

不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响

高洪军, 彭畅, 张秀芝, 李强, 贾立辉, 朱平

(吉林省农业科学院, 长春 130033)

摘要: 通过5年田间定位试验,研究了不同玉米秸秆还田方式对黑钙土土壤团聚体含量、稳定性和团聚体有机碳贡献率的影响。结果表明:与秸秆不还田(CK)比较,秸秆还田处理能显著提高土壤大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)含量、团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)($P<0.05$)。秸秆轮耕还田(SRT)比秸秆覆盖还田(SCR)能更有利于土壤大团聚体形成,但2个处理的土壤团聚体稳定性之间差异不显著。秸秆轮耕还田与秸秆不还田相比较能显著增加土壤各粒级团聚体有机碳含量和大团聚体有机碳贡献率,同时,秸秆轮耕还田比秸秆覆盖还田更有利于提高 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 粒径和 $<53\ \mu\text{m}$ 粒径团聚体有机碳含量,以及 $250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 粒级团聚体有机碳贡献率。相关性分析表明,土壤有机碳含量与土壤团聚体稳定性及其碳库之间存在极显著的正相关关系。旋耕/深翻的轮耕还田模式促进了耕层土壤大团聚体形成和土壤结构稳定,显著提高土壤团聚体碳库和对土壤有机碳的贡献,为东北黑钙土区较适宜的玉米秸秆还田模式之一。

关键词: 秸秆还田; 轮耕; 黑钙土; 土壤团聚体

中图分类号: S185; S155.27

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0075-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.013

Effects of Different Straw Returning Modes on Characteristics of Soil Aggregates in Chernozem Soil

GAO Hongjun, PENG Chang, ZHANG Xiuzhi, LI Qiang, JIA Lihui, ZHU Ping

(Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033)

Abstract: A Five-year field experiment was conducted to study the size compositions and stability of soil aggregate and their soil organic carbon (SOC) contribution rates to total SOC in different maize straw returning treatments (without straw returning, CK; straw cover returning, SCR; straw rotational tillage returning, SRT). The results indicated that straw returning modes significantly increased the mass of macro-aggregates ($>250\ \mu\text{m}$), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD), compared with CK ($P < 0.05$). SRT had more significant effects on formation of soil macro-aggregates than SCR, but there was no obvious difference in stability of soil aggregate between SRT and SCR. SRT markedly enhanced SOC of every size aggregates and contribution rates of aggregates SOC, which were higher than SCR in SOC of $>2\ 000\ \mu\text{m}$ and $<53\ \mu\text{m}$ aggregates, contribution rates of $250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ aggregates SOC. There were significant positive correlations between the SOC and the stability and associated-C ($P < 0.01$) of aggregate. Straw rotational tillage (two years of rotary tillage plus one year of moldboard return) was more favorable for macro-aggregates formation and soil structure stability, improving carbon pool of soil aggregate and their SOC contribution rates, which one of was the most appropriate rotational tillage pattern in Chernozem soil, northeast China.

Keywords: straw returning; rotational tillage; Chernozem; soil aggregate

土壤团聚体是形成土壤结构的重要基础,也是土壤中各种养分的贮藏库和各种微生物的生存环境^[1]。土壤团聚体特征和土壤有机质含量可作为评价土壤肥力的重要指标,并且对土壤功能的提升起着关键作

用。不同粒级团聚体对养分的保持和供应有着不同的影响^[2],并且其数量和分布状况决定了土壤孔隙的分布和连续性,进而影响了土壤动物和微生物的活动^[3]。水稳性团聚体的数量分布和空间排列方式决

收稿日期: 2018-07-10

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136-6); 吉林省科技创新工程项目(CXGC2017JQ008); 国家重点研发计划项目(2016YFE0112700-3, 2016YFD0800103)

第一作者: 高洪军(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤肥力与农田生态研究。E-mail: ghj-1975@163.com

