

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.029

黑土区坡耕地生物炭施用模式效应与土地生产力评价

魏永霞^{1,2} 石国新¹ 吴昱^{3,4} 刘慧^{2,5}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090; 4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;
5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了研究黑土区施加生物炭的施用模式, 以东北黑土区 3° 坡耕地田间径流小区为研究对象, 进行了为期 3 年的观测。2015 年按照生物炭的施加量共设置 C0 (0 t/hm²)、C25 (25 t/hm²)、C50 (50 t/hm²)、C75 (75 t/hm²)、C100 (100 t/hm²) 5 个处理, 2016、2017 分别连续施加等量的生物炭。分析了黑土区连续 3 年施加生物炭后土壤理化性质、水土保持效应、节水增产效应等指标的变化规律, 并建立改进的 TOPSIS 模型对生物炭的施用模式进行综合评价。结果表明: 土壤有机碳密度、pH 值随施炭量的增加均呈线性递增趋势, 土壤容重随施炭量的增加呈线性递减趋势, 且施用年限越久, 作用越明显; 施用 1 年时田间持水率随施炭量的增加呈线性递增趋势, C100 处理田间持水率最大, 为 35.48%, 连续施用 2 年、3 年时田间持水率随施炭量的增加呈先增后减的二次抛物线变化, 均为 C50 处理达到最大, 分别为 36.20%、36.24%; 3 年的年径流量和年土壤侵蚀量随施炭量的增加均呈先减后增的二次抛物线变化, 连续施加 2 年 50 t/hm² 的生物炭减流效果和抗土壤侵蚀效果最优; 连续 3 年施加生物炭均提高了大豆产量和水分利用效率, 各年份产量和水分利用效率提高最大的分别为 C75 (21.8%、25.3%)、C50 (33.3%、27.6%)、C50 (24.1%、19.8%); 在不同施炭量和施用年限条件下, 改进的 TOPSIS 模型能客观、清晰地描述土地生产力变化过程, 并总结出生物炭施用模式, 即连续施加 2 年 50 t/hm² 的生物炭对土地生产能力的提升最优, 其次是施加 1 年 75 t/hm² 的生物炭。

关键词: 生物炭; 施用模式; 综合评价; 土地生产力指数; TOPSIS 模型

中图分类号: S157.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0251-09

Effect and Comprehensive Evaluation of Biochar Application Mode on Slope Farmland in Black Soil Region

WEI Yongxia^{1,2} SHI Guoxin¹ WU Yu^{3,4} LIU Hui^{2,5}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of High Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China
3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China
4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
5. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the mode of application of biochar in the black soil area, a field runoff plot of 3° slope cultivated land in Northeast China was studied for a period of three years. In 2015, according to the amount of biochar applied, five treatments of C0 (0 t/hm²), C25 (25 t/hm²), C50 (50 t/hm²), C75 (75 t/hm²) and C100 (100 t/hm²) were set up. The treatments were applied with the same amount of biochar in 2016 and 2017, respectively. The changes of soil physical and chemical properties, the effects of soil and water conservation and the effects of water-saving and yield-increasing were studied after applying biochar for three consecutive years in black soil area. And a model was established based on an improved TOPSIS to comprehensively evaluate the application mode of biochar. The results showed

收稿日期: 2018-05-17 修回日期: 2018-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和农业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: wxy0915@163.com

通信作者: 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

that the soil organic carbon density, pH value and the applied amount of biochar presented a linear increasing trend, the soil bulk density and the applied amount of biochar showed a linear decreasing trend, and the longer the service life was, the more obvious the effect was. The field water holding capacity and the applied amount of biochar were increased linearly in the first year. The C100 treatment had the largest amount of water in the field, which was 35.48%. And the field water capacity and applied amount of biochar during the two-year and three-year continuous applications showed a quadratic parabola changes. The parabola changes reached the maximum at C50 treatment, which were 36.20% and 36.24%. The three-year annual runoff, annual soil erosion and applied amount of biochar were firstly reduced and then increased by the quadratic parabola. Continuous application of two years of 50 t/hm² biochar had the best reduction effect and anti-erosion effect. The application of biochar for three consecutive years increased soybean yield and water use efficiency, The highest increase in yield and water use efficiency in each year were C75 (21.8%, 25.3%), C50 (33.3%, 27.6%) and C50 (24.1%, 19.8%), respectively. Under the conditions of different biochar application rates and application years, the improved TOPSIS model can objectively and clearly describe the process of soil productivity changes, and summarize the proposed biochar application mode. That was, continuous application of 50 t/hm² biochar for two years gave the best improvement in soil productivity, which followed by 75 t/hm² for a year. The results of this research can provide a theoretical basis for practical production.

