

朱 倩,严陶韬,周之栋,等.施用生物炭对喀斯特石灰土特性及刺槐幼苗生长的影响[J].江苏农业科学,2018,46(3):241-245.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.03.061

施用生物炭对喀斯特石灰土特性 及刺槐幼苗生长的影响

朱 倩,严陶韬,周之栋,孙嘉曼,薛建辉,吴永波

(江苏省南方现代林业协同创新中心/南京林业大学生物与环境学院,江苏南京 210037)

摘要:生物炭作为一种新型土壤改良剂近年来备受关注,通过施用生物炭以期改善喀斯特山地土壤团聚体结构、增加土壤保水保肥性,从而提高造林成活率和幼苗生长。采用盆栽试验方法研究生物炭及其添加量对喀斯特石灰土土壤特性及刺槐幼苗生长的影响。3 种供试生物炭为稻壳炭、棉花秸秆炭和木炭,添加比例均为 1.0%、2.5%、5.0%、10.0% (炭土质量比)。结果表明:3 种生物炭处理后,石灰土容重均随施用量增加而呈降低趋势,其中木炭降低土壤容重效应最明显;施用生物炭对土壤水稳性团聚体粒径分布影响显著,木炭在 2.5% 施用量下对土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体比例增加效应最明显;土壤团聚体平均质量直径 (mean weight diameter, MWD) 和几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 均在生物炭中等施用量 (2.5%、5.0%) 下达到最大值。木炭和稻壳炭对 MWD 值增加作用较强,木炭对 GMD 值增加效应最强;3 种生物炭均在 5.0% 施用量下对土壤水分特性改善作用最明显,其中木炭对土壤持水性改善作用较好,秸秆炭对土壤入渗性的改善作用较好;3 种生物炭施用后均能提高盆栽刺槐幼苗的生长量。说明生物炭能够改良喀斯特石灰土土壤、促进植物幼苗生长,其中木炭在中等施用量 (2.5%、5.0%) 下作用更好。

关键词:生物炭;喀斯特石灰土;土壤特性;团聚体;土壤水分;刺槐;幼苗生长;直径;土壤改良;造林成活率

中图分类号: S792.270.1; S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)03-0241-05

近年来,有关生物炭作为农田土壤改良剂或肥料缓释载体的研究受到广泛关注。生物炭是指在低温 (300 ~ 700 °C) 缺氧条件下生物质裂解产生的一种具有高度芳香化、富含碳素的固体颗粒物质^[1-2]。生物炭具有孔隙多、比表面积大、吸附力强等特性,施入土壤后可改善土壤保水特性,并减少养分淋失。有研究表明,施用生物炭可在一定程度上降低土壤容重,且随着施用量的提高,容重降低效应更明显^[3-4]。生物炭在土壤中一般不是以自由有机质形式存在,而是与土壤中其他形态有机物质、矿物、微生物等相互作用,从而增强土壤团聚体的形成和稳定性,且生物炭的缓慢氧化过程使得生物炭作用下形成的团聚体更稳固长久^[5]。生物炭对土壤团聚体稳定性的影响因生物炭种类、施用量及土壤类型而异^[6-8]。Hua 等的研究结果表明,8% 玉米秸秆生物炭添加可显著增加土壤团聚体的稳定性^[6];Peng 等研究报道,施用 1% 水稻秸秆生物炭对土壤团聚体的稳定性无影响^[8];而 Bussher 等研究结果表明,核桃壳生物炭处理可降低沿海壤土的土壤团聚体稳定性^[7]。另外,生物炭在炭化过程中形成的多孔结构对土壤的水分状况也会产生显著影响。有许多研究表明,施用生物炭对土壤渗透性的影响主要与生物炭类型和土壤质地有

关^[9-13]。Barnes 等研究表明,在生物炭施用量相同的条件下,不同质地土壤中的土壤饱和导水率存在差异,与对照相比,土壤饱和导水率在沙土和有机土中分别降低 92%、62%,而在黏土中反而增加了 328%^[14]。

