

网络出版时间:2016-10-20 16:36 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.12.016
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161020.1636.032.html

生物质炭基肥料对黑麦草生长特性的影响

孙樱萁¹, 郭建斌¹, 李子富², 白晓凤², 刘 宇¹

(1 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

【摘 要】【目的】研究生物质炭基肥料对黑麦草生长指标的影响,为秸秆利用及生物质炭基肥料的开发应用提供依据。【方法】将玉米秸秆经 400 °C 热解而成的生物质炭与磷酸二氢钾、羧甲基纤维素钠(粘结剂)按不同质量比(1:1:0.3, 2:1:0.3, 3:1:0.3, 4:1:0.3)混合造粒制成 4 种生物质炭基肥料,通过温室盆栽试验,以不施肥作为对照(ck),比较生物质炭和生物质炭基肥料对多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)生长特性的影响,建立肥料中生物质炭含量与黑麦草地上部分鲜质量的拟合模型,筛选出肥料中生物质炭最佳含量。【结果】与 ck 相比,施用生物质炭及生物质炭基肥料对黑麦草的株高、根系长度、根表面积、生物量等均有提高,但对黑麦草的出苗率却无显著影响($P>0.05$)。在所制的 4 种生物质炭基肥料中,当生物质炭与磷酸二氢钾及粘结剂的质量比为 2:1:0.3 时,对黑麦草生长促进作用明显,播种 60 d 后其株高和地上部分鲜质量较 ck 分别显著增加了 34.51% 和 70.59% ($P<0.05$),根长与根表面积分别显著增长了 40.04% 和 59.86% ($P<0.05$)。由拟合的模型可以看出,随着肥料中生物质炭含量的增加,黑麦草地上部分鲜质量先增加后减少,当肥料中生物质炭含量为 61.60% 时,即施用 31.28 g 生物质炭与 15.00 g 磷酸二氢钾及 4.50 g 粘结剂混合制备的生物质炭基肥料时,黑麦草地上部分鲜质量最高达 3.02 g/盆。【结论】施用 20 g/kg 生物质炭基肥料对黑麦草生长存在一定的促进作用,当生物质炭基肥料中生物质炭含量为 61.60% 时,所制生物质炭基肥料肥效达到最佳。

【关键词】 生物质炭基肥料; 黑麦草; 生长特性; 配比模型

【中图分类号】 S141.6

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)12-0117-07

Influence of biochar-based fertilizers on growth characteristics of ryegrass

SUN Yingqi¹, GUO Jianbin¹, LI Zifu², BAI Xiaofeng², LIU Yu¹

(1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 This study quantified the influence of biochar-based fertilizers on growth characteristics of ryegrass to provide scientific basis for guiding the development and application of straw-biochar and other biomass-based fertilizers. 【Method】 Four granulated biochar-based fertilizers were made by mixing biochar made from corn straw after pyrogenation at 400 °C with KH_2PO_4 and CMC with mass ratios of 1:1:0.3, 2:1:0.3, 3:1:0.3 and 4:1:0.3. Using pot experiments in the greenhouse, the influences of biochar and biochar-based fertilizers on growth characteristics of ryegrass (*Lolium multiflorum*) were compared with the control experiment (ck) without fertilizer. Relationship between fresh aboveground weigh of ryegrass and biochar content of the fertilizers was fitted and the optimal biochar con-

【收稿日期】 2015-08-29

【基金项目】 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-IC-14-004)

