

添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响*

孙元宏 高雪莹 赵兴敏 隋 标 王鸿斌 赵兰坡[†]

(吉林农业大学资源与环境学院, 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

摘 要 研究添加有机物料后, 土壤重组有机碳含量变化及其对土壤团聚体组成的影响, 对于科学评价秸秆还田对土壤的培肥作用及其环境效应具有重要意义。采用室内培养试验, 培养 120 d, 研究耕作白浆土耕层土壤和母质层中添加不同比例秸秆对土壤重组有机碳积累量、团聚体组成及各粒级团聚体中有机碳分布的影响。结果表明: 随秸秆施用量增加, 耕层土壤和母质的重组有机碳含量均呈同步增加趋势, 耕层土壤和母质相比, 重组有机碳增量差异不大, 两者增量差值仅为 0.34 g kg^{-1} , 但两者的有机碳增率差异很大, 耕层土壤仅为 85.51%, 母质则高达 556.23%。说明在成土过程中, 耕层土壤中有机质的累积会降低其固碳潜力, 而在母质层中, 其固碳“位点”处于“空置”状态, 因此有很强的固碳潜力。同时, 秸秆的添加, 促进了土壤中小粒径团聚体 ($< 0.25 \text{ mm}$) 向大团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 的转化, 耕层土壤和母质土壤在秸秆添加量为 3% 和 2% 时大团聚体中有机碳的贡献率最高, 分别为 69.90% 和 65.48%。在白浆土中添加玉米秸秆培养后, 其母质的固碳能力大于耕层土壤。

关键词 白浆土; 成土母质; 玉米秸秆; 有机碳; 重组; 团聚体

中图分类号 S156 **文献标识码** A

白浆土是吉林省和黑龙江省的重要土壤资源^[1], 总面积约为 $5.27 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。该土壤主要分布于平缓起伏的阶地或台地地形上, 腐殖质累积和白浆化过程是白浆土的主要成土过程^[2]。白浆土的黏粒矿物组成以蛭石和伊利石为主, 具有质地黏重、阳离子交换量较高等特性^[3], 这也为白浆土有机碳的累积及有机无机复合体的形成奠定了物质基础^[4]。自然白浆土一经开垦后, 易发生水土流失, 腐殖质层变薄, 有机质含量迅速下降等问题^[5]。因此, 耕作白浆土一直被列为低产土壤, 玉米产量一般在 $7\ 500 \sim 9\ 000 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[6]。肥力低、酸性强、通透性差、易旱易涝是白浆土肥力低下的主要表现^[7]。在众多的改良措施中, 以提高土壤有机质含量为主要目标的秸秆还田措施是当前白浆土改良培肥的主要农艺措施^[8]。

研究证明, 秸秆还田对于提高土壤有机质含量, 改善土壤腐殖质组成, 促进大粒径团聚体形成, 改良土壤的理化及生物学性质等具有显著作用^[9-10]。将秸秆混合还田是发挥土壤固碳性能、提升有机碳含量、减少温室气体排放的环境友好型土壤培肥措施。但由于土壤的类型、开垦年限、种植制度及培肥管理措施等的不同, 土壤矿质胶体的组成、有机质含量及理化性质等均有很大差异, 势必会造成土壤的固碳性能和潜力上差异。因此, 揭示不同耕作土壤的固碳性能和潜力, 科学地评价秸秆还田措施对土壤的培肥效果及环境效应具有重要科学意义, 同时对以秸秆还田措施为核心环节的低成本、环境友好型耕作模式的构建提供重要理论支撑。

土壤中的重组有机碳是与土壤矿质胶体结合的有机无机复合的碳^[11], 重组有机碳是土壤有机

* 国家自然科学基金项目 (41403077) 和吉林省科技厅科技支撑计划项目 (20130204050SF) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41403077) and the Science and Technology Support Project of Jilin Province (No. 20130204050SF)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaolanpo12@163.com

作者简介: 孙元宏 (1992—), 女, 吉林敦化人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: 842615166@qq.com

收稿日期: 2016-12-13; 收到修改日期: 2017-01-21; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-04-10

