

黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响

吴昱^{1,2} 刘慧³ 杨爱峥⁴ 赵雨森¹

(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. 哥本哈根大学科学学院, 哥本哈根 DK-2630)

摘要: 为了探索生物炭对黑土区坡耕地的水土保持作用效果,于2015年在东北黑土区典型黑土带上的黑龙江省北安市红星农场3°坡耕地上的径流小区内,开展了不同生物炭施用量(0、25、50、75、100 t/hm²)对土壤结构、持水性能、径流泥沙控制等影响的试验研究。结果表明:生物炭可有效改善黑土区土壤结构,随着生物炭添加量的增加,土壤容重随之减小,而土壤孔隙度则会明显提高;土壤饱和含水率、田间持水量和土壤储水能力均随生物炭施用量的增加而增加;适当施加生物炭对黑土区坡耕地降雨径流及水土流失具有较好的控制作用,75 t/hm²处理具有最好的径流泥沙控制效果,其中径流控制效果好于泥沙控制;施加生物炭还可以不同程度地减少黑土区坡耕地土壤养分流失,并可以改善养分的空间分布,4种生物炭用量处理的养分含量不仅在数量上高于对照处理,而且在均匀程度上有较大的改善,减缓了坡度对土壤养分造成的坡上与坡下的差异。研究结果为东北黑土区秸秆资源的高效、绿色、循环利用提供了一条新的途径,可为黑土区坡耕地水土流失防治提供理论依据和技术支撑,对该区农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 黑土区坡耕地; 秸秆生物炭; 土壤结构; 持水性能; 径流泥沙

中图分类号: S216.2; S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0287-08

Influences of Biochar Supply on Water and Soil Erosion in Slopping Farm-land of Black Soil Region

WU Yu^{1,2} LIU Hui³ YANG Aizheng⁴ ZHAO Yusen¹

(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. Faculty of Science, University of Copenhagen, Copenhagen DK-2630, Denmark)

Abstract: To explore the effects of biochar on soil and water conservation in slopping farm-land of black soil region, the experiments for the influences of different amounts of biochar supply (0 t/hm², 25 t/hm², 50 t/hm², 75 t/hm² and 100 t/hm²) on soil structure, water holding property, runoff and sediment control, etc. were conducted in the run-off plots, which were located at the slopping farm-land with three degrees of terrain slope in Hongxing state farm of Beian City, Heilongjiang Province in the typical black soil belt. The results showed that the biochar could effectively improve the soil structure in black soil region, and the soil bulk density was decreased with the increase of amount of biochar, but the soil porosity was just opposite. And some indexes for indicating the soil water holding capacity, such as saturated soil water content, field water capacity and soil water storage were all increased with the increase of biochar supply amount. The run-off and soil erosion in slopping farm-land could also be controlled by suitable supply of biochar, the best treatment for run-off and sediments control was that with 75 t/hm², and the effect of run-off control was better than that of the sediment control. Biochar supply also could reduce the soil nutrient loss and improve the spacial distribution of soil nutrient at different degrees, and the soil nutrient contents for the four treatments of biochar supply were all higher than that without biochar supply, and the evenness degree of soil nutrients distribution was also improved

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)和黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)

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

obviously, which made the differences of soil nutrients between upslope and downslope reduced. The results could provide a new way for efficient, green and recycling utilization of straw resource in the northeast black soil region, the theoretical foundation for prevention and control of water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region, which have important significance to promote the regional sustainable development of agriculture.

Key words: slopping farm-land in black soil region; crop stalk biochar; soil structure; water holding property; run-off and sediment

0 引言

东北黑土区作为世界上仅有的三大黑土带之一,具有得天独厚的农业水土资源条件,为我国主要的粮食生产基地,对保障国家粮食安全发挥了巨大作用。区内坡耕地占耕地总面积的60%,坡度多在 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,坡长500~2000 m,是产生水土流失的主要源地^[1];该区属寒温带大陆性季风气候,降雨的年内分配不均,全年降水量的70%~80%集中在7—9月;雨期集中,降雨强度大,导致该区坡耕地水土流失严重。同时,在不利的自然条件和人类不合理的垦殖与经营的双重影响下,黑土退化严重,黑土层已经由开垦初期的60~70 cm减少到20~30 cm,土壤养分逐渐降低,土壤结构破坏明显,容重增加,孔隙度降低,渗透性下降,导致土壤持水保肥能力下降^[2],严重制约着黑土区农业水土资源的可持续高效利用,使国家粮食安全面临着严重威胁。因此,开展黑土区水土保持理论与技术研究具有重要的现实意义和深远的历史意义。目前,有关黑土区水土保持研究主要集中在工程措施和耕作技术方面^[2-4],而从改善土壤结构方面的研究还很少,特别是将秸秆生物炭作为土壤改良剂应用于坡耕地综合治理及其对坡耕地养分空间变异性和水土流失的影响则鲜见报道。

