

不同改性生物炭及施用量对风沙土土壤团聚体及牧草产量的影响

焦敏娜, 周 鹏, 孙 权*, 姬 强*

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: 为了探究不同改性生物炭及施用量对风沙土土壤结构、养分含量及牧草产量的影响, 以 20% FeCl_3 改性生物炭与 6% 壳聚糖改性生物炭为供试材料, 以未施加改性生物炭处理为对照 CK_0 , 分别设置 0.75、1.5、 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 3 个施用量梯度, 研究其对土壤中团聚体含量、稳定性, 有机碳含量, 牧草产量的影响。结果表明, 大于 0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量、大于 0.25 mm 的水稳定性团聚体含量、平均质量直径、有机碳含量、高羊茅生物量及干物质量均随着两种改性生物炭施用量的增大而增大, 并在施用量为 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到其最大值。团聚体破坏率与土壤不稳定团粒指数值随着生物炭施用量的增加呈现先减小后增大的趋势, 当施用量为 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤团聚体最稳定。改性生物炭具有改良风沙土土壤团聚体结构、增加有机碳含量的作用。通过对比各处理牧草产量及土壤中团聚体含量、结构等指标, 建议在风沙土中施加 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的壳聚糖改性生物炭。

关键词: 改性生物炭; 风沙土; 土壤团聚体; 牧草产量

土壤团聚体及有机质是衡量土壤肥力的两大指标^[1]。各粒级土壤团聚体的数量分布和空间排列方式决定了土壤孔隙的分布和连续性, 进而决定了土壤的水力性质和通透性能, 并影响土壤生物的活动和养分的保持与供应^[2]。良好的土壤团聚体能有效地改善土壤的耕性和透气、透水性, 增强土壤的抗侵蚀能力^[3]。土壤有机碳作为植物生长发育的基本营养元素, 其含量变化是土地利用方式下土壤质量和土壤肥力演变的重要标志, 直接影响着土壤肥力和作物产量的高低^[4]。风沙土由于其特殊的成土过程与自然条件, 土壤沙化严重, 近年来人为活动又加速了土壤退化, 严重影响了土壤碳含量的积累^[5]。如何通过添加物料及农艺措施改善风沙土土壤中团聚体的分布及提高风沙土作物产量成为生态研究的热点之一。

生物炭是指有机生物物质在低氧或缺氧的环境中, 高温 (一般 $<700^\circ\text{C}$) 缓慢热解得到的一种含

碳量高、富有孔隙结构的碳化物质^[6]。秸秆、木材、果壳等农林废弃物, 工业生产和生活活动中产生的有机废弃物如垃圾、污泥、家畜粪料等皆为制作生物炭的原始物料。由于原材料成本较低、方便易得且在改善土壤结构、提高土壤中有机碳含量、提升土壤保水保肥能力^[7]等方面作用显著。因此, 生物炭在现代绿色农业中有较大的应用前景。研究发现, 生物炭复合材料在改良土壤及促进植物生长等方面效果优于单一生物炭, 因此本试验选用 20% 的 FeCl_3 与 6% 的壳聚糖两种方法改性的生物炭及 3 种不同的施用量, 探讨两种改性方法、3 种施用量对风沙土团聚体含量、稳定性及牧草产量变化的影响, 以期对改性生物炭在培肥地力; 改善风沙土土壤质量、结构方面及提高风沙土作物产量等方面提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于自治区首府银川市灵武境内宁东能源化工区, 地理坐标为北纬 $38^\circ 9'$, 东经 $107^\circ 12'$, 平均海拔为 1 348.3 m。主导风向冬季为西北风, 夏季为东南风; 气候为中温带干旱气候, 冬春季风沙多, 干旱少雨, 蒸发强烈, 日照时间长, 年平均气

收稿日期: 2019-11-05; 录用日期: 2020-04-18

基金项目: 宁夏重点研发计划项目 (2018BFG02016, 2018BBF02021)。

作者简介: 焦敏娜 (1995-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养与环境生态。E-mail: minnaji@qq.com。