碳的主要赋存形式,也是衡量土壤固碳性能的重要指标^[12]。研究土壤中添加秸秆后重组有机碳含量的变化,可揭示土壤的固碳性能及有机无机复合能力。目前,有关东北玉米主产区主要耕作土壤的重组有机碳含量及其对秸秆还田的响应等研究资料尚不多见,生产上已有的各种秸秆还田方法的技术效果评价缺少科学依据,无法横向比较,给技术推广部门带来很大困惑,严重制约了秸秆还田技术的推广。针对这一需求,我们以东北玉米主产区主要耕作土壤之一的白浆土为研究对象,在田间调查的基础上,设置了添加玉米秸秆的恒温培养试验,以揭示在外源秸秆供应充足的条件下,自身有机碳含量较高的耕层土壤尚存的固碳潜力和几乎不含有有机碳的母质层的固碳潜力,为白浆土固碳增汇型秸秆还田技术的构建提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为中位黄土质白浆土,是吉林省分布面积最大的代表性白浆土亚类。于2015年春季采自吉林省永吉县一拉溪镇贾河村一农户的玉米田,该田块玉米连作年限已有20余年,常年施用化肥,不施有机肥。近3年化肥(N-P₂O₅-K₂O:24-15-15三元复合肥)施用量平均为750 kg hm⁻²,玉米产量平均在8 500 kg hm⁻²,属中产田。用蛇形采样法采集耕层混合土样,深度为0~20 cm;于剖面150~200 cm之间采集母质层混合样品。将上述耕层和母质层土样带回室内,经自然风干过2 mm筛子备用,其理化性质见表1。供试玉米秸秆取自吉林农业大学实验田,样品经风干粉碎过1 mm筛子备用。其有机碳含量486.1 g kg⁻¹,全氮

5.29 g kg⁻¹,全磷5.88 g kg⁻¹,全钾7.80 g kg⁻¹,C/N 91.9。

1.2 培养试验

培养试验共设8个处理,秸秆添加量占土壤和秸秆总质量的百分比分别为:0%、0.5%、1%、2%、3%、5%、10%、15%,每个处理重复3次。称取不同比例的秸秆粉和供试土壤共500 g于塑料薄膜上,混合均匀,用蒸馏水将混合样含水量调节至30%后转移至体积为1 200 ml方形带盖(盖上留有通气孔)塑料盒(15.6 cm×11 cm×7 cm)中,称重后放在25℃的恒温培养箱中培养120 d,在此期间,每隔5 d补水至恒重,到期取出风干备用。

1.3 分析方法

土壤重组的提取方法采用比重分组法^[13],具体操作:称取过0.25 mm筛风干土样10.00 g于100 ml离心管中,加入相对密度为1.8的重液(ZnBr₂和蒸馏水添加比约为1:1,用比重计测量其相对密度并调节至1.8 g cm⁻³) 25 ml,连续震荡1 h。处理后的土样以3 000 r min⁻¹转速离心10 min。将离心管中轻组置于有滤纸的玻璃漏斗中过滤,离心管内继续加重液重复上述步骤至轻组无有机物为止。离心管中重组用95%乙醇洗涤3次,再用蒸馏水洗2次,离心管中土样低温烘干称重,将烘干的土样研磨过0.25 mm筛,备用。

土壤团聚体分级方法采用湿筛法^[14],利用自动振荡筛(套筛直径2、1、0.25、0.106 mm)。具体操作:称取风干土样100.00 g于2 mm筛上,在室温下用蒸馏水浸润5 min,然后以30次每分钟速度在蒸馏水中振荡2 min,上下振幅为40 mm,将筛上的团聚体冲洗到烧杯中,获得>2 mm、2~1 mm、1~0.25 mm、0.25~0.106mm的水稳性团聚体,而<0.106 mm水稳性团聚体则需在筒内沉降

表1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of studied soil

土壤 Soil types	pH	CEC (cmol kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	机械组成Mechanical composition (%)			
					> 0.2 mm	0.02 ~ 0.2 mm	0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm
耕层 Top soil	4.82	15.38	15.94	1.66	0.59	37.11	34.05	28.25
母质 Parent material	6.44	18.88	1.61	0.33	0.28	26.00	28.59	45.13

48 h, 弃去清液后, 将团聚体转移至烧杯中。将各级团聚体上漂浮的秸秆捞出, 将盛有团聚体的烧杯置于50 °C电热板上烘干、称重, 计算各粒级团聚体的百分数, 各级团聚体磨细过0.25 mm筛备用。

土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化外加热法, 阳离子交换量测定采用乙酸铵法, pH测定采用电位法, 全氮测定采用硫酸消煮—凯氏定氮法, 机械组成测定采用吸管法和筛分法。

1.4 数据处理

文中数据采用Excel进行数据处理, 采用SPSS

22.0软件最小显著性差异法(LSD)进行显著性差异比较, 图形用Origin 2017进行分析处理。

2 结果与讨论

2.1 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳含量的影响

供试白浆土耕层及母质层土壤添加不同量的玉米秸秆后, 重组有机碳均发生了明显变化(图1), 各处理的重组有机碳含量均随秸秆添加量的增加而相应升高。耕层土壤的重组有机碳含量曲线

