>和模糊物元模型<sup>[32-33]</sup>计算的土地生产能力指数进行比较。

表 2 评价指标体系

Tab.2 Assessment indicator system

一级指标	二级指标
土壤理化性质( $x_1$ )	土壤容重( $x_{11}$ )/(g·cm <sup>-3</sup> )
	土壤孔隙度( $x_{12}$ )/%
	土壤 pH 值( $x_{13}$ )
	土壤有机质质量分数( $x_{14}$ )/%
	土壤铵态 N 质量比( $x_{15}$ )/(mg·kg <sup>-1</sup> )
	土壤有效 P 质量比( $x_{16}$ )/(mg·kg <sup>-1</sup> )
	土壤速效 K 质量比( $x_{17}$ )/(mg·kg <sup>-1</sup> )
土壤持水能力( $x_2$ )	土壤养分的空间变异系数( $x_{18}$ )/%
	土壤饱和含水率( $x_{21}$ )/%
	土壤田间持水量( $x_{22}$ )/%
	凋萎系数( $x_{23}$ )/%
水土保持效应( $x_3$ )	土壤有效水最大含量( $x_{24}$ )/%
	饱和导水率( $x_{25}$ )/(10 <sup>-3</sup> cm·min <sup>-1</sup> )
	年径流深( $x_{31}$ )/mm
节水增产效应( $x_4$ )	年土壤侵蚀量( $x_{32}$ )/(t·hm <sup>-2</sup> )
	大豆产量( $x_{41}$ )/(kg·hm <sup>-2</sup> )
	大豆水分利用效率( $x_{42}$ )/(kg·m <sup>-3</sup> )

注:土壤养分的空间变异系数为各处理土壤铵态 N、有效 P、速效 K、有机质的空间变异系数的平均值。

表 3 一级指标值

Tab.3 Values of the first class indicators

一级指标	二级指标权重	一级指标值				
		CK	T1	T2	T3	T4
$x_1$	(0.113, 0.099, 0.119, 0.106, 0.146, 0.066, 0.225, 0.126)	0	0.267	0.530	0.754	1.000
$x_2$	(0.160, 0.220, 0.170, 0.220, 0.230)	0.170	0.258	0.446	0.618	0.830
$x_3$	(0.486, 0.514)	0	0.390	0.661	0.940	1.000
$x_4$	(0.514, 0.486)	0	0.346	0.925	1.000	0.797

表 4 正态性检验及参数估计

Tab.4 Normality test and parameter estimation

一级指标	Kolmogorov - Smirnov 检验			Shapiro - Wilk 检验			均值	标准差
	统计量	自由度	概率	统计量	自由度	概率		
$x_1$	0.132	5	0.200	0.988	5	0.973	0.510	0.393
$x_2$	0.180	5	0.200	0.963	5	0.828	0.464	0.268
$x_3$	0.196	5	0.200	0.930	5	0.599	0.598	0.413
$x_4$	0.266	5	0.200	0.889	5	0.351	0.614	0.427

表 5 参数估计及拟合优度检验

Tab.5 Parameter estimation and test of goodness of fit

项目	Ali - Mikhail - Haq Copula	Clayton Copula	Frank Copula	Gumbel Copula
函数	$C = \frac{\prod_{i=1}^4 u_i}{1 - \theta \prod_{i=1}^4 (1 - u_i)}$	$C = \left( \sum_{i=1}^4 u_i^{-\theta} - 1 \right)^{-\frac{1}{\theta}}$	$C = -\frac{1}{\theta} \ln \left( 1 + \frac{\prod_{i=1}^4 (e^{-\theta u_i} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right)$	$C = e^{-\left[ \sum_{i=1}^4 (-\ln u_i)^\theta \right]^{\frac{1}{\theta}}}$
$\theta$	0.065 6	1.413 0	2.578 0	1.000 0
OLS	$9.560 \times 10^{-5}$	0.084 4	0.043 2	$2.468 \times 10^{-5}$