通讯作者: 孙权, E-mail: sqnxu@sina.com; 姬强, E-mail: jiqiang1122@nxu.edu.cn。

温为 6.7 ~ 8.8 °C, 年平均风速 2.5 ~ 2.6 m · s⁻¹; 土壤质地为砂壤, 成土母质类型为风积母质, 细沙含量在 90% 左右, 养分含量较低。

1.2 供试材料

1.2.1 生物炭

试验所使用的生物炭是由陕西某生物科技公司在 450 °C 下经过高温、限氧裂解条件下制得的苹果树枝条生物炭, 后经磨细过 1 mm 筛备用。生物炭 pH 值 (土:水=1:10) 10.35, 比表面积 86.70 m² · g⁻¹, C 70.12%, N 1.02%, 硝态氮 1.86 mg · kg⁻¹, 铵态氮 0.39 mg · kg⁻¹。

1.2.2 土壤

本试验供试土壤的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

pH	全盐 (g · kg ⁻¹)	全 N (g · kg ⁻¹)	有机质 (g · kg ⁻¹)	有机 C (g · kg ⁻¹)	C/N
9.34	2.63	0.23	8.53	4.95	21.52

1.3 试验设计

本试验使用的生物炭先于实验室进行改性, 分别使用浓度为 6% 的壳聚糖溶液及浓度为 20% 的 FeCl₃ 溶液对生物炭进行充分喷湿并不停翻拌, 在室温下放置 24 h 后用蒸馏水冲洗至中性, 晾干后即得到试验所使用的两种改性生物炭。田间试验根据改性生物炭的施用量及改性方法设置 7 个处理, 分别为对照 (CK₀)、FeCl₃ 改性生物炭施用量为 0.75 t · hm⁻² (Fe_{0.75})、FeCl₃ 改性生物炭施用量为 1.5 t · hm⁻² (Fe_{1.5})、FeCl₃ 改性生物炭施用量为 2.25 t · hm⁻² (Fe_{2.25})、壳聚糖改性生物炭施用量为 0.75 t · hm⁻² (K_{0.75})、壳聚糖改性生物炭施用量为 1.5 t · hm⁻² (K_{1.5})、壳聚糖改性生物炭施用量为 2.25 t · hm⁻² (K_{2.25}), 每个处理重复 3 次, 共 21 个小区, 小区面积为 3 m × 5 m, 每个小区之间设置宽为 0.5 m 的隔离带。试验前期, 将生物炭按照施用量梯度一次性施于试验地表层并进行浅翻, 之后于小区中种植高羊茅 (*Festuca elata*), 播种量为 200 kg · hm⁻², 采用微喷带补水, 9 月中旬收获。

1.4 试验方法

在施加改性生物炭前、高羊茅收获后分别采集 0 ~ 30 cm 耕层土壤。土壤养分含量采用南京农业大学鲍士旦^[8]的方法测定, 土壤全氮采用半微量开氏法测定; 土壤有机质测定采用重铬酸钾-硫酸

外加热法测定, 全盐采用电导率法测定。生物炭比表面积采用比表面积分析仪测定, 生物炭中碳、氮采用元素分析仪 (德国) 测定。

每个小区采集 0 ~ 30 cm 的土层原状土, 重复 3 次, 分别装于密封袋中进行密封。将采集的团聚体原状土样挑去动植物残体、石砾、根系等后, 按自然结构将土样轻轻掰成 1 cm³ 大小的土块, 于室内自然风干。机械稳定性团聚体与水稳性团聚体分别采用干筛法与湿筛法进行测定。大于 0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量 (DR_{0.25})、大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量 (WR_{0.25})、平均质量直径 (MWD)、团聚体破坏率 (PAD)、土壤不稳定团粒指数 (E_{LT}) 分别参照文献 [9] 中公式计算。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行初步处理, 采用 SPSS 23.0 统计分析软件进行试验数据的方差分析与差异显著性检验 (LSD 法), 使用 Origin 8.0 软件进行相关图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同改性生物炭对土壤团聚体的影响