通信作者: 朱平(1962-), 男, 研究员, 主要从事土壤培肥研究。E-mail: zhuping1962@sohu.com

定了土壤结构的稳定性和抗侵蚀的能力。詹其厚等^[4]研究表明,秸秆还田能够显著增加土壤中有胶结物质的数量,进而改善了土壤团聚体结构。玉米秸秆还田可以显著降低土壤微团聚体的数量,促进微团聚体向水稳性大团聚体的转变,同时提高其稳定性;另一方面,在耕作时,秸秆还田会增加扰动阻力,减少对土壤团聚体的破坏程度^[5]。土壤团聚体内包含了表土中将近 90% 的有机碳^[6],团聚体的质量及其有机碳含量决定了各级团聚体对土壤有机碳积累的贡献率^[7]。王勇等^[8]研究表明,表层土壤总有机碳增加的贡献主要来源于细大团聚体。通过反馈作用机制,土壤有机碳的增加将促进土壤团聚化的加快。以往关于土壤团聚体的研究多集中于施肥制度、土壤耕作、土地利用方式等对土壤团聚体及有机碳分布的影响^[9-10],而有关秸秆深翻和旋耕相结合的轮耕还田方式对东北黑钙土土壤团聚体特征的影响还鲜见报道。该项研究将翻耕、旋耕等耕作措施组成合理的还田模式,探究秸秆还田方式对土壤团聚体结构的影响,是解决长期单一耕作造成土壤结构变差的有效措施。

黑钙土是吉林省主要耕作土壤之一,耕地面积达 144.5 万 hm^2 , 占全省总耕地面积的 27%, 具有腐殖质层薄,有机质含量低、细砂粒含量高、碳酸盐聚积等特点。近几年随着机械化的推进,秸秆深翻还田、免耕还田、旋耕还田等还田方式正在该地区推广应用。因此,本文通过玉米秸秆还田定位试验,研究了不同秸秆还田方式对土壤水稳性团聚体分布、各粒径团聚体有机碳含量及其贡献率的影响,以期选择更有利于土壤结构改善和有机碳累积的秸秆还田模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本试验在吉林省农安县哈拉海镇吉林省农业科学院哈拉海试验站进行,该区域属中温带大陆性季风气候,地势平坦,四季分明,年均气温 $4.7\text{ }^\circ\text{C}$,无霜期 145 d,年均降水量 507.7 mm,有效积温 $2\ 800\text{ }^\circ\text{C}$ 。试验开始于 2011 年 10 月,土壤类型为黑钙土,在该区域具有典型代表性。耕层土壤(0—20 cm)有机质含量为 22.3 g/kg,全 N 含量为 1.537 g/kg,全 P 含量为 0.565 g/kg,全 K 含量为 22.7 g/kg,碱解 N 含量为 128.2 mg/kg,速效 P 含量为 12.9 mg/kg,速效 K 含量为 132.5 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理,分别为秸秆不还田(CK),秸秆覆盖还田(SCR),秸秆轮耕还田(SRT;2 年旋耕还田+1 年深翻还田),3 次重复,小区面积 80 m^2 ,随机区组排列。其中,翻耕:在玉米收获后,利用秸秆粉碎

机粉碎秸秆(长度小于 10 cm),然后翻埋于土壤中,翻耕深度 25 cm 以上。旋耕:在玉米收获后,利用秸秆粉碎机粉碎秸秆(长度小于 5 cm),然后利用旋耕机旋耕土壤(深度约 20 cm),最后重镇压。免耕:在玉米收获后,利用秸秆粉碎机粉碎秸秆(长度 10 cm 以下),采用免耕播种机一次性完成播种、施肥及镇压作业;每隔 1 年采用单柱振动式局部深松作业 1 次,深松深度约为 30 cm。

试验地种植作物为玉米,品种为“先玉 335”。供试肥料:氮肥为尿素,磷肥为重过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,3 个处理施肥量相同,N 肥为 $210\text{ kg}/\text{hm}^2$, $\text{P}(\text{P}_2\text{O}_5)$ 肥为 $105\text{ kg}/\text{hm}^2$, $\text{K}(\text{K}_2\text{O})$ 肥为 $105\text{ kg}/\text{hm}^2$,玉米氮肥施用量的 1/3 和磷钾肥作基肥在春季播种前作底肥一起施用,预留 2/3 氮肥在拔节期追肥。秸秆还田量为 $8\ 000\text{ kg}/\text{hm}^2$,秸秆养分含量:42.6% C,0.8% N,0.32% P_2O_5 ,0.75% K_2O 。玉米于每年 4 月 28 日左右播种,9 月 27 日左右收获,各处理生育期田间管理一致。