### 2.2.4 黑土区坡耕地生产能力指数

3 种方法计算的土地生产能力指数如图 5 所示。由 TOPSIS 模型和模糊物元模型计算的土地生产能力指数十分接近,并且除 CK 处理外均显著高

于由 Copula 评价法计算的土地生产能力指数。采用 Kendall 相关系数对由 3 种方法得到的土地生产能力指数进行一致性检验,各组间 Kendall 系数均为 1,在显著性水平  $p < 0.05$  下,3 种方法计算的土

地生产能力指数具有统计学意义上的一致性。从计算结果看,3种方法计算的土壤生产能力指数均随生物炭施用量的增加而增大,其中由TOPSIS模型和模糊物元模型计算的土壤生产能力指数随着生物炭施用量的增加先是快速呈线性增长,在生物炭施用量大于 $50\text{ t/hm}^2$ 后,增长趋势开始减缓;而由Copula评价法计算的土壤生产力指数呈“S型”曲线增长,在生物炭施用量较少时,土地生产能力指数增长不显著,之后随着生物炭施用量的不断增加,土地生产能力指数迅速增大,当生物炭施用量大于 $75\text{ t/hm}^2$ 后,土地生产能力指数的增长有变缓趋势。

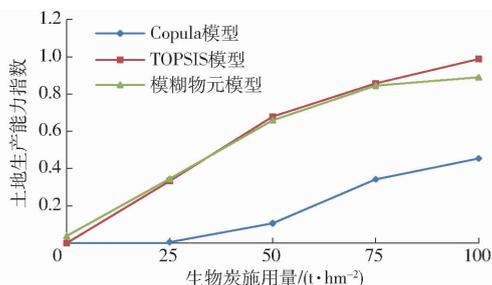


图5 土地生产能力指数随生物炭施用量的变化  
Fig. 5 Change of soil productivity index with straw biochar amount

从生物炭施用量对土壤理化性质、持水能力、水土保持效应和节水增产效应4个一级指标的影响看(图6),随着生物炭施用量的增加,土壤理化性质、持水能力和水土保持效应指数均呈线性递增;而节水增产效应指数则呈抛物线型先增后减,在生物炭施用量约为 $77\text{ t/hm}^2$ 时节水增产效果最好,该结果与试验结果十分接近,也验证了评价结果的可靠性。

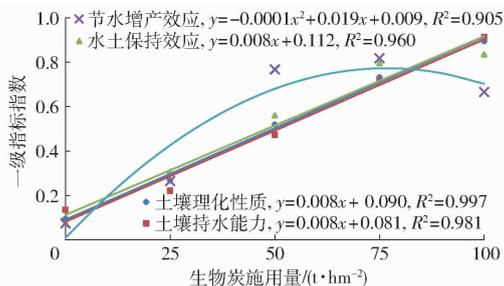


图6 一级指标指数随生物炭施用量的变化  
Fig. 6 Change of indexes of the first class indicators with straw biochar amount

### 3 讨论

生物炭质轻多孔,具有强大的吸附能力,能够改善土壤结构,提高土壤肥力。随着生物炭施用量的增加,土壤容重降低,孔隙度增大,铵态N、有效P、速效K、pH值和有机质含量均增加,这一结论与前人的研究基本一致,但仍有一定差异,如在本研究中

T4处理土壤容重较CK降低5.24%,低于OGUNTUNDE等<sup>[34]</sup>认为的9%;在本研究中,土壤化学性质对生物炭施用量的敏感度由大到小依次为:铵态N、速效K、有效P、有机质、pH值,这与周桂玉等<sup>[35]</sup>的研究成果有一定的差异,可能是由于生物炭种类和供试土壤的理化性质差异造成的。另外,生物炭能够使土壤养分空间分布趋于一致,降低处理内不同位置土壤养分差异,减小坡度对土壤养分分布的影响,这在现有研究中鲜见报道。

多数学者认为生物炭能够提高土壤的持水能力<sup>[28,36-37]</sup>,但在不同生物炭施用量对土壤持水性能的影响程度上尚未达成一致。DUGAN等<sup>[38]</sup>研究发现秸秆生物炭可提高土壤的持水能力,但不同施用量间差异不显著。王丹丹等<sup>[36]</sup>则认为土壤持水能力与生物炭添加量呈正相关。在本研究中,土壤饱和和含水率、田间持水量、凋萎系数和有效水最大含量均随生物炭施用量的增加而递增,且高施炭量处理对于土壤水分的影响程度明显高于低施炭量处理,其中土壤饱和含水率对生物炭施用量的响应最为敏感,其次是田间持水量和土壤有效水最大含量,凋萎系数各处理间差异不显著。

