

不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响

石艳香¹, 迟凤琴^{2*}, 张久明^{2*}, 匡恩俊², 佟玉欣², 马星竹², 朱莹雪², 袁佳慧²

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:【目的】探讨黑土中添加秸秆对团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响, 为东北黑土地保护提供依据。【方法】基于 43 年的黑土长期定位试验, 选取不施肥 (CK)、单施有机肥 (M)、单施氮磷钾化肥 (NPK)、常量有机肥配施氮磷钾化肥 (MNPk) 和高量有机肥配施化肥 ($M_2N_2P_2$) 5 种处理的土壤, 添加等量秸秆 (相当于实际生产的全量秸秆还田) 后采用砂滤管法进行田间原位培养, 在培养的第 0、60 和 150 d 取样分析土壤团聚体的稳定性、团聚体有机碳含量及添加秸秆对土壤有机碳的贡献率。【结果】添加秸秆促进了土壤大团聚体 ($> 250 \mu\text{m}$) 的形成, 提高了大团聚体的比例, 其中, 常量有机肥配施氮、磷、钾化肥处理大团聚体含量增加效果显著, 高于其它施肥处理; 但随着培养时间的增加大团聚体含量减少, 随之团聚体的稳定性呈现下降趋势。添加秸秆能够提高土壤大团聚体有机碳的含量, 且高量有机肥配施化肥处理增加效果较好。单施有机肥、单施氮磷钾化肥、常量有机肥配施氮磷钾化肥处理中添加的秸秆对大团聚体有机碳的贡献率均达到 80% 以上 ($P < 0.05$); 但随着培养时间的增加, 秸秆对大团聚体有机碳贡献逐渐下降, 而对 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率呈上升趋势, 有机碳在较小粒级的土壤团聚体中积累, 进一步说明添加秸秆会影响团聚体分布的比例, 进而影响团聚体有机碳的贡献率。【结论】添加秸秆提高了黑土团聚体稳定性和有机碳含量, 高肥力 ($M_2N_2P_2$) 黑土配合秸秆还田可以提高土壤有机碳的固存能力。

关键词: 黑土; 玉米秸秆; 水稳性团聚体; 土壤有机碳; 长期施肥

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)04-0856-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022070601

石艳香, 迟凤琴, 张久明, 匡恩俊, 佟玉欣, 马星竹, 朱莹雪, 袁佳慧. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 856 - 863

SHI Yan-xiang, CHI Feng-qin, ZHANG Jiu-ming, KUANG En-jun, TONG Yu-xin, MA Xing-zhu, ZHU Ying-xue, YUAN Jia-hui. Effects of Straw Addition on Stability of Soil Aggregates and Contribution of Organic Carbon Under Different Fertilization Treatments in Black Soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 856 - 863

0 引言

【研究意义】土壤团聚体和土壤有机碳是土壤结构的重要物质基础和肥力的重要载体^[1], 是评价土壤结构质量的重要指标, 其动态变化能够反映土壤的理化性质和生态功能^[2]。土壤有机碳是土壤团聚体形成过程中重要的胶结物质^[3], 能够决定土壤肥力水平^[4]。同时, 团聚体形成过程能够促进土壤固碳, 对土壤有机碳起到保护作用^[5]。【前人研究进展】国内外研究表明, 添加外源有机物料是增加团聚体稳定

性、提高农业土壤有机碳质量快速而有效的途径^[6]。秸秆还田不仅能够增加有机碳含量, 对维持和提高土壤有机质含量以及改善土壤结构具有重要意义^[7]。适当的秸秆还田能够起到稳定土壤性质和固碳等生态功能的关键作用^[8]。朱锟恒等^[9]研究表明, 秸秆还田后其腐熟过程中产生的多糖等代谢物可以促进土壤团聚体的形成。崔荣美等^[10]在渭北旱塬以秸秆还田 9000 kg hm^{-2} 和 13500 kg hm^{-2} 发现, 连续秸秆还田 3 年后 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质含量分别较对照提高了 8.92% 和 9.85%, 且 $> 0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量显

收稿日期: 2022-07-06; 修订日期: 2022-12-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500204)、黑龙江省博士后基金项目 (LBH-Z19206)、黑龙江省农业科学院杰出青年基金项目、黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”项目 (HNK2019CX13) 和水稻土和白浆土质量与产能提升三江示范区项目 (XDA28100400) 资助

作者简介: 石艳香 (1998-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力方面研究。E-mail: 18204955034@qq.com

