

# 添加稻草生物质炭对滨海水稻土有机质活性的影响<sup>①</sup>

关连珠, 姜雪楠, 张广才\*, 潘林林, 张 婷, 赵 雅, 叶 超, 张雅楠, 李 丽

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室/农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

**摘要:**为明确腐熟稻草、直还稻草与稻草生物质炭 3 种不同的稻草还田方式对滨海盐渍型水稻土中碳组分的影响, 采用为期 270 d 的室内恒温培养试验, 研究了施用等碳量的腐熟稻草、直还稻草(指稻草直接还田)与稻草生物质炭对水稻土有机碳累积及其氧化稳定性、土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳含量的影响。稻草生物质炭处理显著提高了土壤有机碳累积量及其氧化稳定性, 并增加了土壤微生物生物量碳含量, 但对水稻土水溶性有机碳含量并无影响。腐熟稻草与直还稻草处理皆可在短时间内提高土壤水溶性有机碳及微生物生物量碳含量, 但对土壤碳累积影响较小, 腐熟稻草处理甚至会降低土壤抗氧化能力。稻草生物质炭的施用会增加土壤碳的积累, 但若长期施用会降低土壤碳库活性, 其可与腐熟稻草或直还稻草配施来减少这一问题。

**关键词:** 稻草生物质炭; 滨海盐渍型水稻土; 活性有机质; 有机碳氧化稳定性

中图分类号: S158 文献标识码: A

滨海盐渍型水稻土是辽宁省优质高产水稻的重要生产基地, 由于多年来的粗放管理, 虽然盐分含量有所减少, 但整体肥力状况却有所恶化。有调查表明, 高产滨海盐渍型水稻土最适的有机质含量为 20~30 g/kg, 而实际土壤平均有机质含量仅为 13.6 g/kg<sup>[1]</sup>。农作物秸秆合理施用能有效改善土壤理化性质, 增加土壤有机碳和微生物生物量碳含量, 并能明显提高作物产量<sup>[2-3]</sup>, 但我国北方大部分秸秆尚未得到充分利用。土壤活性有机碳库是土壤圈中一种十分活跃、周转速度较快的组分, 是对土壤扰动和土壤管理措施最为敏感的有机碳组分。它将土壤矿物质、有机碳与生物成分联系在一起<sup>[4-5]</sup>, 指示土壤的综合性活力水平<sup>[6]</sup>。近年来随着秸秆还田成为新研究热点, 国内外学者对秸秆还田培肥土壤及提升土壤有机质含量等方面也进行了许多研究<sup>[7-10]</sup>。秸秆直接还田可以使农田生态环境得到改善, 提高作物产量, 但也带来病虫害加重、整地质量差等负面效应; 秸秆腐熟还田能克服直接还田的缺点, 不利条件是耗费劳动力和时间; 秸秆炭化还田对土壤改良有多方面积极影响, 但其对土壤功能影响的机理目前还不完全清楚, 秸秆生物质炭还田对土壤活性有机质影响方面的研究还有待深入。目前, 关于秸秆还田方面的研究主要集中于旱地土壤, 而在水田土

壤(特别是滨海盐渍型水稻土)方面相关研究不多, 不同处理方式的稻草施入, 盐渍型水稻土有机碳活性变化的规律及影响效果缺乏相关研究数据。本文旨在通过探讨 3 种不同方法处理的稻草对滨海盐渍型水稻土有机质活性的影响, 找出北方水田稻草适宜的还田方式, 以为推广水稻秸秆还田、充分利用秸秆资源提供理论基础和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验土壤取自辽宁盘锦市大洼县(40°56'9" N, 122°3'51" E), 为典型滨海盐渍型水稻土。用多点混合取样法采集 0~20 cm 耕层土壤样品, 风干后过 2 mm 筛, 用于恒温淹水培养试验。供试土壤的有机碳含量为 11.92 g/kg, 全氮含量为 1.31 g/kg, 全磷含量为 0.42 g/kg, 全钾含量为 25.31 g/kg, 土壤 pH 为 7.87。

