生物炭对日光大棚土壤团聚体结构的影响

王亚琼[1,2,3]，牛文全[1,4]，李学凯[3]，王 婕[3]，官雅辉[1]，董继红[5]

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国旱区节水农业研究院，陕西 杨凌 712100；4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；5. 长安大学 地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054)

摘 要：[目的] 探明果木生物炭对杨凌地区日光大棚土壤团聚体结构的影响，提出适宜该地区的生物炭添加量，为改良日光温室大棚土壤结构，提升作物产量提供科学依据。[方法] 设置 10，30，50，70，90 t/hm^2 共 5 个生物炭添加量处理，以未添加生物炭处理为对照，采用干筛法和湿筛法，对比分析不同处理的团聚体几何平均直径、平均重量直径、破坏率和分形维数等指标。最后通过分析不同生物炭添加量下的作物产量，综合考虑土壤团聚体指标，提出最优的生物炭添加量。[结果] 添加生物炭后，土壤机械稳定性大团聚体含量增加 0.6～4.6 mg/kg，机械稳定性微团聚体含量降低 4.0%～32.6%；添加生物炭后，粒径为 3～2 mm，2～1 mm，1～0.5 mm 水稳性大团聚体含量分别增加 25.3%～41.2%，22.7%～74.2%，9.1%～46.4%，粒径为 0.5～0.25 mm 水稳性大团聚体含量降低 2.1%～18.1%。生物炭能够促进小粒径微团聚体的形成，但对微团聚体稳定性和总含量没有显著影响。添加生物炭后菠菜鲜重显著提升(68.7%～214.9%)。[结论] 生物炭能够改良土壤团聚体结构。综合考虑团聚体、作物产量因素，在日光大棚添加 70 t/hm^2 生物炭效果最好。

关键词：生物炭；团聚体；稳定性；植株鲜重

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)04-0190-06 **中图分类号**：S152.4

文献参数：王亚琼，牛文全，李学凯，等. 生物炭对日光大棚土壤团聚体结构的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(4)：190-195. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.030；Wang Yaqiong，Niu Wenquan，Li Xuekai，et al. Effects of biochar on soil aggregate structure in greenhouse[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(4)：190-195.

Effects of Biochar on Soil Aggregate Structure in Greenhouse

Wang Yaqiong[1,2,3]，Niu Wenquan[1,4]，Li Xuekai[3]，Wang Jie[3]，Guan Yahui[1]，Dong Jihong[5]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation，CAS & MWR，Yangling，Shannxi* 712100，*China*；2. *University of Chinese Academy of Sciences，Beijing* 100049，*China*；3. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China，Yangling，Shannxi* 712100，*China*；4. *College of Water Conservancy and Architectural Engineering，Northwest A&F University，Yangling，Shannxi* 712100，*China*；5. *College of Geology Engineering and Geomatics，Chang'an University，Xi'an，Shannxi* 710054，*China*)

Abstract：[Objective] The effects of wood-source biochar on the soil aggregate structure were studied to find a suitable biochar addition and to provide a scientific basis for improving the soil structure and increasing crop yield for solar greenhouse soil in Yangling District，Shaanxi Province. [Methods] Five biochar treatments of 10，30，50，70 and 90 t/hm^2，and a control treatment without any biochar，were set up. For all treatments，soil aggregate mean weight diameter，geometric mean diameter，damage rate and fractal dimension were calculated through the dry sieve method and the wet sieve method. And，crop yields under different biochar additions were also analyzed. Finally，an appropriate biochar addition was concluded both in considering soil aggregates and crop yields. [Results] The results showed that the mechanically stable dry aggregates

收稿日期：2019-01-13 **修回日期**：2019-03-07

资助项目：国家重点研发计划项目“西北典型农区高效节水灌溉技术与集成应用”(2016YFC0400202)；国家自然科学基金项目“水肥一体化滴灌滴头堵塞机理及防堵策略研究”(51679205)