Key words: biochar; application model; comprehensive evaluation; soil productivity index; TOPSIS model

0 引言

东北黑土区作为国家粮食主产区之一,在我国粮食安全体系建设中具有重大作用^[1]。该区秸秆资源丰富,但被利用的秸秆资源相对较少,秸秆焚烧等不恰当的秸秆处理方式不但造成资源的浪费,而且对环境也造成不可挽回的影响。秸秆还田已经成为一项受到普遍重视的高效技术,通过该技术可以减少水土流失、提高产量和水分利用效率等,从而提高土地的综合生产力,这对推动农业健康可持续发展具有重要意义^[2-3]。

生物炭是秸秆炭化还田的新产物,是以作物秸秆、动物粪便为原材料在缺氧或低氧条件下缓慢高温裂解获得的一类富含碳的有机质^[4]。近年来,随着生物炭在农业生产中应用的不断探究,围绕生物炭影响土地生产能力的研究越来越多。在土壤改良方面,已有的相关研究表明,生物炭施入土壤后能有效地降低土壤容重、增加孔隙度,从而提高土壤的持水能力、改善田间气候和调节田间持水率^[5-7],也可以改善土壤的结构、使土壤松散、稳固土壤三相比例、提高土壤 pH 值^[8-11]。在水土保持方面,已有的相关研究认为,施加生物炭可以减少产流量、产沙量,防治土壤侵蚀和水土流失^[12-13]。在节水增产方面,也有一些国内外学者的相关探究。如 ZWIETEN 等^[14]研究认为添加生物炭提高了作物产量和灌溉水的利用效率。刘鑫^[15]在对小麦的试验研究中也得到类似结论。VAN ZWIETEN 等^[16]通过室内研究表明施加 10 t/hm² 生物炭后小麦、萝卜的产量增幅

均已超过 50%。张娜等^[17]总结出施加 1 t/hm² 的生物炭增产效果最佳,增产幅度可达 8.8%。

生物炭稳定性极强,在土壤中能够长期存在,虽然目前已有较多生物炭节水增产效应等的研究,但多是以短期施加生物炭为条件研究施加生物炭对土壤理化性质、水土保持效应、节水增产效应等指标的影响,而在探索中长期施加生物炭对各指标的变化规律,以及施炭量与施炭年限的合理配置方面缺乏精确的指导与评价。为此,本研究以大豆坡耕地田间径流小区为研究对象,连续 3 年施加生物炭,明晰施加生物炭后土壤理化性质、水土保持效应、节水增产效应等的变化规律。建立改进的 TOPSIS 评价模型对土地生产力进行综合评价,通过综合评价总结出生物炭施用模式,为黑土区最优生物炭施加剂量和年际分配提供合理的建议,同时为黑土区实际生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验基地选择黑龙江省北安市,位于北纬 48°02'~48°17',东经 126°47'~127°15',属于寒温带大陆性气候。全年平均降水量 555.3 mm,全年降雨集中在 7—9 月,约占全年的 90% 左右。积温 2 254.5℃,无霜期 110~115 d。耕地多为丘陵漫岗,土质肥沃,地势由东向西倾斜,岗顶平缓,坡面较长,坡度为 3°~5°。土壤为草甸黑土,土壤疏松通透性好,不易入渗。主要农作物为大豆、玉米。

1.2 试验设计

试验于 2015—2017 年在北安市红星农场内坡度为 3° 的径流小区进行。小区规格 20 m × 5 m, 每两个小区间隔 1 m。为了防止侧渗各小区边界用深入地下 1 m 的铁板隔开。每个小区埋设 TDR 管, 埋深 1.8 m。小区末端设有径流自动记录系统和泥沙收集系统, 自动记录后的径流排入区外排水沟。试验共设 5 个处理, 即不加生物炭的常规处理 C0 (对照处理) 和生物炭施加量分别为 C25 (25 t/hm²)、C50 (50 t/hm²)、C75 (75 t/hm²)、C100 (100 t/hm²) 的处理, 2 次重复, 共计 10 个径流小区。试验开始前将生物炭均匀铺撒于土壤表面并反复搅拌, 使其与表层土壤 (0 ~ 20 cm 土层) 混合均匀。试验连续 3 年种植大豆, 并施加重茬肥。2016、2017 年分别在上一年试验基础之上加入等量的生物炭, 并做相同的处理。

供试土壤为草甸黑土, 理化性质为 pH 值 6.3, 总有机碳质量比 34.83 g/kg, 全氮质量比 1.1 g/kg, 全磷质量比 0.45 g/kg, 全钾质量比 0.35 g/kg。供试大豆品种为黑河三号。供试玉米秸秆生物炭购于辽宁金和福农业开发有限公司, 制备方式为无氧条件 450℃ 高温裂解, 基粒径 1.5 ~ 2.0 mm, 生物炭性质为 pH 值 9.14, 含氮 1.53%、磷 0.78%、钾 1.68%, 灰分为 31.8%。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤理化性质