1.3 土壤样品采集与分析

2016 年 10 月在玉米收获后采样,用直径为 10 cm 的环刀在每个小区 0—20 cm 土层以“S”形取 5 点混合成 1 个有代表性的原状耕层土壤。运回室内后(运输时避免震动和翻倒),沿土壤的自然结构轻轻地剥开,将原状土剥成小土块,同时防止外力的作用而变形。样品在风干之前过 10 mm 筛,去除杂草和植物根系,土样摊平在透气通风处,自然风干。

土壤有机碳和团聚体有机碳采用重铬酸钾氧化法测定^[11],土壤团聚体采用 Elliot^[12]的方法分离 4 个级别水稳性团聚体,即 $>2\ 000$, $250\sim2\ 000$, $53\sim250$, $<53\ \mu\text{m}$ 4 个级别。 $>250\ \mu\text{m}$ 的团聚体称为水稳性大团聚体, $<250\ \mu\text{m}$ 称为水稳性微团聚体。

1.4 数据分析与计算方法

试验中的数据采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理与统计分析,用 LSD 法进行差异显著性检验。

团聚体的稳定性用平均重量直径(MWD,mm)和几何平均直径(GMD,mm)^[13]表示,计算公式分别见公式(1)和公式(2),各粒径团聚体对土壤有机碳积累贡献率^[14]计算方法见公式(3)。

$$\text{MWD} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (2)$$

$$\text{各粒径团聚体对土壤有机碳贡献率}(\%) = \frac{C_i w_i}{C_{\text{soil}}} \quad (3)$$

式中: x_i 为第*i*级团聚体的平均直径(mm); w_i 为第*i*级团聚体的质量比例; c_i 为第*i*级团聚体的有机碳含量(g/kg); c_{soil} 为土壤有机碳的含量(g/kg)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对土壤团聚体含量的影响

由表 1 可知,以 53~250 μm 级别团聚体所占比例最大,而 >2 000, <53 μm 级别团聚体所占比例较小,土壤总体以微团聚体为主(58.3%~67.4%)。与秸秆不还田相比(CK),秸秆覆盖还田(SCR)和秸秆轮耕(SRT)处理均显著提高了>250 μm 大团聚体含量,减少了微团聚体含量。对于直径>2 000 μm 级别团聚体含量,SCR 和 SRT 处理之间差异不显著,但对于 250~2 000 μm 团聚体,秸秆轮耕还田处理比较秸秆覆盖处理显著提高该粒径团聚体含量,并且差异达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 不同秸秆还田方式下耕层土壤团聚体的质量比例

处理	各级团聚体质量比例/%			
	>2000 μm	250~2000 μm	53~250 μm	<53 μm
CK	11.54b	21.01c	45.14a	22.30a
SCR	15.83a	23.31b	42.73c	18.90b
SRT	15.16a	25.84a	44.11b	14.25c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

可见,不同秸秆方式对各级别团聚体影响有差异,秸秆还田显著降低了土壤微团聚体(<53 μm)的含量,增加了土壤大团聚体(250~2 000, >2 000 μm)的含量。总体上,秸秆轮耕还田明显提高了土壤大团聚体的分配比例。

2.2 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的稳定性(特指水稳性)指土壤团聚结构在水中移动时抗水力分散的能力,好的土壤结构依赖于稳定性团聚体的形成。土壤团聚体的稳定性一般用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)来表示,大团聚体的百分比越高,MWD 越大;团聚体越稳定,GMD 越大^[15]。由图 1 可知,与秸秆不还田(CK)处理相比,秸秆覆盖还田和秸秆轮耕还田都显著提高了土壤团聚体的稳定性($P<0.05$),MWD 和 GMD 分别增加了 25.4%,23.9%和 29.0%,35.5%($P<0.05$)。与秸秆覆盖还田相比较,秸秆轮耕还田土壤团聚体的 MWD 和 GMD 差异都未达到显著水平。可见,2 种秸秆还田方式下土壤团聚体的分布有显著差异,但是它们对团聚体稳定性的影响还达不到显著水平。总之,玉米秸秆还田能显著提高 0—20 cm 土层团聚体的稳定性。