*通讯作者: E-mail: fqchi2013@163.com; E-mail: zjm_8049@163.com

著高于对照。黑土与棕壤连续 5 a 秸秆还田, 研究发现在团聚体稳定性、有机碳含量及分布方面有较好的改善效果^[11]。秸秆还田能够增加白浆土的有机质含量, 且秸秆还田量越大效果越明显^[12]。孙雪^[13]等通过对华北平原潮褐土添加有机物料研究表明, 秸秆还田和有机粪肥的施用可以促进大团聚体的合成提高有机碳组分含量, 增强有机碳在团聚体中的富集能力。以上研究结果表明, 秸秆还田后对土壤团聚体以及有机碳含量影响差异, 是受土壤类型, 生态环境, 气候条件以及耕作措施等影响, 但对土壤结构和有机碳含量均具有促进作用。【本研究切入点】黑土是我国最肥沃的土壤之一, 是商品粮生产基地, 自二十世纪五十年代大规模的开垦以来, 由于长期高强度利用, 土壤侵蚀严重, 土地结构遭到破坏, 土壤肥力日趋退化, 有机碳含量逐渐下降^[14]。近年来, 关于秸秆还田对团聚体影响的研究较多, 但利用长期不同施肥处理黑土进行秸秆还田后有机碳在团聚体中的变化研究较少。【拟解决的问题】本研究利用黑土长期定位施肥试验, 分析其添加秸秆后各施肥处理的土壤团聚体分布、稳定性以及团聚体有机碳的变化特征, 阐明秸秆添加后各粒级团聚体有机碳与团聚体稳定性间的关系, 旨在为土壤固碳和黑土可持续利用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料

试验在农业农村部哈尔滨黑土生态环境重点野外科学观测试验站 (126°51'28" E, 45°50'37" N) 进行。

该试验站始建于 1979 年, 属中温带季风气候, 年平均气温为 3.6 °C; 年均无霜期为 150 d; 年均降水量为 500 mm, 土壤为发育于黄土状母质上的中层黑土。试验站种植体系为小麦—大豆—玉米长期轮作。初始耕层 (1979 年, 0~20 cm) 土壤基本性质为: 有机碳含量为 15.5 g kg⁻¹, 全氮含量为 1.47 g kg⁻¹, 全磷 (P₂O₅) 含量为 1.07 g kg⁻¹, 全钾 (K₂O) 含量为 25.16 g kg⁻¹, 碱解氮含量为 151 mg kg⁻¹, 有效磷含量为 51 mg kg⁻¹, 速效钾含量为 200 mg kg⁻¹, pH 为 7.2。

1.2 试验设计

本研究选取长期定位试验站的 5 个施肥处理, 各处理施肥量详见表 1, 每个处理 4 次重复。2021 年春季采集不同处理 0~20 cm 土层原状土壤样品, 当季作物为玉米。挑除植物根系等杂质后, 将样品风干至含水量达到土壤塑限 (含水量约在 22%~25% 左右), 把大土块沿着脆弱带轻轻掰开, 使其能通过 2 mm 筛子, 然后继续在室温下自然风干。分别称取各处理风干土壤 120 g 与玉米秸秆 (0.5~1 cm) 1.5 g (相当于生产实际秸秆全量还田) 混匀, 装入砂滤管中, 埋入对应处理表层 0~20 cm 土层进行田间原位培养。所用玉米秸秆含碳量为 356 g kg⁻¹, 含氮量为 10.2 g kg⁻¹, 碳氮比为 34.90。分别在培养后第 60 d 和 150 d 取出。取样时将砂滤管悬空倒放, 轻轻地把所有的土壤样品晃动出来, 用四分法从每管土样中分别取出 40 g 样品, 剩余的土壤重新放回砂滤管中, 重新密封并埋回相应土层。

表 1 长期定位试验中不同施肥处理的施肥量

Table 1 The amount of fertilizer application in long-term located fertilization experiment

处理 Treatment	施氮量 (kg hm ⁻² y ⁻¹) N			施磷量 (kg hm ⁻² y ⁻¹) P ₂ O ₅			施钾量 K ₂ O (kg hm ⁻² y ⁻¹)	有机肥 Horse manure (t hm ⁻²)
	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize		
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	150	75	150	75	150	75	75	0
M	0	0	0	0	0	0	0	18.6
MNPK	150	75	150	75	150	75	75	18.6
M ₂ N ₂ P ₂	300	150	300	150	300	150	0	37.2

注: CK 表示不施肥; N、P、K、M (常量) 分别表示施氮肥、磷肥、钾肥、有机肥; N₂、P₂、M₂ 分别表示施肥量为常量的 2 倍; CK、NPK、M、MNPK 和 M₂N₂P₂ 为不同的施肥处理。下同

1.3 测定方法

水稳性团聚体分级: 采用湿筛法^[15]利用土壤团聚体分析仪 (SAA08052, 上海) 进行团聚体分级。室温条件下, 称取过了 5 mm 筛风干土壤样品 50 g,

置于 2 mm 筛子上, 蒸馏水中浸润 5 min 后, 以 30 次 min⁻¹ 运行速度振荡 30 min, 振幅 3 cm, 依次获得 > 250 μm, 53~250 μm 和 < 53 μm 粒级的团聚体, 团聚体沉降 48 h 后, 弃去上清液获得。各级别团聚