第一作者：王亚琼(1993—)，女(汉族)，河北省新乐市人，硕士研究生，研究方向为水土资源高效利用研究。E-mail：wangyaqiong16@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者：牛文全(1972—)，男(汉族)，甘肃省甘谷县人，博士，研究员，博士生导师，主要从事灌溉理论与节水技术等方向的研究。E-mail：nwq@nwafu.edu.cn。

significantly increased by 0.6～4.6 mg/kg and the dry microaggregates decreased by 4.0%～32.6% compared with that of control treatment. Further, after adding biochar, 3～2 mm, 2～1 mm and 1～0.5 mm water stable large aggregates increased by 25.3%～41.2%, 22.7%～74.2%, 9.1%～46.4% respectively; however 0.5～0.25 mm water stable large aggregates decreased by 2.1%～18.1%. Biochar could promote the formation of small size microaggregates, but have a non-significant effect on microaggregate stability and microaggregates. Additionally, biochar had a positive effect on the spinach fresh weight with an increase of 68.8%～214.9%. [Conclusion] Biochar can ameliorate the soil aggregate structure. Taking soil aggregates and crop fields into account, the 70 t/hm^2 biochar has the optimal effect in greenhouse.

Keywords: biochar; aggregates; stability; crop weight

因为设施大棚具有高温、高湿、高蒸发量的特点,土壤缺少雨水淋洗,存在人为过量施肥、栽培方式不当等现象,造成土壤养分流失严重,土壤盐分累积,重金属污染,作物产量下降[1-2]。作物生长与土壤团聚体状况密切相关。土壤团聚体结构改善后,土壤养分损失量降低,作物产量增加。团聚体是土壤结构的基本单元,与土壤肥力和作物产量密切相关。土壤团聚体是土壤中矿物颗粒与有机、无机物质通过胶结、凝聚以及黏结作用组合形成的次级粒子。土壤团聚体的大小和组成对土壤水分下渗、土壤微生物繁殖、植物根系生长和土壤侵蚀有重要影响。良好的土壤团聚体结构能够抑制土壤结构退化、减小土壤有机碳损失,维持土壤肥力,提升作物产量,增加农作物的经济效益。但是,目前日光大棚土壤出现团聚体结构恶化,团聚体稳定性降低的现象,这一现象引起了相关学者的广泛关注。杨长明等[3]研究发现,温室大棚土壤水稳性大团聚体含量显著小于传统小麦—玉米轮作粮田、果园和苜蓿地。裴中健等[4]研究发现,日光大棚土壤水稳性团聚体含量显著降低,并且水稳性大团聚体含量小于露地土壤,日光大棚不利于土壤水稳性大团聚体形成,对团聚体结构破坏较严重。生物炭是一种有机土壤改良剂,具有增加土壤团聚体稳定性的作用。生物炭通过加强细菌的生物活性,促进团聚体形成来增加稳定性。并且,生物炭显著增加土壤表层的颗粒有机碳含量,进而影响团聚体的动态结构变化[5]。但是生物炭对土壤团聚体的影响也因土壤类型、土地利用方式、生物炭的种类和性质不同,未得出一致结论。在陕西省杨凌地区,较多的研究集中在生物炭改变土壤营养元素、作物产量,影响经济效益。而生物炭对塿土土壤结构的研究相对较少,并且生物炭对塿土团聚体的改良效果也未得出统一结论。因为生物炭的制备条件不同,生物炭的性质千差万别。不同的生物炭来源、碳化温度、碳化时间导致生物炭性质的千差万别[6]。与由动物残体制成的生物炭相比,由植物制备的生物炭含碳量更高,更不容易被微生物分解,在土壤中保存时间更长。生物炭表面的微小孔隙为土壤微生物提供生活场所,促进团聚体形成。但是,生物炭是一种惰性炭,不易与土壤发生化学反应,可能对土壤团聚体的形成无促进作用。侯晓娜[7]和徐国鑫[8]研究表明虽然生物炭能够增加水稳性大团聚体含量和降低水稳性微团聚体含量,但是对团聚体稳定性指标没有显著影响。李江舟[9]和王月玲[10]研究发现,生物炭通过增加水稳性团聚体含量,显著提高团聚体稳定性。也有研究表明,生物炭对土壤团聚体的影响也因添加量的不同而不同。尚杰[11]研究发现,土壤团聚体稳定性指标随着生物炭添加量的增加呈现先增加后降低趋势。本文采用盆栽试验,综合应用平均重量直径、几何平均直径、破坏率、分形维数、作物产量等指标,探究不同果木生物炭添加量对日光大棚耕层扰动土壤团聚体结构和稳定性的影响,为改良日光温室大棚土壤结构、提升作物产量提供合理的依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验大棚位于陕西省杨凌高新技术示范区大寨乡寨西村(108.02°E,34.17°N),属于东亚暖温带半湿润半干旱气候区,具有明显的大陆性季风气候特征,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。年平均气温12.9 ℃,无霜期 211 d。