【作者简介】 孙樱萁(1990—),女,河北廊坊人,在读硕士,主要从事生态环境工程与林业生态工程研究。E-mail:syqbeilin@163.com

【通信作者】 郭建斌(1962—),男,陕西韩城人,教授,博士生导师,主要从事生态环境工程与林业生态工程研究。

E-mail:1196153618@qq.com

tent was determined. 【Result】 All the growth parameters including plant height, root length, root surface area and biomass of ryegrass were increased in the treatments with application of biochar and biochar-based fertilizers compared with those of ck. However, there was no significant ($P < 0.05$) influence on the emergence of ryegrass. The best among the four biochar-based fertilizers was the one with the mixing ratio of 2 : 1 : 0.3, which resulted in the highest growth increase, including 34.51% increase of plant height ($P < 0.05$), 70.59% of aboveground fresh weight, 40.04% of root length and 59.86% of root surface area ($P < 0.05$). Based on the fitted relationship, the fresh aboveground weight of ryegrass firstly increased and then decreased with the increase of biochar content. When the biochar content was 61.60%, i. e. Using the biochar-based fertilizer made from 31.28 g biochar was mixed with 15.00 g KH_2PO_4 and 4.50 g CMC, the maximum fresh aboveground weight of ryegrass of 3.02 g was obtained. 【Conclusion】 The application of 20 g/kg biochar-based fertilizers promoted the growth of ryegrass and the optimal biochar content of fertilizer was 61.60%.

Key words: biochar-based fertilizers; ryegrass; growth characteristics; ratio model

随着我国经济的快速发展,农牧业中肥料的施用量也大幅度增加,施用肥料在使作物增产的同时,也产生了诸多问题:肥料自身的性质及施用方法的不合理,导致我国肥料利用率低下并对环境造成了危害^[1]。合理施肥是草地持续利用的有效途径之一^[2],建立施肥模型,寻求促进草产量增长最优的肥料配比也迫在眉睫。而对于产生的大量农业废弃物如秸秆^[3],处理方法多为露天焚烧,不仅浪费了资源,还引发了雾霾等环境问题^[4]。生物质炭是农作物废弃物等生物质(或生物有机材料)在无氧或低氧环境中热裂解分离可燃气体后产生的固态产物^[5],其含碳量高且具有较高的生物化学和热稳定性,不仅可提高土壤有机碳含量,而且还具有改善土壤结构、调节土壤 pH 等特性^[6]。此外,生物质炭具有较高的阳离子交换量、表面积和养分含量,因此施用生物质炭后可以增加土壤养分有效性,提高植物对养分的吸收能力,促进植物的生长^[7-10]。但同样有研究^[11-13]发现,单独施用不同比例生物质炭时也可能导致植物生物量下降。最新研究表明,生物质炭可以作为缓释肥料的载体,与其他农用肥料混合制成生物质炭缓释氮肥^[14-15],既能提高肥料的利用率,又可以实现农林废弃物资源化利用。

如今,将生物质炭作为肥料载体的国内外研究还处在起步阶段,Steiner 等^[16]和 Lehmann 等^[17]将生物质炭与无机肥料掺混制成的生物质炭基复合肥,可增加土壤全氮量和速效磷含量,促进作物对氮、磷元素的吸收,减少氮的损失量。钟雪梅等^[18]利用粘结剂在尿素颗粒表面包裹竹炭制成竹炭包膜尿素肥料,可显著降低尿素在土壤中的淋失,促进作

物对氮素的吸收,提高氮素利用率。目前针对生物质炭的研究,多数是将其与尿素混合制成生物质炭基氮肥,通过尿素淋溶试验和土壤培养等室内试验探究生物质炭的缓释性能^[19]。而将生物质炭与磷酸二氢钾混合制生物质炭基肥料磷肥,研究其对植物生长影响的报道还较少,且目前对于该肥料的农用标准^[20]也没有明确的规定及模型化的科学论证。本研究将生物质炭与磷酸二氢钾混合制备生物质炭基颗粒肥料,通过温室盆栽试验,探究所制肥料对多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)生长的影响,并通过建立炭基肥中生物质炭含量与多花黑麦草鲜草产量的拟合模型,得出所制肥料中最适的生物质炭含量,为生物质炭基肥料的生产和广泛应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试生物质炭基肥料

研究所用的生物质炭是将玉米秸秆在 400 °C 下密封限氧炭化制备而成,冷却至室温后过孔径 1 mm 筛备用。生物质炭中的碳(C)含量为 70.2%,氮(N)含量为 1.01%,灰分含量为 13.43%。