体于 60 °C 下烘干, 称重, 磨细过 100 目筛。 > 250 μm 级别的团聚体为水稳性大团聚体, < 250 μm 级别的团聚体 (53 ~ 250 μm 和 < 53 μm) 为水稳性微团聚体。

土壤有机碳测定: 先用 1 mol L⁻¹ 盐酸处理去除样品中无机碳, 然后利用总有机碳分析仪 (TOC multi N/C, 德国) 测定土壤和团聚体样品中有机碳含量。

1.4 数据处理

数据处理采用 Microsoft Office Excel 2010, 统计分析采用 SPSS Statistics 17.0 软件, 运用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

团聚体稳定性一般采用平均重量直径 (MWD) 表示:

$$MWD = \sum_{i=1}^3 \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中: i 为 3 个不同级别 (> 250 μm, 53 ~ 250 μm, < 53 μm); r_{i-1} , r_i 分别代表第 $i-1$ 与第 i 个级别筛子的孔径别筛子; 令 $r_0=r_1$, $r_2=r_3$, m_i 是第 i 个级别水稳性团聚体质量百分含量 (%)。

利用李玮等^[6]方法计算各粒级团聚体对土壤有

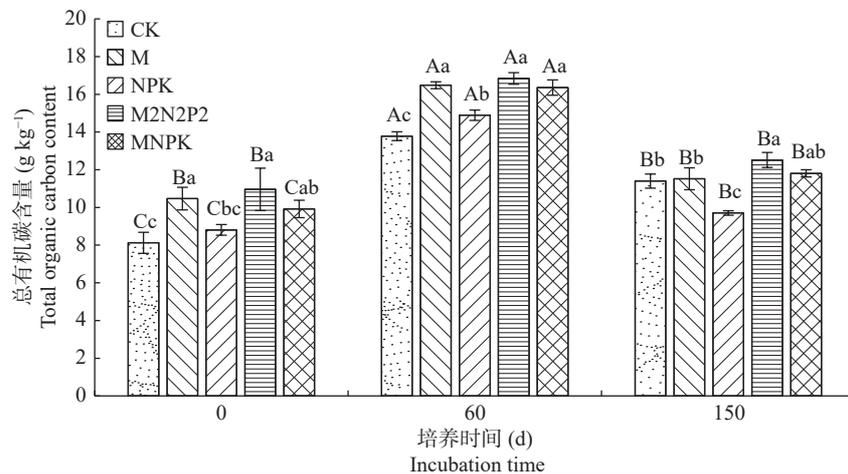
机碳的贡献率:

$$\text{团聚体有机碳贡献率(\%)} = \frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体比例}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 秸秆添加后各处理土壤总有机碳含量

添加秸秆后不同施肥处理土壤总有机碳含量存在明显差异 (图 1)。添加秸秆 0 d, 不同施肥处理 (M、M₂N₂P₂ 和 MNPK) 土壤总有机碳含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。添加秸秆培养后, 土壤总有机碳含量呈增加趋势, 增加幅度为 10.02% ~ 69.63% ($P < 0.05$)。在培养 60 d 时, M、MNPK、M₂N₂P₂ 和 NPK 处理与 CK 相比土壤总有机碳含量分别显著提高了 19.59%、18.72%、22.21% 和 8.06%; 培养 180 d 时, 有机肥 (M、MNPK、M₂N₂P₂) 处理的土壤总有机碳含量均高于 CK, 其中 M₂N₂P₂ 处理达到显著水平 ($P < 0.05$), 而 NPK 处理的总有机碳含量较 CK 降低了 14.82% ($P < 0.05$)。随着培养时间的增加, 土壤总有机碳的含量总体呈下降趋势。



注: 小写字母表示同一培养时间不同施肥处理之间的差异性, 大写字母表示同一施肥处理土壤不同培养时间之间的差异性

图 1 添加秸秆后不同施肥处理土壤总有机碳含量的变化

Fig.1 Changes of soil total organic carbon contents in different fertilization treatments with straw addition

2.2 添加秸秆后各处理土壤团聚体的变化特征

2.2.1 添加秸秆对土壤团聚体分布的影响 从图 2 可知, 与添加秸秆 0 d 相比, 添加秸秆培养后土壤各粒级团聚体发生明显变化。添加秸秆 0d 时, 土壤大团聚体 (> 250 μm) 比例表现为 MNPK > NPK > CK > M > M₂N₂P₂; M 和 M₂N₂P₂ 处理 53 ~ 250 μm 粒

级团聚体比例高于 CK 处理; 与 CK 相比, 除 MNPK 处理外, 其它处理 < 53 μm 粒级团聚体比例均有所提高。与添加秸秆 0 d 相比, 添加秸秆 60 d 后, 各施肥处理土壤大团聚体 (> 250 μm) 所占比例提高; 53 ~ 250 μm 粒级团聚体比例降低; 除 M₂N₂P₂ 外, 土壤 < 53 μm 粒级团聚体比例低于添加