每个小区选取 2 个取样点, 于大豆收获期取表层土壤测定其基础理化性质, 其中田间持水率采用室内环刀法测定, 土壤容重采用 DIK-1130 型土壤三相仪测定, 土壤 pH 值采用 PHS-3C 型酸度计测定, 土壤总有机碳含量采用德国 Elementar Vario TOC 有机碳分析仪测定, 并过 2 mm 筛测得大于 2 mm 砾石质量百分比, 计算土壤总有机碳密度

$$S = CD\theta(1 - \delta)/100 \quad (1)$$

式中 S ——土壤总有机碳密度, t/hm²

C ——土壤有机碳质量比, g/kg

D ——土层厚度, cm

θ ——土壤容重, g/m³

δ ——土样中大于 2 mm 砾石质量分数, %

1.3.2 年径流量、年土壤侵蚀量

采用安装在径流小区末端的径流自动记录系统和泥沙收集系统测定各次降雨的径流量和产沙量, 进而计算年径流量、年土壤侵蚀量。

1.3.3 产量及水分利用效率

于大豆收获期在相同处理径流小区的坡上和坡下相应位置选取 2 个 10 m² 的地块进行实收测产, 计

算大豆总产量。采用水量平衡方程计算各处理耗水量, 水量平衡方程为

$$ET = P + I + \Delta S - \Delta R \pm Q \quad (2)$$

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中 ET ——作物生育期耗水量, mm

P ——作物生育期的降雨量, mm

I ——作物生育期灌水量, 本研究中全生育期内未灌水, 取 0 mm

ΔS ——收获期与播种期 0 ~ 100 cm 土壤储水量之差, mm

ΔR ——地表径流量, mm

Q ——地下水交换量 (试区地下水埋深 40 m, 可忽略不计), mm

WUE ——水分利用效率, kg/m³

Y ——产量, kg/hm²

1.4 改进的 TOPSIS 模型

TOPSIS (Technique for order preference by similarity an ideal solution) 模型是一种比较常用的多目标决策方法, 其原理是借助多目标决策问题的“正理想解”和“负理想解”来排序, 若某一方案离正理想解最近的同时, 又远离负理想解, 则该方案作为理想方案。TOPSIS 模型具体步骤详见文献 [18]。

传统的 TOPSIS 模型容易产生逆序问题, 在计算权重时带有主观性, 使评价结果偏离实际 [19], 造成评价结果不合理。而且传统的 TOPSIS 模型决策矩阵求解复杂, 不易求得正负理想解 [20]。为解决上述缺点对 TOPSIS 模型进行改进。

(1) 采用熵权法和变异系数法 [21] 加权平均计算各指标的权重系数。

变异系数法为

$$v_i = \frac{\sigma_i}{x_i} \quad (4)$$

$$z_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^m v_i} \quad (5)$$

式中 v_i ——第 i 项指标的变异系数

σ_i ——第 i 项指标的标准差

\bar{x}_i ——指标的平均数

z_i ——变异系数法计算的权重

$$\omega = (z_i + \omega_1)/2 \quad (6)$$

式中 ω ——熵权法和变异系数法加权平均权重

ω_1 ——熵权法计算的权重

(2) 为简化正负理想解的计算, 提出了一种改进的欧氏距离算法。此法依据为矩阵 Y 中所有的 y_{ij} 的取值范围为 $0 \leq y_{ij} \leq 1$, 显然, 对于偏好最高的目标属性值为 $y_{ij} = 1$, 对于偏好最低的目标属性值为

$y_{ij} = 0$, 故将本研究中绝对正理想解设定为 $L = (1, 1, \dots, 1)^T$, 绝对负理想解设定为 $I = (0, 0, \dots, 0)^T$ 。计算与正负理想解之间的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (y_{ij} - 1)^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (y_{ij} - 0)^2} \quad (8)$$

式中 D_i^+ ——各评价对象与正理想解之间的距离

D_i^- ——各评价对象与负理想解之间的距离

ω_j ——各评价指标的熵权系数

则土地生产力指数 C_i 为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

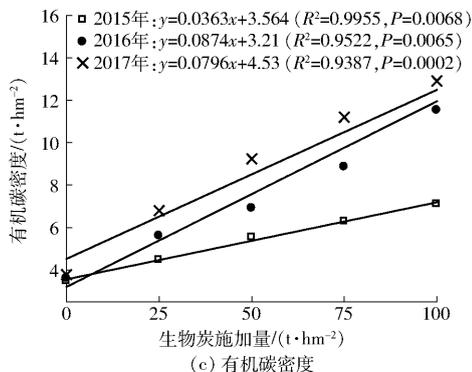
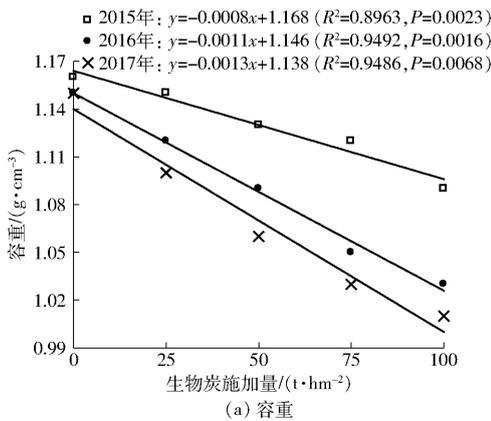
1.5 数据处理方法