试验所需的 4 种生物质炭基肥料(F1、F2、F3、F4)均由玉米秸秆烧制的生物质炭、磷酸二氢钾、粘结剂按一定比例混合制成,其中本研究所用粘结剂为羧甲基纤维素钠,其添加量为 4.50 g,为保证肥料养分含量一致,磷酸二氢钾添加量均为 15.00 g,采用圆盘造粒的方法,收集成型较好的肥料颗粒,在 80 °C 下烘干备用。4 种生物质炭基肥料具体配方见表 1。

表 1 4 种生物质炭基肥料代号及各成分配比
Table 1 Ratios and codes of 4 biomass-based fertilizers

肥料代号 Fertilizer	$m(\text{生物质炭}) : m(\text{磷酸二氢钾}) :$ $m(\text{粘结剂})$ $m(\text{Biochar}) : m(\text{KH}_2\text{PO}_4) : m(\text{Binder})$	生物质炭含量/% Biochar content	磷酸二氢钾含量/% KH_2PO_4 content
F1	1 : 1 : 0.3	43.48	43.48
F2	2 : 1 : 0.3	60.61	30.30
F3	3 : 1 : 0.3	69.76	23.25
F4	4 : 1 : 0.3	75.47	18.86

1.2 供试植物与土壤

盆栽试验供试植物为多花黑麦草(以下简称黑麦草),是禾本科黑麦草属多年生植物,须根系较为发达。试验土壤取自北京林业大学苗圃试验田,为褐土,土壤经风干后过孔径 5 mm 土筛用于盆栽试验,试验用土的基本肥力状况为:全氮 1.43 g/kg,全磷 0.18 g/kg,全钾 15.12 g/kg,有机质 10.4 g/kg,碱解氮 112 mg/kg,速效磷 21.35 mg/kg,速效钾 70.53 mg/kg,pH 7.5。

1.3 试验设计与方法

本研究采用温室盆栽试验。试验设 6 个处理,分别是:空白组(ck).不添加任何肥料或添加剂;t.施用生物质炭颗粒(将 30 g 生物质炭与 4.5 g 羧甲基纤维素钠混合造粒而成);pk 1~ pk 4.分别施用 4 种自制的生物质炭基肥料(F1、F2、F3、F4)。每处理设置 4 个重复。选取籽粒饱满、无病虫的黑麦草种子播种于塑料花盆内,花盆规格为上口内径 40 cm,高 25 cm,底内径 30 cm,每个花盆中施用尿素 4.8 g,钾肥 2.4 g,生物质炭颗粒及 4 种生物质炭基肥料用量相同,均为 100 g,将其与 5 kg 供试土壤(即肥料施用量为 20 g/kg)混合均匀后装盆,每盆播种黑麦草种子 35 粒,于 2015-06-20 播种,2015-08-20 收获,期间定期记录生长情况,盆栽试验时的室温为 23~26 ℃,除水分管理外,试验期间不施用其他肥料。

1.4 测量指标及方法

出苗率的测量在播种 10 d 后,根据出苗棵数计算得出,出苗率=发芽棵数/播种总数×100%。剔除异常生长的植株,每盆中留 20 株。每 10 d 进行 1 次各处理组株高调查,株高为土壤表面到黑麦草叶尖的垂直距离。播种 2 个月后采收,采收前 2 h 测量株高,每盆取 5 株测量其株高,取平均值。采收时分别收集地上和地下部分,并测量其鲜质量和根长,用水洗的方法取其地下部分,保持其根部的完整性,分别装袋编号,使用根系扫描系统(EPSON Flatbed Scanner)对植物根系进行扫描,并将扫描图片输入电脑分析测定根表面积。后将地上部分放入 80 ℃