2.1.1 不同改性生物炭对粒径 >0.25 mm 土壤团聚体含量的影响

团聚体按粒径大小可以分为粒径 >0.25 mm 的大团聚体及 <0.25 mm 的微团聚体。其中, 粒径 >0.25 mm 的团聚体在提高土壤保水保肥性、水稳程度、机械稳定程度、通气性等方面都优于 <0.25 mm 的微团聚体^[10]。

粒径 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量 DR_{0.25} 与粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 WR_{0.25} 的分析结果如表 2 所示。通过比较所有处理可知, 当 FeCl₃ 改性生物炭施用量达 2.25 t · hm⁻² 时, DR_{0.25} 的含量最高, 较不添加生物炭的对照 CK₀ 显著提高了 21.27%。通过比较施用壳聚糖改性生物炭与 FeCl₃ 改性生物炭的风沙土壤 DR_{0.25} 值可知, 壳聚糖改性生物炭对风沙土中机械稳定性大团聚体的增加效果优于 FeCl₃ 改性生物炭。通过比较改性壳聚糖生物炭的 3 个处理可知, 随施用量增多, DR_{0.25} 的含量呈现增加的趋势; 其中处理 K_{2.25} 对机械性大团聚体的增加效果最佳, 较 CK₀ 提高了 33.18%。比较 FeCl₃ 改性生物炭的处理可知, 3 个浓度对 DR_{0.25} 的增加效果随用量增多呈现上升的趋势, 较 CK₀ 分别提高了 4.79%、13.74%、35.83%。

粒径 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量见表 2 所示, 对比表中 $WR_{0.25}$ 含量可知, $Fe_{2.25}$ 的水稳性大团聚体的含量高于其他几种处理, 较对照 CK_0 显著增加了 33.37%。对比两种改性方法的实验结果可知, 使用壳聚糖改性的生物炭对提高 $WR_{0.25}$ 含量效果略优于使用 $FeCl_3$ 改性的生物炭, 这与 $DR_{0.25}$ 的规律一致。比较 $FeCl_3$ 处理与壳聚糖处理可以发现, 随着生物炭施用量的升高, $WR_{0.25}$ 的含量也增高, 且当两种生物炭的施用量均达到 $2.25\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $WR_{0.25}$ 达到最高; 通过对比可以看出, 使用 $FeCl_3$ 改性的生物炭的增长速率较使用壳聚糖的生物炭高。综合 $DR_{0.25}$ 与 $WR_{0.25}$ 的含量可知, 随着改性生物炭的施用量的增加, 土壤中的 >0.25 mm 的机械性稳定团聚体含量及水稳性团聚体含量呈现增高的趋势。

表 2 不同改性生物炭处理下的 $DR_{0.25}$ 与 $WR_{0.25}$ 含量 (%)

处理		$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$
$FeCl_3$ 处理	$Fe_{0.75}$	$71.98 \pm 0.81c$	$58.73 \pm 0.21c$
	$Fe_{1.5}$	$78.13 \pm 0.80b$	$69.81 \pm 0.36b$
	$Fe_{2.25}$	$83.30 \pm 0.23a$	$76.46 \pm 0.21a$
壳聚糖处理	$K_{0.75}$	$82.02 \pm 0.07c$	$65.04 \pm 0.36c$
	$K_{1.5}$	$86.71 \pm 0.13b$	$66.72 \pm 0.24b$
	$K_{2.25}$	$91.48 \pm 0.25a$	$69.06 \pm 0.19a$
对照	CK_0	$68.69 \pm 0.22d$	$57.33 \pm 0.48d$