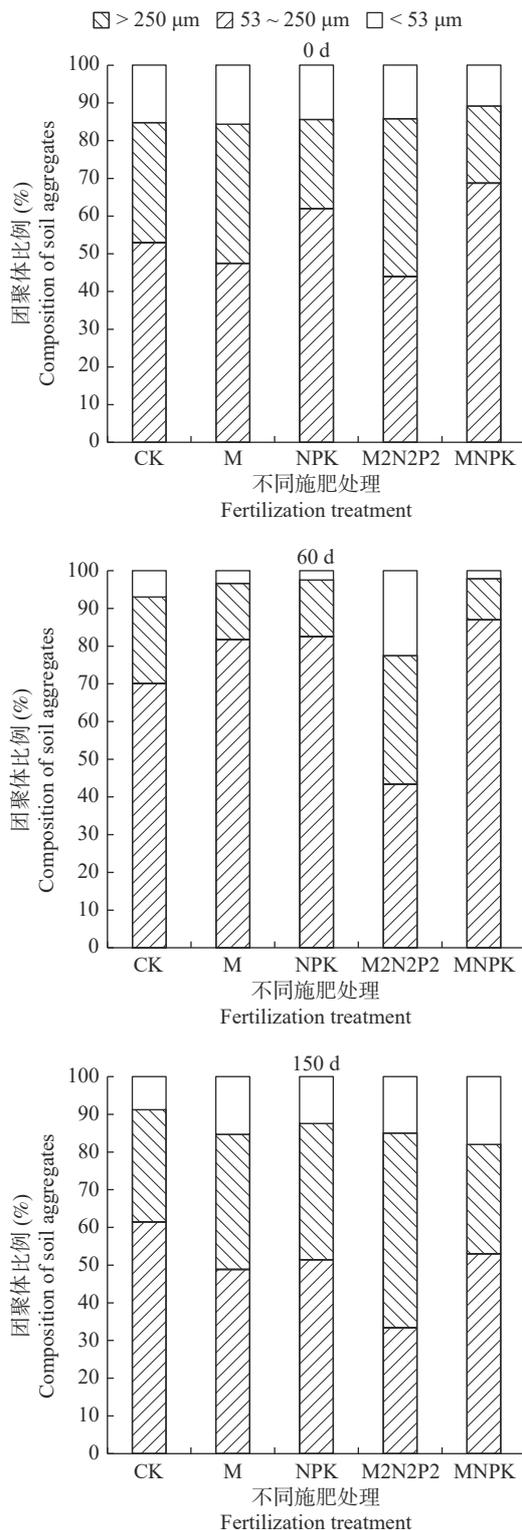


图2 添加秸秆后不同施肥处理土壤水稳性团聚体的组成
Fig.2 Composition of soil water-stable aggregates in different fertilization treatments with straw addition

秸秆 0 d 处理。添加秸秆 150 d 时, 除 CK 处理外各施肥处理大团聚体 (> 250 μm) 比例低于添加秸秆 0 d 处理; 除 CK 外各施肥处理 53 ~ 250 μm 粒级团聚体比例均高于添加秸秆 0 d 处理; M、MNPK 和

M₂N₂P₂ 处理 < 53 μm 粒级土壤团聚体比例与添加秸秆 0 d 相比分别提高了 2.30%, 65.68% 和 5.00%。随着培养时间增加, 各施肥处理大团聚体 (> 250 μm) 比例逐渐下降, 53 ~ 250 μm 粒级团聚体比例呈增加趋势。

2.2.2 添加秸秆后团聚体稳定性的变化 MWD 值是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。添加秸秆 0 d 土壤团聚体的稳定性表现为 MNPK > NPK > CK > M > M₂N₂P₂, 其中 MNPK 团聚体稳定性较 CK 提高了 12.58% (图 3)。与添加秸秆 0 d 相比, 添加秸秆第 60 d 时, 除 M₂N₂P₂ 处理外其它处理土壤团聚体 MWD 值增加了 10.70% ~ 25.33%。添加秸秆第 150 d, M₂N₂P₂ 处理 MWD 值较添加秸秆 0 d 降低了 12.41%。随着培养时间的增加, 添加秸秆土壤 MWD 值呈逐渐下降趋势, 表明团聚体稳定性逐渐降低。

2.2.3 添加秸秆对土壤团聚体有机碳含量的影响 添加秸秆 0 d 时土壤各粒级团聚体有机碳含量表现为 M₂N₂P₂ > MNPK > NPK > M > CK, 且 MNPK、NPK 和 M₂N₂P₂ 处理较 CK 处理达到显著水平 (表 2, $P < 0.05$)。与添加秸秆 0 d 相比, 添加秸秆 60 d 时, > 250 μm 和 < 53 μm 粒级团聚体有机碳含量逐渐增加; 添加秸秆 150 d 时, NPK 和 MNPK 处理大团聚体 (> 250 μm) 有机碳含量分别较添加秸秆 0 d 降低了 6.58% 和 17.65%; 各处理 53 ~ 250 μm 粒级团聚体有机碳含量均降低; 而在 < 53 μm 粒级团聚体 (除 M₂N₂P₂ 和 CK 处理外) 有机碳含量呈增加趋势。

