

烟杆生物炭对砒砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响

魏彬萌^{1,2,3}, 王益权^{1,2,3,4}, 李忠徽⁴

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075;
3. 国土资源部退化及未利用土地整治重点实验室, 西安 710075; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 710021)

摘要: 为明确施用生物炭对砒砂岩与沙复配土壤水分保持及肥力提升的影响, 采用盆栽试验, 研究了不同生物炭施用量(0, 10, 20, 30, 50 g/kg(以风干土计))对砒砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响。结果表明: 在种植玉米一季后, 施用生物炭可显著降低复配土壤容重, 尤其当生物炭施用量达到 30 g/kg 时, 土壤容重可降低至 1.37 g/cm³, 但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时, 土壤容重又出现增加的趋势; 土壤田间持水量随生物炭施用量的增加呈显著增加趋势, 但当施用量增加到 50 g/kg 时又会出现下降趋势; 土壤 pH、全盐量随生物炭添加量的增加显著增加, 尤其当生物炭添加量为 50 g/kg 时, 土壤 pH 可达 8.80, 全盐量可达 2.51 g/kg; 土壤有机质、有效磷、速效钾含量也随生物炭施用量的增加而显著增加, 但有效磷在生物炭施用量增加至 50 g/kg 时出现下降趋势。进一步分析不同生物炭处理对玉米生物量的影响, 发现玉米根干重、地上部分干重、百粒重、单株产量均随生物炭施用量的增加呈显著增加趋势, 但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时, 上述各指标反而显著降低。生物炭对于砒砂岩与沙复配土壤理化性状、水分保持、肥力提升、作物生长及产量等诸多方面都有明显改善效果, 在施用过程中需要注意使用量, 在本试验条件下, 生物炭推荐施用量为 30 g/kg 干土。

关键词: 生物炭; 复配土壤; 土壤理化性状; 生物量

中图分类号: S156.5; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0217-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.032

Influence of Tobacco Biochar on Soil Physic-chemical Properties and Maize Growth in the Soil Compositd with Feldspathic Sandstone and Sand

WEI Binmeng^{1,2,3}, WANG Yiquan^{1,2,3,4}, LI Zhonghui⁴

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075; 2. Institute of Land Engineering Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075;
3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering the Ministry of Land and Resources, Xi'an 710075; 4. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effect of biochar application on the water holding capacity and fertility of the soil composited with feldspathic sandstone and sand. A pot experiment with five treatments [0 g/kg biochar (CK), 10 g/kg biochar (T10), 20 g/kg biochar (T20), 30 g/kg biochar (T30), 50 g/kg biochar (T50)] was conducted over a corn growing season. Results showed that the application of biochar significantly decreased soil bulk density, but it was not a linear relationship between the reduction of soil bulk density and biochar application rates. Specifically, soil bulk density was the minimum with 30 g/kg biochar applied, but 50 g/kg biochar application instead increased soil bulk density. There was a positive correlation between field water capacity and biochar application rates ranging from 0 g/kg to 30 g/kg, but the application of 50 g/kg biochar decreased soil field water capacity. Soil pH, total salt content, organic matter content and available potassium content increased with the increases of biochar application rates. Soil available phosphorus content firstly increased with biochar application rate but then decreased when 50 g/kg biochar was applied. Briefly, soil pH, total salt content were 8.80, 2.51 g/kg respectively with 50 g/kg biochar applied. Furthermore, it was also found that the dry weight of maize roots, the dry weight of maize aboveground part, the 100-grain weight and the yield per plant showed a significant increase with the increases of

收稿日期: 2017-09-11

资助项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目“退化及未利用土地整治创新团队”(2016KCT-23)

第一作者: 魏彬萌(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事土壤物理与改良研究。E-mail: weibinmeng@126.com

通信作者: 王益权(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理及改良研究。E-mail: 442516031@qq.com

biomass application rates ranging from 0 g/kg to 30 g/kg, but the application of 50 g/kg biochar decreased these biomass indexes significantly. Overall, the application of biochar could improve soil physicochemical properties and fertility and the growth and yield of maize, but the effect would be lowered when biochar application rate is more than 30 g/kg. Accordingly, the recommended biochar application rate is 30 g/kg to improve soil quality and crop yield under the present experimental conditions.