烘箱中烘至质量恒定(48 h),测量黑麦草地上部分的干质量。根据获得的不同生物质炭基肥料中生物质炭含量(x)及黑麦草地上部分鲜质量(y)数据,按 $y=ax^2+bx+c$ 模型(a 、 b 、 c 均为参数)进行回归分析,拟合黑麦草地上部分鲜质量与肥料中生物质炭含量的一元二次效应方程。并按最大边际效应求取偏导函数。生物质炭基肥料中生物质炭最佳含量按 $b+2ax=0$ 方程求取,继而预测黑麦草地上部分鲜质量。

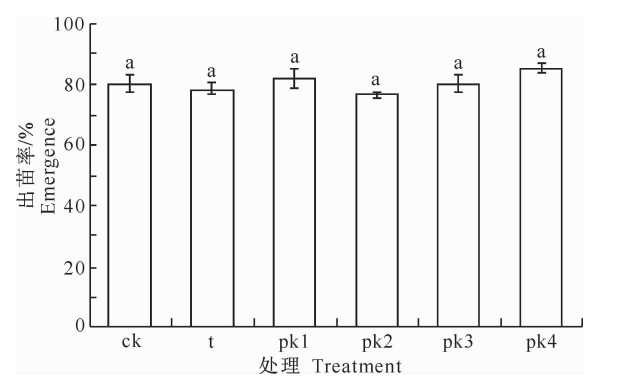
1.5 数据分析

试验数据为 4 次重复的平均值。用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(ANOVA)、最小显著性差异(LSD)分析及模型配比的回归分析,用 Excel 2013 进行统计绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生物质炭基肥料对黑麦草出苗率的影响

黑麦草于 06-20 播种,10 d 之后即 07-01 测各个处理花盆中黑麦草的出苗率,结果见图 1。



图柱上标相同小写字母者表示处理间差异不显著($P>0.05$)
标不同小写字母者表示处理间差异显著($P<0.05$),下图同
Same lowercase letters indicate insignificant differences among
different treatments at $P>0.05$ level,while different lowercase
letters show significant differences among different
treatments at $P<0.05$ level. The same below

图 1 不同生物质炭基肥料对黑麦草出苗率的影响
Fig. 1 Influence of different biochar-based fertilizers on
the emergence of ryegrass

从图 1 可以看出,各处理组之间多花黑麦草的出苗率并不存在显著差异($P>0.05$),出苗率均在 80% 以上。

2.2 不同生物质炭基肥料对黑麦草株高的影响

图 2 表明,在黑麦草生长前期,即 07-20 前(种植 1~30 d),各处理黑麦草株高之间并没有明显差异;生长后期,即播种 30 d 后,生物质炭基肥处理组黑麦草株高比 ck 均有增加,在 07-30(播种后 40 d),pk2 处理黑麦草的株高分别比 ck、t 处理增长 29.18% 和 18.35%,且差异显著($P<0.05$);在 08-

20,pk2 处理黑麦草的株高较 ck 提高了 34.51%,且差异显著($P<0.05$)。在整个生长期,施用不同生物质炭基肥料的黑麦草生长趋势具有相似性,表现为从 07-01—07-30 生长速度较快,之后长势趋于平缓但总体仍呈持续增长的特点。而 ck 处理黑麦草在 07-20 之前生长较快,之后长势平缓,生长后期近乎停滞,且在整个观测期内平均株高显著低于各生物质炭基肥料处理。在施用生物质炭基肥料的处理中,pk2 处理黑麦草长势最好,株高增长最多,肥效最佳。