各项指标均采用平均值,应用 Microsoft Excel 2010、Origin 8.0 对数据进行处理与绘图。采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, LSD 法进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 施加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发育的主要因素之一。不同生物炭施加量及施用年限土壤的理化性质如图 1 所示。由图 1a 可知,随着生物炭施加量的增加,土壤容重逐渐降低,2015、2016、2017 年 C25



处理较 C0 分别降低 0.86%、2.6%、4.3%, C50 处理分别降低 2.5%、5.2%、7.8%, C75 处理分别降低 3.4%、8.6%、10.4%, C100 处理分别降低 7.7%、8.6%、11.3%。3 年土壤容重与生物炭施加量均呈较好的线性关系 (R^2 均在 0.89 以上, $P < 0.01$)。在相同的施用年限条件下,生物炭施加量越大,土壤容重越低,且随着施用年限的增加,土壤容重随生物炭施用量的增加下降的速率增加。在相同施炭量水平下随着施用年限的增加,容重降低,但 2017 年较 2016 年下降的幅度 ($0.01 \sim 0.03 \text{ g/m}^3$) 小于 2016 年较 2015 年下降的幅度 ($0.02 \sim 0.07 \text{ g/m}^3$)。图 1b 显示,2015 年田间持水率与生物炭施加量呈线性关系 ($R^2 = 0.9854, P < 0.01$),其中 C100 处理田间持水率最高,较 C0 处理增加了 8.14%,差异达显著性水平 ($P < 0.05$)。2016、2017 年田间持水率与生物炭施加量呈二次抛物线关系 (R^2 为 0.9298、0.9231, P 为 0.027、0.034)。两年均以 C50 处理田间持水率最大,与 C0 相比分别提高了 9.95%、8.34%,均达到显著性差异 ($P < 0.05$)。可见,不同年限间生物炭对田间持水率的影响效果存在差异,这不仅与施炭量有关,与施加年限之间也有一定的关系。

土壤有机碳是土壤有机质含量的一种化学度量,对产量具有重要影响。由图 1c 可看出,3 年土壤有机碳密度各处理对生物炭的敏感度均为 C100 最大,与同年 C0 相比分别增加了 102.6%、

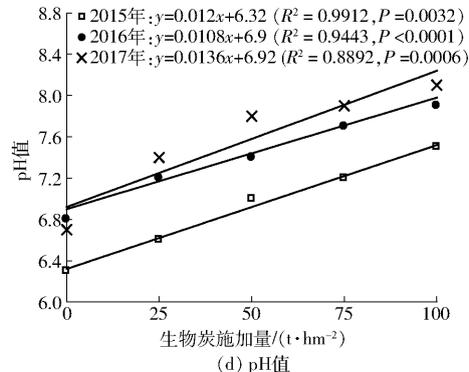
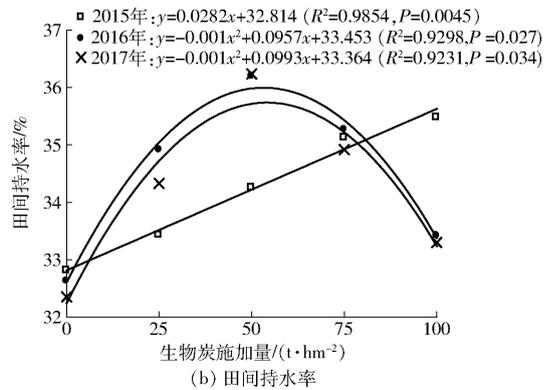


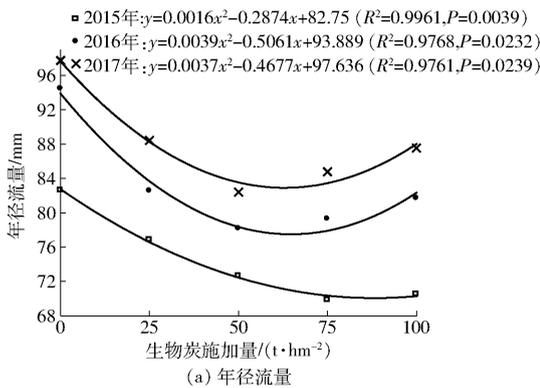
图 1 2015—2017 年土壤理化性质

Fig. 1 Physical and chemical properties of soil from 2015 to 2017

246.3%、257.9%,方差分析结果表明,差异均达显著水平($P < 0.05$)。如图 1d 所示,3 年土壤 pH 值与生物炭施加量均呈线性关系(R^2 均在 0.88 以上, $P < 0.01$)。各年的 C100 处理 pH 值较 C0 处理提高了 0.9、1.1、1.4,差异显著($P < 0.05$);此外,不同年限相同处理之间的土壤有机碳密度和 pH 值均高于前一年(C0 处理除外),可见施用年限越久效果提升越明显。