Keywords: biochar; composited soil; soil physic-chemical properties; maize biomass

毛乌素沙地生态环境脆弱,土壤养分贫瘠,持水性差,加上人为不合理的农垦及过度放牧,加剧了草地退化^[1],导致该区长期以来难以作为耕地后备资源进行有效利用^[2]。虽然采用封沙育草、育林,生态水利修复等土壤防侵蚀措施对该区域进行综合治理,但未能从根本上遏制该区荒漠化发展的趋势^[3-4]。该区除风沙土外,还广泛分布着被当地人俗称“环境癌症”的砒砂岩,其成岩程度和结构强度都很低,易风化,渗透性能差,主要养分欠缺,具有“干时坚如磐石,遇水却烂如泥”的形态特征,植被一般很难生长^[5]。然而基于砒砂岩具有一定的持水和保水能力^[6],韩霁昌等^[7]、柴苗苗等^[8]学者利用砒砂岩和风沙土性质上的互补性,将两者按一定的比例复配改良,这样既可以减少或阻止沙地水分渗漏,提升土壤保肥能力,又可减弱砒砂岩固结板结现象,达到治理沙地和改良砒砂岩的目的。目前,多数研究已将砒砂岩与沙按照 1:2 的比例复配,其土壤结构相对最稳定,土壤保水保肥及透气性最好,但该复配土壤仍处于成土初期,土壤结构和保水保肥能力整体偏低^[9],希望能寻求更好的方法加以改善与提高。

将农作物秸秆、木质物质、禽畜粪便等在限氧、密闭环境中经过高温热解形成的生物炭是一类富含碳素、性质稳定且具有不同程度芳构化的固态物质^[10],其具有较大的比表面积、高度发达的孔隙结构及较强的离子吸附与交换能力^[11],将其作为一种新型土壤改良剂施入土壤,不仅能够降低土壤容重^[12],增大土壤孔隙度,改善土壤结构,而且能够提高土壤有机质含量^[13],增加土壤固碳能力及农作物产量等^[14]。基于上述研究现状与获得的成果,可以推测施用生物炭可实现对砒砂岩与沙复配土壤结构及肥力水平的再提升,但目前很少有人对该问题开展研究。因此,本试验通过向复配土壤中施入不同量的生物炭,研究其对复配土壤理化性状的影响,以期探究适合复配土壤肥力效应及获得可持续提升的最佳生物炭施用量,为复配土壤的性质与功能改善、水资源高效利用及植物养分保障提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2016 年 6—10 月在渭北旱塬富平县陕西地

建土地工程技术研究院富平中试基地进行。供试土壤为砒砂岩与风沙土按体积比 1:2 复配的土壤,其沙粒含量 59.81%,粉粒含量 35.85%,黏粒含量 4.33%,砒砂岩和风沙土均取自毛乌素沙地东南部榆林市榆阳区小纪汗乡大纪汗村。生物炭购自陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司,是以烟杆为原料烧制而成,其基本理化性状为:2~0.02 mm 的颗粒组成占 89.53%,0.02~0.002 mm 的颗粒组成占 8.73%,<0.002 mm 的颗粒组成占 1.74%,pH 10.43,比表面积 86.70 m²/g,全 C 含量 723.8 g/kg,全 N 含量 11.9 g/kg,速效 P 含量 387.8 mg/kg,速效 K 含量 1 023.1 mg/kg。