注: 同列中相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

2.1.2 不同改性生物炭对粒径 >0.25 mm 团聚体平均质量直径的影响

团聚体的平均质量直径 (MWD) 能够反映土壤团聚体大小的分布情况, 可以通过对比 MWD 值的大小来衡量团聚体的稳定性^[11]。各处理粒径 >0.25 mm 的团聚体干筛 MWD 值如表 3 所示。由表可知, 在施用改性生物炭后的土壤表层团聚体 MWD 值较对照 CK_0 均有增加。其中处理 $K_{2.25}$ 的 MWD 值为所有处理的最大值, 较对照 CK_0 显著增加了 95.92%。对比两种改性方式的生物炭可知, 壳聚糖处理对干筛 MWD 值的增加效果优于 $FeCl_3$ 处理, 较对照 CK_0 的增幅分别为 26.53%、40.82%、95.92%。对比这 3 个施用量可以发现, MWD 值随着改性生物炭施用量的增多呈现增大的趋势。 $FeCl_3$ 处理的 MWD 值与壳聚糖处理呈现相同的规律, 即随着生物炭施用量的增多而增大的趋势, 其较对照 CK_0 的增幅分别为 2.04%、12.24%、70.41%。

各处理粒径 >0.25 mm 的团聚体湿筛 MWD 值如表 3 所示。从表中可以看出, 当 $FeCl_3$ 改性的生物炭施用量达到 $2.25\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 湿筛 MWD 值为所有处理的最高值, 较对照 CK_0 增幅为 94.37%。对比两种改性生物炭不同施用量的处理可以发现, 湿筛的 MWD 值随着生物炭施用量的增多呈现增大趋势。对比两种改性生物炭施用土壤的 MWD 值可以发现, 壳聚糖改性生物炭对土壤团聚体 MWD 值的增幅优于 $FeCl_3$ 改性生物炭; 较对照 CK_0 增幅依次为 46.48%、56.34%、80.28%。

综合干筛与湿筛的 MWD 值可知, 施用改性生物炭可以增加土壤团聚体的稳定性, 两种改性方法与不施加生物炭的对照 CK_0 相比, 稳定性均有显著提高。

表 3 不同改性生物炭处理下的 MWD 值 (mm)

处理		干筛 MWD	湿筛 MWD
$FeCl_3$ 处理	$Fe_{0.75}$	$1.00 \pm 0.04c$	$0.81 \pm 0.03c$
	$Fe_{1.5}$	$1.10 \pm 0.02b$	$1.13 \pm 0.02b$
	$Fe_{2.25}$	$1.67 \pm 0.02a$	$1.38 \pm 0.04a$
壳聚糖处理	$K_{0.75}$	$1.24 \pm 0.03b$	$1.04 \pm 0.05b$
	$K_{1.5}$	$1.38 \pm 0.02b$	$1.11 \pm 0.02b$
	$K_{2.25}$	$1.92 \pm 0.01a$	$1.28 \pm 0.03a$
对照	CK_0	$0.98 \pm 0.03d$	$0.71 \pm 0.06d$

2.1.3 不同改性生物炭对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的稳定性可以通过团聚体破坏率 (PAD) 及土壤不稳定团粒指数 (E_{LT}) 来反映^[12]。施用两种改性方法的生物炭对 PAD 及土壤 E_{LT} 如表 4 所示, 两种处理对土壤团聚体稳定性影响有所不同。比较两种改性生物炭处理后的风沙土壤 PAD 数据可知, $FeCl_3$ 处理的 PAD 值较壳聚糖处理的数值小。结果表明, $FeCl_3$ 改性生物炭对土壤团聚体的稳定性提高效果优于壳聚糖改性生物炭, PAD 值较对照 CK_0 降低了 34.60%、48.50%、19.68%, 呈现较显著的降低趋势。从 $FeCl_3$ 处理的 PAD 值可以看出, 随着改性生物炭施用量的增加, 团聚体破坏率呈现先降低后增高的趋势。壳聚糖处理的团聚体破坏率也呈现先降低后升高的趋势, 与 $FeCl_3$ 处理规律一致。

各处理土壤团聚体不稳定指数如表 4 所示, 由表可知, $FeCl_3$ 处理的 E_{LT} 值随着生物炭施用量的增大呈现先减小后增大的趋势, 壳聚糖处理的规律与