生物炭作为土壤改良剂已经得到了国内外学者的广泛关注。多位学者的研究表明,生物炭的施入可使土壤容重显著降低,而总孔隙率显著增加^[5-8],其原因为生物炭具有微孔多、比表面积大、密度小等特性,且含有丰富的有机大分子,因此生物炭施入土壤后可以降低土壤容重,增大土壤孔隙度,增强土壤持水能力,促进土壤团聚体的形成,从而改善土壤的物理性状,使得土壤能够保持更多的水分、养分和空气,进一步提高土壤的保水、保肥、保气性^[9-10];不仅如此,由于生物炭容重低、粘性差,还可以降低粘质土壤容重和硬度^[11]。陈温福等^[12]对白浆土的改良试验表明,当生物炭施用量为 10 t/hm^2 时,经过大豆一个生育期即可将白浆层调整到理想状态,但当施用量超过 30 t/hm^2 时白浆层反而过于松散;魏永霞等^[13]对黑土区的试验表明,生物炭具有较好的土

壤改良效果,当生物炭施用量为 75 t/hm^2 时,大豆产量达到了最佳状态。因此生物炭还田改土的适宜施用量需根据土壤类型等决定。

本文拟利用黑土区秸秆资源条件,将其炭化施加于自身土壤,开展不同生物炭施用量对土壤结构、持水性能、径流泥沙控制等影响的试验研究,达到土壤改良,增加土壤持水保肥能力,减少水土流失的目的,在探索行之有效的黑土修复与保护技术的同时,也为黑土区秸秆资源的绿色循环高效利用探索一条新的途径。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2015年5—10月在位于东北典型黑土带上的黑龙江省红星农场坡耕地上的径流小区内进行,小区规格为 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,地面坡度为 3° 。设置5个生物炭用量水平(0、25、50、75、 100 t/hm^2),2次重复。其中以 0 t/hm^2 用量为对照,各处理编号依次为CK、T1、T2、T3、T4。

供试土壤为草甸黑土,土壤容重为 1.14 g/cm^3 ,砂粒(大于 0.02 mm)、粉粒($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)、粘粒(小于 0.002 mm)的质量分数分别为21.91%、44.28%和33.81%;生物炭原材料选用黑土区较为丰富的玉米秸秆,生物炭由辽宁金和福农业开发有限公司生产,其基本物理化学指标为:粒径 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$,pH值为9.14,碳、全氮、硫、氢和灰的质量分数分别为70.38%、1.53%、0.78%、1.68%和31.8%。供试作物为黑河3号大豆。

试验开始前,将生物炭均匀撒在土壤表面,经人工搅拌使混合壤各处颜色均一,即其与耕层土壤(20 cm)混合均匀,起垄静置7 d左右后播种。大豆种植与管理采用当地常规方法。

1.2 观测内容与与方法

(1)土壤水分动态:采用干燥法,按照大豆生育期测定,4次重复(相同处理的2个径流小区各取2次重复),测定层位为0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm。

(2)土壤物理性质:大豆生育期末用环刀取耕层原状土,重复同上,采用DIK-1130型土壤三相仪

测定土壤孔隙度和容重。

(3)土壤水分常数:大豆生育期末,环刀法测定不同处理土壤饱和含水率和田间持水量,重复同上。

(4)土壤养分指标:大豆生育期末测定土壤有机质、铵态氮、有效磷和速效钾含量,重复同上。采用化学方法测定,其中土壤有机质质量分数(%)采用重铬酸钾-硫酸法^[14];铵态氮质量比(mg/kg)采用2 mol/L KCl浸提-靛酚蓝比色法^[14];有效磷质量比(mg/kg)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法^[14];速效钾质量比(mg/kg)采用醋酸铵浸提-火焰光度法^[14]。