1.2　试验设计

果木生物炭购于陕西亿鑫能源科技有限公司。生物炭施用量共设 6 个处理:0,10,30,50,70 和 90 t/hm^2,分别记为 CK,C_{10},C_{30},C_{50},C_{70},C_{90}(即每 1 kg 土样分别添加生物炭 0.0,3.2,9.7,16.2,22.6,29.1 g),其中,不施生物炭处理 CK 为对照试验,每个处理设置4 个重复。试验大棚棚龄为 8 a,采用沟灌和滴灌灌水方式种植经济果蔬,如黄瓜、番茄、甜瓜、豆角等,一年两茬。取日光大棚耕层土壤,过2 mm筛后备用。试验用土在中国土壤系统分类中的土类为土垫旱耕人为土[12],机械组成为:黏粒30.3%,粉粒34.7%,砂粒 35.0%。供试土壤的化学性质为:有机

质 16.5 g/kg，全氮 1.0 g/kg，全磷 0.4 g/kg，全钾 23.7 g/kg。试验基肥施用腐熟有机肥 37.5 t/hm^2，尿素 0.3 t/hm^2，磷肥 0.26 t/hm^2，钾肥 0.28 t/hm^2。将生物炭、过筛土壤、肥料人工充分混合均匀后，装入体积为 0.02 m^3 的圆桶中，根据实际情况灌水。土壤容重设置为 1.4 g/cm^3。因为植物根系主要集中在 0—20 cm深度，所以填装深度设为 20 cm。试验桶放置在日光大棚内，试验桶内种植菠菜(*Spinacia oleracea*)，每桶播种 30 粒种子，两叶一心时定植至每桶 6 株，于 2017 年 11 月 29 日开始，2018 年 1 月 27 日结束，共 60 d。

1.3 采样和测定方法

(1) 土壤采样时间。2017 年 11 月至 2018 年 1 月共采集土样 4 次，每隔 15 d 采集试验桶内 0—20 cm 原状土壤。取土时，尽量避开植物根系。每次采集土样后，将具有同样生物炭处理的备用土样进行回填。通过预处理数据，发现不同取土时间对土壤各级团聚体含量未见显著影响，所以将不同的取土时间看做不同处理间的重复。植物样采集时间：在第 60 d 作物收获时每个处理随机选取 5 株新鲜植物样品。

(2) 测定方法。采用人工筛分方法测定土壤大团聚体组成。机械稳定性团聚体采用干筛法，水稳性大团聚体采用湿筛法。将采集的土样掰成直径约为 10～12 mm 的小块，风干后过孔径为 10，7，5，3，1，0.5，0.25 mm 的筛组进行干筛，筛完后用百分位的天平称量各级团聚体的质量，并计算各级团聚体比例。把风干土壤样品按比例重新配成 50 g 作为准备湿筛的样品。为防止细小团聚体湿筛时堵塞筛孔，在湿筛样品中取出小于 0.25 mm 的团聚体。将上述准备湿筛的样品倒入 1 L 沉降筒中，用水湿润，静置一段时间后，倒入孔径为 5，3，2，1，0.5，0.25 mm 的筛组，将筛组用铁丝网固定，在水中上下筛分 10 次。取出后面 3 个筛子，如前筛分 3 次，洗净筛子中的水稳性团聚体表面的附着物。收集各级土壤团聚体，置于 105 ℃烘箱中 8 h，测定团聚体质量。按照团聚体粒径，将机械稳定性团聚体分为机械稳定性大团聚体(大于 0.25 mm)、机械稳定性微团聚体(小于 0.25 mm)；将水稳性团聚体分为团聚体 A_1(大于 2.00 mm)、团聚体 A_2(2.00～0.25 mm)、微团聚体(小于 0.25 mm)。将风干土过 0.25 mm 筛网后，采用 MS2 000 型激光粒度仪测定土壤微团聚体。按照龚伟[13]提出的分类方法，按照粒径将土壤微团聚体划分成 0.25～0.05 mm，0.05～0.02 mm，0.02～0.002 mm，<0.002 mm。判断团聚体稳定性常用的指标有团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction，PAD)、平均重量直径(mean weight diameter，MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter，GMD)和分形维数(fractal dimension，D)。平均重量直径是将各级团聚体含量加权求和，几何平均直径也能表明土壤团聚体分布状况。土壤具有一定分形特征，也常用分形维数来描述和评价土壤团聚体结构。计算团聚体结构破坏率(PAD)、几何平均直径(GMD)，平均重量直径(MWD)。具体计算公式为：