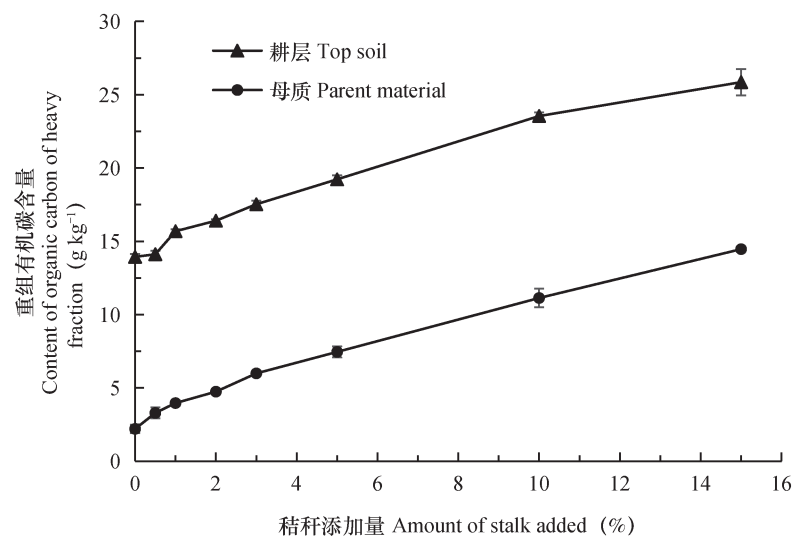


图1 不同秸秆添加量对耕层土壤和母质重组有机碳含量的影响

Fig. 1 Effects of stalk incorporation on content of organic carbon of heavy fraction in the top soil and parent material relative to incorporation rate

位于母质层土壤的上方, 说明耕层土壤各处理的重组有机碳含量均明显高于母质层。

由图2可见, 随秸秆添加量的增加, 耕层与母质层各处理的重组有机碳含量与未添加秸秆处理(对照)的重组有机碳含量的差值(简称为“重组有机碳增量”)及其相对于对照的增加比率(重组有机碳增率)是有一定差异的。耕层土壤重组有机碳增量随秸秆添加量的增加而缓慢增加, 在秸秆添加量高达15%的处理中, 耕层土壤的重组有机碳增量为11.92 g kg⁻¹, 母质层土壤的重组有机碳增量为12.26 g kg⁻¹, 两者的绝对增量差值为0.34 g kg⁻¹, 差异不是很大。但两者的有机碳增率则有很大差异, 前者仅为85.51%, 后者高达556.23%, 即5.56倍, 说明母质的固碳能力及潜力远远高于耕层土壤。

秸秆还田是提升土壤有机质含量有效措施^[15-16], 但土壤有机碳提升的幅度取决于秸秆的还田数量和性质, 同时也与土壤的固碳性能及其所处的气候环境有关^[17]。土壤中的黏粒是有机无机复合体形成的重要基础物质, 是土壤中碳素固定的主要载体^[18-19]。本研究中, 随秸秆添加量的增加, 供试的白浆土耕层及其成土母质的重组有机碳含量均呈相应增加态势, 即使在有机碳含量高达15.94 g kg⁻¹耕层土壤中, 秸秆添加量高达15%的情况下, 其重组有机碳含量仍然呈现明显上升趋势, 远未达饱和点。相比之下, 母质的固碳潜力更大。有研究表明, 在不同有机碳含量的黑土中, 加入不同比例秸秆的条件下, 土壤重组有机碳含量均升高, 在低有机碳含量的土壤中施入秸秆对有机碳的提升效果更为明显, 本研究结果与其一致^[20]。在供试的母质