2.2 施加生物炭对年径流量和年土壤侵蚀量的影响

图 2 为 2015—2017 年各处理年径流量、年土壤侵蚀量。由图 2a 可知,施加生物炭可以减小年径流量和土壤侵蚀量。连续 3 年年径流量与生物炭施加量均呈抛物线关系(R^2 均在 0.97 以上, P 为 0.003 9、0.023 2、0.023 9)。2015 年 C75 处理减流效果最优,与同年 C0 处理相比减少了 15.4%,其他处理减流效果从高到低依次为 C100、C50、C25,分别减少



了 14.6%、12.0%、6.9%。2016、2017 年均以 C50 处理径流控制效果最优,较 C0 处理分别减少 17.2%、15.7%。而施炭量最高的 C100 处理,2 年径流量仅较 C0 处理减少 3.3%、2.9%;图 2b 显示,年土壤侵蚀量与年径流量的变化规律大致相同(R^2 均在 0.99 以上, $P < 0.01$)。连续 3 年最优处理(C75、C50、C50)对应的土壤侵蚀量较同年对照处理减少了 1.7%、2.7%、2.3%。综合 3 年的试验结果发现,2016、2017 年 C50 处理较 2015 年减流率增加了 5.2%、3.7%,减沙率增加了 1.3%、0.8%。可见,生物炭施加量相同,但施用年限不同,其减流效果和抗土壤侵蚀效果也不同,即使是施用年限相同,也并非生物炭施加量越多效果越好,所以应该注重生物炭施加量和施用年限的合理分配,这在一定程度上可以防治水土流失,改善生态环境。

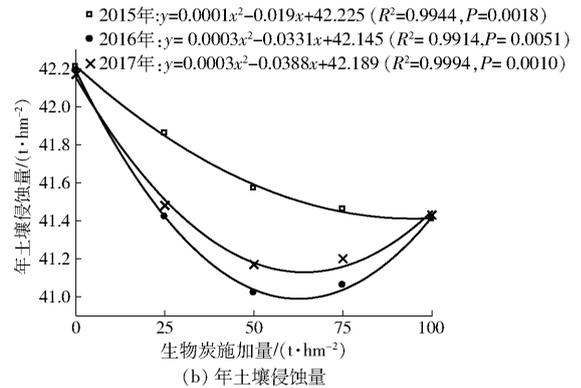


图 2 2015—2017 年年径流量和年土壤侵蚀量

Fig. 2 Annual runoff and soil erosion in 2015—2017

2.3 施加生物炭对产量和水分利用效率的影响

东北黑土区水资源短缺,已经成为制约该区作物生产的严重问题,因此在保证产量的前提下,提高水分利用效率是黑土区农业发展的重要措施。如图 3 所示,2015 年 C75 处理的节水增产效果最优,增产率为 21.8%,水分利用效率提高率为 25.3%,与 C0 处理差异均显著($P < 0.05$),其次是 C100、C50、C25 处理;2016 年施加生物炭后各处理产量和水分利用

效率较 C0 处理的增幅分别为 7.1% ~ 33.3%、9.8% ~ 27.6%,均为 C50 处理达到最优;2017 年 C50 处理增产率最大,为 24.1%,而 C100 处理产量略高于对照处理,无明显差异($P > 0.05$)。对比 3 年试验结果可知,以 2016 年 C50 处理增产率最高,2016、2017 年最优处理的增产率相比 2015 年提高了 11.5%、2.3%,C75、C100 处理的产量与 2015 年相比呈降低趋势,而 C25、C50 处理对应的产量呈增