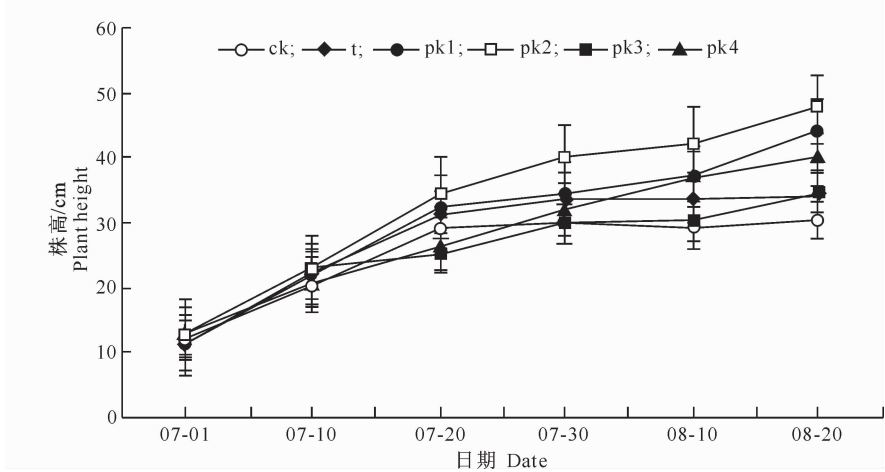


图 2 不同生物质炭基肥料对黑麦草株高的影响

Fig. 2 Influence of different biochar-based fertilizers on ryegrass plant height

2.3 不同生物质炭基肥料对黑麦草根系的影响

由图 3 可以看出,与 ck 和 t 处理相比,施用了生物质炭基肥料的黑麦草根长和根表面积均增加,其中 pk2 处理的根最长,比 ck 和 t 处理的根长分别增加了 40.04%,29.4%,且差异均显著($P<0.05$);

t 处理与 ck,pk1、pk3 与 pk4 处理的根长差异均不显著($P>0.05$)。6 个处理中,pk2 处理黑麦草根表面积最大,达 889.41 mm²,显著高于其他处理,与 ck 相比,提高了 59.86%。

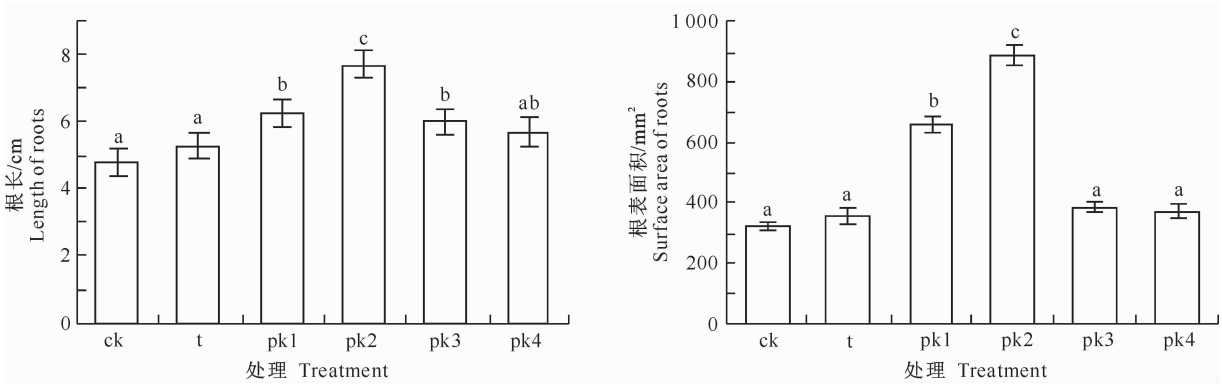


图 3 不同生物质炭基肥料对黑麦草根长及根表面积的影响

Fig. 3 Influence of different biochar-based fertilizers on length and surface area of ryegrass roots

2.4 不同生物质炭基肥料对黑麦草生物量的影响

表 4 显示,与 ck 相比,施用生物质炭及生物质炭基肥料的黑麦草的地上部分鲜、干质量及地下部

分鲜质量均增加,其中 pk2 处理黑麦草地上部分鲜、干质量及地下部分鲜质量均最大,且显著高于其他处理($P<0.05$)。

表 2 不同生物质炭基肥料对黑麦草生物量的影响

Table 2 Influence of different biochar-based fertilizers on ryegrass biomass

g/盆

处理 Treatment	地上部分鲜质量 Aboveground fresh weight	地上部分干质量 Aboveground dry weight	地下部分鲜质量 Underground fresh weight
ck	1.70±0.012 a	0.89±0.006 a	0.52±0.012 a
t	2.30±0.023 c	0.93±0.017 a	0.65±0.006 b
pk1	2.06±0.023 d	1.01±0.012 b	0.58±0.017 d
pk2	2.90±0.006 e	1.65±0.058 c	0.94±0.023 e
pk3	2.56±0.012 d	1.41±0.049 d	0.72±0.017 d
pk4	2.42±0.101 b	1.37±0.063 b	0.65±0.035 c