$$PAD=\frac{>0.25\ mm\ 不稳定团聚体(干筛-湿筛)}{>0.25\ mm\ 团聚体(干筛)}\times 100\% \quad (1)$$

$$GMD=\exp\sum(W_i\times\log\overline{R_i}/W_s) \quad (2)$$

$$MWD=\frac{\sum(\overline{R_i}W_i)}{W_s} \quad (3)$$

式中：W_i——某一粒径水稳性团聚体质量(g)；$\overline{R_i}$——某一粒径团聚体平均直径(mm)；W_s——分析样品质量(g)。

植株单株鲜量采用百分位天平称量。将新鲜植株去根后，擦净表面灰尘，进行称重。

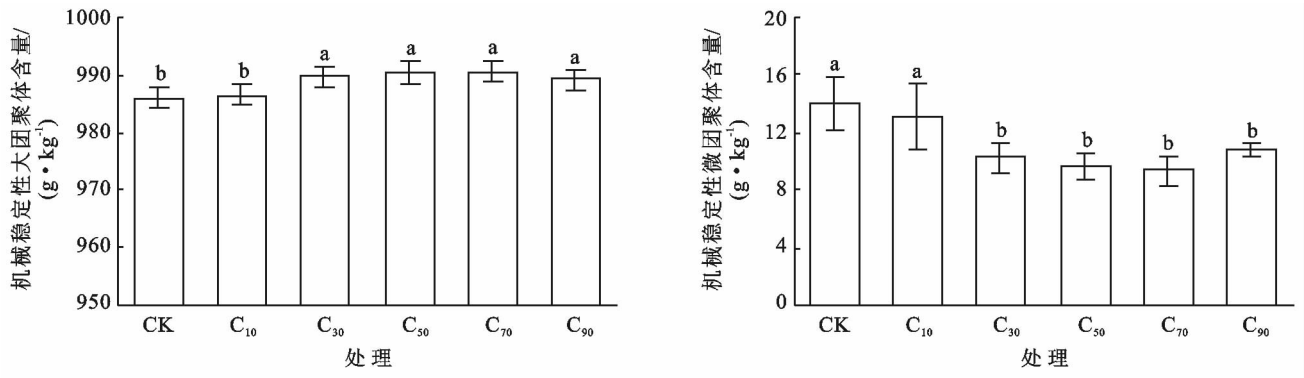
1.4 数据分析

采用 SPSS 进行方差分析，各处理间的显著性均在 0.05 水平下进行，平均值比较采用 Duncan 法。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对机械稳定性团聚体的影响

图 1 为生物炭对机械稳定性团聚体的影响。土壤中添加生物炭，可以显著增加机械稳定性大团聚体含量($p<0.05$)，C_{70} 处理含量最多，为 990.6 g/kg；C_{10} 处理含量最少，为 986.0 g/kg。生物炭显著降低机械稳定性微团聚体含量($p<0.05$)，其中，C_{70} 处理降幅最大，为 32.6%，C_{10} 降幅最小，为 4.0%。生物炭对机械稳定性大团聚体和微团聚体有显著影响，可能原因是生物炭与土壤粒子形成了较强的静电场，吸附黏土颗粒，促进土壤矿物颗粒和小团聚体形成大团聚体[14]；也可能是在土壤中添加生物炭，土壤有机质含量增加与胶结物质改变[15]，促进土壤大团聚体形成。生物炭添加到土壤后，不仅影响杨凌塿土机械稳定性团聚体，此结果也在其它类型土壤中适用。柴冠群[16]和孟祥天[17]研究发现，在重庆紫色土、江西红壤，添加生物炭后，会显著增加粒径>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量。10 t/hm^2 生物炭处理与不添加生物炭处理没有显著差异，而当生物炭添加量大于 30 t/hm^2 时，机械稳定性大团聚体含量显著升高，机械稳定性微团聚体含量显著降低，所以当生物炭添加量大于 30 t/hm^2 时，生物炭改良机械稳定性团聚体效果最好。