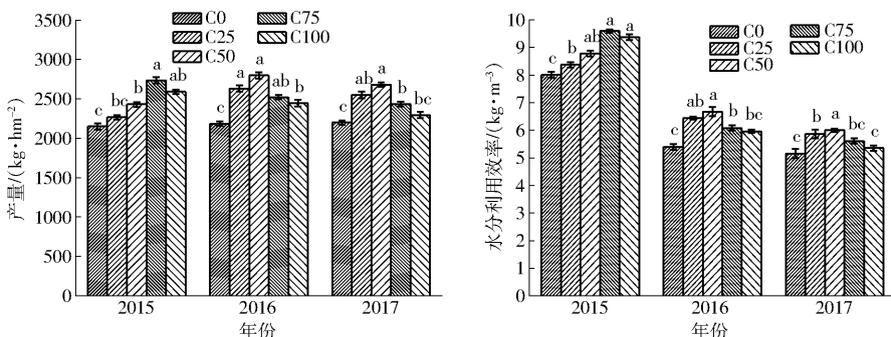


图 3 2015—2017 年大豆产量和水分利用效率变化

Fig. 3 Changes in soybean production and WUE in 2015—2017

加趋势,说明施炭量过高或使用年限过长均会导致大豆增产幅度降低。

2.4 土地生产力综合评价

2.4.1 评价指标及其权重

土壤理化性质、水土保持效应、节水增产效应均为土地生产力的重要体现,因此选取这些指标为一级指标,各一级指标下又选取若干指标作为二级指标,构建评价指标体系,如表1所示。改进的TOPSIS采用熵权法和变异系数法加权平均确定各指标的权重,权重系数如表2所示。

表1 评价指标体系

Tab.1 Evaluation system

目的	一级指标	二级指标
土地生产力评价	土壤理化性质	容重 X_1
		pH值 X_2
		田间持水率 X_3
		有机碳密度 X_4
	水土保持效应	年土壤侵蚀量 X_5
		年径流量 X_6
	节水增产效应	产量 X_7
		水分利用效率 X_8

表2 各评价指标权重系数

Tab.2 Weight coefficient of each evaluation index

方法	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
加权平均法	0.128	0.127	0.095	0.107	0.110	0.128	0.147	0.158

2.4.2 综合评价分析

评价模型计算的土地生产力指数如图4所示。由图4可知,在不同施炭量和施用年限条件下,2015年以生物炭施加量75 t/hm²最优,与正理想解的距离最近,与负理想解的距离最远,当施炭量大于75 t/hm²时土地生产力指数开始减小。2016、2017年施加生物炭的各处理在综合评价中均呈正向贡献,以生物炭施加量50 t/hm²最优,最接近理想解,之后随着施炭量的增加,土地生产力指数减小。另一方面,2015年生产力指数的增长速率随施炭量的增加由慢到快;在施炭量大于75 t/hm²时,土地生产力指数缓慢降低。2016、2017年施炭量高于50 t/hm²时,2017年生产力指数下降速率较2016年快。对比3年分析,以连续施加2年50 t/hm²的生物炭土地生产力指数最大,其次是施加1年75 t/hm²的生物炭。

3 讨论

生物炭疏松多孔,具有较强的吸附能力,施入土壤后可改善土壤结构和提高土壤持水能力^[22]。本试验结果显示,逐年施加生物炭,土壤容重随生物炭

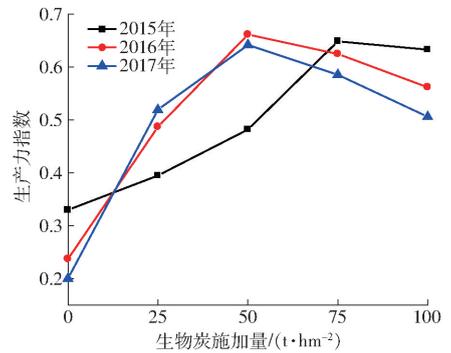


图4 2015—2017年土地生产力指数

Fig.4 Soil productivity index in 2015—2017

施加量的增加呈下降趋势,而有机碳密度、土壤pH值呈上升趋势,且施用年限越久作用越强烈,这与李明等^[23]、魏永霞等^[24]的结论一致,但与聂新星等^[25]认为的对pH值无显著影响这个结论不同,这是因为土壤种类和生物炭施加量的不同;在生物炭提高土壤的持水性能方面,王丹丹等^[26]认为土壤的持水性能与生物炭施加量呈正相关;DUGAN等^[27]的研究结果发现,生物炭可以提高土壤的持水能力,但最优施加量没有明确提出;在本研究中,施加1年生物炭田间持水率随着生物炭的增加呈线性递增趋势,而连续施加2年、3年的田间持水率变化趋势呈先增后减的抛物线变化,最优施炭量处理均为C50。产生这种现象的原因是生物炭质轻多孔,比表面积大,将其施用于土壤中,能够增加土壤的孔隙度,进而提高土壤的持水能力,但这种能力是有限度的,施炭量过高反而会减弱这种能力。