1.2 试验设计

本研究采用了生物盆栽试验的方法,设置了 5 个生物炭施用水平,分别为 0 g/kg (CK),10 g/kg (T10),20 g/kg (T20),30 g/kg (T30),50 g/kg (T50) (以风干土计)。于 2016 年 6 月 15 日将砒砂岩与沙复配土壤与生物炭按设置量充分混合均匀,每盆装 15 kg,适度压实。各处理重复 6 次,共计 30 个盆。在播种作物前以基肥形式施入,每盆拌施氮肥(N)3 g、磷肥(P₂O₅)2 g、钾肥(K₂O)3 g。每盆点播玉米种子 3 粒,待出苗后每盆只选择留其中 1 株生长健壮的苗。全生育期内盆栽放置于日光温室内,根据玉米生长情况,用差重法将含水量维持在土壤田间持水量的 60%~100%,适时浇灌,各处理其他管理措施与水平均保持一致。

1.3 样品采集与测定

土壤样品于 2016 年 10 月 10 日玉米成熟收获后采集。在每个盆内先用体积 100 cm³ 的环刀采集 2 个原状土壤样品,分别用于容重和田间持水量的测定;再用直径 2 cm 的小土钻取扰动土样,每盆各取 6 钻,作为混合土样,经风干、研磨,再分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于土壤相关化学指标的测定。

土壤容重采用环刀法^[15]测定;饱和导水率采用威尔科克斯法^[15]测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法—外加热法^[16]测定;pH 采用 DELTA 320 pH 计测定(水土比为 1:1)^[15];全盐含量采用残渣烘干法(水土比 1:1 浸提)^[15];有效磷含量采用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[15];速效钾含量采用 1 mol/L 的醋酸铵提取—火焰光度计法^[15]测定。

根干重和地上部分干重:在玉米成熟后,将玉米根系与玉米地上部分晒干,然后分别装入布袋内,放入烘箱,在 105 ℃ 下杀青 1~2 h,80 ℃ 恒温烘干至恒重,用电子天平称取干重,记录相应的重量;百粒重和单株产量的测定是在玉米成熟后,将玉米单株籽粒烘干,用电子天平称取干重,记录相应的重量。

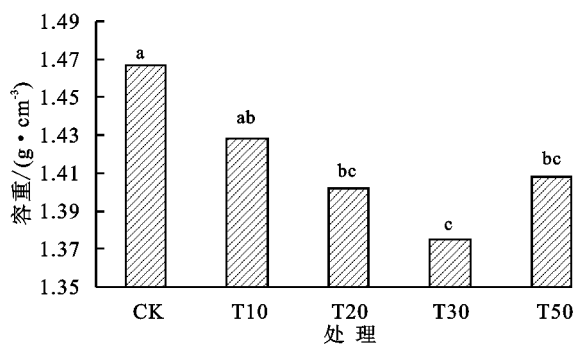
1.4 数据处理

试验数据均采用 Excel 2007 进行统计分析,采用 SPSS 19.0 对数据进行 LSD_{0.05} 差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤物理性质的影响

2.1.1 生物炭对土壤容重的影响 土壤容重是表征土壤松紧状况的指标,是影响作物根系发育的重要因素之一,土壤容重降低一般表明土壤结构得到改善^[17]。由图 1 可以看出,随着生物炭施用量的增加,复配土壤容重明显降低,尤其当生物炭施用量达到 30 g/kg 时,土壤容重可降低至 1.37 g/cm³,但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时,土壤容重反而出现增加趋势,主要是因为生物炭具有多孔性,自身密度较低,其容重远低于矿质土壤,而且生物炭又可显著提高土壤微生物量,进而使土壤生物活性和“团聚性”增强^[18],从而会使复配土壤容重降低。但是当生物炭用量过多时,由于其本身颗粒细小,过量的生物炭填充了土壤孔隙,又可使土壤孔隙堵塞,使土壤容重增加^[19]。Eastman^[20]在粉砂土壤上施用 25 g/kg 的生物炭,土壤容重从 1.52 g/cm³ 降低到 1.33 g/cm³。因此,适量施用生物炭可有效降低土壤容重,有助于改善土壤通气状况和增大土壤水分入渗速率,改良土壤结构性能。



注:图中不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同生物炭处理对复配土壤容重的影响

2.1.2 生物炭对土壤田间持水量的影响 田间持水量是度量土壤稳定保持的最高土壤含水量,是作物有效水的上限^[21]。由图 2 可以看出,随着生物炭施用量的增加,复配土壤的田间持水量呈显著增加趋势。相比 CK, T10、T20、T30、T50 处理复配土壤的田间持水量分别增加了 9.27%, 22.58%, 32.10% 和