在整个培养期内, 与 CK 相比, 大团聚体 (> 250 μm) 有机碳含量逐渐增加, 53 ~ 250 μm 粒级中除 NPK 处理外团聚体有机碳含量均高于 CK, < 53 μm 团聚体有机碳含量中 MNPK 处理最低, 为 7.14 g kg⁻¹; 培养期内, M、M₂N₂P₂、MNPK (除培养 60 d 的 < 53 μm 粒级) 处理能够提高各粒级团聚体中有机碳含量, 且 M₂N₂P₂ 效果最好, 达到显著水平 ($P < 0.05$); 培养 150 d 时, 53 ~ 250 μm 和 < 53 μm 粒级团聚体中, MNPK 处理的有机碳含量较 CK 分别显著提高了 5.23%, 13.47%。表明随着培养时间的增加, 添加秸秆后各粒级土壤团聚体有机碳含量呈现下降趋势。

2.2.4 添加秸秆对各粒级团聚体有机碳贡献率的影响 土壤团聚体有机碳的含量随团聚体粒径的减小而降低 (表 3)。在培养期内各处理团聚体有机碳主

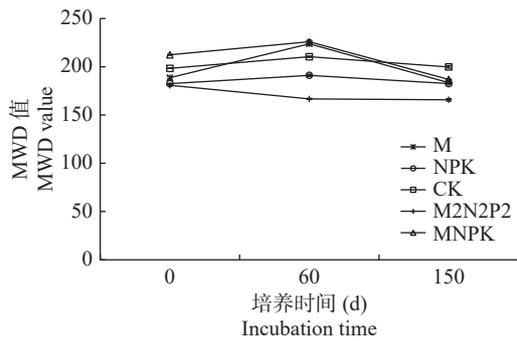


图 3 添加秸秆后不同施肥处理土壤团聚体 MWD 值

Fig.3 MWD values of soil aggregates in different fertilization treatments with straw addition

要分布在大团聚体 ($> 250 \mu\text{m}$) 中。添加秸秆 0 d 土壤团聚体有机碳贡献率在大团聚体 ($> 250 \mu\text{m}$) 中表现为 $\text{MNPK} > \text{CK} > \text{M} > \text{NPK} > \text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$, 其中 MNPK 处理较 CK 显著提升了 8.87% ($P < 0.05$); 不同施肥处理 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级团聚体有机碳贡献率均高于 CK 处理; 而 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级团聚体中 M 和 MNPK 处理有机碳贡献率低于 CK 处理, NPK 和 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$ 处理较 CK 处理显著提升 ($P < 0.05$)。

添加秸秆 60 d 各处理大团聚体 ($> 250 \mu\text{m}$) 有机碳贡献率高于添加秸秆 0 d, $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒级团聚

表 2 添加秸秆对不同施肥处理土壤团聚体有机碳含量的影响

Table 2 Effects of straw addition on organic carbon content of soil aggregates under different fertilization treatments

施肥处理 Fertilization treatment	培养时间 (d) Incubation time	$>250 \mu\text{m}$ 团聚体 (g kg^{-1}) $>250 \mu\text{m}$ aggregate	$53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体 (g kg^{-1}) $53 \sim 250 \mu\text{m}$ aggregate	$<53 \mu\text{m}$ 团聚体 (g kg^{-1}) $<53 \mu\text{m}$ aggregate
CK	0	9.53 Bc	10.27 Bb	7.91 Ab
M		9.97 Bc	10.90 Bab	7.27 Bb
NPK		11.47 Ab	9.58 ABb	7.14 Ab
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		12.10 Bb	12.44 Aa	10.64 Aa
MNPK		12.08 Aa	12.49 Aa	7.55 Ab
CK	60	11.54 Ac	12.43 Abc	8.05 Abc
M		13.49 Aa	13.34 Aab	8.63 Ab
NPK		11.55 Ac	11.41 Ac	8.46 Abc
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		13.80 Aa	14.23 Aa	9.95 Aa
MNPK		12.76 Ab	13.12 Aab	7.74 Ac
CK	150	10.12 Bb	8.98 Bbc	7.35 Ab
M		10.70 Bb	9.29 Cab	7.46 Bb
NPK		10.70 Ab	8.83 Bc	7.47 Ab
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		11.92 Ba	9.58 Ba	8.71 Ba
MNPK		10.36 Bb	9.45 Ba	8.34 Aa

注: 大写字母表示同一处理不同培养时间之间的差异, 小写字母代表同一粒级不同处理之间的差异

表 3 添加秸秆对不同施肥处理土壤有机碳贡献率的影响 (%)

Table 3 Effects of straw addition on the contribution rates of soil organic carbon under different fertilization treatments (%)