大豆产量和水分利用效率均随着生物炭施用量的增加先增后减,呈抛物线型变化。采用二次函数拟合大豆产量、水分利用效率关于生物炭施用量的变化规律,拟合效果较为理想。由拟合结果可知,在生物炭施用量约为 $74\text{ t/hm}^2$ 时,大豆产量和水分利用效率达到最佳。勾芒芒等<sup>[15]</sup>在番茄试验中也得到类似的结论。HOSSAIN等<sup>[17]</sup>和ZWIETEN等<sup>[19]</sup>通过盆栽试验也证明施用生物炭能够显著增加小麦、番茄等作物的产量。MAJOR等<sup>[18]</sup>通过大田试验发现,在施用生物炭后的4年间,相比于不施用生物炭,玉米在第1年产量没有显著变化,而在后3年产量大幅增加。JONES等<sup>[39]</sup>的研究也显示生物炭没有对作物前2年的生长产生显著影响,却显著增加了第3年的产量。王丹丹等<sup>[36]</sup>在黄土高原地区的研究表明,在施加生物炭6个月就有效地改善了表层土壤容重、田间持水量和土壤的导水性能,土壤的持水性能与生物炭施加量呈正相关。勾芒芒等<sup>[15]</sup>研究了沙壤土添加生物炭的节水保肥和增产效应,通过1年的试验结果表明,土壤含水率、速效磷、速效钾均随着生物炭施用量的增加而增加,施用生物炭的番茄产量均明显高于不施生物炭处理。王艳阳等<sup>[10]</sup>研究也表明施用生物炭后所形成的生物炭-土壤双层土壤结构不仅增加了上层土壤的蓄水能力,而且对下层土壤的持水性能亦有显著提高。本研究通过1年的试验,在土壤理化性质、土壤的持

水保肥能力和节水增产方面均获得了与上述相关研究<sup>[36,15,10]</sup>类似的结果;同时,在坡耕地径流泥沙控制方面也取得了一定的效果。这是因为生物炭本身孔隙结构发达、质轻、颗粒细小、比表面积大,具有巨大的表面能,土壤水分吸持能力强。同时,添加生物炭后,可以改善土壤结构,降低土壤容重,增加土壤孔隙率,从而提高土壤的通透性和持水能力。另外,生物炭含有羟基、羧基、苯环等官能团,使其具有强大的吸附能力和较大的阳离子交换量,从而为提高土壤肥料的利用率和利用效率提供了可能<sup>[15]</sup>。可见,生物炭改善了作物生长环境,进而促进作物生长,提高作物产量;同时土壤持水能力的增强势必会减少坡耕地的降雨径流,从而减少土壤及其养分的流失。本研究也说明生物炭适用于黑土区坡耕地土地生产力的改善与修复。至于生物炭是否能够提高土壤本身的抗蚀性,使坡耕地径流泥沙控制效果进一步提高,则需要进一步长期地开展试验研究,因为土壤本身团粒结构的形成需要一定的时间。此外,生物炭对作物产量影响的多年后效应,本研究中并未涉及,仍需要开展多年试验做进一步研究。

本研究建立了基于 Gumbel Copula 函数评价模型计算不同生物炭施用量的土地生产能力指数,并将计算结果与基于熵权法的 TOPSIS 模型和模糊物元模型计算的土壤生产能力指数进行了对比,3 种方法计算的结果具有统计意义上的一致性。由 TOPSIS 模型和模糊物元模型计算的土壤生产能力指数随生物炭施用量的增加先是呈线性快速增长,之后趋于平缓;而由 Gumbel Copula 函数计算的土壤生产能力指数则随生物炭施用量的增加呈“S 型”曲线递增。理论上,土地生产能力指数与生物炭施用量之间应为 Logistic 曲线,当生物炭施用量较低时,土地生产能力主要取决于土壤自身的理化性质,土地生产能力指数增长缓慢;随着生物炭施用量的增加,改善了土壤的结构,提高了土壤有效养分和水分的利用率,减少了水、土以及养分的流失,土地生产能力指数迅速增长;但是当生物炭施用量达到一定量后,土壤 pH 值过高,反而不利于大豆生长,故而土地生产能力指数增长放缓。3 种方法中只有 Gumbel Copula 函数计算的土壤生产能力指数完整地反映了这一变化过程,因此其较另外 2 种方法更为合理,可以作为黑土区坡耕地生产能力的评价依