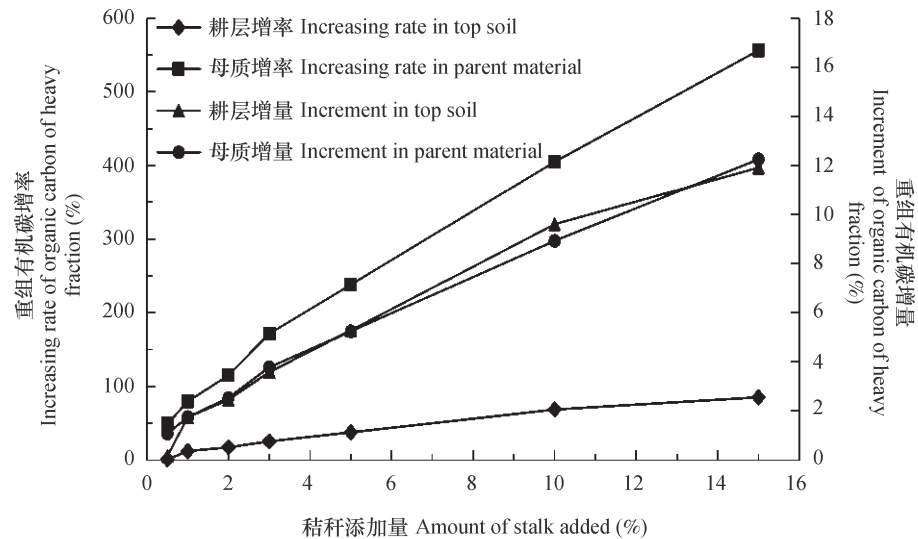


图2 随秸秆添加量增加耕层土壤和母质重组有机碳增加的关系

Fig. 2 Relationship of increment of organic carbon of heavy fraction in the top soil and parent material with incorporation rate of corn stalk

中，其黏粒含量高达45.13%，而其有机质含量仅为 1.61 g kg^{-1} ，黏粒胶体大量的固碳“位点”呈空置状态，致使其固碳潜力远大于耕层土壤。在母质土壤中，当外援秸秆碳供应充足时，秸秆在短时间内就可转化为土壤的重组有机碳，进而可大幅提升母质中重组有机碳含量。目前，白浆土区培肥改良的主要措施是玉米秸秆的全量还田，本研究结果可以看出，这种措施连年实施不会造成土壤固碳容量的饱和而丧失固碳能力，亦不会增加秸秆还田条件下的碳排放。

2.2 添加玉米秸秆对白浆土团聚体组成的影响

表2表明，供试的白浆土耕层土壤及母质中添加玉米秸秆后，其团聚体的组成是以 $1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径为主体，不同秸秆添加量的处理间有很大差异。随着秸秆添加量的增加，母质层土壤中的 $>0.25 \text{ mm}$ 的团粒含量均呈显著增加趋势，耕层土壤在5%秸秆添加量时含量最高。其中， $>2 \text{ mm}$ 的大团聚体含量均呈现出先增加后减少的趋势，在母质中，秸秆添加量为10%处理的大团聚体含量最高，耕层土壤则在5%时达最大； $2 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径团聚体含量则呈现出随秸秆添加量的增加而逐渐增加的趋势；在母质中，各添加秸秆处理的 $1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 均小于未添加秸秆的对照，在耕层土壤中变化趋势不明显。无论是耕层土壤或是在母质中， $<0.25 \text{ mm}$ 微团聚体含量均随秸秆添加量的增加而呈减少的趋势。

土壤中添加有机物料后，增加了总有机碳和重组有机碳的含量，必然会引起团聚体组成的变化。有学者在黑土中加入4%的秸秆条件下培养180 d，大团聚体含量相比对照增加了10倍左右^[21]。仇建飞等^[22]研究证明添加秸秆促进了大团聚体的形成，在添加量为5%条件下大团聚体的含量较3%增加显著，微团聚体含量随秸秆添加量的增加而降低。而本研究中，大团聚体含量不是无限度升高的，造成此差异的原因是因为前人试验中玉米秸秆的添加量远不及本研究的添加量高。过量秸秆并不能使 $>2 \text{ mm}$ 粒级团聚体含量一直增加，是因为当秸秆过多时阻碍了小团聚体的相互团聚，而当秸秆量较大时微生物量随着氮源的减少而竞争加大，导致微生物活性下降，微生物量也是影响土壤颗粒团聚的重要因素^[23]。

农田中有机物料的施入为微生物提供了丰富的碳源，微生物在分解秸秆的过程中产了易分解态的有机质（糖类、有机酸、腐殖物质）等，这些物质将小团聚体胶结在一起形成大团聚体^[24]。同时，添加秸秆促进了真菌和细菌的繁衍，微团粒在与菌丝和根系的相互作用缠绕下形成大团聚体^[25]。而土壤的团粒结构是作物高产的条件之一^[26]，土壤团聚体对维持和稳定土壤肥力有着重要作用。