施肥处理 Fertilization treatment	培养时间 Incubation time (d)	$>250 \mu\text{m}$ 团聚体 $>250 \mu\text{m}$ aggregate	$53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ aggregate	$<53 \mu\text{m}$ 团聚体 $<53 \mu\text{m}$ aggregate
CK	0	69.08 ± 1.30 ABb	20.35 ± 0.49 Cd	9.57 ± 0.87 Abc
M		65.30 ± 0.77 Cc	26.31 ± 0.60 Bc	8.4 ± 0.20 Bc
NPK		55.31 ± 1.50 Bd	34.14 ± 0.86 Ab	10.55 ± 0.67 Bab
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		51.40 ± 1.46 Be	37.64 ± 1.72 Ba	10.96 ± 0.42 Ca
MNPK		75.21 ± 1.25 Ba	20.66 ± 1.06 Bd	5.13 ± 0.21 Bd
CK	60	69.49 ± 1.07 ABb	24.47 ± 0.86 Bb	6.23 ± 0.26 Bb
M		81.39 ± 0.43 Aa	14.63 ± 0.44 Cc	3.98 ± 0.22 Cc
NPK		81.65 ± 1.35 Aa	14.70 ± 1.31 Cc	3.65 ± 0.05 Cc
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		42.29 ± 1.16 Ac	37.57 ± 0.76 Ba	20.29 ± 1.33 Aa
MNPK		82.68 ± 1.31 Aa	14.63 ± 1.29 Cc	2.69 ± 0.04 Bc
CK	150	63.99 ± 0.78 Ca	27.53 ± 0.49 Ac	8.48 ± 0.41 Ad
M		53.56 ± 0.38 Bb	34.15 ± 0.11 Ab	12.29 ± 0.28 Ac
NPK		55.14 ± 1.61 Cb	32.64 ± 0.93 Bb	11.22 ± 0.73 Ac
$\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$		37.77 ± 0.43 Cc	47.05 ± 0.75 Aa	15.19 ± 0.33 Bb
MNPK		55.12 ± 1.64 Cb	27.59 ± 0.89 Ac	17.29 ± 1.42 Aa

注: 大写字母表示同一处理不同培养时间差异, 小写字母表示同一粒级不同处理间的差异

体有机碳贡献率呈下降趋势(表3)。添加秸秆 180 d 与添加秸秆 0 d 相比,各处理大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)有机碳贡献率降低了 0.31%~26.71% ($P < 0.01$); 53~250 μm 粒级团聚体(NPK 处理除外)和 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级团聚体(CK 处理外)有机碳贡献率均增加 ($P < 0.01$)。添加秸秆 60 d 时,大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)有机碳贡献率为 42.29~82.68%,且 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$ 处理显著低于其它处理 ($P < 0.05$); 53~250 μm 团聚体有机碳贡献率为 14.63~37.53%,其中 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$ 处理显著高于其它处理 ($P < 0.05$)。添加秸秆 150 d 时,施肥处理大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)有机碳贡献率均显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$),而微团聚体有机碳贡献率呈相反规律。

3 讨论

3.1 添加秸秆对土壤中有机碳含量的影响

长期以来,秸秆还田对团聚体粒级分布及团聚体有机碳含量具有显著影响^[17-18],且秸秆还田配施化肥能够增加土壤有机碳含量^[19]。由于不同粒级土壤团聚体中有机碳的分解速率和残留量不同,且不同施肥措施下碳的输入水平不同,导致秸秆还田对不同粒级团聚体有机碳含量影响不同。大量研究表明,有机碳主要分布在大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)中^[20-21]。本研究中,添加秸秆不仅能够影响团聚体的分布,还在不同程度上影响团聚体有机碳含量的变化。与添加秸秆 0 d 相比,添加秸秆培养后能够整体增加土壤有机碳含量,其中大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)的有机碳含量均高于 CK 处理,表明大团聚体是储存有机碳重要场所。培养期内 $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$ 处理有机碳含量均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),表明有机肥料投入量对团聚体中有机碳的含量有积极影响,这与胡丹丹^[22]等研究结果一致。微团聚体(53~250 μm 和 $< 53 \mu\text{m}$)的有机碳含量除 MNPK 处理外均高于 CK 处理, $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$ 处理达到显著水平 ($P < 0.05$); 随着培养时间的增加,各粒级团聚体有机碳含量呈现逐渐减小的趋势。

3.2 添加秸秆对土壤团聚体及稳定性的影响

土壤团聚体稳定性是受自然因素、人为因素以及土壤理化性质等一系列因素影响,本实验基于长期定位试验平台下,重点研究秸秆还田对土壤的团聚体分布以及稳定性的影响。以往研究表明,土壤中大团聚体数量越多,土壤结构的稳定性越强^[23],且