23.06%, 主要是因为一方面生物炭属多孔性材料,具有巨大的比表面积,尤其孔隙度的递增使土壤持水力显著增加;另一方面施入生物炭可使土壤微生物群落和土壤整体的吸附能力增加,进而提高土壤的保水性能^[22];而且复配土壤中加入生物炭后,使土壤的全盐含量增加 0.71~2.27 倍(图 3b),盐分含量的增加会使土壤吸湿能力增强,从而增强土壤对水分的吸持能力^[23]。本研究还发现,当生物炭用量增加到 50 g/kg 时,复配土壤田间持水量会出现下降趋势,这与过量施用生物炭到 50 g/kg 时复配土壤容重增加有直接关系(图 1)。Dugan 等^[24]认为,由于生物炭表面普遍具有斥水性,当其添加量增加时,水分排斥效应会明显表现出来;高海英等^[25]利用木炭和竹炭研究了 4 种添加量对土壤持水能力的影响,发现土壤含水量随生物炭施用量的增加而增大,但当添加量达到 80 t/hm² 时,又出现下降趋势。另外,生物炭对土壤水分的影响也与土壤本身的性质有关,Tryon^[26]在沙土中加入生物炭会增加 18% 的土壤有效水,然而在肥沃的土壤中没有观察到这种现象,并且在黏质土壤中有效水含量随生物炭的加入而减少。

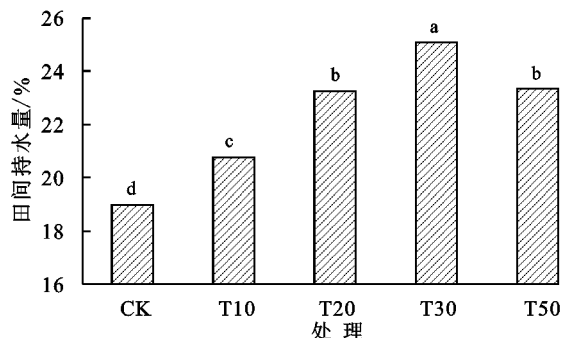


图 2 不同生物炭处理对复配土壤田间持水量的影响

2.2 生物炭对土壤化学性质的影响

2.2.1 生物炭对土壤 pH 和全盐量的影响 由图 3 可以看出,复配土壤 pH 和全盐量随生物炭施用量的增加而显著增加, T10、T20、T30、T50 处理与 CK 相比,土壤 pH 分别增加了 0.15、0.23、0.32、0.59 个 pH 单位;全盐量分别增加了 0.71、1.37、1.71、2.27 倍。当生物炭添加量为 50 g/kg 时,土壤 pH 为 8.80,全盐量为 2.51 g/kg,主要是因为生物炭本身的 pH 较高,达到 10.43,且生物炭灰分中含有不同浓度的碱性物质,施入土壤后会导致土壤 pH 和全盐量的快速提高^[27]。土壤 pH 和盐分提高过多,会使作物生长受到一定的抑制。

2.2.2 生物炭对土壤有机质含量的影响 复配土壤最大的缺陷是有机质缺乏,生物活性差,因此快速提升土壤有机质含量显得尤为重要。由图 4 可以看出,在玉米一个生长季后,施用生物炭的复配土壤有机质含量显著提升,且随生物炭施用量的增加,复配土壤有机质含量递增。与 CK 相比, T10、T20、T30、T50

处理土壤有机质含量分别增加了 1.86,3.78,5.39,7.98 倍,主要是因为一方面生物炭本身含碳量高,且具有高度羧酸酯化和芳构化结构,表现出高度的化学稳定性,施入土壤能够提高土壤有机质含量^[28];另一方面,生物炭能够促进土壤有机—矿质复合体的形成,提高了土壤团聚体稳定性,对土壤新增有机碳具有物理保护作用,从而减少了有机质的流失^[29];同时被包裹或吸附在生物炭孔隙及有机—矿质复合体中的微生物生长繁殖及活性减弱,也可导致土壤有机质