施用的稻草分为 3 种处理: 直还稻草处理(Z), 指稻草直接还田, 将稻草粉碎至 1.5 mm; 腐熟稻草处理(F), 将粉碎后的稻草加水至含水率为 50% 后装入容器中, 置于 30℃ 培养箱恒温培养至变为黑色粉末并有土香味, 时间为 6 个月; 稻草生物质炭处理(S), 由粉碎后的稻草在 450℃ 高温无氧条件下制备而成。

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201503118-10)资助。

\* 通讯作者(guangcaizhang@163.com)

作者简介: 关连珠(1960—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 主要从事土壤肥力与耕地保育、土壤化学和农业环境与生态研究。E-mail: guanlian Zhu@126.com

供试稻草处理后的基本性质见表 1。

表 1 供试稻草处理后的基本性质

处理	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	pH
腐熟稻草(F)	439.35	11.82	1.59	17.81	9.75
直还稻草(Z)	408.60	6.17	1.00	10.41	6.01
稻草生物质炭(S)	452.50	6.83	4.36	68.70	10.48

## 1.2 试验设计

本培养试验为室内暗室恒温无作物淹水培养,共设置 4 个处理,分别为腐熟稻草(F)、直还稻草(Z)、稻草生物质炭(S)和对照(CK),3 次重复。直还稻草施入量根据目前农业生产中水稻留高茬和稻草直接还田的常用量(9 000 kg/hm<sup>2</sup>)的 2.5 倍进行换算,在室内培养过程中按照土壤质量的 1% 施用,并对其施入土壤中的碳量进行等碳换算,计算出腐熟稻草与稻草生物质炭的施入量。每一处理的用土量为 3 kg,加不同稻草处理后的土壤充分混匀后置于 6 L 的塑料桶中培养,加水至高于土壤 15 cm 左右。培养时间为 270 d(2016 年 6 月至 2017 年 3 月),培养期间为恒温 25℃,按当地大田实际耕种情况(辽宁滨海水稻土地势低洼,排水设施不完善,大部分长期淹水)进行全程淹水培养,并定期搅拌、补水。分别于培养后的 90、180、270 d 进行采样,取出适量土样进行测定。

## 1.3 试验方法

土壤和 3 种稻草材料的有机碳含量采用 VARIO EL III 元素分析仪进行测定。原始土壤和培养后土壤的易氧化有机碳(EOC)含量参考文献[11-12]方法测定<sup>[11-12]</sup>,并计算有机碳氧化稳定系数(Kos), $Kos = (\text{总有机碳} - \text{易氧化有机碳}) / \text{易氧化有机碳}$ ;微生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸-硫酸钾提取法测定;水溶性有机碳(DOC)含量采用纯水浸提,TOC 自动分析仪测定。

## 1.4 数据处理

所有数据均采用 MS Office Excel 2010 进行处理,统计分析采用 SPSS 20.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳累积的变化

图 1 显示了添加 3 种不同稻草对土壤有机碳累积的影响。从图 1 可以看出,不同处理稻草的施入都增加了土壤有机碳总量。随培养时间的延长,累积在土壤中的有机碳因降解而逐渐降低,但下降幅度却因处理的不同而有很大差异。对照土壤(CK)在整个培养过程中有机碳总量有少量的下降,培养至 270 d 时,下

降的幅度为 15.3%;其次为稻草生物质炭(S)处理,土壤有机碳总量的下降幅度为 25.1%,而直还稻草(Z)与腐熟稻草(F)处理土壤有机碳总量下降最明显,下降幅度分别为 39.8% 与 37.4%。总体来说,施用不同处理的稻草均会增加滨海盐渍型水稻土土壤有机碳的降解速率,其中直还稻草处理对土壤有机碳的降解速率影响最为明显,若以不同稻草施用处理与对照之间的有机碳差异来说明施入土壤中的有机碳的表观残余碳量,那么至培养 270 d 时,腐熟稻草处理土壤有机碳的残余率为 8.33%,稻草生物质炭处理为 23.20%,直还稻草处理为 5.47%。