2.3 添加玉米秸秆对土壤各级团聚体有机碳的影响

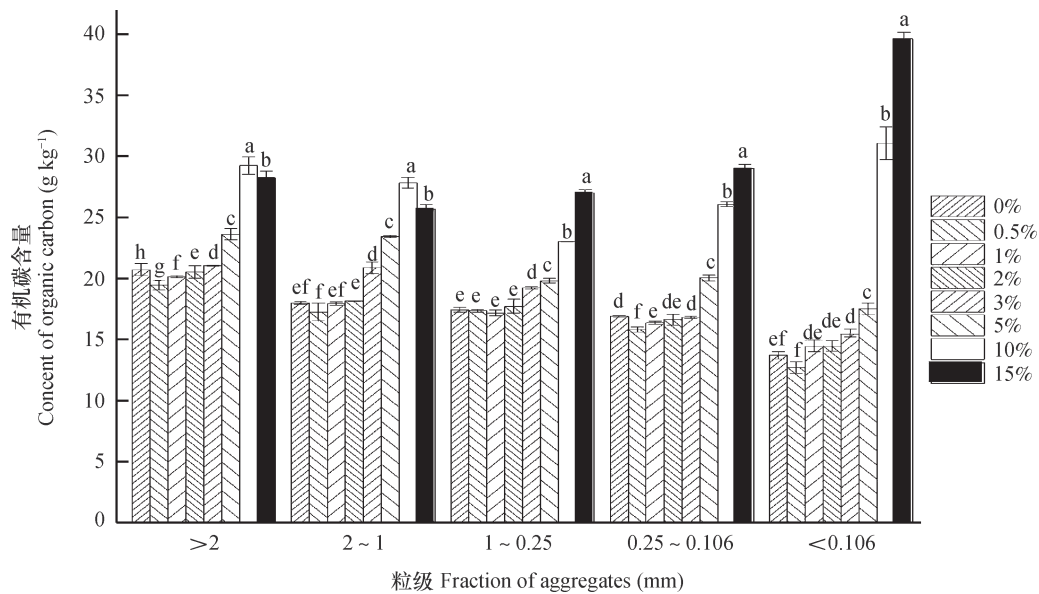
从图3、图4可看出，将秸秆添施入到土壤中，使土壤各粒级有机碳含量均明显升高。白浆土

表2 不同用量玉米秸秆条件下耕层土壤和母质的团聚体组成

Table 2 Composition of soil aggregates in the top soil and parent material relative to incorporation rate of corn stalk (%)

土壤 Soil	处理 Treatment	粒级 Fraction of aggregates (mm)				
		> 2	2 ~ 1	1 ~ 0.25	> 0.25	< 0.25
耕层 Top soil	0%	0.14 ± 0.13e	7.35 ± 0.67g	46.91 ± 1.21d	54.40 ± 1.48g	45.60 ± 1.48a
	0.5%	0.66 ± 0.07e	14.88 ± 1.31de	42.46 ± 2.24e	58.00 ± 1.08f	42.00 ± 1.08b
	1%	1.51 ± 0.15e	9.77 ± 0.51f	50.46 ± 1.30c	61.74 ± 0.65e	38.26 ± 0.65c
	2%	4.94 ± 0.69d	13.50 ± 0.93e	54.16 ± 1.50b	72.60 ± 0.38d	27.40 ± 0.38d
	3%	9.14 ± 0.98b	16.95 ± 1.95d	58.87 ± 1.16a	84.97 ± 1.47c	15.03 ± 1.47e
	5%	13.64 ± 1.87a	29.27 ± 0.78c	49.52 ± 1.84cd	92.44 ± 0.73a	7.56 ± 0.73g
	10%	7.31 ± 0.47c	50.17 ± 1.71a	34.65 ± 1.32f	92.14 ± 1.38ab	7.86 ± 1.38fg
	15%	5.59 ± 0.48d	41.86 ± 1.19b	42.85 ± 2.20e	90.30 ± 1.42b	9.70 ± 1.42f
母质 Parent material	0%	0.13 ± 0.02e	7.90 ± 0.34f	45.41 ± 1.00a	53.44 ± 1.25g	46.56 ± 1.25a
	0.5%	0.58 ± 0.07e	20.33 ± 0.83e	35.70 ± 0.62e	56.62 ± 0.45f	43.38 ± 0.45b
	1%	6.42 ± 0.58d	26.62 ± 1.06d	26.84 ± 1.23f	59.88 ± 2.42e	40.12 ± 2.42c
	2%	7.81 ± 0.79c	26.64 ± 1.20d	42.96 ± 1.28b	77.41 ± 2.19d	22.59 ± 2.19d
	3%	10.40 ± 0.38b	33.16 ± 0.72c	40.70 ± 0.95c	84.27 ± 1.91c	15.73 ± 1.91e
	5%	10.93 ± 0.29b	34.09 ± 0.37c	43.41 ± 0.91b	88.44 ± 0.33ab	11.56 ± 0.33fg
	10%	12.12 ± 0.50a	37.49 ± 0.91b	37.59 ± 0.74d	87.21 ± 1.40b	12.79 ± 1.40f
	15%	10.89 ± 0.71b	43.54 ± 0.99a	36.55 ± 0.58de	90.99 ± 0.86a	9.01 ± 0.86g

注：表中不同小写字母表示不同处理间的差异，显著水平 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters mean significant differences between treatments at 5% level according to LSD's multiple range test