(5)降雨量及其过程:自记雨量计自动记录。

(6)降雨径流过程:采用安装在小区出口的翻斗式径流自计系统自动记录。

(7)降雨产沙过程:与径流过程同步,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,经计算获取产沙量及其过程。

1.3 数据分析处理方法

采用Excel 2013、SPSS 12和GS+9.0统计软件进行相关的数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤结构指标的影响

不同处理的耕层土壤容重和孔隙度及其显著性分析见表1,各处理0~20 cm土层的土壤容重由大到小依次为:CK、T1、T2、T3、T4,即土壤容重随生物炭施加量的增加而降低,从生物炭施加量最高的T4处理到最低的T1处理,土壤容重分别降低5.24%、4.79%、4.31%和2.23%;各处理0~20 cm土层的土壤孔隙度由大到小依次为:T4、T3、T2、T1、CK,即土壤孔隙度随生物炭施加量的增加而增大,从T4到T1处理,土壤孔隙度分别增大12.90%、7.66%、6.45%和4.03%。

表1 不同处理耕层土壤的容重与孔隙度

Tab.1 Bulk density and porosity of soil for different treatments

| 参数 | CK | T1 | T2 | T3 | T4 |
|----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 土壤容重/(g·cm ⁻³) | 1.140 ^a | 1.115 ^b | 1.091 ^{bc} | 1.085 ^c | 1.080 ^c |
| 土壤孔隙度/% | 49.6 ^a | 51.6 ^{ab} | 52.8 ^b | 53.4 ^{bc} | 56.0 ^c |

注:同一行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

生物炭对土壤容重和孔隙度的影响可能与生物炭本身所具有的多微孔、比表面积大、密度小,且具有丰富的有机大分子等有关,添加生物炭后,可使土壤结构得到有效改善。这与陈红霞等^[6]随着施炭

量的增加,土壤容重逐渐降低,土壤孔隙度逐渐变大结果一致,说明施加生物炭可以有效改善土壤结构,并同样适用于黑土区。本区域亦存在着各种人为因素,诸如不合理的耕作、长期的过量化肥使用等而导致的土壤板结,供水供肥能力降低等问题,施加生物炭可以作为解决这一问题的有效途径。

2.2 施加生物炭对土壤持水性能的影响

2.2.1 对土壤水分常数的影响

土壤的田间持水量和饱和含水率作为两个较为重要的土壤水分常数,可以反映土壤持水性能的高低,直接影响作物的生长发育。生物炭本身具有疏松多孔、比表面积大的特点,有巨大的孔隙度和表面能,施加生物炭的土壤,可增加孔隙度,改善土壤的持水性能^[15]。由图1可以看出,各处理土壤饱和含水率、田间持水量均随着施炭量的增加而增大。各处理饱和含水率较对照组分别提高了11.16%、21.30%、22.31%和29.01%;田间持水量较对照处理分别提高了0.32%、3.17%、5.71%和10.48%。经显著性分析,饱和含水率除T2、T3之间无显著性差异以外,其他各项之间差异均达到了显著性水平($P < 0.05$);田间持水量除CK和T1之间、T2和T3之间无显著性差异外,其余各项之间亦达到了显著性水平。可见,施加生物炭的土壤,在降雨过程中能够充分吸持水分、截留雨水^[16],使田间持水量和饱和含水率均有所提高。这与很多研究所表明的土壤持水能力随着生物炭添加量的增加而增加的结论具有很好的一致性^[17],说明生物炭的施用,在黑土区同样具有提高土壤持水能力的作用。

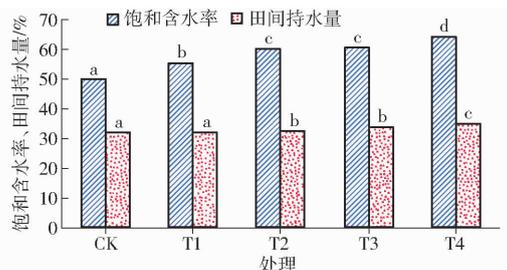


图1 不同处理耕层土壤水分常数

Fig.1 Soil moisture constant of arable layer for different treatments

2.2.2 对土壤储水量的影响

不同的生物炭施加量处理条件下,0~100 cm土层的土壤储水量如图2所示。可以看出,从5月17日播种到10月4日收获,不同处理的0~100 cm土壤储水量与降雨量的动态变化具有较好的相关性,并且不同生物炭施用量处理的土壤储水量虽然变化趋势一致,但水量上具有明显的差异。总体上来看,基本表现为生物炭用量大的土壤储水量变化