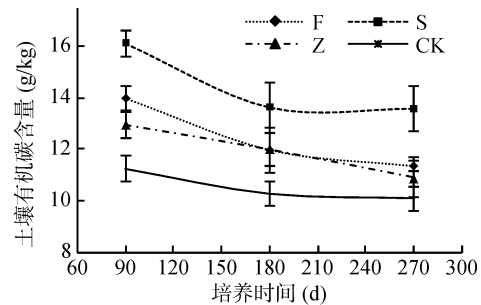


图 1 不同稻草添加对滨海盐渍型水稻土有机碳累积的影响

### 2.2 土壤有机碳氧化稳定性的变化

氧化稳定性是土壤有机碳的一个重要基本属性,关系到土壤有机碳抗氧化能力的强弱,反映了土壤有机质分解的难易。土壤有机碳的氧化稳定性可用氧化稳定系数(Kos)来衡量,Kos 值越大,活性越低,反之,则越高<sup>[11]</sup>。由图 2 可知,培养至 270 d 时,所有处理土壤的 Kos 值都有所上升,但上升幅度则因处理不同而有所差异。施入稻草生物质炭(S)的土壤 Kos 增幅最大,至 270 d 时与对照土壤(CK)相比增加 42.31%;施入直还稻草(Z)的土壤 Kos 与对照土壤(CK)则并没有显著差异,比之对照土壤(CK)仅降低 3.48%。施入腐熟稻草(F)的土壤 Kos 增幅最小,并显著小于对照土壤(CK),与其相比降低 12.99%。这一

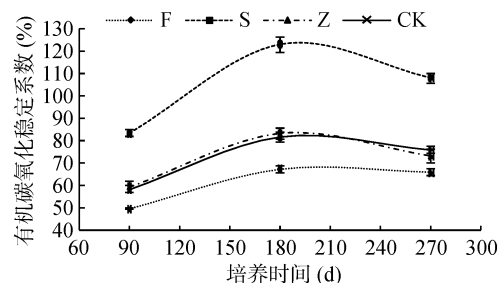


图 2 不同稻草添加对滨海盐渍型水稻土有机碳氧化稳定系数(Kos)的影响

结果表明,稻草生物质炭的施用会显著降低土壤有机碳的活性,而腐熟稻草的施用则会增加土壤有机碳的活性,直还稻草的施用对有机碳的活性影响较小。

### 2.3 土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳含量的变化

土壤水溶性有机碳是指能溶解于土壤水的那部分活性较高的土壤有机碳组分<sup>[13-14]</sup>。由图 3 可以看出,在 270 d 的培养过程中,除腐熟稻草处理土壤水溶性有机碳含量呈现下降外,其余各处理的变化幅度较小,并随着培养时间的延长,呈现先上升后下降的趋势。至 270 d 时,直还稻草和腐熟稻草处理土壤水溶性有机碳含量显著高于对照,但直还稻草与腐熟稻草处理间并无差异,而稻草生物质炭处理对土壤水溶性有机碳含量无显著影响。

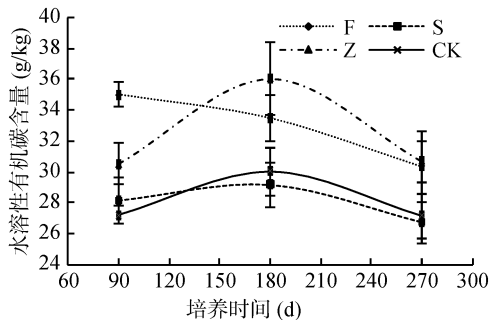


图 3 不同稻草添加对滨海盐渍型水稻土水溶性有机碳的影响

不同稻草处理对土壤微生物生物量碳的影响见图 4。由图 4 可知,不同处理稻草的施入都增加了土壤微生物生物量碳含量。在培养 90 d 时,3 种处理方式(腐熟稻草、稻草生物质炭、直还稻草)土壤微生物生物量碳均高于对照土壤,其中腐熟稻草处理含量最高,而直还稻草与稻草生物质炭处理含量较为接近;随着培养时间的增加,直还稻草处理土壤微生物生物量碳含量上升幅度增加,至培养 270 d 时,3 种稻草处理的含量均高于对照,其中腐熟稻草处理与直还稻

