

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.031

黑土区坡耕地连年施加生物炭的最佳模式研究

魏永霞^{1,2} 冯超¹ 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. 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. 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: 为探讨东北黑土区连续多年施加生物炭的应用效果及其综合影响,寻找最佳的施碳量以及施加年限,于2015年在位于黑龙江省北安市的红星农场开展了生物炭最佳施用模式的研究。按照生物炭的施加量设置Y0(0 t/hm²)、Y25(25 t/hm²)、Y50(50 t/hm²)、Y75(75 t/hm²)、Y100(100 t/hm²)5个处理,每个处理重复两次,连续施加4年(2015—2018年),对土壤理化性质、水土保持效应以及节水增产效应等指标进行观测,建立基于优化遗传算法的投影模型,对指标进行了综合评价。结果表明:随着生物炭施加量、施加年限的增加,土壤容重呈现降低趋势,土壤pH值、土壤碳氮比则呈现上升趋势,且生物炭的累积施加量越大,这种趋势就越明显。Y25、Y50处理下的田间持水率随着施加年限的增加呈现逐年升高趋势,Y75处理则呈现出先升高、后降低的趋势,Y100处理则呈现逐年下降趋势,其中2018年Y25处理下的田间持水率为37.33%。径流系数与土壤侵蚀量均与施炭量呈现先降低、后升高的趋势,连续施加两年50 t/hm²生物炭的径流减少效果与抗侵蚀效果最优。连续施加4年25 t/hm²生物炭的玉米产量在所有处理中最高,为10 350 kg/hm²。水分利用效率(WUE)的最优处理为2015年的Y50,为32.85 kg/(mm·hm²)。通过综合评价模型得出,连续3年施加32.63 t/hm²生物炭为东北黑土区最佳生物炭施用模式。该研究结果可为生物炭对黑土区土壤改良提供理论依据。

关键词: 生物炭; 土壤性质; 水土保持; 优化遗传算法; 投影寻踪模型; 综合评价
中图分类号: S157.2; S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0269-09

Optimal Application Mode of Biochar in Sloping Farmland of Black Soil Area

WEI Yongxia^{1,2} FENG Chao¹ 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 Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, 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: Aiming to explore the application effect and comprehensive effects of adding biochar for many years in the black soil region of Northeast China, find the best carbon application amount and application period, and provide scientific theoretical guidance for the efficient use of black soil resources and the sustainable development of water resources. In 2015, the research on the best application mode of biochar was carried out at Hongxing Farm in Bei'an City, Heilongjiang Province. Five treatments, including Y0 (0 t/hm²), Y25 (25 t/hm²), Y50 (50 t/hm²), Y75 (75 t/hm²) and Y100 (100 t/hm²) were set according to the amount of biochar applied, and each treatment was repeated twice, and continuous application for four years (2015—2018), indicators of soil physical and chemical properties, soil and water conservation effects, and water-saving yield increase were observed. A projection model

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-04-15
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)、黑龙江省博士后面资助经费项目(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,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

optimized by genetic algorithm was established to comprehensively evaluate the index. The results showed that with the increase of biochar application and application time, the soil bulk density showed a decreasing trend, soil pH and soil C/N showed an upward trend, and the larger the cumulative amount of biochar applied was, the more obvious the trend was. The field water holding capacity under the treatment of Y25 and Y50 showed an increasing trend with the increase of the application period. The Y75 treatment showed a trend of increasing first and then decreasing. The field water holding capacity under Y100 treatment showed a downward trend year by year, and the field water holding capacity under Y25 treatment in 2018 was 37.33%, the runoff coefficient and soil erosion amount were both decreased first and then increased. The effect of 50 t/hm² biochar on reducing runoff and resisting erosion were the best. The yield of corn with 25 t/hm² biochar applied continuously for four years was the highest in all treatments, which was 10 350 kg/hm². Through the comprehensive evaluation model, the best biochar application mode of 32.63 t/hm² biochar applied to the northeast black soil area was obtained for three consecutive years. The results of this study can provide a theoretical basis for biochar to improve soil in black soil areas.

Key words: biochar; soil properties; soil and water conservation; optimized genetic algorithm; projection pursuit model; comprehensive evaluation

0 引言

东北部黑土区是我国粮食主要生产地,对保障粮食安全具有十分重要的意义^[1],玉米是该区域的重要经济作物。长期以来,由于对黑土资源的高强度利用、缺少合理的管理模式,以及所处地区雨期集中、水土流失严重,导致东北黑土区在玉米连年丰收的背后潜伏着巨大的危机,主要表现在土壤养分库容偏低、黑土耕层变薄、土壤酸化、土地生产力下降,以及秸秆焚烧造成环境污染等。因此,土壤质量的改善、水土资源的保护,以及秸秆资源的有效利用等是东北黑土区持续发展的关键^[2-3]。