过程线位置较高。时段初(播种期)各处理的土壤储水量没有明显的不同,甚至对照处理的土壤储水量处于较高水平,随着生物炭施加时间的延长,生物炭的持水作用逐渐显现。大豆播种到苗期,土壤水分因降雨补充较少而处于消耗状态,土壤储水量呈下降趋势,但到苗期(5月30日)已能够看出不同生物炭用量处理土壤储水量的明显差异;到5月30日之后,由于降雨的补充,土壤储水量呈缓慢上升态势,到7月28日,土壤储水量达到最大值。之后由于降雨量的明显减小,大豆生长旺盛,耗水量较大,土壤储水量显著降低;8月15日到10月4日,随着大豆耗水减少以及降雨量的增加,土壤储水量呈上升趋势。可以看出,在土壤储水量的消长过程中,生物炭对土壤储水量具有明显的正向效应,并且表现出土壤储水量随着生物炭施加量的增加而增加,2015年T4处理0~100cm土层的土壤储水量较对照最多提高了8.2%。可见,生物炭的施加有效地提高了土壤储水量,这主要是生物炭改善了土壤结构,提高了土壤的持水性能,有利于坡耕地土壤水分的保持和降雨利用率的提高。

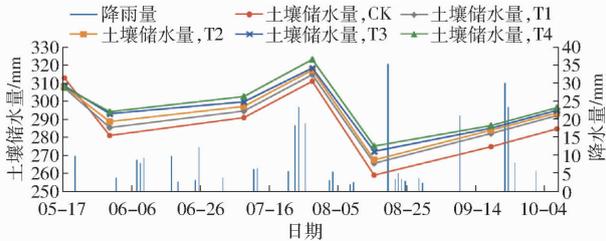


图2 不同处理的0~100cm土层土壤储水量

Fig. 2 Soil water storage in 0~100 cm soil layer for different treatments

2.3 施加生物炭对次降雨径流的影响

选取2015年7月24日降雨过程进行分析,本次降雨历时55min,最大降雨强度115.2mm/h,总降雨量22mm,降雨径流强度及累积径流强度过程如图3所示。

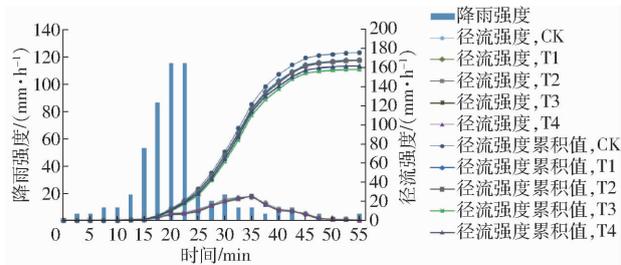


图3 2015年7月24日不同处理降雨地表径流过程

Fig. 3 Process of runoff for rainfall on 24th, July of 2015

由图3可以看出,施加生物炭的小区径流与对照小区径流强度和累积径流强度过程线趋势都基本相同,但施加生物炭的小区降雨产流量均小于对照

小区,但超过一定限度后,径流则增加。说明在一定的生物炭施加量范围内具有一定的径流控制作用,主要原因就是生物炭施加到土壤后改善了土壤结构,有效降低了土壤容重,进而增加土壤孔隙度,此时土壤巨大的表面积和亲水基团也进一步提高了土壤的持水能力;同时,适量地施加生物炭,可以减少土壤养分淋失^[18],为农作物创造了良好的水肥环境,有利于作物生长发育,为坡耕地降雨径流控制提供良好的植被条件。可以看出,随着生物炭添加量的增加,呈现出径流强度过程线向下移动的趋势,即次降雨径流量随着生物炭添加量的增加而减少。本次降雨处理T1、T2、T3、T4径流量较CK处理分别减少了4.71%、6.55%、10.15%、7.97%,从降雨径流控制效果来看,生物炭施加量为75t/hm²时为最佳。本次降雨发生在大豆的分枝期,相对于其他处理来说,该处理的大豆长势迅猛,冠层发育,对降雨的阻碍作用明显^[3],冠层截留降低了降雨产流量,使得T3处理的产流量最小。但随着生物炭的过量施入,可能会导致土壤的碳氮比提高,造成作物养分吸收困难^[19-20],抑制大豆的生长发育^[19],故产流量呈增加趋势。