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters show significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

2.5 肥料中生物质炭含量与黑麦草产量模型的建立

从 6 个处理中选出 4 个生物质炭基肥料处理对黑麦草地上部分鲜质量数据进行拟合,得到的黑麦草地上部分鲜质量(y)与生物质炭基肥料中生物质炭含量(x)的回归方程为:

$$y = -29.714x^2 + 36.602x - 8.2524, R^2 = 0.9847.$$

由拟合结果(图 4)可以看出,拟合曲线呈抛物线形状。对拟合方程进行显著性分析,发现在 $P<0.05$ 情况下差异达到显著水平,且相关系数 R^2 为 0.9847。由 $b+2ax=0$ 方程可知,当生物质炭基肥料中生物质炭最佳含量为 61.60%时,即 31.28 g 生物质炭与 15.00 g 磷酸二氢钾、4.50 g 粘结剂混合时,黑麦草地上部分鲜质量可以达到最大 3.02 g/盆。由拟合曲线所得生物质炭基肥料中的最佳生物质炭含量,与肥料 F2 中生物质炭含量更为接近,符合试验实际情况,可知建立的模型存在实际意义。

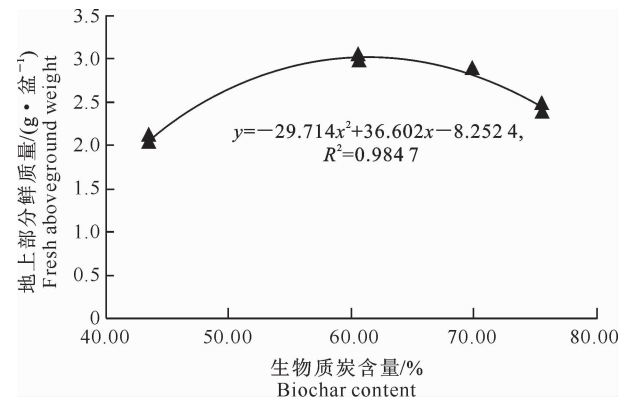


图 4 黑麦草地上部分鲜质量与肥料中生物质炭含量的关系
Fig. 4 Relationship between the fresh aboveground weight of ryegrass and biochar content of fertilizers

3 结论与讨论

本研究将玉米秸秆烧制的生物质炭与常规无机肥料混合造粒制备得到了 4 种生物质炭基肥料,并

采用温室盆栽试验,探究不同生物质炭基肥料对黑麦草生长特性的影响。结果表明,施用不同生物质炭基肥料,对黑麦草的株高、根长、生物量等生长特性都起到了一定的促进作用,但对黑麦草的出苗率无显著影响,这与李程等^[21]的研究结果一致。由于种子中储藏大量有机物和矿质元素,萌发初期可以满足植物生长的需求,不需要从外界获取营养物质,只需适宜的外界条件就能萌发。