注：不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异， $p < 0.05$ 。下同 Note: Different lowercase letters in the figure mean significant difference between treatments the same in aggregate particle size ($p < 0.05$). The same below

图3 不同秸秆用量条件下耕层土壤不同粒级的含碳量

Fig. 3 Carbon content in soil aggregates in the top soil relative to incorporation rate of corn stalk and particle size

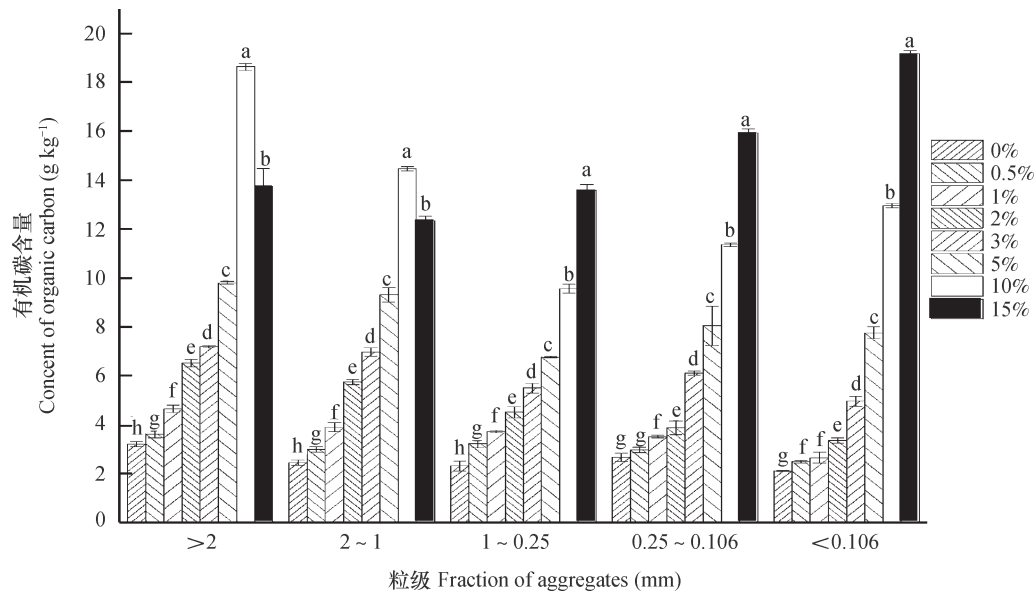


图4 不同秸秆用量条件下母质层不同粒级的含碳量

Fig. 4 Carbon content in soil aggregates in the parent material relative to incorporation rate of corn stalk and particle size

耕层土壤和母质土壤随着秸秆施用量的增加,在 > 2 mm、2 ~ 1 mm 粒级团聚体的有机碳含量均呈现出先增加后减少的趋势,当秸秆施用量为 10% 时有机碳含量最高。在 1 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.106 mm、< 0.106 mm 粒级的团聚体中,无论是耕层土壤还是母质土壤均表现为随秸秆施用量的增加土壤有机碳含量逐渐升高的趋势。从图 3 可知,各粒级团聚体未加秸秆处理较加 0.5% 秸秆处理的有机碳含量高,是因为耕层土壤原有机碳含量较高,在加入少量秸秆后产生“激发效应”促进原有机碳的分解。添加适量秸秆能显著提高大团聚体 (> 0.25 mm) 中有机碳的贡献率,耕层土壤和母质土壤分别在秸秆添加量为 3% 和 2% 时大团聚体中有机碳的含量最高,分别为 69.90% 和 65.48%。此外,母质土壤在施入少量秸秆时各级有机碳增幅迅速增加,耕层土壤在添加量为 5% 以上的秸秆时增幅才显著,说明添加外源碳对母质层土壤有机碳的增加更为显著,而对本底有机碳含量较高的土壤在达到一定量时增幅才明显。

添加秸秆引起了土壤中团聚体含量的变化,也必定会导致团聚体中碳的分布发生变化。郝翔翔等^[27]研究发现,在土壤中连续施用 8 年秸秆后,各粒级团聚体内有机碳含量普遍提高,土壤中大团聚体有机碳的贡献率显著增加,而微团聚体有机碳的贡献率则明显减少。孙汉印等^[28]研究了在不同秸秆还田模式下土壤团聚中有机碳的变化,结果表