贵州喀斯特地区长期受自然和人为因素的影响,出现了严重的水土流失和石漠化,导致该地区土壤瘠薄,土壤质地结构差,保水保肥能力低,造林初期苗木生长速度慢、存活率低,从而增加了退化山地植被恢复的难度。因此,对喀斯特山地土壤进行改良,以促进造林初期幼苗生长的速度,形成稳定的森林群落,成为喀斯特山地植被恢复亟待解决的问题。目前相关研究主要集中在提高喀斯特石灰土土壤质量、植被恢复技术和抗旱树种筛选等^[15-19]方面。本试验以期利用生物炭的保水保肥性能来改善喀斯特土壤蓄水保肥能力差的特性,利用生物炭有机胶结剂的特性来增加土壤团聚体结构及稳定性并改善土壤孔隙结构,从而缓解其水土流失严重的问题。本研究以喀斯特山地石灰土为研究对象,探讨 3 种原料生物炭的不同施用量 (炭土质量比为 1.0%、2.5%、5.0%、10.0%) 对土壤团聚体结构和水分特性的影响,为石漠化山地森林植被恢复中采取有效的土壤改良措施、提高造林成活率和幼苗生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与生物炭

供试土壤采自贵州省普定县白岩镇 (105° 50' E、23° 16' N),属于典型的喀斯特地区,风干过 2 mm 筛后备用,基本理化性质为:pH 值 7.79,容重 0.95 g/cm³,有机质含量 4.30%,碱解氮含量 65.81 mg/kg,有效磷含量 50.00 mg/kg,

收稿日期:2017-06-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划 (编号:2016YFC0502605);国家林业局“948”项目;国家科技支撑计划 (编号:2015BAD07B0404);江苏高校优势学科建设工程。

作者简介:朱 倩 (1992—),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail:1029849067@qq.com。

通信作者:薛建辉,博士,教授,主要从事森林生态及林业生态工程研究。E-mail:jhxue@njfu.com.cn。

有效钾含量 166.61 mg/kg,田间持水量 28.91%。供试生物炭为稻壳炭(RHB)、棉花秸秆炭(CSB)和木炭(WCB),购于安徽拜尔福生物科技有限公司,经粉碎过 2 mm 筛后备用,3 种原料生物炭的基本特性见表 1。

表 1 供试生物炭的基本性质

生物炭种类	pH 值	灰分含量 (%)	总碳含量 (%)	总氮含量 (%)	有效磷含量 (g/kg)	有效钾含量 (g/kg)	比表面积 (m ² /g)
稻壳炭	9.41	13.52	46.31	0.62	21.31	2.54	91.45
秸秆炭	7.98	29.53	50.12	0.83	51.22	2.46	757.59
木炭	8.89	63.55	58.94	1.31	53.52	2.69	380.83

1.2 试验设计

试验地点位于南京林业大学下蜀林场,于 2015 年 2—10 月进行盆栽试验。试验共设 13 个处理,分别为:不添加生物炭(CK),3 种生物炭按炭土质量比 1.0%、2.5%、5.0%、10.0% 添加,每个处理 3 次重复。将过筛后的生物炭与土壤按比例混匀,装入塑料盆中(上径 18 cm、下径 15 cm、高 20 cm),装炭土混合物 3 kg/盆,播种 3 粒/盆灭菌、催芽后的刺槐种子。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤特性的测定 在施用生物炭后 240 d,采集盆栽土壤表土层多点混合土样,每个处理重复 3 次。各指标均采用常规方法测定^[20];每个盆栽中用不锈钢环刀采集原状土测定土壤容重,土壤容重采用烘干法测定;土壤毛管持水量和饱和导水率采用环刀法测定;水稳性团聚体采用湿筛法测定。