2.4 施加生物炭对次降雨产沙的影响

2015年7月24日降雨过程与产沙量的关系如图4所示。可以看出,产沙过程与地表径流过程的变化趋势基本一致,在本试验处理范围内,施加生物炭均有一定的减沙效果,但效果并不明显。各处理产沙量按从大到小的顺序为CK、T4、T1、T2、T3, T1到T4处理减沙率分别为1.91%、1.93%、2.44%和1.82%,生物炭施加量为75t/hm²的T3处理的减沙率最大。相对于减沙效果来说,最佳生物炭用量为75t/hm²,这与对地表径流的影响结果基本一致。主要因为施加生物炭减小了径流形成,使跟随径流流失的泥沙也相对减少,将适量的生物炭施入农田土壤,具有一定的水土保持作用。但是,随着生物炭施用量的增加,使表层土壤更为稀松,过大的灰分导致土壤结构性降低,表层土壤则易于被降雨形成径流所携带而产生土壤的流失。

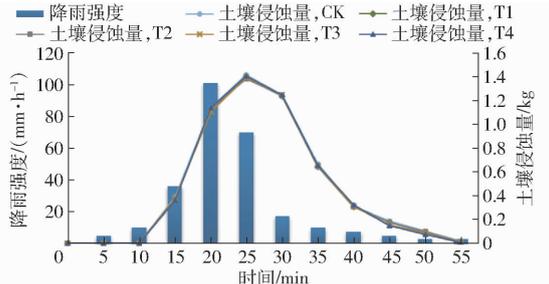


图4 2015年7月24日不同处理的降雨产沙过程

Fig. 4 Process of sediment for rainfall on 24th, July of 2015

2.5 施加生物炭对土壤养分流失的影响

各处理耕层土壤有机质、有效磷、速效钾和铵态氮含量对作物生长影响测定结果见表 2。由表 2 可以看出,土壤中的铵态氮、有机磷、速效钾和有机质含量均随着生物炭用量的加大而加大。其中,T3 处理的有机质和铵态氮含量较对照处理分别提高 125.0% 和 184.3%,T4 处理分别提高 158.3% 和 415.6%,均达到了显著水平。可见,生物炭可以提高土壤养分,这与已有研究结论一致^[20-21],在验证以往研究的同时,也说明了生物炭的保肥性能同样适用于黑土区。这主要得益于生物炭的吸附性能,减少了土壤中养分的流失,达到了持水保肥的效果。但各处理间并未全部达到显著差异。

表 2 不同处理耕层土壤养分含量平均值

Tab.2 Average contents of soil nutrients in arable layer for different treatments

| 参数 | CK | T1 | T2 | T3 | T4 |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 铵态氮质量比/(mg·kg ⁻¹) | 32 ^e | 43 ^d | 64 ^c | 91 ^b | 165 ^a |
| 有效磷质量比/(mg·kg ⁻¹) | 82 ^b | 88 ^b | 93 ^b | 110 ^a | 119 ^a |
| 速效钾质量比/(mg·kg ⁻¹) | 128 ^b | 151 ^b | 170 ^b | 197 ^a | 206 ^a |
| 有机质质量分数/% | 2.4 ^d | 3.8 ^c | 4.9 ^b | 5.4 ^b | 6.2 ^a |

为进一步探讨生物炭对土壤中养分含量的影响,应用地统计学原理对各处理下的土壤养分含量进行了统计分析,其养分含量分布如图 5、6 所示(图中从左到右为小区坡度方向)。因试验小区位于坡耕地上,降雨径流对土壤养分的携带作用,通常会表现出不同坡位土壤养分含量分布的不均匀性。但加入生物炭后,这种状况得到了很大的改善。对比图 5、6 可以看出,施加生物炭的 T4 处理,不仅表现出较高的土壤养分(铵态氮、有效磷、速效钾和有