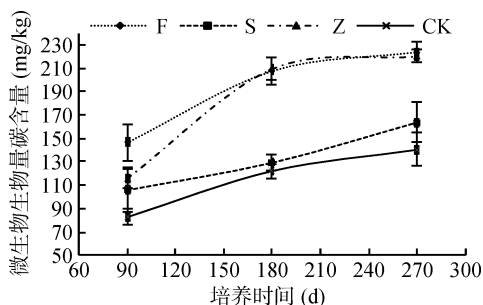


图 4 不同稻草添加对滨海盐渍型水稻土微生物生物量碳的影响

草处理含量较高,分别高于对照 59.50% 和 56.48%,而稻草生物质炭处理仅高于对照 16.70%。

## 3 讨论

### 3.1 不同稻草处理对滨海盐渍型水稻土有机碳稳定性的影响

本研究表明,3 种稻草处理均增加土壤有机碳含量,但同时也会加速土壤有机质的分解。其中,稻草生物质炭处理的分解速率远低于其他处理,同时其土壤有机碳氧化稳定系数也显著高于直还稻草与腐熟稻草处理。这与前人研究结果一致。如 Bruun 等<sup>[15]</sup>使用 <sup>14</sup>C 标记生物质炭及作物秸秆进行 2 年土壤培养试验发现,生物质炭低温和高温碳损失分别为 9.3%、3.1%,远远低于秸秆(56%)的碳损失;Kimetu 和 Lehmann<sup>[16]</sup>报道生物质炭的稳定性及稳定化作用大于其他绿肥类易分解有机物,致使生物质炭的碳损失远低于绿肥;Kuazyakov 等<sup>[17]</sup>使用 <sup>14</sup>C 标记的黑麦草生物质炭培养 60 d 后仅 1.8% ~ 2.1% 的生物质炭被分解。

目前,对于生物质炭在土壤中的分解机理还没有统一的结论,大多认为是微生物降解与无机降解过程相结合。Hame 和 Marschner<sup>[18]</sup>用橡树干和玉米秸秆生物质炭加 <sup>14</sup>C 标记葡萄糖、营养液,接种微生物,在 20 °C 的条件下培养 60 d 发现,葡萄糖的加入促进了生物质炭的分解。无机降解过程可能是一个表面氧化过程。由于生物质炭中硅(Si)和碳(C)的保护机制和芳香碳的聚合程度及其完整度使生物质炭较为稳定,这可能是其长时间残留在土壤中的原因<sup>[19]</sup>。

### 3.2 不同稻草处理对滨海盐渍型水稻土有机碳活性的影响

土壤水溶性碳和微生物生物量碳皆为土壤有机碳的活性指标,与土壤中养分流转、土壤碳循环密切相关,其能在土壤总碳变化之前反映出土壤碳发生的细微变化。本研究表明,直还稻草与腐熟稻草处理都显著增加土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳含量,而稻草生物质炭处理也会增加土壤微生物生物量碳含量,但对土壤水溶性碳含量无显著影响,这与前人研究结果一致<sup>[20]</sup>。3 种有机物质的施用均显著增加土壤微生物生物量碳含量的原因是这些有机物质均能为土壤微生物提供能源,但是,由于 3 种有机物质的组分及其稳定性不同,腐熟稻草较低的碳氮比更利于微生物利用,使得腐熟稻草处理土壤水溶性有机碳和微生物生物量碳含量显著高于直还稻草处理;而随着直还稻草在培养过程中逐渐腐解,土壤中碳氮比向着

有利于微生物活动的方向发展,水溶性有机碳和微生物生物量碳含量随之增加;而稻草生物质炭组分具有较强的稳定性,相对于直还稻草与腐熟稻草处理并不易于被微生物分解,虽然显著增加了微生物生物量碳,而对水溶性有机碳含量无明显影响,另外,还可能与生物质炭较大的比表面积对水溶性有机碳的吸附有关。

#### 4 结论

1)腐熟稻草、直还稻草和稻草生物质炭的施用都可增加滨海盐渍型水稻土中土壤有机碳含量,稻草生物质炭对土壤有机碳含量的增加最为显著( $P<0.05$ ),且施用稻草生物质炭的土壤有机碳氧化稳定系数显著高于其他两种处理和对照( $P<0.05$ ),表明其抗氧化能力最强,有助于土壤有机碳的累积。因此,本研究3种稻草处理皆可增加滨海盐渍型水稻土中有机碳的累积,而稻草生物质炭处理效果最佳。