土壤毛管持水量 = 环刀内水分质量/环刀内干土质量 × 100%。土壤饱和导水率测定:将环刀取得原状土样带回室内浸水饱和 24 h,然后其上放置空环刀并持续加水,2 h 后判断单位时间渗水量稳定时为止,记录数据,并按以下公式计算:

$$K_{10} = \frac{QL}{AtH} \times \frac{1}{0.7 + 0.03T^{\circ}}$$

式中:K₁₀ 为土壤 10 ℃ 下饱和导水率,mm/min;Q 为渗透量,mL;L 为土样高度,cm;A 为渗透横截面积,cm²;t 为渗透时间,h;H 为水头高度,cm;T 为实测水温,℃。

水稳性团聚体测定中团聚体分析仪设定为 30 r/min,持续 10 min,所测团聚体粒径分别为 > 2.000 mm、2.000 ~ 0.250 mm、0.250 ~ 0.053 mm、< 0.053 mm。团聚体的稳定性采用平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)来描述,分别按以下公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i;$$
$$GMD = \exp\left(\frac{\sum w_i \ln x_i}{\sum w_i}\right)。$$

式中:x_i 表示筛出来的任意粒径范围团聚体的平均质量直径;w_i 表示筛出来的任意粒径团聚体的质量占土壤样品干质量的比例。

1.3.2 幼苗生长特性的测定 用卷尺和游标卡尺测定处理 240 d 后刺槐幼苗的株高、地径,并采集植株鲜样用保温箱带回实验室内,在 105 ℃ 干燥箱中先烘干 30 min,再调至 80 ℃ 下烘干至恒质量,测得刺槐幼苗单株生物量,每个处理测定 3 株刺槐幼苗。

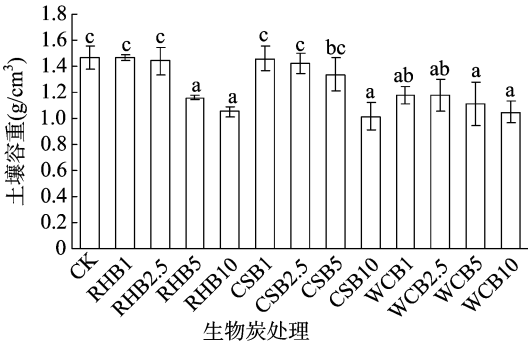
1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel 12.0 进行统计分析、作图,对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对土壤特性的影响

2.1.1 土壤容重 由图 1 可知,随生物炭施用量的增加,土壤容重均呈下降趋势,变幅为 8.83% ~ 30.78%,生物炭施用量(5.0%、10.0%)较高时,土壤容重基本显著降低(P < 0.05)。WCB 各处理的土壤容重与 CK 相比差异显著,且与 RHB 和 CSB 相比对土壤容重的降低效果更明显。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05);下同
图1 不同原料生物炭处理对土壤容重的影响

2.1.2 土壤水稳性团聚体

2.1.2.1 土壤水稳性团聚体粒径分布 由表 2 可知,施用生物炭大多可提高大团聚体(≥0.250 mm)含量,并降低微团聚体(<0.250 mm)含量。生物炭中等施用量(2.5%、5.0%)水平对土壤水稳性大团聚体含量增加效果达显著水平(P < 0.05),相比 CK 可提高 37.30% ~ 57.00%,且 WCB 作用更明显。除了 CSB 外,2 种生物炭对提高 > 2.000 mm 及 2.000 ~ 0.250 mm 土壤团聚体含量的幅度也呈增加趋势。

2.1.2.2 土壤水稳性团聚体稳定性 由图 2 可看出,除 1.0% 生物炭施用量各处理的土壤 MWD 值与 CK 相比无显著差异外,其他各处理的 MWD 值均显著大于 CK,且在中等施用量(2.5%、5.0%)下增加值更高。其中,RHB2.5、CSB2.5、WCB2.5、RHB5、CSB5、WCB5 比 CK 分别提高 45.80%、29.22%、43.12%、40.38%、28.76%、38.34%。因此,RHB 和 WCB 对土壤 MWD 值增加效应更明显。同样,中等生物炭施用水水平(2.5%、5.0%)对土壤 GMD 值增加更明显。其中,RHB2.5、CSB2.5、WCB2.5、RHB5、CSB5、WCB5 比 CK 分别提高 87.23%、58.57%、106.43%、79.64%、56.76%、77.16%。可见,WCB 对土壤 GMD 值增强作用最明显(图 3)。