机质)含量,而且从坡上到坡下其空间分布的均匀性也有所提高,即生物炭降低了土壤养分的空间变异性。这说明生物炭可以在减少坡耕地养分的流失的同时,改善坡面上养分含量的分布状况。这主要是由于生物炭具有较好的养分吸附作用的结果。生产实践中,由于田间小气候状况、下垫面条件等自然条件的不同,即便是平地也会存在着作物生长基质、水肥条件等的不均匀性,导致作物生长发育水平的明显变异。由于生物炭具有吸附性和持水性,使得作物生长的水肥状况趋于均匀,特别是使得坡耕地坡上和坡下的水肥条件趋于均匀,从而为作物生长发育及其产量的提高提供了保障。

由表 2 和图 5、6 可以看出,CK 和 T4 处理间土壤养分含量均表现出显著差异,养分含量随着生物炭用量的增加而增加;从空间分布图还可看出,铵态氮和有效磷含量与有机质含量变化存在着明显的正向同步性,有机质含量高的区域,铵态氮和有效磷含量也呈较高的态势,特别是铵态氮表现得最为明显;而速效钾则表现为土壤铵态氮和有效磷含量高的地方,其含量反而相对较低的现象。这是由于氮和磷在黑土中的存在形式以有机态为主,为土壤有机质的主要组成部分。与此不同的是,钾则是以无机态形式赋存于矿物质和黄土母质中。同时,由于黑土的长期耕作过程中,通常表现为氮肥和磷肥的投入大于钾肥,也导致了土壤中钾肥的消耗过大。