适当的施肥措施也能够提高土壤养分含量,增加土壤团聚体的含量,但施用化肥需要控制氮肥、磷肥和钾肥的用量^[24]。本研究中发现,团聚体以 $> 250 \mu\text{m}$ 粒级的团聚体为主,并且发现不同施肥处理土壤添加秸秆后能够促进大团聚体的形成(图2),这与薛斌等^[25]对武穴市和荆州市两地长期秸秆还田的土壤团聚体组和机碳组成、分布研究结果一致。

MWD 值是评价土壤团聚体特征及稳定性的常用方法,MWD 值越大,表示团聚体的结构越稳定^[26]。以往研究表明,施用有机物料能够提高团聚体的稳定性。但在本研究中,培养 180 d 时,团聚体 MWD 值减小,即随着培养时间的增加,团聚体的稳定性逐渐降低。这可能是因为微生物分解有机物质导致其数量和质量受到影响,进而影响土壤颗粒的胶结能力,致使大团聚体分解为微团聚体^[27];张秀芝^[28]等人研究表明,长期施用高量有机肥及有机肥与无机肥配施较 CK 显著降低了 MWD、GMD,但增加了团聚体破碎率及分形维数,进而导致团聚体稳定性降低。顾鑫^[29]等研究表明秸秆还田后,随着培养时间的增加,土壤团聚体的稳定性有下降趋势。这可能是由于有机物料中含有较多的 K^+ 、 Na^+ 等一价阳离子,这些阳离子可能提高了土壤胶体的分散,促进了大团聚体的破散^[30-31],降低了团聚体的稳定性,所以随着培养时间的增加,土壤团聚体的稳定性逐渐降低。

3.3 添加秸秆对黑土团聚体有机碳贡献率的影响

试验研究结果表明,各处理中大团聚体($> 250 \mu\text{m}$)的有机碳贡献率最高,其次为 53~250 μm 粒级的贡献率, $< 53 \mu\text{m}$ 粒级团聚体有机碳贡献率最低;这是因为添加秸秆为微生物提供了足够的碳源和丰富的能量物质,且大团聚体更适合于微生物生存,从而使大量的外源碳固存在大团聚体中^[32];大团聚体中有机碳的含量较高,占比较大,因此贡献率较高,这与 SODHIGPS^[33]等的研究结果一致;而 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级有机碳含量较低,这是因为 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级团聚体所占比例较小,仅为土壤质量的 2.07~23.37%,故随团聚体粒级的减小,有机碳含量逐渐降低,随之有机碳贡献率较低。本试验研究结果表明,不同施肥处理土壤添加秸秆大团聚体的有机碳贡献率会随着时间的增加而降低,而土壤微团聚体的有机碳贡献率逐渐增加。这与郭策^[34]等研究玉米秸秆添加对不同母质黑钙土有机碳含量及团聚体稳定性的结果

一致。这主要是由于添加秸秆会影响团聚体分布的比例进而影响其有机碳的贡献率,且随着时间的增加,有机碳会在较小粒级中的土壤团聚体中积累,因此,大团聚体有机碳贡献率呈下降趋势。

4 结论

本研究向 43 年不同施肥处理的黑土中添加等量秸秆,探究土壤团聚体的组成以及有机碳含量的动态变化,结论如下:①添加玉米秸秆能够促进大团聚体的形成,提高土壤平均重量直径,进而提高土壤团聚体的稳定性,但随着培养时间的增加,团聚体稳定性呈下降趋势。②秸秆还田提高了土壤总有机碳和各粒级团聚体有机碳的含量,且大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体。其中高量有机肥配施化肥处理各粒级团聚体有机碳含量增加最为显著。③添加秸秆使各处理大团聚体有机碳贡献率增加,但随着培养时间的增加,土壤有机碳在较小粒级的团聚体中积累,进而使土壤大团聚体有机碳贡献率降低。综上,适量增施有机肥配合秸秆还田有利于提高土壤团聚体稳定性,改善土壤结构,增加土壤有机碳含量,提高土壤有机碳库水平。

参考文献:

- [1] 金鑫鑫,汪景宽,孙良杰,等. 稳定¹³C同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 217-224.
- [2] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [3] 李睿,江长胜,郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3429-3437.
- [4] 白文娟,徐华勤,章家恩. 不同培肥措施对土壤团聚体中微生物特性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 24-30.
- [5] 宋丽萍,罗珠珠,李玲玲,等. 苜蓿-作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 27-35.
- [6] 郝翔翔. 不同生态系统下黑土剖面有机质变化特征[D]. 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [7] 韩贵清. 基于“双碳”目标愿景下的土壤碳汇发展与黑土保护利用[J]. 数据, 2021, (9): 56-59.
- [8] 韩明钊,赵雨森,翟国庆,等. 有机物料添加对黑土团聚体稳定性及有机碳影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(5): 109-114.
- [9] 朱锬恒,段良霞,李元辰,等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(21): 86-90.
- [10] 崔荣美,李儒,韩清芳,等. 不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 124-132.
- [11] 窦莉洋. 秸秆还田对不同类型土壤团聚体稳定性、有机碳含量及其分布的影响[D]. 沈阳农业大学, 2018.
- [12] 董守坤,刘丽君,马秀峰,等. 秸秆还田对白浆土养分含量的影响[J]. 作物杂志, 2011, (1): 53-55.
- [13] 孙雪,张玉铭,张丽娟,等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1384-1396.
- [14] 雷国平,代路,宋戈. 黑龙江省典型黑土区土壤生态环境质量评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 243-248.
- [15] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamic sand soil organic carbon and nitrogen accumulation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 657-666.
- [16] 李玮,郑子成,李廷轩,刘敏英. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [17] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828-838.
- [18] 王碧胜,于维水,武雪萍,等. 添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1533-1563.
- [19] 王虎,王旭东,田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [20] 郭菊花,陈小云,刘满强,等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, (5): 787-793.
- [21] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(04): 1035-1041.
- [22] 胡丹丹,李浩,宋惠洁,等. 长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系[J]. 土壤通报, 2022, 53(01): 152-159.
- [23] 马东方,袁再健,吴新亮,等. 华南花岗岩侵蚀区不同植被类型坡面土壤有机碳分布和团聚体稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 137-144.
- [24] 王晓军,孙玉琴,王勇,等. 长期定位施肥对旱作土壤团聚体及养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 276-280.
- [25] 薛斌,刘威,殷志遥,等. 秸秆还田对土壤团聚体组成及其有机碳组成的影响[C]. 土壤科学与生态文明(下册)——中国土壤学会第十三次全国会员代表大会暨第十一届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集, 2016: 84-95.
- [26] 李霄云,王益全,孙慧敏,等. 有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1125-1131.
- [27] 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.
- [28] 张秀芝,李强,高洪军,等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳

- 定性及有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1214 – 1223.
- [29] 顾 鑫, 安婷婷, 李双异, 等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 243 – 247 + 312.
- [30] 冷延慧, 汪景宽, 李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2171 – 2177.
- [31] Whalen J K, Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5): 1637 – 1647.
- [32] 花可可, 朱 波, 杨小林, 等. 长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 167 – 174.
- [33] Sodhigps, Beriv, Benbidk. Soilaggregationand distribution of carbon and nitrogen in different fractions underlong-term application of compostin rice-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 103(2): 412 – 418.
- [34] 郭 策, 赵兴敏, 王 楠, 等. 秸秆还田配施氮肥对黑钙土有机碳及微生物量碳氮的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2022, 56(1): 21 – 30.

Effects of Straw Addition on Stability of Soil Aggregates and Contribution of Organic Carbon Under Different Fertilization Treatments in Black Soil

SHI Yan-xiang¹, CHI Feng-qin^{2*}, ZHANG Jiu-ming^{2*}, KUANG En-jun²,
TONG Yu-xin², MA Xing-zhu², ZHU Ying-xue², YUAN Jia-hui²

(1. *College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150086, China*; 2. *Heilongjiang Black Soil Conservation and Utilization Research Institution, Key Laboratory of Black Land Protection and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150086, China*)

Abstract: [Objective] To explore the effect of straw application on stability of soil aggregates and their contribution to organic carbon (C) sequestration can provide a basis for the protection of black soil in northeast China. [Method] Based on a long-term (43 years) experiment of black soil, five treatments, no fertilization (CK), single application of organic fertilizer (M), single application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), organic fertilizer combined with nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (MNPK) and high amount organic fertilizer combined with chemical fertilizer ($\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$) were selected. The same amount of straw (equivalent to the amount of full straw returning in the actual production) was added into silicon tube and was incubated in the field. The soil aggregate stability, organic C contents of soil aggregates and their contribution rate to soil organic C sequestration were analyzed by sampling on the 0, 60th and 150th days of incubation. [Result] The application of straw promoted the formation of > 250 μm macro-aggregate and increased the proportion of macroaggregates. The contents of macroaggregates increased significantly in the treatment of MNPK, which was higher than that in other fertilization treatments. However, the contents of large aggregates decreased with the increase of incubation time, and the stability of aggregates decreased. The straw addition increased the contents of organic C in > 250 μm aggregate, especially in the treatment of $\text{M}_2\text{N}_2\text{P}_2$. The contribution rates of the added straw to soil organic C of > 250 μm aggregate were more than 80% ($P < 0.05$) in the treatments of M, NPK and MNPK. The contribution rates of added straw to soil organic C of >250 μm aggregates was decreased gradually with incubation time. However, this contribution rates to 53-250 μm and < 53 μm aggregates showed increasing trends, and organic C would accumulate in smaller soil aggregates. It further indicated that the addition of straw would affect the proportion of aggregate distribution and the contribution rate of organic C. [Conclusion] The application of straw can improve soil aggregate stability and organic C content. The high fertility black soil combined with straw addition can improve soil organic C sequestration.

Key words: Black soil; Maize straw; Water-stable aggregate; Soil organic carbon; Long-term fertilization

[责任编辑: 高晓丹]