注:图中不同小写字母表示不同处理之间存在 $p<0.05$ 的显著差异。下同。

图 1　生物炭对土壤机械稳定性大团聚体含量和微团聚体含量的影响

2.2　生物炭对土壤水稳性团聚体分布的影响

水稳性团聚体 A_1 是指粒径大于 2 mm 的水稳性大团聚体,将粒径为 2～0.25 mm 的水稳性大团聚体归为水稳性团聚体 A_2。表 1 为生物炭对水稳性团聚体的影响,各级水稳性团聚体 A_1 含量为 0.5～3.0 g/kg,各级水稳性团聚体 A_2 含量为 4.8～65.0 g/kg,水稳性微团聚体含量为 911.3～914.4 g/kg。与对照相比,土壤中添加生物炭,增加了水稳性团聚体 A_1 总含量($p<0.05$),其中 C_{30} 处理增幅最大,为 62.6%。由表 1 可知,随着生物炭添加量的增加,粒径>3 mm 水稳性团聚体含量呈波动上升趋势,3～2 mm 水稳性团聚体含量呈先增后减的趋势。添加生物炭后,粒径>3 mm 水稳性大团聚体含量的增幅为 16.7%～137.0%,其中 C_{70} 处理的最高,为 1.3 g/kg;C_{10} 和 C_{30} 处理的粒径为 3～2 mm 水稳性团聚体含量最高,比对照分别增加了 41.2%和 40.8%。与对照相比,除粒径为 0.5～0.25 mm 的水稳性团聚体外,生物炭显著改变各粒径 A_2 团聚体的含量($p<0.05$),但是生物炭对 A_2 团聚体总含量却没有显著影响。粒径为 2～1 mm 水稳性团聚体的含量随着生物炭含量的增加呈先增后减的趋势,C_{70} 处理的最高,水稳性团聚体含量比对照增加了83.2%;粒径 1～0.5 mm 水稳性团聚体含量随着生物炭含量的增加而增加,C_{90} 处理的增幅最大,为46.4%;粒径为 0.5～0.25 mm 水稳性团聚体含量随着生物炭含量的增加而减小,C_{90} 的降幅最大,为18.1%。添加生物炭后,土壤水稳性微团聚体总含量出现先降低后升高趋势,但是对水稳性微团聚体总含量没有显著影响。在杨凌搂土中添加生物炭后,粒径>0.25 mm 的水稳性大团聚体呈现增加趋势,特别是粒径分别为 2～1 mm 和 1～0.5 mm 的水稳性大团聚体,而粒径为 0.5～0.25 mm 的团聚体却显著减小,可能原因是土壤中添加生物炭增加植物的地下生物量,促进微生物分解,增加土壤有机物含量,促进小团聚体形成大团聚体,此结果与已有研究结果相似[11, 16]。基于 A_1 团聚体,当生物炭添加量大于 10 t/hm² 时,粒径为 3～2 mm 和大于 2 mm 团聚体含量较高;基于 A_2 团聚体和大于 30 t/hm² 生物炭处理粒径 1～0.5 mm,0.5～0.25 mm 团聚体含量发生显著变化。从水稳性大团聚体来看生物炭添加量大于 30 t/hm² 对土壤改良效果最好。