3 讨论

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,另外,它含有羟基、羧基、苯环等官能团,使得其

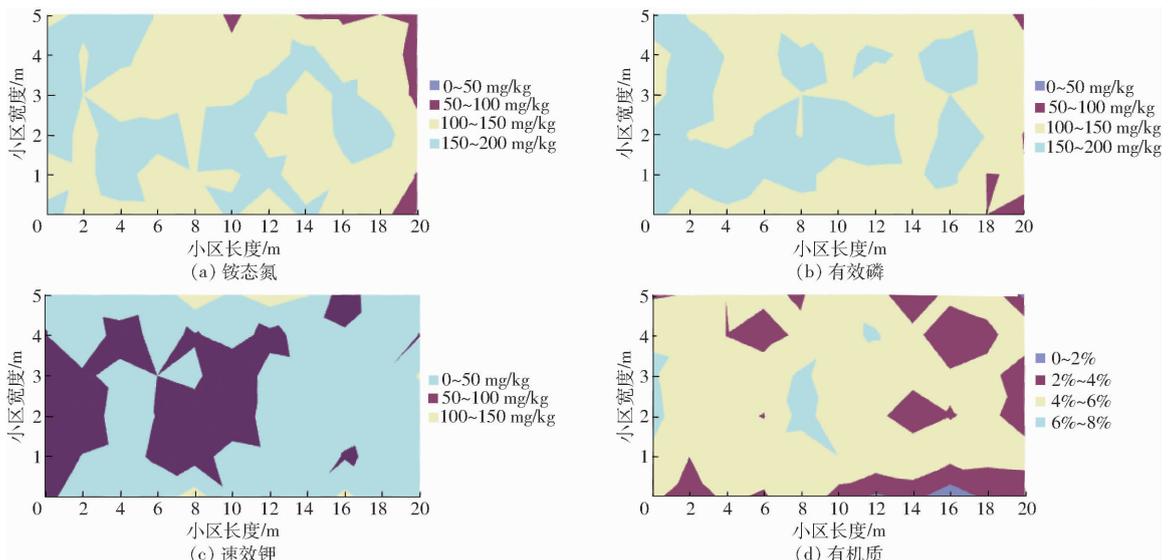


图 5 T4 处理的土壤养分含量空间分布

Fig.5 Spatial distributions of soil nutrients contents for treatment of T4

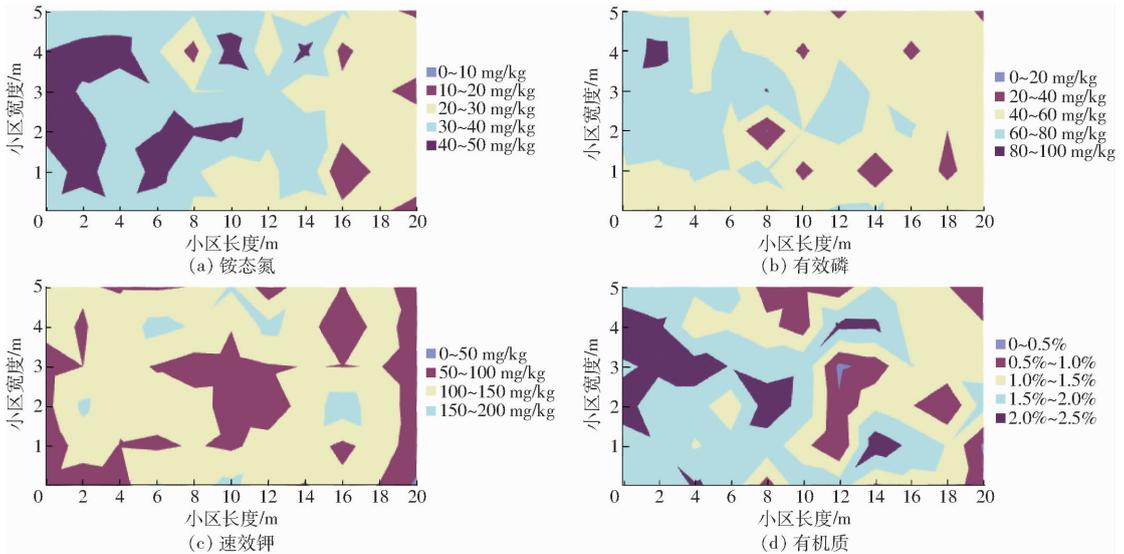


图 6 CK 处理的土壤养分含量空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of soil nutrients contents for treatment of CK

具有强大的吸附能力^[22]。随着土壤中生物炭施加量的增加,土壤孔隙率和容重分别呈增加和降低趋势;土壤中铵态氮、有效磷、速效钾和有机质含量亦随着生物炭施用量的增加而增加,这与其他地区的已有研究基本一致^[21,23],说明生物炭对黑土区存在着正向的农业水土效应;本研究发现,生物炭不仅能够减少养分流失,还可以降低土壤养分的空间变异性,减小了地形坡度对土壤养分分布的影响,这应该是生物炭能够提高坡耕地产能的主要原因之一,这一点在以往的研究中鲜见报道。

关于生物炭对土壤持水性能的影响,相当一部分学者认为生物炭可以提高土壤的持水性能^[15,24-25],但其施用量对土壤持水能力的影响程度上尚存在差异,这应该是与供试土壤本身的性质有关。王丹丹等^[23]认为土壤持水能力与生物炭添加量呈正相关,而 DUGAN 等^[25]的研究发现秸秆生物炭可提高土壤的持水能力,但施用量的影响不显著。在本研究中,无论是反映土壤持水性能的土壤水分常数,还是土壤储水量均随生物炭施用量的增加而增加。

关于生物炭的起效时间,JONES 等^[26]的研究显示,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^[23]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^[27]研究了沙壤土添加生物炭的节水保肥和增产效应,通过 1 a 的试验表明,土壤水分、养分均随着生物炭施用量的增加而增加,施用生物炭的番茄的生物性状指标明显好于对照处理。王艳阳

等^[28]在黑土区的研究表明,施用生物炭后,供试土层形成了炭-土双层结构,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。本研究亦经过了 1 a 的试验,在土壤理化性质、土壤的持水保肥能力方面均取得了与上述相关研究^[23,27-28]类似的结果,生物炭在黑土区坡耕地降雨径流与土壤流失控制方面具有一定的正效应。这亦是生物炭本身的特点及其土壤改良作用的反映。添加生物炭后,改善了作物的水肥生长环境,进而促进了作物生长,使作物冠层发育,提高了植物截留率,减小了雨水对表层土壤的击溅;同时土壤持水能力的增强势必会减少坡耕地降雨径流的形成。这些都是减少土壤及其养分流失的主要原因。本研究也说明了生物炭适用于黑土区坡耕地的水土流失防治。至于生物炭是否能够提高土壤本身的抗蚀性,从而进一步提高坡耕地径流泥沙控制效果,则需要进一步持续地试验研究,因为土壤本身团粒结构的形成需要一定的时间。同时,生物炭施用以后的多年后效应,本研究亦未涉及,有待进一步研究。

4 结论

(1)生物炭可有效降低黑土区土壤容重,提高土壤孔隙度。在试验处理范围内,随着生物炭添加量的增加,土壤容重和土壤孔隙度分别呈现降低和增加趋势。25、50、75、100 t/hm²生物炭用量处理的土壤容重减小幅度为 2.23%~5.24%,孔隙度增加幅度为 4.03%~12.90%。