2.3 不同秸秆还田方式对团聚体中有机碳含量的影响

从表 2 可以看出,各级别团聚体有机碳含量以 250~2 000 μm 级别大团聚体含碳量为最高,53~

250, <53 μm 微团聚体有机碳含量较低。与秸秆不还田(CK)处理相比,对于 >2 000 μm 团聚体,2 种秸秆还田方式都显著提高了该粒径团聚体有机碳含量($P<0.05$),增加幅度为 15.8%~20.7%,其中,秸秆轮耕还田与覆盖还田之间差异达显著水平;对于 250~2 000 μm 级别团聚体,秸秆还田处理都显著提高了该级别团聚体有机碳含量($P<0.05$),增加幅度为 3.9%~4.3%,但 SCR 和 SRT 之间差异未达到显著水平。对于 250~53 μm 微团聚体,仅秸秆轮耕还田显著提高了该粒径团聚体有机碳含量($P<0.05$);对于 <53 μm 级别微团聚体,2 种秸秆还田方式都显著增加了该粒径团聚体有机碳含量。因此,与秸秆不还田(CK)处理相比,玉米秸秆轮耕还田和覆盖还田都有利于大团聚体(>250 μm)中有机碳的增加,同时秸秆轮耕还田也显著提高了微团聚体有机碳含量。

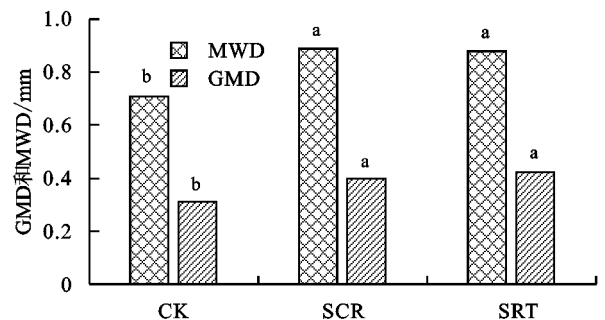


图 1 秸秆还田处理下土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

表 2 不同级别团聚体中有机碳含量

处理	单位:g/kg			
	大团聚体		微团聚体	
	>2000 μm	250~2000 μm	53~250 μm	<53 μm
CK	13.58c	16.45b	11.18b	10.04c
SCR	15.73b	17.09a	11.15b	11.51b
SRT	16.39a	17.16a	11.64a	12.38a

2.4 不同秸秆还田方式下团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

土壤各粒级团聚体对土壤基本性质的贡献率,更能全面、客观、精准地反映有机培肥对土壤肥力的影响与贡献。由表 3 可知,不同粒径团聚体对土壤有机碳积累的相对贡献有所差异,以 53~250 μm 级别团聚体有机碳贡献率为最高,其次为 250~2 000 μm 级别团聚体有机碳贡献率, <53, >2 000 μm 级别团聚体有机碳贡献率较低。虽然 >2 000, 250~2 000 μm 级别团聚体有机碳含量相对较高(表 3),但是贡献率却是以 53~250 μm 级别团聚体最高,这主要是因为大级别团聚体所占比例较少、小级别团聚体所占比例相对较多所导致。

与秸秆不还田(CK)比较,2 种秸秆还田方式都

显著增加了 $>2\ 000, 250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 级别大团聚体有机碳的贡献率,尤其是秸秆轮耕还田较覆盖还田显著增加了 $250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 级别团聚体有机碳的贡献率($P<0.05$)。但是秸秆还田对 $53\sim 250, <53\ \mu\text{m}$ 级别微团聚体有机碳贡献率,相对于对照均有所下降,这可能是秸秆还田促进了微团聚体向大团聚体演变的结果。

表 3 不同级别团聚体对土壤有机碳的贡献率

处理	单位: %			
	大团聚体		微团聚体	
	$>2000\ \mu\text{m}$	$250\sim 2000\ \mu\text{m}$	$53\sim 250\ \mu\text{m}$	$<53\ \mu\text{m}$
CK	12.52b	27.58c	40.28a	17.87a
SCR	17.20a	28.74b	34.57b	15.68b
SRT	17.48a	29.88a	33.76b	11.87c