据。

另外,上述研究仅以施用 1 年生物炭的土壤为研究对象,由于生物炭施用不同年限对反映土地生产能力的各项指标的影响有所不同,对于连续施用生物炭条件下各指标的变化规律,土地生产能力对生物炭施用量的响应规律以及一次施入的后效应有待进一步研究揭示。

## 4 结 论

(1) 生物炭能够有效提高黑土区坡耕地土壤肥力和养分的可利用性。随着生物炭施用量的增加,土壤有效 P、速效 K、pH 值和有机质含量均随生物炭施用量的增加呈线性递增趋势,铵态 N 的含量随生物炭施用量的增加呈指数增长。

(2) 生物炭能够改善土壤结构,有效提高黑土区坡耕地土壤的持水性能。随着生物炭施用量的增加,土壤孔隙度、饱和含水率、田间持水量、凋萎系数和有效水最大含量均呈现出增加趋势,且高施炭量处理对于土壤水分的影响程度明显高于低施炭量处理,而土壤容重则随着生物炭施加量的增加而减小。土壤孔隙度最多较对照处理增加 12.90%,而土壤田间持水量和有效水最大含量则分别提高 10.48% 和 10.36%。

(3) 生物炭对黑土区坡耕地具有一定的蓄水保土和节水增产效果。随着生物炭施用量的增加,年径流深和土壤侵蚀量均呈线性递减趋势,而减流率和减沙率则呈对数函数递增。生物炭施用量每增加 1 t/hm<sup>2</sup>,径流深和土壤侵蚀量可分别减少 0.019 mm 和 0.009 t/hm<sup>2</sup>;生物炭施用当年表现为大豆产量和水分利用效率均先增后减,呈抛物线型变化。当生物炭施用量约为 74 t/hm<sup>2</sup>时,大豆产量和水分利用效率达到最佳。

(4) 基于 Gumbel Copula 函数的土地生产力评价模型能够很好地评价黑土区坡耕地不同生物炭施用量条件下的土地生产能力。模型计算的土壤生产能力指数随生物炭施用量的增加呈“S 型”曲线递增,土壤理化性质、持水能力和水土保持效应指数均呈线性递增;而节水增产效应指数则呈抛物线型先增后减,在生物炭施用量约为 77 t/hm<sup>2</sup>时节水增产效果最好。模型计算结果与试验分析结果吻合较好。

## 参 考 文 献

- 刘慧,魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J/OL]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 288-296. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20142035&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20142035&flag=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.20.035. LIU Hui, WEI Yongxia. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 288-296. (in Chinese)