2.1.3 土壤水分特性

2.1.3.1 土壤毛管持水量 由图 4 可看出,除 RHB1、CSB1 处理的土壤毛管持水量与 CK 相比有所下降外,其他各处理

表 2 施用生物炭对土壤水稳性团聚体粒径分布的影响

生物炭处理类型	土壤大团聚体的含量(%)			土壤微团聚体的含量(%)		
	>2.000 mm	2.000~0.250 mm	≥0.250 mm 总和	0.250~0.053 mm	<0.053 mm	<0.250 mm 总和
CK	7.48 ± 0.41ab	45.31 ± 1.77a	52.80 ± 1.36a	32.08 ± 0.34c	15.12 ± 1.02cde	47.21 ± 1.36e
RHB1	5.51 ± 1.78a	48.52 ± 2.38a	54.03 ± 2.09a	25.28 ± 5.30c	20.69 ± 5.08f	45.97 ± 2.09e
RHB2.5	13.13 ± 2.63d	65.97 ± 4.01c	79.10 ± 1.39de	6.76 ± 0.42a	14.14 ± 1.81bcd	20.90 ± 1.39ab
RHB5	11.96 ± 0.37d	64.55 ± 4.24c	76.51 ± 4.62de	12.82 ± 4.54ab	10.68 ± 0.08ab	23.49 ± 4.62ab
RHB10	8.78 ± 0.11b	64.31 ± 1.19c	73.08 ± 1.30cd	15.45 ± 0.22b	11.47 ± 1.08bc	26.92 ± 1.30bc
CSB1	6.42 ± 0.22a	46.99 ± 1.53a	53.41 ± 1.75a	30.62 ± 1.80c	15.97 ± 0.04de	46.59 ± 1.75e
CSB2.5	8.65 ± 0.88b	64.41 ± 1.18c	73.06 ± 0.30cd	13.28 ± 0.04ab	13.66 ± 0.26bcd	26.94 ± 0.3bc
CSB5	8.87 ± 0.94b	63.62 ± 5.77bc	72.49 ± 6.71cd	12.33 ± 5.44ab	15.19 ± 1.27cde	27.51 ± 6.71bc
CSB10	8.53 ± 0.02b	59.07 ± 2.53bc	67.60 ± 2.51bc	13.82 ± 3.36ab	18.58 ± 0.85ef	32.4 ± 2.51cd
WCB1	5.79 ± 0.55a	56.73 ± 5.36b	62.52 ± 4.81b	27.52 ± 5.83c	9.96 ± 1.02ab	37.48 ± 4.81d
WCB2.5	8.82 ± 1.32b	74.07 ± 2.17d	82.89 ± 3.49e	10.36 ± 1.82ab	6.75 ± 5.31a	17.11 ± 3.49a
WCB5	11.26 ± 1.33cd	64.75 ± 5.50c	76.01 ± 6.83de	12.76 ± 5.05ab	11.23 ± 1.78bc	23.99 ± 6.83ab
WCB10	9.35 ± 1.34bc	66.08 ± 7.82c	75.44 ± 6.48d	11.72 ± 7.87ab	12.84 ± 1.38bcd	24.57 ± 6.48b