增加^[30]。Ameloot 等^[31]的研究发现施用木本生物炭 49 t/hm² 能使土壤有机碳含量提高 115%;Kimetu 等^[32]发现生物炭的碳损失远低于绿肥,且其稳定性大于绿肥类易分解有机物,加入生物炭的土壤有机碳矿化量减少,可使已存在的有机碳稳定性提升;Matovic^[33]的研究表明,1 hm² 土地施用 13.5 t 的生物炭(3%),可以成为持续两个世纪的碳库,且能够增加土壤肥力和保持上千年的化学稳定性,可见复配土壤施用生物炭具有极其重要的作用。

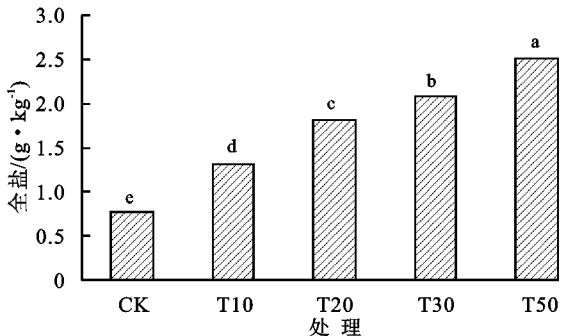
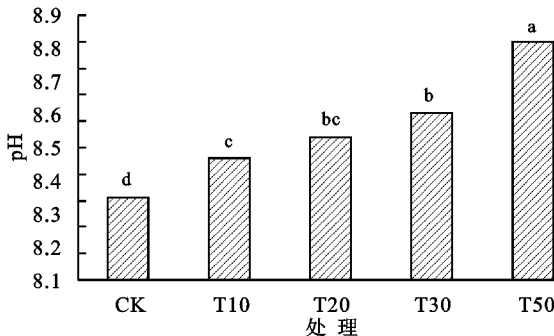


图 3 不同生物炭处理对复配土壤 pH、全盐量的影响

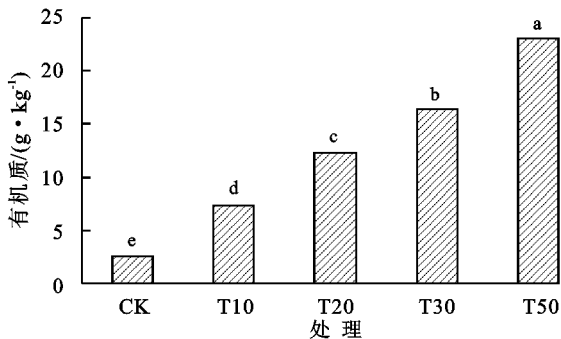


图 4 不同生物炭处理对复配土壤有机质含量的影响

2.2.3 生物炭对土壤有效磷和速效钾含量的影响
由图 5 可以看出,添加生物炭会使复配土壤有效磷和速效钾含量显著增加。相比 CK 处理,T10、T20、T30、T50 处理土壤有效磷含量分别增加了 0.53,1.17,

1.63,1.43 倍,速效钾含量分别增加了 0.40,0.97,1.27,1.64 倍,主要是因为一方面生物炭本身含有较高的磷元素和钾元素,并且有效性较高;另一方面生物炭表面具有丰富的官能团和较大的比表面积,提高了土壤阳离子交换量,吸附更多的养分离子,避免养分流失,有效提高土壤肥力和肥料利用效率^[34]。吕一甲等^[28]的研究发现生物炭的施用,可使内蒙古河套灌区耕层土壤有效磷和速效钾含量均有显著提高。本试验还发现,当生物炭的添加量增加至 50 g/kg 时,复配土壤有效磷含量出现下降趋势,可能是因为生物炭增加了复配土壤 0.15~0.59 个单位的 pH,影响土壤中磷的吸附和解吸^[35],从而使磷的活性降低。