2.5 土壤有机碳含量与 MWD、团聚体碳库的相互关系

由表 4 可知,土壤有机碳含量与大团聚体碳含量($R=0.94, P<0.01$)、微团聚体碳含量($R=0.949, P<0.01$)、团聚体平均重量直径(MWD, $R=0.848, P<0.01$)之间均存在极显著的正相关关系;而土壤团聚体稳定性(MWD)与大团聚体碳($R=0.967, P<0.01$)、微团聚体碳含量($R=0.82, P<0.01$)之间存在极显著相关;大团聚体碳含量和微团聚体碳含量也表现出极显著的正相关关系($R=0.921, P<0.01$)。表明土壤有机碳含量显著地影响土壤团聚体碳含量及其稳定性。

表 4 土壤有机碳与 MWD、大团聚体碳、微团聚体碳之间的相关性

指标	土壤有机碳	大团聚体碳含量	微团聚体碳含量	MWD
土壤有机碳	1			
大团聚体碳含量	0.940**	1		
微团聚体碳含量	0.949**	0.921**	1	
MWD	0.848**	0.967**	0.820**	1

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

3 讨论

土壤微团聚体主要由胶结持久性强且不易分解的有机无机复合体组成,大团聚体则主要是植物根系和微生物菌丝体黏结了许多微团聚体后形成的^[8]。张先凤等^[16]研究表明,秸秆还田主要减少了潮土微团聚体的数量,促进了微团聚体向大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)的转化,同时提高了其稳定性,这与本研究结论一致。不合理耕作极大地破坏了土壤结构,从而导致土壤大团聚体比例下降。秸秆还田增加了土壤有机质的含量,有机质中的多糖、胡敏酸、蛋白质等作为团聚体形成的胶结物质在团聚体的形成和稳定中起着十分重要的作用^[17]。田慎重等^[5]研究发现,秸秆还田会减少耕作对土壤扰动力,降低对土壤团聚体的破

坏力,同时,秸秆旋耕还田对耕层土壤各粒级间的团聚体比例分布更为均匀。

Six 等^[18]研究发现,秸秆还田能显著增加土壤大团聚体碳的含量,这可能是由于有机质作为主要胶结物质将土壤颗粒和小级别团聚体胶结成大团聚体的缘故。本试验中,秸秆还田能显著增加土壤大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)有机碳的含量,这与许多学者^[19-20]研究结果一致。刘恩科等^[9]研究也发现,长期有机肥和化肥配施可增加各粒级团聚体有机碳的含量,特别是显著增加了大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)有机碳的含量。因此,土壤大团聚体碳作为评价不同农业管理措施对土壤有机碳变化影响的指标更为灵敏。

本研究表明,在各粒级团聚体有机碳贡献率中,以 $53\sim 250\ \mu\text{m}$ 级别微团聚体为最高,其次为 $250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 级别大团聚体,土壤有机碳贡献率与各粒级团聚体所占比例变化趋势基本一致,表明土壤的优势粒级含有更多的有机碳。已有学者^[21]研究认为,微团聚体有机碳主要是由腐殖化的惰性组分组成,不易矿化分解,有利于碳固存。Kool 等^[22]研究也发现,不同粒级碳库可能存在碳饱和现象,微团聚体中固持的碳周期时间长;但另一方面,由于微团聚体的固碳潜力较低,易于达到碳饱和,新进入土壤的有机碳主要储存在大团聚体中。本研究结果也表明,秸秆还田措施能显著提高耕层土壤大团聚体有机碳贡献率,减少了微团聚体有机碳贡献率。另外,土壤有机碳与土壤团聚体稳定性及其碳库(包括大团聚体和微团聚体碳)之间有着极显著的正相关关系,表明土壤团聚体碳对有机碳库的贡献显著影响了土壤有机碳库的大小。王迪等^[23]研究表明,土壤团聚体中有有机碳不仅促进了团聚体的形成,也能够显著增加其自身稳定性,而且稳定的团聚体也能够显著提高对有机碳的物理保护作用,促进土壤有机碳的有效固定^[24]。