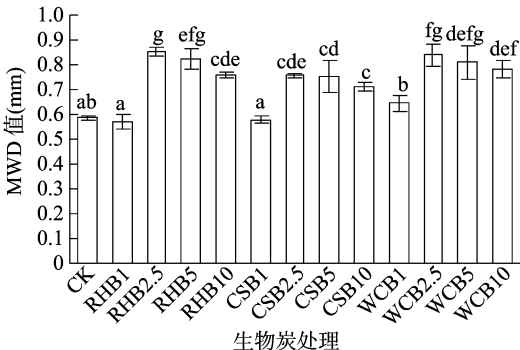


图2 施用生物炭对土壤水稳性团聚体 MWD 值的影响

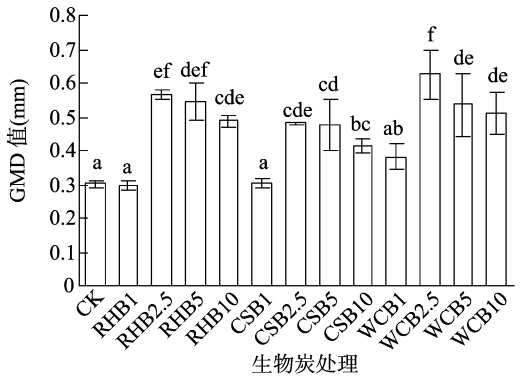


图3 施用生物炭对土壤水稳性团聚体 GMD 值的影响

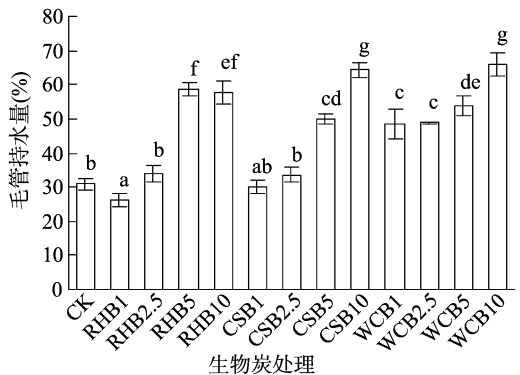


图4 施用生物炭对土壤毛管持水量的影响

的土壤毛管持水量均大于 CK,且在较高施用量下(5.0%、10.0%)达到最大值。WCB 各处理与 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$),提高了 57.74%~112.82%,且 WCB 对土壤毛管持水量的增加作用最明显。

2.1.3.2 土壤饱和导水率 由图 5 可看出,除 WCB10 处理的土壤饱和导水率与 CK 相比提高外,其他各处理的土壤饱和导水率均显著低于 CK($P<0.05$)。在中等施用量(2.5%、5.0%)下,土壤饱和导水率达到最小值,其中 CSB2.5、CSB5 比 CK 分别降低 69.35%、67.62%,且 CSB 对土壤饱和导水率的降低作用效果最明显。

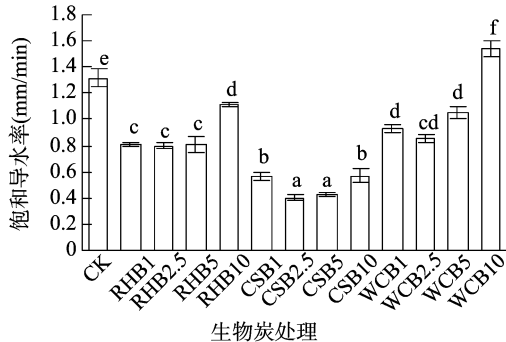


图5 施用生物炭对土壤饱和导水率的影响

2.2 施用生物炭对盆栽刺槐幼苗生长的影响

由表 3 可知,施用 3 种原料生物炭在一定程度上均能促进刺槐幼苗生长。施用稻壳炭对刺槐幼苗株高作用均达显著水平,且 3 种生物炭均在较高施用量(5.0%、10.0%)下幼苗高度达到较大值,RHB10、CSB10、WCB10、RHB5、CSB5、WCB5 分别比 CK 高 150.02%、236.71%、169.13%、151.36%、35.18%、29.96%。施用生物炭各处理中只有在 10.0% 施用量下刺槐幼苗地径显著高于 CK($P<0.05$),RHB10、CSB10、WCB10 与 CK 相比分别高 150.91%、132.66%、62.27%。施用生物炭各处理下刺槐幼苗平均单株生物量与 CK 相比均有所提高,且均在 10.0% 施用量下达到最大值,RHB10、CSB10、WCB10 与 CK 相比分别提高 342.92%、451.74%、334.02%。因此,RHB 和 CSB 比 WCB 对刺槐幼苗生长的促进作用更明显,且在 10.0% 的较高施用量下作用最明显。