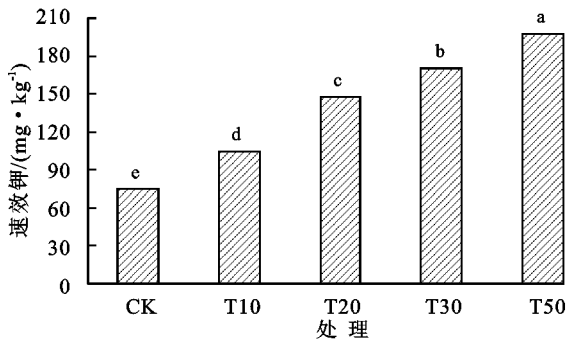
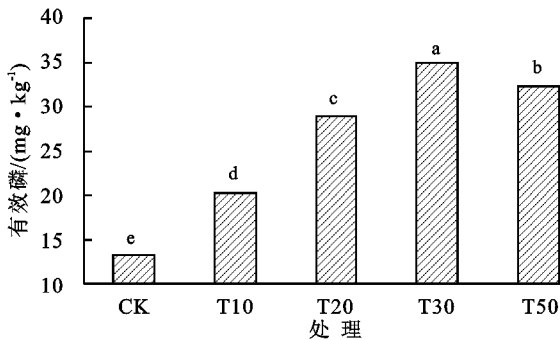


图 5 不同生物炭处理对复配土壤有效磷和速效钾含量的影响

2.3 生物炭对玉米生物量的影响

从表 1 可以看出,玉米根干重、地上部分干重、百粒重、单株产量均随生物炭施用量的增加而显著增加,但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时,各指标均明显降低。说明过量施加生物炭会抑制玉米的根干重、地上部分干

重、百粒重及单株产量,可能是因为生物炭施用过多时会使土壤孔隙被密实,土壤田间持水量降低,pH 和全盐量增加过多,导致植物生长受阻;另外,高温制备的生物炭会富集一些有毒有害物质,如焦油、树脂、多环芳烃和重金属等,这些物质也会抑制植物生长,且会对土

壤环境产生威胁^[36]。Baronti 等^[37]进行的砂壤土盆栽试验,结果也表明生物炭施用量为 30,60 t/hm²时,黑麦草的生物量分别较对照增加了 20%和 52%,但继续增加生物炭施用量到 100,200 t/hm²时,其生物量反而较对照降低 8%和 30%。

表 1 不同生物炭处理对玉米生物量的影响

处理	单位:g			
	根干重	地上部分干重	百粒重	单株产量
CK	25.67d	99.25d	26.32d	108.13d
T10	26.65c	103.34c	29.32c	122.13c
T20	28.32b	107.65ab	30.64b	136.78b
T30	29.42a	109.44a	31.49a	147.35a
T50	25.21d	100.89d	26.12d	107.67d

注:同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

3 结论

在砒砂岩与风沙土按 1:2 复配的土壤上施加生物炭,在种植玉米一季后可显著降低复配土壤容重,尤其当生物炭施用量达到 30 g/kg 时,土壤容重可降低至 1.37 g/cm³,但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时,土壤容重会出现增加的趋势。土壤田间持水量、pH、全盐量、有机质、有效磷、速效钾含量基本随生物炭施用量的增加而显著增加,只有在生物炭施用量增加到 50 g/kg 时,其田间持水量和有效磷含量会出现下降趋势。可见适量施用生物炭对于砒砂岩与沙复配土壤容重降低、水分保持及肥力提升方面都有较好的效果。进一步分析不同生物炭处理对玉米生物量的影响,发现玉米根干重、地上部分干重、百粒重、单株产量均随生物炭施用量的增加而显著增加,但当生物炭施用量增加到 50 g/kg 时各指标均明显降低。因此,在本试验条件下,建议生物炭施用量提高到 30 g/kg 干土时效果最好。

总之,合理使用生物炭,利用其独特的物理、化学性质对于砒砂岩与沙复配土壤降低土壤容重、保持土壤水分及提升土壤肥力方面都有较好的效果。但该试验结果源于盆栽试验,与大田实际情况有所差异,再加之不同种类生物炭的应用效果可能会对试验结果产生影响,因此还需进一步进行研究。

参考文献:

[1] 张露,韩霁昌,王欢元,等. 砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J]. 中国水土保持科学,2015,13(2):45-49.