FeCl_3 处理的相同。通过对比 FeCl_3 处理与壳聚糖处理结果可知, FeCl_3 改性生物炭对降低土壤不稳定团粒指数的效果优于壳聚糖改性生物炭, 较对照 CK_0 降低了 11.09%、14.01%、5.25%。综合 PAD 及 E_{LT} 两组数据可以发现, 随着改性生物炭施用量的增大, 土壤团聚体稳定性呈现出先增大后减小的趋势。

表 4 不同改性生物炭处理下的 PAD 和 E_{LT} 值 (%)

	处理	PAD	E_{LT}
FeCl_3 处理	$\text{Fe}_{0.75}$	$14.59 \pm 0.37\text{e}$	$31.66 \pm 0.06\text{c}$
	$\text{Fe}_{1.5}$	$11.49 \pm 0.25\text{f}$	$30.62 \pm 0.17\text{d}$
	$\text{Fe}_{2.25}$	$17.92 \pm 0.17\text{d}$	$33.74 \pm 0.08\text{b}$
壳聚糖处理	$\text{K}_{0.75}$	$20.32 \pm 0.21\text{b}$	$32.94 \pm 0.14\text{c}$
	$\text{K}_{1.5}$	$18.49 \pm 0.27\text{c}$	$30.88 \pm 0.22\text{d}$
	$\text{K}_{2.25}$	$23.08 \pm 0.26\text{a}$	$34.30 \pm 0.15\text{b}$
对照	CK_0	$23.31 \pm 0.16\text{a}$	$35.61 \pm 0.12\text{a}$

2.2 不同改性生物炭对土壤有机碳的影响

施用不同浓度梯度的两种改性生物炭后土壤有机碳的含量变化如图 1 所示。对照 CK_0 的有机碳含量为 $10.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-2}$ 。从图 1 中可以发现, 经过改性生物炭处理的土壤有机碳的含量较对照 CK_0 均有显著提高。其中壳聚糖改性生物炭对土壤有机碳的增加效果优于 FeCl_3 改性生物炭, 其增幅分别为 12.78%、15.68%、20.52%; 呈现随着改性生物炭施用量的增加, 土壤有机碳含量增多的趋势。 FeCl_3 处理较 CK_0 的增幅依次为 6.06%、6.34%、12.78%,

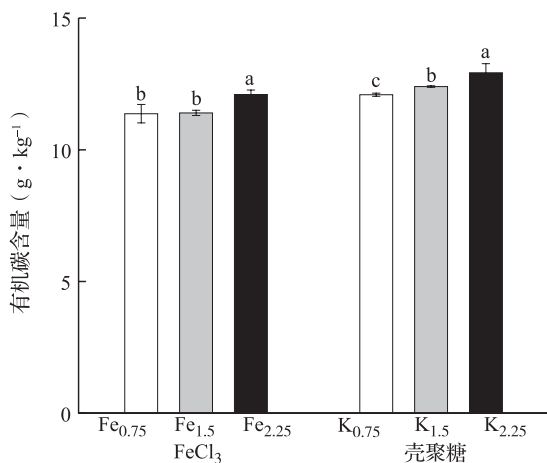


图 1 不同改性生物炭及施用量对土壤有机碳的影响

注: 柱上字母相同表示同一生物炭处理间差异不显著 ($P>0.05$), 下同。

与壳聚糖处理结果趋势一致。以上结果表明, 施加改性生物炭可以增加土壤中有机碳的含量, 且随着生物炭施用量的增多, 土壤有机碳的增加幅度也显著增大。

2.3 不同改性生物炭对高羊茅产量的影响

施用两种改性生物炭后高羊茅的生物量如图 2 所示。对照 CK_0 的生物量为 $1580.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。添加不同施用量的生物炭, 高羊茅的生物量也呈现显著差异。比较壳聚糖处理与 FeCl_3 处理的生物量可以发现, 壳聚糖改性生物炭对高羊茅增产效果较 FeCl_3 改性生物炭显著。与 CK_0 相比, 生物量显著提高了 52.02%、68.32%、79.19%。结果表明, 随着改性生物炭施用量的增加, 生物量呈现增多的趋势。 FeCl_3 处理与壳聚糖处理的规律一致, 生物量较 CK_0 增加了 6.46%、36.07%、42.83%。比较所有处理的生物量可知, $\text{K}_{2.25}$ 的增产效果最佳。