表 1　生物炭对水稳性团聚体含量的影响

处理	A_1 团聚体含量/(g·kg⁻¹)			A_2 团聚体含量/(g·kg⁻¹)				微团聚体含量/(g·kg⁻¹)
	>3 mm	3～2 mm	>2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	2～0.25 mm	
CK	0.5±0.1^{b}	2.3±0.1^{b}	2.9±0.2^{b}	4.8±0.2^{b}	13.8±0.2^{d}	65.0±0.3^{a}	83.5±0.5^{a}	913.6±0.6^{a}
C_{10}	0.6±0.1^{ab}	3.3±0.4^{a}	3.9±0.4^{a}	5.8±0.3^{b}	15.0±0.2^{cd}	63.7±0.6^{ab}	84.6±0.8^{a}	911.5±0.7^{a}
C_{30}	1.2±0.3^{ab}	3.3±0.2^{a}	4.4±0.4^{a}	6.1±0.1^{b}	15.9±0.4^{c}	62.2±0.3^{b}	84.2±0.7^{a}	911.3±1.0^{a}
C_{50}	0.7±0.2^{ab}	2.9±0.1^{ab}	3.6±0.2^{a}	7.6±0.3^{a}	17.7±0.6^{b}	59.2±0.9^{c}	84.6±1.0^{a}	911.9±1.1^{a}
C_{70}	1.3±0.3^{a}	3.0±0.3^{ab}	4.3±0.4^{a}	8.7±0.9^{a}	18.4±0.3^{b}	55.2±0.8^{d}	82.3±5.4^{a}	913.5±1.7^{a}
C_{90}	0.9±0.2^{ab}	3.0±0.3^{ab}	3.9±0.3^{a}	8.3±0.4^{a}	20.1±0.7^{a}	53.3±0.2^{d}	81.7±0.9^{a}	914.4±1.1^{a}

注:数据为平均值±标准差,不同小写字母表示在 0.05 水平下的差异。下同。

2.3　生物炭对大团聚体稳定性的影响

本研究采用 3 个指标,即团聚体破坏率,几何平均直径,平均重量直径,对土壤团聚体稳定性进行评价。表 2 为生物炭对水稳性团聚体稳定性的影响。

几何平均直径与平均重量直径越大，团聚体团聚度越高，团聚体越稳定。与对照相比，添加生物炭对以上 3 个指标有显著影响($p<0.05$)。与对照相比，添加生物炭后，土壤团聚体的几何平均直径与平均重量直径均为增大趋势，并随着生物炭添加量的增加而增加；破坏率随着生物炭添加量的增加而减小。

生物炭具有明显增加水稳性大团聚体几何平均直径与平均重量直径的趋势，能够显著降低水稳性大团聚体破坏率，可能是生物炭施加到土壤中，降低土壤容重，改善土壤结构，微生物代谢产物增加、土壤团聚体胶结物质增多引起的[18]。此结果与一些学者研究结果相似，尚杰[11]等研究发现，在搂土中添加 40～60 t/hm^2 生物炭，团聚体破坏率显著降低 17.5%，平均重量直径显著增加 31.6%。乔丹丹[19]等研究发现，在黄褐土中添加 4.5 t/hm^2 生物炭，可以显著提高土壤团聚体稳定性。生物炭对改良土壤、增加水稳性大团聚体稳定性有重要作用。与不添加生物炭相比，C_{30}，C_{50}，C_{70} 和 C_{90} 处理的团聚体几何平均直径显著升高，所以基于几何平均直径，大于 30 t/hm^2 生物炭添加量对土壤改良效果最好。与对照相比，C_{70} 和 C_{90} 处理的平均重量直径显著升高，所以基于团聚体平均重量直径，大于 70 t/hm^2 生物炭添加量优化土壤结构。添加生物炭后，土壤团聚体破坏率显著降低，所以基于团聚体破坏率，大于 10 t/hm^2 生物炭添加量土壤团聚体稳定性最强。综合考虑 3 个团聚体稳定性指标，当生物炭添加量大于 70 t/hm^2 时，生物炭改良土壤团聚体稳定性效果最好。

表 2 生物炭对水稳性团聚体稳定性的影响

处理	几何平均直径/mm	平均重量直径/mm	破坏率/%
CK	0.426 3±0.001 0^b	0.164 4±0.002 9^b	79.28%±0.000 9^a
C_{10}	0.427 3±0.000 9^{ab}	0.166 9±0.003 9^b	79.19%±0.000 7^b
C_{30}	0.427 8±0.001 9^a	0.169 1±0.007 7^{ab}	79.11%±0.001 4^{bc}
C_{50}	0.428 0±0.001 4^a	0.170 7±0.003 4^{ab}	79.08%±0.000 8^{cd}
C_{70}	0.428 5±0.003 1^a	0.174 5±0.011 5^a	79.02%±0.001 6^{cd}
C_{90}	0.428 7±0.001 8^a	0.173 5±0.005 7^a	78.98%±0.001 2^d