生物炭是由作物秸秆在无氧条件下,经过高温热解产生的一种稳定的、含有大量碳元素的固体^[4]。由于生物炭具有疏松多孔、比表面积大、有机碳含量高等特点,因而在解决上述问题时做出了突出贡献,受到了国内外学者的广泛关注。多数研究表明,生物炭在土壤改良、水土保持以及节水增产等方面具有显著效果,如降低土壤容重^[5]、增加土壤孔隙度从而提高土壤的保水性^[6]、提高土壤有机碳含量以增加土壤碳氮比^[7-8]、提高土壤抗酸化能力^[9-11]、减少径流量和土壤侵蚀^[12-14]、提高作物的水分利用效率和产量^[15]等。也有研究表明,生物炭可能会产生负效应:如叶丽丽等^[16]通过试验发现,向红壤中添加生物炭,导致土壤中团聚体的稳定性降低,破坏了土壤结构;ASAI 等^[17]田间试验也发现,施加 4 t/hm² 的生物炭,使水稻的产量降低了 23.3%。这说明受土壤类型、制备生物炭的材料和作物品种等因素的影响,生物炭对土地及作物产生的影响是一个长期复杂的过程^[14]。但目前对生物炭的研究以短期居多,缺乏对生物炭长期效应的探

讨,同时生物炭对土地及作物的多项指标均有影响,有的会产生负效应,有的会产生正效应,综合影响评价的研究较少。

为此,本研究以黑土区坡耕地为研究对象,选择黑土区主要粮食作物玉米为供试作物,通过连续 4 年施加生物炭,探讨长期施加生物炭后土壤理化性质、水土流失以及作物产量等指标的年际变化规律。采用基于优化遗传算法的投影寻踪模型,对不同的生物炭施用模式进行综合评价,探索黑土区坡耕地最佳生物炭施加量和施加年限,为黑土资源的高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 5 月—2018 年 10 月在黑龙江省农垦北安管理局红星农场试验基地(48°2′~48°17′N, 126°47′~127°15′E)进行,试验小区位于小兴安岭西麓向松嫩平原的过渡丘陵漫岗地区,地势自东向西倾斜,坡面较长,坡度 3°~5°。属中温带湿润大陆性季风气候,大于等于 10℃ 的有效积温为 2 254.5℃,日照时数为 2 364.2 h,无霜期 105 d 左右。多年平均降雨量为 553 mm,且全年近 90% 的降雨量集中在 7—9 月。土壤为草甸黑土,质地松散,但近些年黑土层厚度逐渐变薄,水土流失加剧,土地生产力下降。本区主要作物为大豆、玉米和水稻。

1.2 供试材料

供试土壤为草甸黑土,其基本性质为:总有机碳质量比 34.83 g/kg,全氮质量比 1.11 g/kg,全钾质量比 0.45 g/kg,全磷质量比 0.35 g/kg,pH 值 6.3,容重 1.15 g/cm³。供试玉米品种为德美亚 1 号,在

出苗期选择长势基本相近且无病虫害的植株作为试验作物。试验所用生物炭的原材料为玉米秸秆,购自辽宁金和福农业开发有限公司,制备方式是使玉米秸秆在无氧条件下用 400 ~ 500℃ 高温进行裂解,其理化性质为:总有机碳质量比 70.21 g/kg,全氮质量比 13.97 g/kg,全钾质量比 2.24 g/kg,全磷质量比 34.55 g/kg,pH 值 9.14。

1.3 试验设计

试验在位于黑龙江省北安市红星农场的径流小区内进行,小区坡度为黑土区坡耕地代表性坡度 3°,规格为 20 m × 5 m,10 个径流小区平行铺设。各小区末端设径流自动记录系统,径流经记录及取样后流入小区底端的排水沟。为防止测渗,各小区边界用埋入地下 1 m 深的铁板隔开,每个小区设置 1 m 间隔。试验按照生物炭施加量不同设置 5 个处理:Y0(对照处理)、Y25 (25 t/hm²)、Y50 (50 t/hm²)、Y75 (75 t/hm²)、Y100 (100 t/hm²),每个处理两次重复。分别于 2015—2018 年玉米播种前,将生物炭与 0 ~ 20 cm 耕层土壤充分混合,起垄静置 7 d。试验开始于 2015 年 5 月,结束于 2018 年 10 月。小区作物施肥、耕作的管理方案均与当地农户相同。

1.4 观测指标及处理方法

1.4.1 土壤理化性质

土壤容重采用环刀法进行测定;田间持水率采用室内威尔科克斯环刀法测定;土壤 pH 值采用电位法测量;总有机碳含量利用德国 Elementar Vario TOC 分析仪测定;全氮采用半微量凯氏定氮法进行测定;土壤中的总有机碳与全氮含量的比值为土壤碳氮比。

1.4.2 径流量及土壤侵蚀量

径流量:每次降雨产流后,通过安装在小区末端的翻斗式流量计自动记录翻斗往复时间,并通过比例系数和翻斗容积计算各小区的产流量和全生育期的总产流量。

土壤侵蚀量:在每次降雨产流后,每 5 min 取一次泥沙收集装置中水样,将水样静置 24 h,漂去上层清水,用滤纸滤出泥沙,干燥 8 h 称量,由各次产沙量计算年土壤侵蚀量。

1.4.3 产量

分别于 2015 年 10 月 8 日、2016 年 10 月 7 日、2017 年 10 月 4 日和 2018 年 10 月 4 日对玉米进行收获。每个径流小区分别在坡上、坡中和坡下相应位置选取 3 个 10 m²的地块,并对所选地块进行实收测产,计算玉米的总产量。

1.5 施用模式的评价方法

投影寻踪 (Projection-pursuit) 模型是一种直接

由样本数据驱动的数据分析方法。它通过把高维数据投影到低维子空间,寻找能够反映原高维数据结构或特征的投影,进而达到研究分析高维数据的目的。详细过程见文献[18],主要过程如下:

(1) 指标归一化

假设评价样本集为 {x(i,j) | i = 1, 2, ..., n; j = 1, 2, ..., p}, 其中 x(i,j) 为第 i 个样本第 j 个指标值,n、p 分别代表样本数量和指标个数。为了将各指标值无量纲化,归一化处理公式分别为:

越大越优指标

$$x^*(i,j) = \frac{x(i,j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \tag{1}$$

越小越优指标

$$x^*(i,j) = \frac{x_{\max}(j) - x(i,j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \tag{2}$$

区间最优指标

$$x^*(i,j) = \begin{cases} 1 - \frac{S_1 - x^*(i,j)}{\max(S_1 - x_{\min}(j), x_{\max}(j) - x^*(i,j))} & (x^*(i,j) < S_1) \\ 1 & (S_1 \leq x^*(i,j) \leq S_2) \\ 1 - \frac{x^*(i,j) - S_2}{\max(S_1 - x_{\min}(j), x_{\max}(j) - x^*(i,j))} & (x^*(i,j) > S_2) \end{cases} \tag{3}$$

式中 x_{min}(j)、x_{max}(j)——第 j 个评价指标中的最小值和最大值

S₁、S₂——第 j 个指标的最优区间下限和上限值

(2) 构造投影指标函数 Q(a)

以 a = {a(1), a(2), ..., a(p)} 作为投影方向,将归一化处理的数据 x*(i,j) 投影到一维空间形成投影值 Z(i), 公式为

$$Z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x^*(i,j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

投影指标函数可以表示为

$$Q(a) = S(z)D(z) \tag{5}$$

$$\text{其中 } D(z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r(i,j))\mu(R - r(i,j)) \tag{6}$$

式中 S(z)——投影值 Z(i) 的标准差

D(z)——群内密度

其中,R 的局部半径密度的窗口半径通常取 max(r(i,j))/5 ≤ R ≤ max(r(i,j))/3 为标准;r(i,j) 表示样本之间的距离,r(i,j) = |Z(i) - Z(k)|, μ(R - r(i,j)) 为单位阶跃函数,当 R > r(i,j) 时 μ(R - r(i,j)) = 1, 否则 μ(R - r(i,j)) = 0。

1.6 数据处理方法

各项指标均采用平均值,应用 Microsoft Excel

2010、Matlab R2016a 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 连续施加生物炭对土壤理化性质的影响

如图 1a 所示,连续施加 4 年生物炭始终使土壤容重呈现逐年降低的趋势,且 2018 年的 Y100 处理的土壤容重与同年 Y0 处理相比降低 15%,差异显著($P<0.05$),相同处理的年际变化关系显示,Y25 处理的容重以平均每年下降 1.7% 的速率逐年降低;Y50 处理的容重降低速率呈现先增加后降低的趋势;Y75 和 Y100 处理的土壤容重在 2015—2017 年下降迅速,相较于当年的对照组最多降低了 8.11% 和 7.34%,在 2018 年虽然容重也有降低但基本趋于平稳,相较于 2017 年仅降低了 0.99% 和 0.98%。

从图 1b 可以看出,在 2015 年的试验中,各处理的田间持水率随着施加生物炭数量的升高而增加,且与对照组相比分别增加了 4%、6%、8.42% 和 12%,差异达到显著水平($P<0.05$);2016 年的持续施加结果显示,除 Y100 以外的其他处理的田间持水率均呈现升高趋势,且相较于 2015 的各处理分别增加了 0.87%、6.27%、1.67%,而在 2017—2018 年的累积施加后,仅有 Y25 和 Y50 处理的田间持水率依然呈现增加的趋势,且 2018 年各处理的田间持水率相较于 2016 年分别增加了 12.58% 和 2.1%,其他处理的田间持水率则呈现下降趋势,相较于 2016 年的处理结果分别下降了 3.4% 和 11.96%,且 2018 年 Y100 处理的田间持水率相较对照组降低了 7%,对该项指标表现出了抑制效果。从累积施炭量的角

度来看,2018 年 Y25 处理和 2016 年 Y50 处理生物炭的累积施入量均与 2015 年 Y100 处理相同,但是对于提高土壤持水能力的效果 2018 年 Y25 处理明显要优于其他两个处理,分别提高了 3.88% 和 4.6%。

从图 1c 可见,随着生物炭的施加,土壤中的碳氮比整体均呈现上升的趋势,差异显著($P<0.05$),其中 2018 年 Y100 处理土壤中的碳氮比达到了所有处理中的最高值,且相较对照处理提高了 206%。但从 4 年各处理碳氮比的变化速率来看,Y100 和 Y75 处理下的变化速率呈现先升高后降低的趋势,而 Y50 和 Y25 处理下的变化速率则呈现出缓慢升高的趋势。

由于所用的秸秆生物炭的 pH 值略高于供试土壤,故土壤的 pH 值也随着生物炭的加入而逐渐升高,差异达到显著水平($P<0.05$),最高可使 pH 值提高 1.7,从相同处理的年际变化上看,各处理下的土壤 pH 值始终高于同处理前一年的土壤 pH 值。从同一年的不同处理角度出发,高生物炭施加量处理下的土壤 pH 值始终高于低生物炭施加量,并且,4 年中土壤 pH 值始终在 Y100 处理达到最大值,与当年的对照组分别提升了 18%、21%、23%、25%。