(2)生物炭可以很好地改善黑土区土壤持水性能。在 25、50、75、100 t/hm²生物炭用量处理范围内,土壤饱和含水率和田间持水量均随生物炭施用

量的增加而增加,二者的增加幅度分别为 11.16% ~ 29.01% 和 0.32% ~ 10.48%;生物炭施用量对大豆不同生育阶段 0 ~ 100 cm 土壤储水量亦具有明显的正效应。

(3)适当地施加生物炭对黑土区坡耕地降雨径流具有较好的控制作用。25、50、75、100 t/hm²生物炭用量处理的次降雨径流降低幅度为 4.71% ~ 10.15%,其中以 75 t/hm²的生物炭用量处理为最优。

(4)施加生物炭对黑土区坡耕地降雨产沙具有一定的控制作用。25、50、75、100 t/hm²生物炭用量

处理的次降雨产沙率降低幅度为 1.82% ~ 2.44%,其中以 75 t/hm²的生物炭用量处理为最优。

(5)施加生物炭不仅可以不同程度地减少黑土区坡耕地土壤养分流失,而且可以改善养分的空间分布。铵态氮、有效磷、速效钾和有机质含量提高幅度分别为 34.4% ~ 415.6%、7.3% ~ 45.1%、18.0% ~ 60.9% 和 58.3% ~ 158.3%;4 种生物炭用量处理的养分含量不仅在数量上高于对照处理,而且在均匀程度上有较大的改善,减缓了坡度对土壤养分造成的坡上与坡下的差异。

参 考 文 献

- 1 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,2010:1-6.
- 2 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)
- 3 吴限,魏永霞,王敏,等. 不同农田植被条件下黑土坡耕地产流和产沙特征[J]. 水土保持通报,2015,35(3):101-104,111.
WU Xian, WEI Yongxia, WANG Min, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in sloping farmland of black soil region under different farmland vegetation [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2015, 35(3):101-104,111. (in Chinese)
- 4 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 models for sloping farmland comprehensive control on soil water conservation and crop yield [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):222-226. (in Chinese)
- 5 OGUNTUDE P G, ABIODUM B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4):591-596.
- 6 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2930-2934.
CHEN Hongxia, DU Zhangliu, GUO Wei, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11):2930-2934. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 张斌,刘晓雨,潘根兴,等. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学,2012,45(23):4844-4853.
ZHANG Bin, LIU Xiaoyu, PAN Genxing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23):4844-4853. (in Chinese)
- 9 ATKINSON C J, FITZGERALD J D, HIPPS N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1-2):1-18.
- 10 MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1-2):117-128.
- 11 MASULILI A, UTOMO W H, SYECHFANI M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia[J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 2(1):39-47.
- 12 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)
- 13 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 biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):201-207. (in Chinese)
- 14 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999:30-108.

- 15 LIANG Feng, LI Guitong, LIN Qimei, et al. Crop yield and soil properties in the first three years after biochar application to a calcareous soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3): 525 - 532.
- 16 KNICKER H. A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39: 935 - 939.
- 17 颜永豪, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 120 - 125.
YAN Yonghao, ZHENG Jiyong, ZHANG Xingchang, et al. Impact of biochar addition into typical soil on field capacity in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 120 - 125. (in Chinese)
- 18 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 54 - 61.
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen use rate [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(6): 54 - 61. (in Chinese)
- 19 张晗芝, 黄云, 刘刚, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2713 - 2717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2713 - 2717. (in Chinese)
- 20 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2011, 37(4): 439 - 445.
HUANG Chao, LIU Lijun, ZHANG Mingkui. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2011, 37(4): 439 - 445. (in Chinese)
- 21 梁仲哲, 齐绍武, 谈俊豪, 等. 生物炭对土壤养分及烟叶各时期化学成分的动态影响[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(21): 120 - 122.
LIANG Zhongzhe, QI Shaowu, TAN Junhao, et al. Effects of biochar on soil nutrients and chemical components of tobacco leaves [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(21): 120 - 122. (in Chinese)
- 22 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)
- 23 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)
- 24 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.
- 25 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.
- 26 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.
- 27 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. 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)
- 28 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)