表 3 不同生物炭处理对刺槐幼苗生长的影响

生物炭处理	株高 (cm)	地径 (mm)	总生物量 (g)
CK	27.57 ± 4.86a	4.93 ± 0.95abc	11.23 ± 1.02a
RHB1	44.10 ± 3.65d	6.57 ± 0.70cd	15.92 ± 0.91bc
RHB2.5	40.17 ± 3.31cd	5.57 ± 0.93abc	13.03 ± 1.55ab
RHB5	69.30 ± 4.06e	6.90 ± 1.87cd	26.05 ± 2.95e
RHB10	68.93 ± 5.76e	12.37 ± 2.35e	49.74 ± 1.55f
CSB1	36.27 ± 0.93bc	5.53 ± 0.90abc	15.45 ± 1.40bc
CSB2.5	28.67 ± 1.26a	5.23 ± 0.38abc	13.44 ± 2.48ab
CSB5	37.27 ± 2.40c	6.03 ± 1.01bcd	20.89 ± 1.39d
CSB10	92.83 ± 2.57f	11.47 ± 1.46e	61.96 ± 4.35g
WCB1	25.47 ± 2.34a	4.77 ± 0.81abc	11.33 ± 0.70a
WCB2.5	31.07 ± 3.72ab	3.50 ± 0.44a	18.88 ± 2.63cd
WCB5	35.83 ± 1.26bc	3.80 ± 0.26ab	14.57 ± 0.68ab
WCB10	74.20 ± 2.62e	8.00 ± 1.32d	48.74 ± 3.19f

3 讨论与结论

3.1 生物炭种类与施用量对土壤团聚体特性的影响

土壤中大团聚体(≥0.25 mm)含量、MWD 值和 GMD 值是确定土壤团聚体稳定性的 3 个重要指标。本研究结果表明,在中等生物炭施用量(2.5%、5.0%)下,对土壤≥0.25 mm 水稳性团聚体含量、MWD 值及 GMD 值的增强效应最显著,可促进水稳性团聚体的形成和稳定性的提高。李江舟等研究表明,施用生物炭可增加土壤中大团聚体(≥0.25 mm)含量,并降低小团聚体(<0.25 mm)含量,从而增强土壤团聚体稳定性^[21]。何玉亭等研究了 1%、2%、4%、6% 生物炭施用量对红壤团聚体稳定性的影响,表明在 2% 和 4% 的中等施用量下对土壤大团聚体的促进作用更明显^[22]。尚杰等的研究也表明,中等施用量(40~60 t/hm²)能显著提高壤土土壤水稳性团聚体的 MWD 值,增加土壤团聚体的稳定性^[23]。

有机胶结剂是土壤团聚体形成的重要因素,也是影响土壤团聚体含量和稳定性的内在因素。生物炭可与土壤颗粒形成有机复合物或无机复合物,从而促进团聚体的形成^[24]。此外,添加生物炭可改善土壤肥力水平,增加土壤中微生物的生物量,而微生物的活动可以加快生物炭的氧化降解,从而促进土壤中团聚体的形成及团聚体稳定性上升。生物炭对土壤团聚体稳定性的作用,取决于生物炭种类和土壤质地等因素^[25-27]。吴崇书等研究表明,施用生物炭对土壤有机质含量较高的土壤水稳性团聚体稳定性作用不明显,而对有机质含量较低的土壤则具有明显的促进作用^[28]。Sun 等的研究也表明,向在土壤结构较差的黏土中施用生物炭有利于团聚体的形成和稳定性提升^[5]。本研究结果与上述结果基本一致,但也有少数研究表明,单施生物炭对土壤大团聚体含量和稳定性影响不显著,这与施用其他有机物料提高土壤团聚体稳定性的结果不同^[29],其机理有待进一步研究。