- 2 魏永霞,张忠学,赵雨森. 坡耕地水土保持理论与技术研究[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- 3 LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London:Earthscan, 2009.
- 4 李力,刘娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学,2011,30(8):1411-1421.  
LI Li, LIU Ya, LU Yuchao, et al. Environmental effects of biochar and advances research of its applications[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(8): 1411-1421. (in Chinese)
- 5 MOHAN D, SARSWAT A, OK Y S, et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review[J]. Bioresource Technology, 2014, 160: 191-202.
- 6 NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2): 105-112.
- 7 郑浩. 芦竹生物炭对农业土壤环境的影响[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.  
ZHENG Hao. Effect of giant reed derived biochar on agricultural soil environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 8 韩光明. 生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.  
HAN Guangming. Effect of biochar on soil physicochemical property and microbial diversity in different soil types[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (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 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/OL]. 农业工程学报,2016,32(8):113-119. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160816&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160816&flag=1). DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.08.016.  
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 113-119. (in Chinese)
- 11 王红兰,唐翔宇,张维,等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J/OL]. 农业工程学报,2015,31(4):107-112. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150416&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150416&flag=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.04.016.  
WANG Honglan, TANG Xiangyu, ZHANG Wei, et al. Effects of biochar application on till soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 107-112. (in Chinese)
- 12 ZHANG Jun, CHEN Qun, YOU Changfu. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil[J]. Pedosphere, 2016, 26(2): 265-272.
- 13 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/OL]. 农业工程学报,2016,32(14):135-144. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161419&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161419&flag=1). DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.019.  
LI Shuailin, WANG Xia, WANG Shuo, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 135-144. (in Chinese)
- 14 肖茜,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J/OL]. 农业工程学报,2015,31(16):128-134. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151618&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151618&flag=1). DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.018.  
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 128-134. (in Chinese)
- 15 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. [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.  
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. (in Chinese)
- 16 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2012.  
ZHANG Weiming. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 17 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.
- 18 MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombia savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1-2): 117-128.
- 19 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.
- 20 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- 21 WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng. Biochar application promote growth parameters of soybean and reduces the growth difference[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(12): 1493-1502.
- 22 王艳阳. 黑土区施用生物炭条件下的土壤水分运动与溶质运移模拟[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.  
WANG Yanyang. Numerical simulation of soil water movement and solute transport under application of biochar in black soil region[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 23 陈晶,王文圣,李跃清. Copula 评价法及其在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,

- 43(增刊1):39-42,66.  
CHEN Jing, WANG Wensheng, LI Yueqing. Copula assessment method and its application for eutrophication of lake water quality assessment[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(Supp. 1): 39-42, 66. (in Chinese)
- 24 吴娟. Copula 函数的估计及其应用[D]. 武汉:华中科技大学,2013.  
WU Juan. The estimation and application of Copula function[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 25 杨希. Copula 函数的选择方法与应用[D]. 青岛:山东科技大学,2010.  
YANG Xi. The selection method of Copula and its application[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 26 张雨. Archimedean Copula 函数在干旱分析中的应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.  
ZHANG Yu. Application of Archimedean Copulas functions in drought analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- 27 钱龙霞,张韧,王红瑞,等. 基于 Copula 函数的水资源供需风险损失模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(2): 517-527.  
QIAN Longxia, ZHANG Ren, WANG Hongrui, et al. Risk loss model of water supply and water demand based on Copula function and its application[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(2): 517-527. (in Chinese)
- 28 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.
- 29 雷勋平, QIU Robin, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.  
LEI Xunping, QIU Robin, LIU Yong. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 243-253. (in Chinese)
- 30 李灿,张凤荣,朱泰峰,等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):217-227.  
LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese)
- 31 魏占民,李泽鸣,李佳宝. TOPSIS 模型对农田土地平整方式的综合评价[J]. 灌排机械工程学报,2014,32(4):356-362.  
WEI Zhanmin, LI Zeming, LI Jiabao. Comprehensive evaluation on farmland leveling methods based on TOPSIS model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 356-362. (in Chinese)
- 32 吴奕,朱海兵,周志成,等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(17):1-7.  
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7. (in Chinese)
- 33 郝瑞霞,刘峰,吕鉴,等. 基于熵权物元模型的污水处理厂运行效果综合评价与分析[J]. 北京工业大学学报,2013,39(3): 445-451.  
HAO Ruixia, LIU Feng, LÜ Jian, et al. Comprehensive evaluation and analysis on the operation of wastewater treatment plant based on matter-element model combined with entropy weight[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(3): 445-451. (in Chinese)
- 34 OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrient and Soil Science, 2008, 171(4): 591-596.
- 35 周桂玉,窦森,刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报,2011, 30(10):2075-2080.  
ZHOU Guiyu, DOU Sen, LIU Shijie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2075-2080. (in Chinese)
- 36 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)
- 37 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.
- 38 DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: impact on water holding capacities(WHC) of three soils from Ghana[C]// Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solution for a Changing World, 2010.
- 39 JONES D L, ROUSK J, EDWARDS J G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 45: 113-124.
- 40 魏永霞,刘志凯,冯鼎瑞,等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后土壤水分动态变化的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(8):201-207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160825&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160825&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025.  
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil after individual rainfall[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201-207. (in Chinese)