目前,东北地区秸秆覆盖还田和深翻还田大面积推广应用都有一定的技术限制性。窦森等^[25]研究认为,秸秆覆盖还田由于土壤表层春季温度低,过分依赖农药,秸秆分解后以气体的形式直接进入大气或在地表富集,对提升土壤有机质作用不大。秸秆深翻还田作业成本高,费时费工,仅增加土壤中某一层土壤有机质的含量。基于秸秆轮耕还田能明显改善土壤物理结构的作用,对于吉林省西部黑钙土区秸秆还田量少(产量低)、土壤砂粒含量高和具备灌溉条件等特点,旋耕还田更易于操作,节省成本,使耕层土壤有机碳分布更均匀;深翻还田解决了旋耕还田表层土壤容纳秸秆量空间有限的问题,使秸秆和有机质向土壤深层渗入,可明显提升土壤有机质水平。

4 结论

(1)与秸秆不还田(CK)比较,秸秆还田处理能显著提高土壤大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)含量、团聚体平均重量直径和几何平均直径,减少微团聚体($<53\ \mu\text{m}$)含量。尤其是秸秆轮耕还田(SRT)比秸秆覆盖还田(SCR)更有利于大团聚体的形成。

(2)秸秆轮耕还田处理较秸秆不还田能显著增加各级团聚体有机碳的含量;秸秆覆盖还田处理除了在微团聚体($53\sim 250\ \mu\text{m}$)外,也显著增加了其他级别团聚体有机碳的含量。秸秆轮耕还田比秸秆覆盖还田更有利于增加大团聚体($>2\ 000\ \mu\text{m}$)和微团聚体($<53\ \mu\text{m}$)有机碳含量。

(3)秸秆轮耕还田对 $250\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ 级别团聚体有机碳贡献率显著优于秸秆覆盖还田。秸秆还田措施能显著提高耕层土壤大团聚体有机碳贡献率,减少微团聚体有机碳贡献率。

(4)秸秆轮耕还田较秸秆覆盖还田可明显改善黑钙土土壤团聚体结构,因此,秸秆轮耕还田模式(2年旋耕还田+1年深翻还田)可作为东北黑钙土区较适宜的秸秆全量还田模式之一。

参考文献:

[1] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil-organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 17-31.

[2] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J].*土壤学报*, 1994,31(1): 18-25.

[3] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11: 199-238.

[4] 詹其厚,袁朝良,张效朴.有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J].*土壤学报*,2003,40(3):420-425.

[5] 田慎重,王瑜,李娜,等.耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J].*生态学报*, 2013,33(22):7116-7124.

[6] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4): 665-676.

[7] 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[J].*农业环境科学学报*,2012,31(2):369-376.

[8] 王勇,姬强,刘帅,等.耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].*农业环境科学学报*,2012,31(7):1365-1373.

[9] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].*生态学报*,2010,30(4):1035-1041.

[10] 何淑勤,郑子龙.不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J].*水土保持通报*,2010,30(1):7-10.

[11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999:106-195.

[12] Elliot E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 518-524.

[13] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].*中国农业科学*,2007,40(9): 1973-1979.

[14] Liu X L, He Y Q, Zhang H L, et al. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 666-673.

[15] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90: 227-234.

[16] 张先凤,朱安宁,张佳宝,等.耕作管理对潮土团聚体形成及有机碳累积的长期效应[J].*中国农业科学*, 2015, 48(23):4639-4648.

[17] 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.

[18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099-2103.

[19] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等.不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J].*土壤学报*,2006,43(3):422-429.

[20] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in Northeastern Ohio, USA [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81: 239-252.

[21] 窦森,郝翔翔.黑土团聚体与颗粒中碳、氮含量及腐殖质组成的比较[J].*中国农业科学*,2013,46(5):970-977.

[22] Kool D M, Chung H, Tate K R, et al. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO_2 spring [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282-1293.

[23] 王迪,吴新亮,蔡崇法,等.长期培肥下红壤有机碳组成与团聚体稳定性的关系[J].*中国水土保持科学*,2016, 14(1):61-70.

[24] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, et al. Long-term tillage rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 371-380.

[25] 窦森,陈光,关松,等.秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式[J].*吉林农业大学学报*,2017,39(2):127-133.