3.2 生物炭种类与施用量对土壤持水性能的影响

土壤容重的降低伴随着土壤孔隙度的增加,使土壤持水量增加。本研究结果表明,生物炭在 5.0% 施用量下对土壤水分特性的改善作用最好,其中木炭对喀斯特石灰土土壤持水量增加作用最明显。Busscher 等对不同生物炭对壤质沙土

持水能力的影响研究结果表明,木炭对土壤持水性增加作用显著^[30]。Uzoma 等进行的田间试验结果表明,生物炭施用可显著降低沙土的饱和导水率,且随生物炭施用量的增加而降低^[31]。这与本研究中土壤饱和导水率随生物炭施用量的增加呈先减小后增加的趋势存在差异,这可能与土壤质地和生物炭自身性质有关。由于生物炭的比表面积较沙质土大,吸水能力更强,能显著改善沙质土壤的持水量,但生物炭对壤土、黏土持水量的影响并不明显,主要取决于生物炭与土壤比表面积的相对大小以及生物炭自身的亲水性^[14]。喀斯特石灰土中多为黏性成分^[32],因此土壤饱和导水率在生物炭施用量较高时下降趋势不明显。

在中等生物炭施用量(2.5%、5.0%)下,喀斯特山地石灰土的土壤结构和持水特性可明显改善,3 种原料生物炭中,木炭对石灰土土壤容重、大团聚体含量与稳定性以及土壤持水特性的作用最明显;秸秆炭对喀斯特石灰土土壤饱和导水率的作用更明显。施用不同种类生物炭均在不同程度上提高刺槐幼苗的单株生物量。因此,综合考虑生物炭对喀斯特石灰土土壤的改良作用及对刺槐幼苗生长的促进作用,建议生物炭最适施用量为中等用量(2.5%、5.0%),最适种类为木炭。

参考文献:

[1] 勾芒芒,屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2013(5):1-5.

[2] Inyang M, Gao B, Pulamanappallil P, et al. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse [J]. Bioresource Technology,2010,101(22):8868-8872.

[3] 田 丹. 生物炭对不同质地土壤结构及水力特征参数影响试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[4] Mukherjee A, Lal R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions[J]. Agronomy,2013,3(2):313-339.

[5] Sun F F, Lu S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore - space properties of clayey soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2014,177(1):26-33.

[6] Hua L, Lu Z Q, Ma H R, et al. Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy,2014,33(3):941-946.

[7] Busscher W J, Novak J M, Ahmedna M. Physical effects of organic matter amendment of a southeastern US coastal loamy sand[J]. Soil Science,2011,176(12):661-667.

[8] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature - and duration - dependent rice straw - derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. Soil & Tillage Research,2011,112(2):159-166.

[9] 田 丹,屈忠义,李 波,等. 生物炭对沙土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J]. 灌溉排水学报,2013,32(3):135-137.

[10] Peake L R, Reid B J, Tang X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils[J]. Geoderma,2014,235:182-190.

[11] 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.