多数学者认为施加生物炭可以有效地减少径流量,但在生物炭施加量和施用年限上,说法尚不一致。吴媛媛等^[28]通过1年室内模拟降雨发现,1%的生物炭可以减少产量和土壤侵蚀,而7%的生物炭显著地增加了土壤的可蚀性;刘祥宏^[29]经过18个月室内人工模拟降雨,发现低量的生物炭可以减少径流;在本研究中,通过3年对3°坡耕地施加生物炭,施加生物炭的各处理均可以减小年径流量和年土壤侵蚀量,其中最优化处理分别为C75、C50、C50,较同年C0处理降低了15.4%、17.2%、15.7%,且在第2年C50处理生物炭对泥沙控制效果和减流效果最优,造成该规律的原因是生物炭本身具有持水性和吸附结构,提高了土壤的持水能力,所以减少了径流量和土壤侵蚀,但是生物炭施加过多后改变了土壤结构,使土壤容重降低,孔隙度增加,土壤的抗冲刷能力减弱,部分炭土化合物会随着雨水冲走,促进径流的形成,造成侵蚀量的增加。另一方面,累积施炭量过高后,土壤结构退化严重,造成减流效果减弱、侵蚀程度增加。土壤侵蚀性受空

间变化、人类活动和其他不可控制因素等影响,对于生物炭长期对泥沙控制的影响还需要进一步探讨。

关于生物炭的节水增产效果及其起效时间的研究仍存在许多说法。勾芒芒等^[30]研究表明,施加生物炭处理产量明显高于未施加生物炭处理的产量,且在 CK、C10、C20、C40、C60 这 5 组处理中 C40 处理产量提高最大;房彬等^[31]认为冬小麦的产量和水分利用效率与生物炭使用水平呈正相关;JONES 等^[32]连续 2 年施加生物炭对产量没有显著影响,却显著增加了第 3 年的产量;在本研究中,施加生物炭可以提高产量和水分利用效率,以连续施加 2 年 50 t/hm²的生物炭增产效果最优,与同年 C0 处理相比增产率高达 33.3%,其次是施加 1 年 75 t/hm²的生物炭。这可能是因为适量的生物炭可以提高大豆的保水性能和有机质含量,使作物生长达到最优平衡,而过高的施炭量打破了这种平衡,导致增产效果和节水效果减弱。另一方面,累积施炭量使土壤 pH 值过高的同时,还会使作物缺铁失绿,生长不良,甚至死亡,导致产量降低。

在本研究中,利用熵权法和差异系数法加权平均计算权重对传统的 TOPSIS 模型进行改进,使评价结果具有完全客观性的同时,也使计算变得简单。理论上,生产力指数与生物炭施加量应为 Logistic 曲线,当施炭量较低时,生产力指数取决于土壤条件,生产力指数缓慢增长;随着施炭量的增加,改善了土壤结构,生产力指数迅速增长;当施炭量过高时,土壤结构不再适合作物生长,生产力指数缓慢升高。当连续施加 2 年以上时,随着施用年限的增加,土壤中累积施炭量增加,生产力指数迅速增加,累积施炭量增加到一定程度后,生产力指数缓慢增加并达到临界最大值,当土壤累积施炭量过高时,生产力指数迅速下降,且随着年限的增加下降速率越大。改进的 TOPSIS 模型能清晰、准确地描述这种变化过程,第 1 年施加 100 t/hm²,生产力指数缓慢下降,这可

能是因为生物炭施加量过高,土壤 pH 值、有机碳密度过大,导致作物生长发育受到影响,产量降低。基于改进的 TOPSIS 模型总结出适用于黑土区的生物炭施用模式,即连续施加 2 年 50 t/hm²的生物炭对土地生产力的提升最大,各项指标均达到相对理想值,其次是施加 1 年 75 t/hm²的生物炭,施加的第 2 年为施加最优年。为此,本研究建议生物炭的施用年限为 1~2 年,不建议 2 年以上施用。另外,对于生物炭对其他指标的响应关系及生物炭对各指标产生的后效应还有待进一步探究。

4 结论

(1)有机碳密度、土壤 pH 值均随生物炭施加量的增加而呈上升趋势,而土壤容重呈下降趋势,且施加年限越长作用越明显,施加 1 年田间持水率随生物炭施加量的增加而上升,连续施加 2 年、3 年的生物炭,在生物炭施加量 50 t/hm²时达到最大,2 年分别较 C0 处理提高 9.95%、8.34%。

(2)施加生物炭可以有效地减小 3°坡耕地的径流和土壤侵蚀。施加 1 年以 75 t/hm²的生物炭对减流效果和抗土壤侵蚀效果影响最优,较 C0 处理减小了 15.4%、1.7%。连续施加 2 年、3 年以 50 t/hm²的生物炭效果最佳,年径流量较 C0 处理减少了 17.2%、15.7%,年土壤侵蚀量较 C0 处理减小了 2.7%、2.3%。

(3)施加生物炭可以提高大豆产量和水分利用效率。施加 1 年以 75 t/hm²的生物炭最优,较对照处理增产 21.8%、水分利用效率提高 25.3%;连续施加 2 年、3 年以 50 t/hm²的生物炭最好,增产率为 33.3%、24.1%,水分利用效率提高率为 27.6%、19.8%。