2.2 连续施加生物炭对水土流失的影响

根据 4 年的实测数据可以看出,连续施加生物炭对于各年径流系数的影响趋势为短期效果 Y100、Y75 处理要优于 Y50、Y25 处理,而从长期效果来看,Y25、Y50 处理要优于 Y75 和 Y100 处理。从图 2 可以看出,2015 年加入生物炭的处理使径流明显减少,减流效果最好的为 Y75 处理,减少了 15.45%,该年其他处理减流效果由大到小依次为 Y100、Y50、

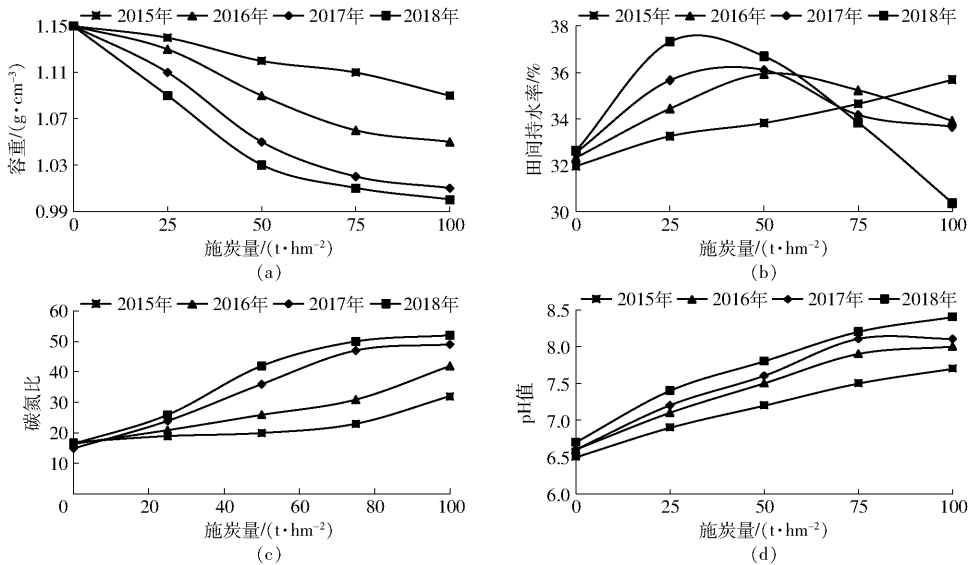


图 1 2015—2018 年土壤理化性质变化曲线

Fig. 1 Physical and chemical properties of soil from 2015 to 2018

Y25,分别减少了 14.65%、12.04%、6.96%;2016 年 Y25 和 Y50 处理相较于上一年相同处理的减流效果均呈现增加趋势,相较于 2015 年径流分别减少了 8.84% 和 5.22%,其中效果最为明显的 Y50 处理相较对照组可使径流减少 17.3%,而 Y75 和 Y100 处理的减流效果与上一年的相同处理减少了 0.22% 和 1.12%。2017 各处理中减流效果最好的是 Y50,减少了 10.72%,其余各处理相较于对照组的径流系数分别为 Y25 减少了 9.46%,Y75 减少了 6.11%,Y100 减少了 6.48%。2017 年各处理的减流效果相较于 2016 年呈现减低趋势,减少了 6.34%~9.11%。2018 年各处理减流能力由大到小依次为 Y25、Y50、Y75、Y0、Y100,相较于对照处理最高可使径流系数降低 12.9%,2018 年 Y50、Y75、Y100 处理的减流效果相比于 2017 年均呈降低趋势,其中 2018 年的 Y100 处理相较于对照处理径流系数增加了 1.01%,对减少径流有不利的影响。

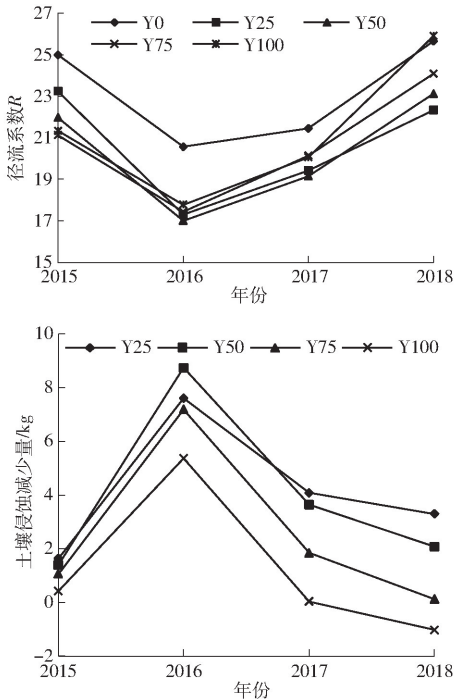


图 2 2015—2018 年径流系数和土壤侵蚀减少量
Fig. 2 Runoff coefficient and soil erosion reduction from 2015 to 2018

由于土壤的侵蚀量很大程度上受到当年降雨量的影响,所以很难通过直接比较相同处理不同年的侵蚀量来确定生物炭对减少侵蚀量的影响。故这里用各处理相较于对照组的减少量来进行比较,从而消除每年降雨量不同所造成的影响。即数值越大说明减少侵蚀效果越明显,反之,则说明减少侵蚀效果不明显,如果这个数值为负则说明该处理不仅不会减少侵蚀量甚至会增加侵蚀量。由图 2 可以看出,随着生物炭的逐年施加,土壤侵蚀的减少量呈现先