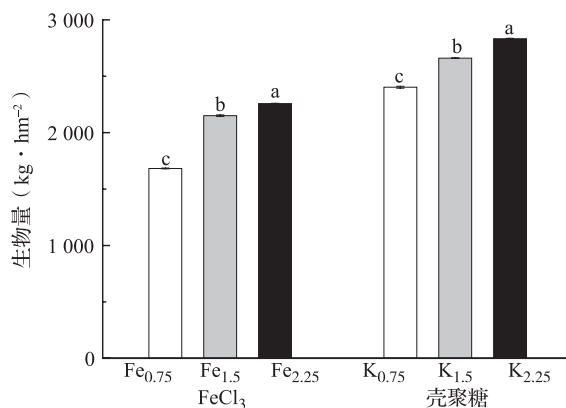


图 2 不同改性生物炭及施用量对高羊茅生物量的影响

两种改性生物炭处理的高羊茅干物质呈现了相同的规律: 随着生物炭施用量的增加, 干物质呈现上升的趋势 (图 3)。从图中可以看出, 经过改性生物炭处理的土壤, 高羊茅的干物质质量明显高于未施用生物炭的土壤。对照 CK_0 的干物质质量为 $625.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。壳聚糖处理的干物质较 CK_0 分别增加了 16.77%、29.72%、94.97%; FeCl_3 处理的干物质较对照 CK_0 分别增加了 17.16%、28.67%、65.05%。结果表明, 壳聚糖改性生物炭对高羊茅干物质增产效果优于 FeCl_3 改性生物炭。综合考虑高羊茅的生物量及干物质可知, $\text{K}_{2.25}$ 为所有处理的最佳施用量, 其增产效果最优。

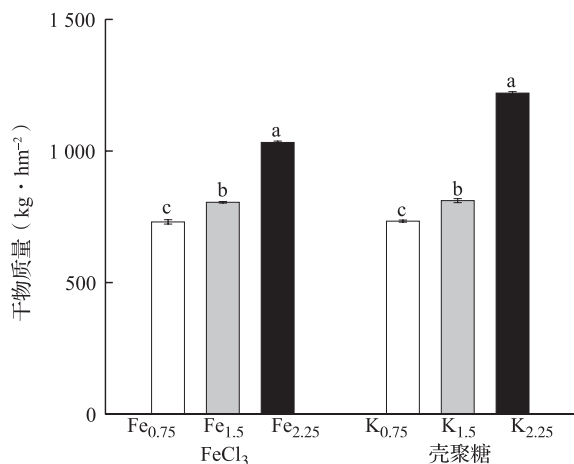


图3 不同改性生物炭及施用量对高羊茅干物质量的影响

3 讨论

有研究表明, 粒径 >0.25 mm 的团聚体含量越高, 土壤的结构及性质则越好^[13]。平均质量直径可以用来衡量土壤团聚体的稳定程度。陈超等^[14]的研究表明, MWD 值越大团聚体的平均粒径团聚度也越高, 团聚体的稳定性也越高。本研究发现, 随着两种改性生物炭施用量的增大, $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 、MWD 值呈现增大的趋势。改性生物炭有促进土壤中微生物活性的作用, 随着施用量的增大, 微生物活性也随之增大, 进而产生更多的分泌物, 这些胶结物质可以促使土壤大团聚体的形成, 增强团聚体的稳定性^[15]。吴鹏豹等^[16]的研究也表明, 向土壤中施加生物炭可以显著提升土壤团聚体的稳定性, 且随着施用量的提高, 团聚体呈现更加稳定的趋势。李倩倩等^[17]的研究表明, PAD 及 E_{LT} 值越大, 表明土壤团聚体的稳定性越差, 土壤的退化程度则越高; 反之则土壤结构越稳定。从本研究中的 PAD 及 E_{LT} 值的变化规律可以发现, 随着两种改性生物炭的施用量的增加, 团聚体破坏率及土壤不稳定团粒指数呈现先减小后增大的趋势, 土壤团聚体的稳定性呈现先升高后下降的趋势。造成这种现象的原因可能为: 添加生物炭可以增加土壤中总孔隙度, 从而提高土壤水分涵养能力, 且随着生物炭施用量的增加, 土壤总孔隙度也随之增加^[18]。采样前正处于当地雨季, 降雨对 0 ~ 30 cm 土层土壤的影响较大, 表层土壤的含水量增高, 土壤的黏结性降低, 不利于团聚体的稳定形成; 且生物炭较稳定, 在短时间内分解性较低, 分解过程也不易产生黏液团聚颗粒^[19]。因此随着改性生物炭施用量的