[12] Abel S, Peters A, Trinks S, et al. Impact of biochar and hydrochar

- addition on water retention and water repellency of sandy soil[J]. *Geoderma*, 2013, 202: 183–191.
- [13] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2281–2288.
- [14] Barnes R T, Gallaghe M E, Masiello C A, et al. Biochar – induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments [J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108340.
- [15] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 76–84.
- [16] 刘方, 王世杰, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 639–644.
- [17] 罗海波, 宋光煜, 何腾兵, 等. 贵州喀斯特山区石漠化治理过程中土壤质量特性研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 112–115.
- [18] 王丁, 张丽琴, 薛建辉. 苗抗旱性综合评价研究——以 6 种喀斯特造林树种苗木为例[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(25): 5–12.
- [19] 姚健, 薛建辉, 吴秋菊, 等. 喀斯特地区 4 种造林幼苗的抗旱性评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 318–322.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 14–24.
- [21] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 2114–2120.
- [22] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2333–2342.
- [23] 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.
- [24] 张磊, 柳璇, 韩俊杰, 等. 生物炭对土壤团聚体及结合态碳库影响研究进展[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(9): 157–161.
- [25] Ouyang L, Wang F, Tang J, et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(4): 991–1002.
- [26] Liu Z, Chen X, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. *Catena*, 2014, 123: 45–51.
- [27] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: results from incubation experiments [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14(6): 975–979.
- [28] 吴崇书, 邱志腾, 章明奎. 施用生物质炭对不同类型土壤物理性状的影响[J]. *浙江农业科学*, 2014(10): 1617–1619, 1623.
- [29] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705–712.
- [30] Busscher W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand [J]. *Soil Science*, 2010, 175(1): 10–14.
- [31] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention [J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(2/3/4): 1137–1143.
- [32] 卜巧珍. 生物炭对石灰土理化性质和作物生长的影响[D]. 桂林: 广西师范大学, 2014.

(上接第 240 页)

群对于重金属镉的吸附试验, 吸附机理以及其对实际重金属镉污染土壤的修复效果还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈悟. 硫酸盐还原菌多相分类系统与综合防治方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] Mihcaei W, Anderw J R, Jodi L F, et al. Phylogeny of dissimilatory sulfite reductases supports an early origin of sulfate respiration[J]. *Bacteriol*, 1998, 180: 2975–2982.
- [3] Joo J O, Choi J H, Kim I H, et al. Effective bioremediation of cadmium (II), nickel (II), and chromium (VI) in a marine environment by using *Desulfovibrio desulfuricans* [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2015, 20(5): 937–941.
- [4] 苏宇, 王进, 彭书传, 等. 以稻草和污泥为碳源硫酸盐还原菌处理酸性矿山排水[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1858–1863.
- [5] Kousi P, Remoundaki E, Hatzikioseyan A A, et al. Metal precipitation in an ethanol – fed, fixed – bed sulphate – reducing bioreactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(3, SI): 677–684.
- [6] Omaechevarria J R, Posadas H G, Ferreras J F. First essays for cadmium wastewater elimination by sulphate – reducing bacteria[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2007, 5(1): 1–10.
- [7] 马忠友, 邓盾, 汪建飞, 等. 一组混合菌群还原硫酸盐的特性[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(8): 184–188.
- [8] 潘嘉川, 曹宏斌, 邵宗泽, 等. 海洋硫酸盐还原菌群处理烟气脱硫废水[J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 504–509.
- [9] Kolmert A, Wikstrom P, Hallberg K B. A fast and simple turbidimetric method for the determination of sulfate in sulfate – reducing bacterial cultures[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2000, 41(3): 179–184.
- [10] 朱晓丽, 张建霞, 徐雅雅, 等. 常温等离子体诱变选育高效耐镉硫酸盐还原菌[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(2): 303–307.
- [11] 周冰玉, 吴迎奔, 陈薇, 等. 高耐镉硫酸盐还原菌的筛选及鉴定[J]. *湖南农业科学*, 2015(7): 91–93.
- [12] 张小里, 陈志听, 刘海洪, 等. 环境因素对硫酸盐还原菌生长的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2000, 20(4): 224–229.
- [13] Bade K, Manz W, Ulrich S. Behavior of sulfate – reducing bacteria under oligotrophic conditions and oxygen stress in particle – free systems related to drinking water[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, 32(3): 215–223.
- [14] 山丹. 大庆油田注水系统硫酸盐还原菌的分布规律及生态因子研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [15] 刘靖, 侯宝利, 郑家荣, 等. 硫酸盐还原菌腐蚀研究进展[J]. *材料保护*, 2001, 34(8): 8–11.
- [16] 刘安波. 硫酸盐还原作用对升流式厌氧污泥床工艺性能影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993.