升高后降低的趋势。具体为 2015 年,施加生物炭的处理可以使土壤侵蚀量减少 0.02~1.23 kg,其中减少量最高的为 Y25 处理。2016 年各处理土壤侵蚀量均有明显降低,且减少量由大到小为 Y50、Y25、Y75、Y100,其中效果最好的 Y50 处理可以使土壤侵蚀量减少 8.33 kg。2017 年加入生物炭的处理减少的土壤侵蚀量分别为 3.67、3.23、1.44、-0.36 kg,相较于 2016 年的效果有明显的降低,其中 Y100 处理土壤侵蚀更加严重。2018 年施加生物炭后的观测结果与 2017 年基本一致,土壤侵蚀量逐渐增加,此外,2018 年的 Y75 处理土壤侵蚀量增加了 0.28 kg,同样出现了土壤侵蚀更加严重的情况。

2.3 连续施加生物炭对玉米产量及水分利用效率的影响

表 1 为连续 4 年施加生物炭玉米水分利用效率 (WUE)、产量和增产率的变化情况。连续 4 年产量随施炭量的增加呈先升高后降低的趋势,最优处理分别为 Y50、Y50、Y25、Y25,其中产量最高的处理为 2018 年的 Y25 处理,相较同年对照处理增加了 1 250 kg/hm²。增产率最高的为 2015 年的 Y50 处理,相较当年对照处理提高了 14.12%。从相同处理的年际变化角度分析,Y25 处理下的产量由 2015 年的 9 400 kg/hm² 逐渐增加到 2018 年的 10 350 kg/hm²,

表 1 2015—2018 年玉米 WUE、产量和增产率
Tab. 1 Changes in corn's WUE, production and yield increase rate from 2015 to 2018

年份	处理	WUE/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	增产率/ %
2015	Y0	27.94 ^a	(8 500 ± 200) ^a	
	Y25	31.32 ^b	(9 400 ± 67) ^b	10.60
	Y50	32.85 ^c	(9 700 ± 100) ^c	14.12
	Y75	32.25 ^b	(9 600 ± 133) ^b	12.94
	Y100	30.86 ^b	(9 200 ± 50) ^b	8.24
2016	Y0	22.92 ^a	(9 200 ± 150) ^a	
	Y25	25.51 ^b	(10 200 ± 250) ^{bc}	10.87
	Y50	25.86 ^{bc}	(10 300 ± 150) ^{bc}	11.96
	Y75	25.34 ^{bc}	(10 150 ± 150) ^{bc}	10.33
	Y100	23.67 ^a	(9 500 ± 166) ^a	3.26
2017	Y0	22.33 ^a	(9 000 ± 200) ^a	
	Y25	25.75 ^b	(10 250 ± 225) ^b	13.89
	Y50	25.35 ^b	(10 150 ± 350) ^b	12.78
	Y75	23.77 ^a	(9 600 ± 166) ^a	6.67
	Y100	22.56 ^a	(9 200 ± 450) ^a	2.22
2018	Y0	23.67 ^b	(9 100 ± 200) ^a	
	Y25	26.11 ^b	(10 350 ± 150) ^b	13.74
	Y50	25.57 ^b	(10 225 ± 225) ^b	12.36
	Y75	24.49 ^a	(9 850 ± 166) ^a	8.24
	Y100	22.70 ^a	(9 000 ± 200) ^a	-1.10

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

增产率为 10.1%。Y50 处理下的增产率在 2015 年达到了最高的 14.12%,2015—2018 年呈现先降低后升高的趋势,2017 年和 2018 年的增产率基本稳定在了 12.5% 左右。Y75 处理下增产率的变化趋势与 Y50 处理基本相同,2015 年的增产率为 12.94%,为 4 年中的最高,在 2017 年降低到 4 年最低的 6.67%,在 2018 年增长到 8.24%。Y100 处理的增产率 2015—2018 年呈现出逐年下降的趋势,从 2015 年的 8.24% 逐年降低到 2018 年的 -1.1%,对玉米的增量产生了抑制的效果。WUE 变化规律与产量变化规律基本一致,2015—2018 年的处理中,WUE 最高的分别为 Y50、Y50、Y25、Y25,分别为 32.85、25.86、25.75、26.11 kg/(mm·hm²),相较于

对照组分别增加了 17.57%、12.83%、15.32%、10.31%,并且在 2018 年 Y100 处理下作物的 WUE 相较于同年的对照组降低了 4.1%。

2.4 生物炭最佳施用模式的综合评价

为了能够尽可能完整地反映出生物炭在该地区连续施加 4 年所产生的效果,进而提出最佳施用模式,需要从土壤改良、水土保持和节水增产等 3 个方面进行评价指标的筛选,从而使评价指标更加全面、科学、合理。选取 8 项指标对不同生物炭施用模式的应用效果进行综合评价,结果见表 2。