本研究中,在 4 种生物质炭基肥料中,当生物质炭、磷酸二氢钾、粘结剂的质量比为 2 : 1 : 0.3 时制备的肥料 F2 肥效显著,对黑麦草的生长促进作用明显。与生物质炭基肥料相比,单独施用生物质炭对黑麦草的生长影响不显著,因此将其与无机肥料配合施用会产生更好的增产效果。本研究中,生物质炭基肥料处理黑麦草的平均株高显著高于 ck,这是由于施用生物质炭基肥料之后,改善了土壤的通透性,为植物生长提供了充足的营养元素,有利于植物对营养元素的吸收和利用,使黑麦草初期能迅速生长,随着营养元素的消耗及根系生长空间的限制,后期黑麦草生长速度相对减小,但由于生物质炭具有大的比表面积及疏松多孔的结构,能吸附无机肥料中的养分离子,减缓其释放速率,延长养分离子的释放时间,故生物质炭基肥料肥效更持久^[22],因而可促进黑麦草生长后期株高持续增长;而 ck 黑麦草株高在生长后期趋于停滞,一方面是由于土壤通透性差、表层容易结皮造成的,另一方面由于营养元素相对缺乏所致。植物体的根部除了为植物生长提供所需的水、无机盐之外,还具有固定土壤、减少地表径流、防治水土流失等作用^[23]。根系越发达,植物的生长状况越好,其改善土壤结构的能力越强、固土效果越好。本研究中,与 ck 相比,施用生物质炭和生物质炭基肥料均可以促进黑麦草根系生长,而生物质炭基肥料的效果总体优于生物质炭,这是由于将生物质炭与无机肥料混合可以弥补生物质炭养分

含量低的缺点,有效促进植物生长。pk1 处理黑麦草的根系生长不如 pk2 处理,可能由于 pk1 中养分含量较高,造成土壤溶液浓度过高,大于植物根系细胞液浓度,导致植物细胞失水,从而使植物根系生长受到了抑制^[24];亦可能由于施肥过多,或偏施某一肥料,破坏了栽培土壤的养分平衡,造成黑麦草植株对其他养分的吸收受阻,进而影响植物体内的代谢过程,降低了植物产量和品质^[25]。t 处理黑麦草地上和地下部分鲜质量较 ck 显著增加,可能是由于施用生物质炭不仅改变了土壤的团粒结构,增加了土壤的孔隙度,降低土壤体积质量,同时增加了土壤田间持水量^[26],从而促进了黑麦草对土壤中水分和养分的吸收,使其地上和地下部分鲜质量明显增加。

本研究中,随着肥料中生物质炭含量的增加,黑麦草地上和地下部分鲜质量均呈现先增加后减小的趋势。拟合结果显示,当生物质炭基肥料中生物质炭含量为 61.60% 时,即 31.28 g 生物质炭与 15.00 g 磷酸二氢钾、4.50 g 羧甲基纤维素钠混合制成的生物质炭基肥料肥效最佳,表明生物质炭含量变化对生物质炭基肥料的肥效性能起着重要的作用。

本研究建立了肥料中的生物质炭含量与黑麦草地上部分鲜质量的拟合模型,预测了肥料中最佳的生物质炭含量,为生物质炭基肥料的制备提供了可行性。本研究拟合出的模型,只将肥料中生物质炭含量作为单一变量因子,其他因子的影响未考虑,因此拟合结果具有一定的局限性和特异性,后续研究应综合其他影响因子进行分析。此外,本研究采用温室盆栽试验进行了分析,对于所制备的生物质炭基肥料的大田应用还有待于进一步研究。

[参考文献]