2.4 生物炭对水稳性微团聚体的影响

表 3 为生物炭对不同粒径土壤微团聚体含量的影响。大棚土壤微团聚体主要集中在 0.25～0.05 mm 和 0.05～0.02 mm。与对照相比，添加生物炭后，粒径为 0.25～0.05 mm 微团聚体的含量随生物炭添加量的增加呈先减小后增加趋势，C_{70} 处理降幅最大，为 8.5%，C_{10} 处理降幅最小，为 2.7%；当生物炭添加量大于 30 t/hm^2 时，粒径为 0.02～0.002 mm 和小于 0.002 mm 粒径团聚体含量显著升高($p<0.05$)。

表 3 生物炭对不同粒径土壤微团聚体的影响

处理	不同粒径微团聚体含量/%			
	0.25～0.05 mm	0.05～0.02 mm	0.02～0.002 mm	<0.002 mm
CK	36.6±2.0^a	41.0±1.2^{ab}	14.4±1.1^c	7.8±0.8^c
C_{10}	35.6±7.1a	39.4±3.3^{bc}	15.4±2.8^{bc}	8.5±1.2^{bc}
C_{30}	34.4±1.0^a	42.0±1.2^a	17.7±1.1^a	9.5±0.6^{ab}
C_{50}	34.4±1.8^a	39.3±2.6^{bc}	17.3±0.6^a	9.5±0.6^{ab}
C_{70}	33.5±1.6^a	40.5±1.9^{abc}	17.4±1.7^a	9.8±1.2^a
C_{90}	35.6±4.6^a	38.6±2.6^c	16.8±1.4^{ab}	9.3±0.5^{ab}

图 2 为生物炭对土壤微团聚体分形维数的影响。分形维数越小，团聚体分布和稳定性越高，土壤结构越紧实。添加生物炭后，土壤微团聚体分形维数降低，降幅为 7.5%～17.0%，C_{50} 处理降幅最大。但生物炭对土壤微团聚体分形维数没有显著性影响，说明生物炭对水稳性微团聚体的稳定性也没有显著影响，此结果和表 1 得出的结果一致，生物炭有降低土壤微团聚体含量的趋势，但是效果并不显著。

添加生物炭后，土壤小粒径水稳性微团聚体含量增加和土壤大粒径水稳性微团聚体含量降低，有利于小粒径团聚体生成，这可能是生物炭添加到土壤中，微生物活动加剧，促进小粒径团聚体形成。添加生物炭降低土壤微团聚体分形维数，增加土壤微团聚体稳定性，但是效果并不显著。

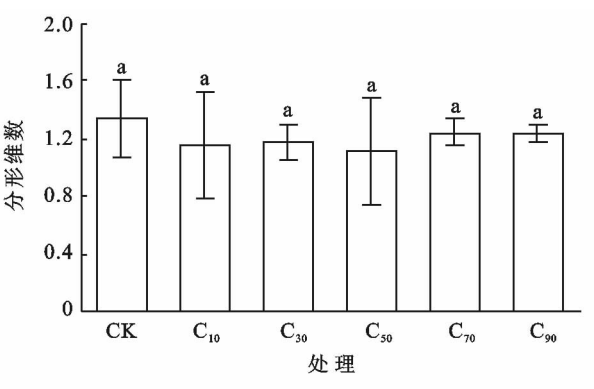


图 2 生物炭对土壤微团聚体分形维数的影响

2.5 生物炭对作物产量的影响

图 3 为不同生物炭添加量对第 60 d 菠菜单株鲜重的影响。不同生物炭添加量处理，菠菜的单株质量分别为 4.5，7.5，9.0，12.2，13.3 和 14.1 g，菠菜的产量随着生物炭添加量的增加而显著增加($p<0.05$)。C_{90} 处理增幅最大为 214.9%，C_{10} 处理增幅最小为 68.7%。此结果与陈温福研究结果一致，陈温福认为生物炭可以调节土壤水肥状况，具有促进作物高产的作用[20]。生物炭影响作物产量，可能原因是生物炭改良土壤容重、孔隙度，保持土壤水分。添加生物炭后，菠菜产量显著增加，其中 50，70，90 t/hm^2 生物炭处