增加, 土壤团聚体的 PAD 及 E_{LT} 值呈现先增大后变小的趋势, 团聚体稳定性呈现先上升后下降的趋势, 李倩倩等^[17]的研究与本研究结果一致。

生物炭富含有机碳且具有较强的生物化学稳定性, 其本身不易被微生物利用^[20], 还田后可作为一种相对稳定的碳源固定在土壤中。同时, 生物炭与土壤团聚体结合, 减少了其与外界的接触面积, 降低了土壤有机质的矿化率, 从而促进土壤固碳^[21-22]。本研究表明, 随着改性生物炭施加量的增加, 土壤中有机碳的含量呈现增多的趋势, 这与余炜敏等^[23]的研究相一致。生物炭能增加土壤中有机碳的这一特性, 可用来改善风沙土的土壤结构, 提高风沙土供碳能力, 为解决土壤荒漠化提供了一种较为良好的修复方式。

由于生物炭可以改善土壤结构及营养环境, 因此施加生物炭可以促使作物产量的提高^[24-26]。本研究表明, 施加改性生物炭不仅可以增加鲜草产量, 还能增加牧草的干物质量。随着生物炭施加量的增加, 牧草产量呈增长的趋势。增产的原因可能为生物炭中有机碳含量高、比表面积大、官能团多、孔隙率大, 添加到土壤中能够增加土壤有机质, 改善土壤结构, 有利于作物生长发育, 进而提高作物产量^[27-28]。

4 结论

4.1 施加改性生物炭可以增加风沙土中大团聚体的含量及平均质量直径

随着改性生物炭施用量的增大, 风沙土中大团聚体的含量及平均质量直径呈增大的趋势, 不同的改性生物炭对大团聚体的增加效果有所不同。经比较, 壳聚糖改性生物炭施加效果优于 $FeCl_3$ 改性生物炭。

4.2 施加改性生物炭可以提高风沙土中团聚体的稳定性

随着改性生物炭施用量的增加, 风沙土中团聚体的稳定性呈现先增大后下降的趋势, 但与对照 CK_0 相比, 团聚体稳定仍有上升。当施用量为 $1.5 t \cdot hm^{-2}$ 时, 稳定性最大; 施用量增加到 $2.25 t \cdot hm^{-2}$ 时, 土壤中团聚体的稳定性呈现下降的趋势。结果表明, 施用改性生物炭可以提高风沙土中团聚体的稳定性, 但施用量不宜过大, 施用量为 $1.5 t \cdot hm^{-2}$ 时最佳。

4.3 施加改性生物炭可以提高土壤中有机碳的含量

随着改性生物炭施用量的增加, 风沙土中有机

碳的含量也随之增加。经比较可知,壳聚糖改性生物炭对土壤有机碳的增加效果优于 FeCl_3 改性生物炭。

4.4 施加改性生物炭可以增加牧草产量

随着改性生物炭施用量的增加,高羊茅的生物量、干物质量呈现升高的趋势,当施用量达到 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,高羊茅的生物量、干物质量达到最大值。经比较可知,壳聚糖改性生物炭对牧草的增产效果优于 FeCl_3 改性生物炭。

综合考虑牧草产量及风沙土中团聚体含量、结构等指标,在宁东地区风沙土中施加 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的壳聚糖改性生物炭能够显著改善风沙土壤结构学性质,提高风沙土供碳能力,有利于牧草的生长发育,进而提高牧草产量。