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.
- [2] 符佩斌,干友民,张洪轩,等. 施肥对高寒草甸产草量和品质的影响 [J]. 草业科学,2015,32(7):1137-1142.
Fu P B, Gan Y M, Zhang H X, et al. Effects of fertilizing on the forage production and quality of alpine grassland [J]. Pratacul-tural Science, 2015, 32(7): 1137-1142.
- [3] 曹国良,张小曳,王亚强,等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算 [J]. 科学通报,2007,52(15):1826-1831.
Cuo G L, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. Estimates of Chinese farmland straw open burning emissions [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [4] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物质炭固碳量的估算 [J]. 农业工程学报,2013,29(14):1-7.
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Ag-ricultural Engineering, 2013, 29(14): 1-7.
- [5] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar a-mendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3): 443-449.
- [6] 张阿凤,潘根兴,李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义 [J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463.
Zhang A F, Pan G X, Li L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2459-2463.
- [7] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemi-cal properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review [J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.
- [8] 陈心想,耿增超. 生物质炭在农业上的应用 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(2):1-8.
Chen X X, Geng Z C. Application of biochar in agriculture [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edi-tion), 2013, 41(2): 1-8.
- [9] 王典,张祥,姜存仓,等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展 [J]. 中国生态农业学报,2012,20(8):963-967.
Wang D, Zhang X, Jiang C C, et al. Biochar research advances regarding soil improvement and crop response [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 963-967.
- [10] 罗煜,陈敏,孟海波,等. 生物质炭之低碳农业 [J]. 中国农学通报,2013,29(26):93-99.
Luo Y, Chen M, Meng H B, et al. The model of low C agricul-ture based upon biochar [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(26): 93-99.
- [11] 姜玉萍,杨晓峰,张兆辉,等. 生物质炭对土壤环境及作物生长影响的研究进展 [J]. 浙江农业学报,2013,25(2):410-415.
Jiang Y P, Yang X F, Zhang Z H, et al. Progress of the effect of biomass charcoal on soil environment and crop growth [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(2): 410-415.
- [12] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物质炭对玉米苗期生长、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 H Z, Huang Y, Liu G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seed-ing stage [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2713-2717.
- [13] Okimori Y, Ogawa M, Takahashi F. Potential of CO₂ emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra [J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2003, 8(3): 261-280.
- [14] 陈琳,乔志刚,李恋卿,等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响 [J]. 生态与农村环境学报,2013,29(5):671-

- 675.
- Chen L, Qiao Z G, Li L Q, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice field and nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671-675.
- [15] 李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(3): 433-440.
- Li D Q, Zhou J S, Pan G X, et al. Effect of biochar-based compound fertilizer on the yield, fruit quality and N use efficiency of vegetables [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(3): 433-440.
- [16] Steiner C, Garcia M, Zech W. Effects of charcoal as slow release nutrient carrier on N-P-K dynamics and soil microbial population Pot experiments with ferralsol substrate [M]// William I W, Wenceslau G T, Johannes L, et al. *Amazonian dark earths (Wim Sombroek's Vision)*. Germany: Springer, 2009: 325-338.
- [17] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395-419.
- [18] 钟雪梅, 朱义年, 刘杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 154-157.
- Zhong X M, Zhu Y N, Liu J, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S1): 154-157.
- [19] 蒋恩臣, 张伟, 秦丽元, 等. 粒状生物质炭基尿素肥料制备及其性能研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(11): 89-94.
- Jiang E C, Zhang W, Qin L Y, et al. Study on preparation of granular biochar-based urea and property [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(11): 89-94.
- [20] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982.
- Liu Y X, Liu W, Wu W X, et al. Environmental behavior and effect of biomass derived black carbon in soil: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [21] 李程, 李小平. 生物质炭对滩涂盐碱土中黑麦草生长的影响初步研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 6844-6848.
- Li C, Li X P. Biochar research on the effect of ryegrass growth in the mudflat saline soil initial [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 6844-6848.
- [22] 高海英, 陈心想, 张雯, 等. 生物质炭和生物质炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 69-78.
- Gao H Y, Chen X X, Zhang W, et al. Physicochemical properties and efficiencies of biochar and biochar-based nitrogenous fertilizer [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 69-78.
- [23] 王文静, 王百田, 吕钊, 等. 复合保水材料对苗木生长的影响 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 1961-1967.
- Wang W J, Wang B T, Lü Z, et al. Effects of superabsorbent polymer composites on tree seedling's growth [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(8): 1961-1967.
- [24] 李凤兰, 高述民. 植物生物学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2008: 128-129.
- Li F L, Gao S M. *Plant physiology* [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2008: 128-129.
- [25] 赵义涛, 姜佰文, 梁运江, 等. 土壤肥科学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 155.
- Zhao Y T, Jiang B W, Liang Y J, et al. *Soil and fertilizer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 155.
- [26] 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 C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2011, 37(4): 439-445.