理的单株鲜重增加程度最大,所以在塿土中,生物炭添加量大于 50 t/hm² 时,菠菜的产量最高。

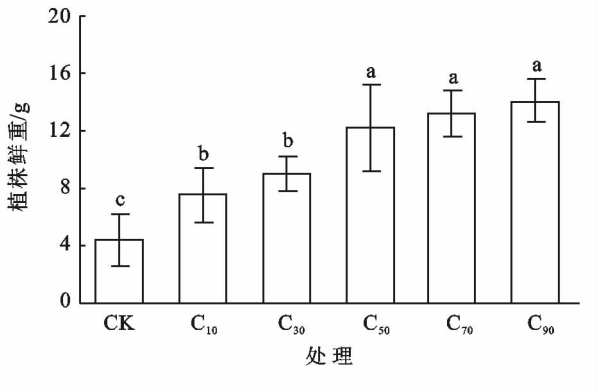


图 3　生物炭添加量对单株菠菜重量的影响

3　结 论

(1) 生物炭能够显著增加机械稳定性大团聚体含量,显著降低机械稳定性微团聚体含量,促进机械稳定性微团聚体形成机械稳定性大团聚体。

(2) 果木生物炭能够改良杨凌大棚土壤团聚体组成,增加土壤水稳性大团聚体稳定性,促进水稳性大团聚体形成。添加生物炭能够显著增加粒径为 2～1 mm 和 1～0.5 mm 水稳性团聚体含量,显著降低粒径为 0.5～0.25 mm 水稳性团聚体含量,显著增加几何平均直径与平均重量直径,显著降低破坏率。

(3) 生物炭能够增加粒径 0.02～0.002 mm 和< 0.002 mm 微团聚体含量,降低粒径为 0.25～0.05 mm 微团聚体含量,促进小粒径微团聚体形成。

(4) 生物炭具有促进菠菜增产的作用,并且作物产量与生物炭添加量呈正相关关系,不同生物炭处理作物增产 68.7%～214.9%。

(5) 生物炭添加量为 70 和 90 t/hm² 时,团聚体稳定性强,团聚体结构良好。当生物炭添加量大于 50 t/hm² 时,作物的产量达到最高水平。综合考虑作物产量和团聚体结构指标,建议在杨凌地区日光大棚采用 70 t/hm² 生物炭处理。

[参 考 文 献]

[1] Choi J H, Lee Y J, Lee H G, et al. Removal characteristics of salts of greenhouse in field test by in situ electrokinetic process[J]. Electrochimica Acta, 2012, 86(1):63-71.

[2] 高新昊,张英鹏,刘兆辉,等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报,2015,35(5):1452-1459.

[3] 杨长明,欧阳竹,杨林章,等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报,2006,26(12):4148-4155.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 李子音,赵传起,刘欢,等. 芦苇基生物炭的制备与活化方式比较研究[J]. 沈阳大学学报:自然科学版,2018,30(6):446-451.

[7] 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.

[8] 徐国鑫,王子芳,高明,等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学,2018,39(1):355-362.

[9] 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.

[10] 王月玲,耿增超,王强,等. 生物炭对塿土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学,2016,37(9):3634-3641.

[11] 尚杰,耿增超,赵军,等. 生物炭对塿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.

[12] 闫湘,常庆瑞,潘靖平. 陕西关中地区塿土在系统分类中的归属[J]. 土壤,2004,36(3):318-322.

[13] 龚伟,胡庭兴,王景燕,等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究[J]. 土壤学报,2007,44(3):571-575.

[14] 张超,刘国彬,薛萚,等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学,2011,44(3):507-515.

[15] 姜灿烂,何园球,刘晓利,等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报,2010,47(4):715-722.

[16] 柴冠群,赵亚南,黄兴成,等. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J]. 水土保持学报,2017,31(1):296-302.

[17] 孟祥天,蒋瑀霁,王晓玥,等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. 土壤,2018,50(2):326-332.

[18] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报,2018,34(3):159-165.

[19] 乔丹丹,吴名宇,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.

[20] 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.