为避免评价指标间量纲的影响,采用式(1)~(3)对指标进行归一化处理,求出最佳投影方向,见表 3。

表 2 评价指标平均值
Tab.2 Average values of evaluation index

年份	处理	容重/(g·cm ⁻³)	田间持水率/%	pH 值	碳氮比	径流系数	年产沙量/kg	产量/(kg·hm ⁻²)	WUE/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
2015	Y0	1.15	31.96	6.5	17.0	24.99	42.20	8 500	27.94
	Y25	1.14	33.25	6.9	19.0	23.25	41.68	9 400	31.32
	Y50	1.12	33.82	7.2	20.0	21.98	41.78	9 700	32.85
	Y75	1.11	34.65	7.5	23.0	21.13	41.92	9 600	32.25
	Y100	1.09	35.69	7.7	32.0	21.33	42.28	9 200	30.86
2016	Y0	1.15	32.33	6.8	16.5	20.56	45.96	9 200	22.92
	Y25	1.13	33.16	7.1	21.0	17.31	42.65	10 200	25.51
	Y50	1.09	35.94	7.5	26.0	17.01	42.13	10 300	25.86
	Y75	1.06	35.23	7.9	31.0	17.43	42.84	10 150	25.34
	Y100	1.05	33.91	8.0	42.0	17.78	43.68	9 500	23.67
2017	Y0	1.15	32.54	6.6	15.0	21.45	52.25	9 000	22.33
	Y25	1.11	35.66	7.2	24.0	19.42	50.33	10 250	25.75
	Y50	1.05	36.10	7.6	36.0	19.15	50.56	10 150	25.35
	Y75	1.02	34.12	8.1	47.0	20.14	51.50	9 600	23.77
	Y100	1.01	33.65	8.1	49.0	20.06	52.44	9 200	22.56
2018	Y0	1.15	32.62	6.7	16.0	25.65	57.96	9 100	23.67
	Y25	1.09	37.33	7.4	26.0	22.34	53.28	10 350	26.11
	Y50	1.03	36.69	7.8	42.0	23.12	53.99	10 225	25.57
	Y75	1.01	33.83	8.2	50.0	24.09	58.12	9 850	24.49
	Y100	1.00	30.37	8.4	52.0	25.91	58.79	9 000	22.70

表 3 评价指标最佳投影方向
Tab.3 Best projection direction of evaluation index

指标	容重	田间持水率	pH 值	碳氮比	径流系数	年产沙量	产量	水分利用效率
投影方向	0.070 7	0.200 5	0.061 8	0.224 4	0.094 9	0.104 3	0.122 1	0.121 3

使用 Matlab 对投影值进行拟合,结果如图 3 所示。在施炭量、施加年限作为控制条件时,2015、2016 年两年的投影值随着生物炭施加量的增加呈现上升趋势。2017、2018 年以生物炭施用量 25 t/hm² 最优,当生物炭施加量高于 25 t/hm² 时,投影值呈现降低趋势。并且,连续施加 3 年 25 t/hm² 生物炭处理投影值最高;投影值 Z 关于生物炭施加量 x 及施

加年限 y 的响应关系为

$$Z = 54.12 - 0.033\,06x - 17.75y + 0.000\,301x^2 + 0.127\,2xy + 9.358y^2 - 0.000\,590\,3x^2y - 0.016\,04xy^2 - 1.297y^3$$

$$R^2 = 0.906\,4, R^2_{\text{adj}} = 0.838\,4, \text{RMSE 为 } 1.591\,3. \text{ 并且通过计算该方程极值得出,在施加年限为 3 年、生物炭施加量为 } 32.63 \text{ t/hm}^2 \text{ 时,可使投影值达到理论最大值。}$$

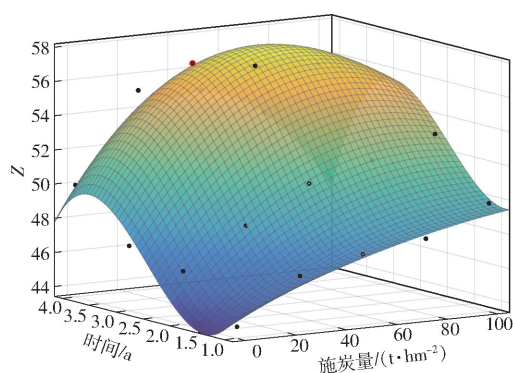


图 3 2015—2018 年各处理投影值拟合

Fig. 3 Projection value fitting graph of each treatment from 2015 to 2018

3 讨论

生物炭自身具有多孔、低密度以及大的比表面积等特性,可以使其具有改良土壤结构,提高土壤持水能力的作用^[19]。改良土壤结构方面,本研究发现,土壤容重随着生物炭施用量的增加呈现逐渐降低的趋势,与前人的结论基本一致^[20]。此外本研究发现,Y25、Y50 处理下土壤容重的降低幅度逐年上升,而 Y75、Y100 处理下土壤容重的降低幅度逐年递减,土壤容重趋于平稳,可能是由于生物炭降低容重的效果达到了最大值^[14]。从土壤持水能力方面来看,学者们普遍认为施加生物炭可以提高土壤的持水能力^[21-23],但施加量以及施加年限与持水能力之间的关系尚不明晰。吴维等^[24]通过在黄壤中施加不同量的秸秆生物炭发现,土壤的田间持水率与生物炭的添加量呈现显著正相关。魏彬萌等^[25]用烟杆生物炭对沙复土壤进行改良时发现,生物炭施加量增加到 50 g/kg 时,复配土壤的田间持水率出现下降趋势。在本研究中,Y25、Y50 处理下的田间持水率呈现逐年升高的趋势,而 Y75、Y100 处理下的田间持水率则呈现出逐年降低的趋势;并且 2018 年 Y100 处理下的田间持水率低于对照组处理。产生这一现象的原因是由于生物炭累积量的增加导致生物炭颗粒堵塞了土壤颗粒之间的孔隙,破坏了土壤的结构,且不同类型的土壤对这种结构破坏的承受能力不同。生物炭主要由全碳组分和灰组分构成,施用生物炭可以提高土壤的碳氮比和 pH 值,增强土壤的肥力和抗酸化能力。本研究中,土壤中的碳氮比和 pH 值均随着生物炭的施加而逐渐升高,这与前人的结论^[11,19]基本一致。