参考文献:

- [1] 文倩,关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004 (4): 434-438.
- [2] 刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (2): 447-455.
- [3] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, 36 (3): 1045-1052.
- [4] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等. 江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38 (6): 2486-2497.
- [5] 张婷,王旭东,逢萌雯,等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, 37 (6): 2298-2303.
- [6] 李力,刘娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30 (8): 1411-1421.
- [7] 褚军,薛建辉,金梅娟,等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30 (4): 409-415.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-108.
- [9] 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.
- [10] 万毅林,高明. 不同种植年限对菜地土壤结构的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31 (13): 236-243.
- [11] Liu Z X, Chen X M, 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.
- [12] 裴中健,梁成华,尹岩. 不同栽培年限日光温室土壤团聚体的组成及稳定性[J]. 水土保持通报, 2015, 35 (6): 70-74, 80.
- [13] 蒋腊梅,白桂芬,吕光辉,等. 不同管理模式对于干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36 (4): 15-21, 39.
- [14] 陈超,李娟,李劲彬. 生物炭和秸秆施用对复配土壤物理性状及团粒结构的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2017, 2 (2): 36-40, 49.
- [15] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35: 219-230.
- [16] 吴鹏豹,解钰,漆智平,等. 生物炭对花岗岩砖红壤团聚体稳定性及其总碳分布特征的影响[J]. 草地学报, 2012, 20 (4): 643-649.
- [17] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, 40 (7): 3388-3396.
- [18] 陈懿,陈伟,林叶春,等. 生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (12): 3781-3787.
- [19] 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.
- [20] Lehmann J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, 447: 143-144.
- [21] Liang B Q, 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.
- [22] 章明奎,顾国平,王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38 (3): 329-335.
- [23] 余炜敏,石永锋,王荣萍,等. 改性生物炭对小白菜生长和磷素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27 (10): 1878-1882.
- [24] 郭大勇,商东耀,王旭刚,等. 改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46 (2): 22-27.
- [25] 曹雪娜. 生物炭对设施土壤养分及作物生长的影响初探[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [26] Xiao Q, Zhu L X, Zhang H P, et al. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semiarid region by improving soil quality and root growth [J]. Crop & Pasture Science, 2016, 67 (5): 495-507.
- [27] 乔丹丹,吴名字,张倩,等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (3): 92-99.
- [28] 王宁,焦晓燕,武爱莲,等. 生物炭及施肥对土壤环境和高粱产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44 (11): 1633-1637.

Effects of different modified biochars and application rates on soil aggregates and forage yield in aeolian sandy soil

JIAO Min-na, ZHOU Peng, SUN Quan*, JI Qiang* (Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021)

Abstract: In order to explore the effects of different modified biochars and application rates on soil structure, nutrient content and forage yield of aeolian sandy soil, 20% FeCl₃ modified biochar and 6% chitosan modified biochar were used as test materials. The modified biochar was treated with the application rates of 0.75, 1.5 and 2.25 t · hm⁻², and no modified biochar application was used as control to study the effects on soil agglomerate content and stability, organic carbon content, and pasture yield. The results showed that >0.25 mm mechanically stable aggregates, >0.25 mm water stable aggregates, mean weight diameter, organic carbon content, tall fescue biomass and dry matter amount increased with the increase of the applied amount of modified biochars, and when the application rate was 2.25 t · hm⁻², it reached the maximum value. The proportion of aggregate destruction and unstable soil aggregate index values showed a trend of decreasing first and then increasing with the increase of the amount of biochar applied, and the value reached the maximum when the application amount was 1.5 t · hm⁻². Modified biochar has the function of improving soil agglomerate structure and nutrient content of aeolian sandy soil. By comparing the forage yield of two modified biochar soils and the agglomerate content and structural index of aeolian sandy soil, it is recommended to apply 1.5 t · hm⁻² chitosan modified biochar in aeolian sandy soil.

Key words: modified biochar; aeolian sandy soil; soil aggregates; forage yield