明秸秆还田增加了 > 2 mm 和 0.25 ~ 0.053 mm 粒级团聚体中有机碳的贡献率。国外学者采用 C¹⁴ 标记玉米秸秆,证明在大团聚体中残留的玉米秸秆碳量较其他粒级的有机碳高的多^[29]。本研究中适量的秸秆能增加大团聚体中有机碳的贡献率,是因为当添加外源有机碳进入土壤时,大团聚体成为微生物活动的主要场所^[30],增大了碳被土壤固定的机率。其次,小团聚体向大团聚体团聚的过程中也导致了碳的迁移。赵兰坡等^[4]研究表明,有机质在积累的过程中先于较细颗粒中积累,当吸附位点饱和,而有机质仍较丰富时,在较大颗粒中有机质的积累便增多。而当秸秆量过多时大团聚体中有机碳的贡献率却降低了,可能是因为随着秸秆添加量的增加,秸秆与土壤的比例逐渐变大,秸秆碳与土壤结合的点位变少,且大量秸秆充斥着土壤阻碍了其碳的迁移所致。

3 结论

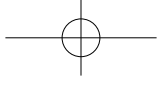
与未添加玉米秸秆相比,随着秸秆添加量的增加,耕层土壤和母质层土壤重组有机碳量均显著增加,且母质层土壤重组有机碳增率远高于耕层土壤;无论是耕层还是母质层土壤,施入秸秆促进了土壤中大团聚体的形成,但随秸秆添加量增加到一定程度 > 2 mm 粒级团聚体含量不再增加反而降低;添加玉米秸秆提高了耕层土壤和母质层土壤各

级团聚体的有机碳含量, 适宜的秸秆添加量可显著提高大团聚体中有机碳对土壤总有机碳的贡献率, 且添加外源碳对母质层土壤各粒级有机碳含量的增加更为明显; 母质在其几乎不含有有机碳的情况下, 固碳能力高于耕层土壤。

参考文献

- [1] 孟庆英, 张春峰, 贾会彬, 等. 不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响. 土壤学报, 2016, 53 (2): 552—559
Meng Q Y, Zhang C F, Jia H B, et al. Effects of mechanical soil amelioration method on physical properties of and enzyme activity in planosol (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 552—559
- [2] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 2版. 北京: 科学出版社, 1987: 355—356
Hseung Y, Li Q K. *Soils of China* (In Chinese). 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987: 355—356
- [3] 赵兰坡, 井上克弘, 吉田稔. 吉林省主要耕作土壤的黏粒矿物组成. 土壤学报, 1993, 30 (3): 267—273
Zhao L P, Katsuhiko L, Minorn Y. Composition of clay mineral in some main cultivated soil in Jilin Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30 (3): 267—273
- [4] 赵兰坡, 马晶, 杨学明, 等. 耕作白浆土有机无机复合体腐殖质组成及类型. 土壤学报, 1997, 34 (1): 28—41
Zhao L P, Ma J, Yang X M, et al. Composition and types of humus in different particle fractions of arable albic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34 (1): 28—41
- [5] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998: 137—144
Soil and Fertilizer Station of Jilin Province. *Jilin soil* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998: 137—144
- [6] 朱宝国, 张春峰, 贾会彬, 等. 白浆土心土间隔改良对土壤理化性状及作物产量的影响. 土壤通报, 2014, 45 (3): 704—710
Zhu B G, Zhang C F, Jia H B, et al. Effect of subsoil mixing interval on physical and chemical characteristics and yield of crops in planosol (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (3): 704—710
- [7] 贾会彬, 刘峰, 赵德林, 等. 白浆土某些理化特性与改良的研究. 土壤学报, 1997, 34 (2): 130—137
Jia H B, Liu F, Zhao D L, et al. Research on some physical-chemical properties and improvement of planosols (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34 (2): 130—137
- [8] 于德清, 丁庆堂, 关熙铭, 等. 种植牧草在白浆土改良中的作用. 应用生态学报, 1993, 4 (1): 37—41
Yu D Q, Ding Q T, Guan X M, et al. Role of planting grass in albic soil amelioration (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4 (1): 37—41
- [9] 赵兰坡. 施用作物秸秆对土壤的培肥作用. 土壤通报, 1996, 27 (2): 76—78
Zhao L P. Effect of crop straw on soil fertility (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27 (2): 76—78
- [10] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响. 农业环境科学学报. 2011, 30 (11): 2362—2367
Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (11): 2362—2367
- [11] 熊毅. 土壤胶体. 2册: 土壤胶体研究法. 北京: 科学出版社, 1985: 44—48
Hseung Y. *Soil colloid*. 2nd vol. Experiment approach of soil colloid (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985: 44—48
- [12] Swanston C W, Caldwell B A, Homann P S, et al. Carbon dynamics during a long-term incubation of separate and recombined density fractions from seven forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1121—1130
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 116—119
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 116—119
- [14] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1071—1076
- [15] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. 中国生态农业学报, 2013, 21 (5): 526—535
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (5): 526—535
- [16] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还