在已有的研究中,生物炭在减少径流量以及减少土壤侵蚀量方面的应用效果尚不明晰。本研究中,2015 年和 2016 年的径流系数随着生物炭的逐年施加而逐渐降低,减少径流的效果明显,这与

LI 等^[26]的研究成果一致;但在 2017 年和 2018 年中,生物炭的持续施加增加了土壤的径流系数与径流量,规律与 2015、2016 年相反。出现这种现象的原因是在加入生物炭的初期,在生物炭自身多孔性质的作用下,土壤孔隙度增加导致土壤水分的入渗率增加,从而减少了该年的径流量,但由于生物炭具有斥水性^[27],随着生物炭的逐年施加,生物炭的累积施加量升高,这种斥水性的影响效果占据了主导地位,导致了该研究的 2017、2018 年径流系数逐年升高。而在降低土壤侵蚀量方面,本研究结果显示,减少的土壤侵蚀量呈现先升高后降低的趋势,在 2016 年施加 50 kg/hm² 生物炭的处理为最优处理,魏永霞等^[14]在相同的试验地区得到了相同的结论,但 2017 年的 Y75 处理和 2018 年的 Y75、Y100 处理的土壤侵蚀量均出现了不同程度的增加,主要是由于过量的施加生物炭对土壤颗粒中的团聚体产生破坏,使土壤的抗侵蚀能力和水稳性下降,导致这一现象的产生。同时相关研究还表明施用生物炭的颗粒尺寸影响着减少侵蚀量的最优生物炭施加量^[26]。

已有研究表明,在土壤中施加生物炭可以使玉米等作物的产量和水分利用效率提高^[14],但对生物炭的施加量、施加年限的合理配置方面却缺乏见解。本研究中,玉米的产量以及水分利用效率规律基本一致,2015—2017 年的试验中,各处理的产量和水分利用效率均高于对照组,与前人的结论一致^[27]。增产率方面,相同年不同处理的增产率随着生物炭施用量的增加呈现先升高后降低的趋势,且 2015—2018 年的最优处理分别为 Y50、Y50、Y25、Y25,王湛等^[28]通过研究生物炭对有机菜的增产作用发现了类似规律。本研究还发现,2018 年的 Y100 处理导致了玉米的减产,这是由于生物炭自身的高含碳量提高了土壤中的碳氮比,生物炭通过提供充分的代谢能量而使土壤微生物对 N 元素产生了生物固定,导致 N 元素根系可利用性降低,从而对玉米的产量产生了抑制效果。

本研究中,使用 AGA 优化的投影寻踪模型对生物炭不同的施加量、施加年限的应用效果进行评价,并利用 Matlab 对施加量、施加年限、投影值进行拟合,相较于传统的投影寻踪模型,在使评价结果更加直观准确的同时,也使计算过程更加简单。改进的投影寻踪模型评价结果显示,开始施加生物炭时,投影值随着生物炭施加量的增加而缓慢升高,随着施加年限的增加,土壤中的累积施炭量也逐渐升高,投影值呈现出先升高后降低的趋势,整体呈现出一个曲面,产生这一现象是因为,生物炭施加量较低时,

投影值取决于土壤自身的条件,而随着生物炭的连续施加,有效改善了土壤结构进而抑制了水土流失并提高了作物产量,因而投影值在这一阶段快速上升并且达到最大值,但当施加年限过长,土壤中生物炭的累积施加量过高时,生物炭开始破坏土壤结构,导致水土流失严重、作物减产的现象,所以投影值在这一阶段开始呈现缓慢降低,生物炭的应用效果欠佳。基于改进的投影寻踪模型总结出黑土区的生物炭最优使用模式为连续3年施加 32.63 t/hm^2 的生物炭,可使生物炭的应用效果达到最优。

4 结论

(1)连年施加生物炭可以显著降低土壤的容重,同时增加土壤pH值以及土壤的碳氮比,且生物炭的累积施加量越大,这种作用效果越明显,田间持水率最高的处理为2018年的Y25处理,相较同年对照处理增加了14.43%,2016—2018年的Y75、Y100处理下的田间持水率逐年降低。

(2)连续两年施加生物炭可以有效减小黑土区的径流系数和土壤侵蚀量,但第3、4年施加生物炭时,会增大耕地的径流系数以及土壤侵蚀量,对水土保持产生不利影响。连续施加两年 50 t/hm^2 的生物炭,土壤径流系数达到最低,相较对照组降低了17.3%,同时土壤侵蚀量达到最低,相较对照组降低了8.33 kg。