[2] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学,2012,26(8):88-94.

[3] 高国雄. 毛乌素沙地能源开发对植被与环境的影响[J]. 水土保持通报,2005,25(2):106-109.

[4] 李娟,韩霁昌,张卫华,等. 砒砂岩与沙复配土壤的物理

性状和相关光谱特性[J]. 麦类作物学报,2015,35(3):394-401.

[5] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报,2015,52(1):77-86.

[6] 张卫华,韩霁昌,王欢元,等. 砒砂岩对毛乌素沙地风成沙的改良应用研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):123-127.

[7] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学,2012,26(8):87-94.

[8] 柴苗苗,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(10):180-182.

[9] 曹婷婷,孙婴婴,吴林川. 砒砂岩与沙复配土体的植物营养保障措施研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究),2017,2(5):36-39.

[10] 王欣,尹带霞,张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报,2015,31(4):248-257.

[11] 张祥,王典,姜存仓,等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(8):979-984.

[12] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. Archives of Agronomy and Soil Science,2014,60(4):457-470.

[13] Kimetu 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):577-585.

[14] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等. 生物炭对中性水稻土养分和微生物群落结构影响的时间尺度变化研究[J]. 农业环境科学学报,2016,35(4):719-728.

[15] 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):120-190.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2011.

[17] 魏彬萌,王益权. 渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(3):694-701.

[18] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry,2010,41:206-213.

[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.

[20] Eastman C M. Soil physical characteristics of an aericochraqualf amended with biochar[D]. Columbus: The Ohio State University, 2011.

[21] 江培福,雷廷武,刘晓辉,等. 用毛细吸渗原理快速测量

- 土壤田间持水量的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 1-5.
- [22] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [23] 潘金华, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 生物炭添加对皖南旱地土壤物理性质及水分特征的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 320-326.
- [24] Dugan E, Verhoef 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 solutions for a changing world. Brisbane, Australia, 2010: 9-12.
- [25] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- [26] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1): 81-115.
- [27] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476.
- [28] 吕一甲, 屈忠义. 生物炭肥料对河套灌区耕层土壤肥力及含水率影响的研究[J]. 节水灌溉, 2015(3): 18-21.
- [29] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7): 669-678.
- [30] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206-213.
- [31] Ameloot N, Sleutel S, Case S D C, et al. C mineralization and microbial activity in four biochar field experiments several years after incorporation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 78: 195-203.
- [32] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 577-585.
- [33] Matovic D. Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective[J]. Energy, 2011, 36(4): 2011-2016.
- [34] Enders A, Hanley K, Whitman T, et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 644-653.
- [35] Parvage M, Ulén B, Eriksson J, et al. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(2): 245-250.
- [36] Raveendran K, Ganesh A, Khilar K C, et al. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics[J]. Fuel, 1995, 74(12): 1812-1822.
- [37] Baronti S, Alberti G, Genesio. Effects on soil fertility and on crops production 2nd International Biochar Conference IBI September 8-10 [C]// Newcastle-Gateshead. UK, 2008.
- (上接第 197 页)
- [19] Borken W, Ahrens B, Schulz C, et al. Site to site variability and temporal trends of DOC concentrations and fluxes in temperate forest soils[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2428-2443.
- [20] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 557-563.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 1-638.
- [22] Gu B, Schmitt J, Chen Z, et al. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: Mechanisms and models [J]. Environmental Science and Technology, 1994, 28(1): 38-46.
- [23] 熊丽, 杨玉盛, 朱锦懋, 等. 可溶性有机碳在米槠天然林不同土层中的迁移特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5711-5720.
- [24] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, et al. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1319-1331.
- [25] Miltner A, Zech W. Carbohydrate decomposition in beech litter as influenced by aluminium, iron and manganese oxides[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(1): 1-7.