- 田对黑土有机质组成和酶活性的影响. 土壤学报, 2015, 52 (3): 665—672
- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation on crop straw on composition of soil organic matter and enzyme and activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 665—672
- [17] Ye R Z, Doane T A, Morris J, et al. The effect of rice straw on the priming of soil organic matter and methane production in peat soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81: 98—107
- [18] Huntington T. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the Southern USA. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1459—1467
- [19] Richter H, Lorenz W, Bahadir M. The global equivalence ratio conception laboratory scale combustion experiments. *Chemosphere*, 1999, 39 (4): 555—562
- [20] 张雷. 有机物料、温度和土壤水分对黑土有机碳分解的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004
- Zhang L. Effects of organic material, temperature and soil moisture on organic carbon decomposition of black soil (In Chinese). Harbin: Northeast Agricultural University, 2004
- [21] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响. 水土保持学报, 2010, 24 (4): 187—191
- Guan S, Dou S, Hu Y Z, et al. Effects of application of corn stalk on distribution of C and N in black soil aggregates (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4): 187—191
- [22] 仇建飞, 窦森, 邵晨, 等. 添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响. 土壤学报, 2011, 48 (4): 781—787
- Qiu J F, Dou S, Shao C, et al. Effects of corn stalk application on quantity and structural characteristics of humus acid in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (4): 781—787
- [23] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究. 生态环境学报, 2013, 22 (9): 1625—1632
- Li N, Han X Z, You M Y, et al. Research review on soil aggregates and microbes (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (9): 1625—1632
- [24] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103: 412—418
- [25] Tisdall J M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil*, 1994, 159 (1): 145—153
- [26] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36 (3): 415—421
- Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36 (3): 415—421
- [27] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响. 中国农学通报, 2013, 29 (35): 263—269
- Hao X X, Yang C B, Yuan Y R, et al. Effects of continuous straw returning on organic carbon content in aggregates and fertility of black soil (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (35): 263—269
- [28] 孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究. 农业环境科学学报, 2012, 31 (2): 369—376
- Sun H Y, Ji Q, Wang Y, et al. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (2): 369—376
- [29] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ¹⁴C-labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42 (6): 953—959
- [30] Jastrow J D, Bouton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801—807



Effects of Corn Stalk Incorporation on Organic Carbon of Heavy Fraction and Composition of Soil Aggregates in Albic Soil

SUN Yuanhong GAO Xueying ZHAO Xingmin SUI Biao WANG Hongbin ZHAO Lanpo[†]

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, Changchun 130118, China)

Abstract 【Objective】 The purpose of this study is to illustrate effects of incorporation of organic material on organic carbon of the heavy fraction and composition of soil aggregates in the soil in the hope that the work may be of some important significance to scientific evaluation of the effects of incorporation of crop straw into the soil on soil fertility and the environment. 【Method】 An in-lab experiment was carried out incubating for 120 days columns of albic soil with corn stalk incorporated into top soil and parent material at a varying rate, and then analyses done for accumulation of organic carbon of heavy fraction, composition of soil aggregates and distribution of organic carbon in various fractions of soil aggregates as affected by incorporation rate of corn stalk. 【Result】 It was found that content of the organic carbon of heavy fraction in both the top soil and parent material increased simultaneously with the increasing incorporation rate of corn stalk. The two soils did not differ much in increment of the content of the organic carbon of heavy fraction, showing a slight difference of being only 0.34 g kg^{-1} . However, they varied sharply in increasing rate of organic carbon. In the top soil, organic carbon increased by 85.51% only and in the parent material by 556.23%. It was also found that, the incorporation of stalk promoted transformation of small aggregates ($< 0.25 \text{ mm}$) to large aggregates ($> 0.25 \text{ mm}$) in the soil. When the amount of corn stalk added is too high, $> 2 \text{ mm}$ size aggregates no longer increase but decrease. When corn stalk was incorporated at a rate of 3% and 2%, the fraction of large aggregates contributed the most to the content of organic carbon in the soil reaching up to 69.90% and 65.48%, respectively. 【Conclusion】 In this study, the addition of stalk promoted accumulation of organic carbon of heavy fraction and formation of large-sized aggregates and increased organic carbon content in aggregates in various particle-size, adding the appropriate amount of corn stalk can increase the contribution rate of organic carbon in the large-sized aggregates fractions. Compared to the top soil, that in the parent material soil had organic carbon increased by a far more high rate. The effect of the addition of extraneous carbon increasing organic carbon content in aggregates of all particle sizes was more apparent. The soil in the parent material layer was much higher than the top soil in carbon sequestration capacity, in the case that the former almost contained nil of organic carbon.

Key words Albic soil; Parent material; Corn stalks; Organic carbon; Heavy fraction; Aggregates

(责任编辑：卢 萍)