(3)施加适量的生物炭可以提高玉米产量和WUE,但当生物炭施加过量时,会对玉米产量和WUE产生抑制效果。2015年施加 50 t/hm^2 生物炭增产效果最好,增产率为14.12%,WUE提高了17.57%;连续4年施加 100 t/hm^2 生物炭,玉米产量和WUE受到了抑制,相对于对照组分别降低了1.1%和4.1%。

(4)利用改进的投影寻踪模型对生物炭不同施用量、施加年限的应用效果进行评价,进而提出黑土区生物炭的最优施用模式为:连续3年施加 32.63 t/hm^2 生物炭。

参 考 文 献

- [1] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1):158-161.
WEI Dan, KUANG Enjun, CHI Fengqin, et al. Status and protection strategies of black soil resources in Northeast China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(1):158-161. (in Chinese)
- [2] 曹志宏, 黄艳丽, 郝晋珉. 中国作物秸秆资源利用潜力的多适宜性综合评价[J]. 环境科学研究, 2018,31(1):179-186.
CAO Zhihong, HUANG Yanli, HAO Jinmin. Multi-suitability comprehensive evaluation of crop straw resource utilization in China [J]. Environmental Science Research, 2018,31(1):179-186. (in Chinese)
- [3] 孙冬海. 黑龙江垦区水资源及其开发利用[J]. 水利规划与设计, 2010(5):17-18.
SUN Donghai. Water resources and development and utilization in Heilongjiang reclamation area[J]. Water Resources Planning and Design, 2010(5):17-18. (in Chinese)
- [4] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1402-1417.
YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5):1402-1417. (in Chinese)
- [5] GLASSER B. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Org. Geochem, 2000, 31(7):669-678.
- [6] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils [J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1):81-115.
- [7] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London: Earthscan, 2009.
- [8] KIMETTYU J M, LEHMANN J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7):577.
- [9] 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.
- [10] CHINTALA R, SCHUMACHER T E, MCDONALD L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(5):626-634.
- [11] 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.
- [12] 吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):294-301.
WU Yu, LIU Hui, YANG Aizheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):294-301. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034. (in Chinese)
- [13] 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):252-261.
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 for the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7): 252–261. 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. (in Chinese)
- [14] 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 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. 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)
- [15] ZEELIE A. Effect of biochar on selected soil physical properties of sandy soil with low agricultural suitability [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2012.
- [16] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤, 2012,44(1):62–66.
YE Lili, WANG Cuihong, ZHOU Hu, et al. Effects of rice straw-derived biochar addition on soil structure stability of an ultisol[J]. Soil, 2012,44(1): 62–66. (in Chinese)
- [17] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1–2):81–84.
- [18] 张欣莉, 丁晶, 李祚泳, 等. 投影寻踪新算法在水质评价模型中的应用[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2):187–189.
ZHANG Xinli, DING Jing, LI Yiyong, et al. Application of new projection pursuit algorithm in assessing water quality [J]. Environmental Science of China, 2000, 20(2): 187–189. (in Chinese)
- [19] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014,29(1):68–79.
WU Yu, XU Gang, LÜ Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(1):68–79. (in Chinese)
- [20] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3–4):443–449.
- [21] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 长期定位连续施用生物炭对植烟土壤物理性状的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(3):182–188.
LIU Hui, ZHOU Qingming, LI Juan, et al. Effects of long-term continuous application of biochar on soil physical properties of planting tobacco[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(3): 182–188. (in Chinese)
- [22] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):290–295.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Coupling effect of biochar and fertilizer on soil water content and tomato yield [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):290–295. 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. (in Chinese)
- [23] 郑利剑, 马娟娟, 郭飞, 等. 基于水稳定同位素技术的生物炭对土壤持水性影响分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):193–198,186.
ZHENG Lijian, MA Juanjuan, GUO Fei, et al. Impact of biochar addition on soil water retention based on water stable isotopes [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):193–198,186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160625&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.025. (in Chinese)
- [24] 吴维, 李心清, 周运超, 等. 玉米秸秆生物炭对贵州黄壤持水能力的影响[J]. 地球与环境, 2017(6):92–97.
WU Wei, LI Xinqing, ZHOU Yunchao, et al. Impact of corn straw biochar on water holding capacity of the yellow soil in Guizhou Province, China [J]. Earth and Environment, 2017(6): 92–97. (in Chinese)
- [25] 魏彬萌, 王益权, 李忠徽. 烟秆生物炭对砷砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2):217–222.
WEI Binmeng, WANG Yiquan, LI Zhonghui. Influence of tobacco biochar on soil physico-chemical properties and maize growth in the soil composition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):217–222. (in Chinese)
- [26] LI Y, ZHANG F, YANG M, et al. Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil[J]. CATENA, 2019, 173:226–233.
- [27] BRIGGS C M, BREINER J, GRAHAM R, et al. Contributions of *Pinus ponderosa* charcoal to soil chemical and physical properties[C]//The ASACSSA-SSSA International Annual Meetings Salt Lake City, USA, 2005.
- [28] 王湛, 李银坤, 王利春, 等. 生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(12): 273–280.
WANG Zhan, LI Yinkun, WANG Lichun, et al. Effects of biochar on yield, quality and water utilization of organic flowering Chinese cabbage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):273–280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181233&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.033. (in Chinese)