(4)在不同施炭量和施用年限条件下,改进的 TOPSIS 模型计算的土壤生产力指数符合土地生产力变化规律,并基于该模型总结出建议的生物炭施用模式,可为黑土区施加生物炭提供参考。

参 考 文 献

- 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)
- 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].农业工程学报,2014,30(20):288-296.
LIU Hui, WEI Yongxia. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20):288-296. (in Chinese)
- 杨爱峥,魏永霞,张忠学,等.坡耕地综合治理技术模式的蓄水保土及增产效应[J].农业工程学报,2011,27(11):222-226.
YANG Aizheng, WEI Yongxia, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of technology modes for sloping farm-land comprehensive control on soil water conservation and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):222-226. (in Chinese)
- 勾芒芒,屈忠义.土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1348-1352.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. Ecology and

- Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1348–1352. (in Chinese)
- 5 LEHMANN J, RILLING M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—a review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(9): 1812–1836.
- 6 PICCOLO A, MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Annals of Laboratory Medicine, 2014, 34(6): 426–432.
- 7 BASSO A S, MIGUEZ F E, LAIRD D A, et al. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5(2): 132–143.
- 8 BAKRY B A, IBRAHIM O M, EID A R, et al. Effect of humic acid, mycorrhiza inoculation, and biochar on yield and water use efficiency of flax under newly reclaimed sandy soil[J]. Agricultural Sciences, 2014, 5(14): 1427–1432.
- 9 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 119–124.
- LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 119–124. (in Chinese)
- 10 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. 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.
- WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of biochar's two consecutive years supply on soil improvement and water saving & 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. (in Chinese)
- 11 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 不同施肥模式对旱地土壤氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 209–213.
- GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Effects of different fertilization modes on soil nitrogen runoff in dryland field[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 209–213. (in Chinese)
- 12 吴媛媛. 添加生物炭对坡面土壤侵蚀的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- WU Yuanyuan. Effect of biochar application on soil erosion of loess slopes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- 13 于亚莉, 史东梅, 蒋平. 不同土壤管理措施对坡耕地土壤氮磷养分流失的控制效应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 30–36, 42.
- YU Yali, SHI Dongmei, JIANG Ping. Effect of different soil management measures on controlling soil nitrogen and phosphorus loss from slop farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 30–36, 42. (in Chinese)
- 14 ZWIETEN L V, ROSE T, HERRIDGE D, et al. Enhanced biological N₂ fixation and yield of faba bean (*Vicia faba*, L.) in an acid soil following biochar addition: dissection of causal mechanisms[J]. Plant and Soil, 2015, 395(1–2): 7–20.
- 15 刘鑫. 不同水肥管理措施对旱地小麦产量与水分利用效率的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LIU Xin. Effect of water and fertilizer management pattern on production and water use efficiency of dryland wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 16 VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1–2): 235–246.
- 17 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569–1574.
- ZHANG Na, LI Jia, LIU Xuehuan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1569–1574. (in Chinese)
- 18 雷勋平, ROBIN Q, 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, ROBIN Q, 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)
- 19 梁昌勇, 戚筱雯, 丁勇, 等. 一种基于 TOPSIS 的混合型多属性群决策方法[J]. 中国管理科学, 2012, 20(4): 109–117.
- LIANG Changyong, QI Ziwen, DING Yong, et al. A hybrid multi-criteria group decision making with TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(4): 109–117. (in Chinese)
- 20 付巧峰. 关于 TOPSIS 法的研究[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(1): 190–193.
- FU Qiaofeng. Study on TOPSIS method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(1): 190–193. (in Chinese)
- 21 陈亮亮, 马亮, 赵经华. 变异系数权重 TOPSIS 法在节水灌溉方案评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 95–96.
- CHEN Liangliang, MA Liang, ZHAO Jinghua. Application of TOPSIS method by variation coefficient weight to water-saving irrigation schemes[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(1): 95–96. (in Chinese)
- 22 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031.

- 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. (in Chinese)
- 23 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47 (11): 172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161123&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023.
- LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological carbon on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (11): 172 - 178. (in Chinese)
- 24 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. 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.
- WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of the biochar on physical properties of the meadow black soil and dynamic changes of soil water after the individual rainfall [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (8): 201 - 207. (in Chinese)
- 25 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)
- 26 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)
- 27 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.
- 28 吴媛媛, 杨明义, 张凤宝, 等. 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 81 - 92.
- WU Yuanyuan, YANG Mingyi, ZHANG Fengbao, et al. Effect of biochar application on erodibility of plow layer soil on loess slopes [J]. Journal of Soil, 2016, 53 (1): 81 - 92. (in Chinese)
- 29 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)
- 30 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?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. 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)
- 31 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. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (8): 1292 - 1297. (in Chinese)
- 32 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.