2)与施用稻草生物质炭和对照相比,腐熟稻草、直还稻草的施用显著增加了滨海盐渍型水稻土水溶性有机碳和微生物生物量碳含量( $P<0.05$ ),表明二者均有增加土壤活性有机质的作用,长期施用可提高农业土壤质量。

#### 参考文献:

- [1] 孙丽宏,林立萍,迟成凯. 滨海盐渍型水稻土最适有机质含量的研究[J]. 科技信息, 2007(4): 217
- [2] 杨志臣,吕贻忠,张凤荣,等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214-218
- [3] 米迎宾,杨劲松,姚荣江,等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 612-620
- [4] Parton W J, Schimei D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in the Great Plains grasslands [J]. Soil Science society of America Journal, 1987, 51: 1173-1179
- [5] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38
- [6] Xiao Z H, Shou Y W. Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37: 1127-1137
- [7] 王志明,朱培立,黄东迈,等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 446-453
- [8] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371-377
- [9] 朱姝,龛森,关松,等. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J/OL]. 土壤学报, 2016, 53(1): 127-136
- [10] 梁桓,索全义,侯建伟,等. 不同炭化温度下玉米秸秆和沙蒿生物炭的结构特征及化学特性[J]. 土壤, 2015, 52(5): 886-891
- [11] 袁可能,张友全. 土壤腐殖质氧化稳定性的研究[J]. 浙江农业科学, 1964(7): 345-349
- [12] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 42(12): 2345-2347
- [13] Kalbitz K, Solinger S, Park J H. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: A review[J]. Soil science, 2000, 165: 277-304
- [14] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. Biology and fertility of soils, 1998, 26: 88-94
- [15] Bruun S, El-Zahery T, Jensen L. Carbon sequestration with biochar—stability and effect on decomposition of soil organic matter[C]. Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. IOPConf. Series: Earth and Environmental Science, 2009
- [16] 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
- [17] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by  $^{14}\text{C}$  labeling [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41: 210-219
- [18] Hamer U, Marschner B. Priming effects of sugars, amino acids, organic acids and catechol on the mineralization of ignin and peat. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, 165: 261-268
- [19] 郭建华. 水稻秸秆生物炭的结构特征、稳定性及其固碳机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [20] 高学振,张丛志,张佳宝,等. 生物炭、秸秆和有机肥对砂姜黑土改性效果的对比研究[J]. 土壤, 2016, 48(3): 468-474

## Effects of Rice Straw-derived Biochar on Organic Carbon Activity in Coastal Saline Paddy Soil

GUAN Lianzhu, JIANG Xuenan, ZHANG Guangcai<sup>\*</sup>, PAN Linlin, ZHANG Ting, ZHAO Ya, YE Chao, ZHANG Yanan, LI Li

*(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University / National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources / Northeast Key Laboratory of Arable Land Conservation and Improvement, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China)*

**Abstract:** In order to clarify the effects of three different rice straw returning modes (rotted rice straw, direct return of rice straw, rice straw-derived biochar) on organic carbon activity in the coastal saline paddy soil, an indoor incubation experiment (at 25 and 270 days) was designed and conducted to study the potential effect of their equivalent carbon application on accumulation and stability of soil organic carbon, the contents of microbial biomass carbon and dissolved organic carbon. Results showed that application of rice straw-derived biochar increased significantly the accumulation and stability of soil organic carbon, and improved the content of microbial biomass carbon. However, it had no effect on the content of dissolved organic carbon. The rotted rice straw and direct return of rice straw treatments increased significantly the contents of soil dissolved organic carbon and microbial biomass at the beginning of incubation experiment, while they had no effects on the accumulation of carbon. Application of rotted rice straw decreased the stability of organic carbon. In conclusion, application of rice straw-derived biochar could increase the accumulation of organic carbon in soil, but it might also decrease activity of soil organic matter after a long-term application without any application of other organic materials. However, its application combined application with rotted rice straw or direct return of rice straw can reduce this negative effect.

**Key words:** Rice straw-derived biochar; Coastal saline paddy soil; Organic carbon activity; Oxidation stability of soil carbon