



秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响

高洪军, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平, 王立春

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘要:【目的】探讨不同秸秆还田量下土壤及团聚体有机碳的变化特征, 阐明土壤及团聚体有机碳储量变化对外源有机碳累积投入的响应关系, 揭示黑钙土土壤及团聚体固碳效应和土壤有机碳定量提升机理。【方法】于2012年4月在吉林省农安县玉米主产区设置了玉米秸秆还田量田间定位试验, 共设计4个处理: 秸秆还田量0 (SA₀)、秸秆还田量4 500 kg·hm⁻² (SA₃₀₀)、秸秆还田量9 000 kg·hm⁻² (SA₆₀₀)、秸秆还田量13 500 kg·hm⁻² (SA₉₀₀)。利用多年试验土壤有机碳储量与外源有机碳投入的数据分析其量化关系和固碳效率。通过湿筛法筛分>2 mm、2—0.25 mm、0.25—0.053 mm和<0.053 mm粒级团聚体, 分析不同粒级团聚体有机碳储量变化特征及固碳效应。【结果】长期秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量, 秸秆还田SA₆₀₀和SA₉₀₀两处理土壤有机碳含量均显著高于秸秆不还田(SA₀)、低量秸秆还田(SA₃₀₀) ($P<0.05$), 并且后3年SA₉₀₀和SA₆₀₀两处理土壤有机碳含量差异达显著水平。2015—2018年间, SA₉₀₀处理土壤有机碳较SA₀处理分别依次提高了11.0%、15.8%、17.2%、23.1%。土壤总有机碳储量与外源有机碳输入呈极显著正线性相关关系 ($P<0.01$), 其中土壤总固碳效率为12.9%。与秸秆不还田(SA₀)相比, 秸秆还田SA₆₀₀和SA₉₀₀两处理均显著提高了各粒级团聚体有机碳含量 ($P<0.05$), 尤其是对大团聚体(>0.25 mm)有机碳含量增加贡献更大。高量秸秆还田(SA₉₀₀)处理的>2 mm和2—0.25 mm粒级团聚体有机碳储量较秸秆不还田(SA₀)处理分别提高了45.5%和47.7%。除<0.053 mm团聚体外, 其他粒级土壤团聚体有机碳储量增加量与累积碳投入量增加量呈显著正线性相关关系 ($P<0.05$); 大粒级团聚体固碳效率显著高于小粒级团聚体, >2 mm和2—0.25 mm粒级团聚体固碳效率分别为4.9%和13.6%。依据秸秆还田下土壤固碳效率, 预测未来10年内土壤有机碳储量要提升10%、20%、30%, 每年需额外分别投入风干玉米秸秆约5.99、11.98、17.97 t·hm⁻²。【结论】玉米秸秆还田能显著促进黑钙土土壤及团聚体有机碳累积, 并且土壤有机碳含量均随秸秆还田量和试验年限的延长而增加, 有机碳主要集中固持在大团聚体中。表明秸秆还田是黑土区土壤肥力提升的重要培育措施, 大团聚体有机碳可作为评价土壤有机碳变化对不同土壤培肥措施快速响应的重要指标之一。

关键词: 秸秆还田量; 黑土区; 土壤有机碳; 团聚体; 固碳效率

Effects of Corn Straw Returning Amounts on Carbon Sequestration Efficiency and Organic Carbon Change of Soil and Aggregate in the Black Soil Area

GAO HongJun, PENG Chang, ZHANG XiuZhi, LI Qiang, ZHU Ping, WANG LiChun

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033)

收稿日期: 2020-03-23; 接受日期: 2020-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300201-3)、吉林省农业科技创新工程杰出青年项目(CXGC2017JQ008)、农业农村部公益性行业(农业)科研专项(201503136-6)

联系方式: 高洪军, Tel: 0431-87063170; E-mail: ghj-1975@163.com. 通信作者朱平, E-mail: zhuping1962@sohu.com. 通信作者王立春, E-mail: wlc1960@163.com

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to explore the organic carbon changes of soil and aggregate, to reveal the quantitative relationship between organic carbon stocks and additional organic carbon input, and to clarify the carbon fixation effect of soil and aggregates, and the mechanism of quantitative enhancement for organic carbon. 【Method】 The field fixed experiment about straw returning amount was set up in the main corn production area of Nong'an County, Jilin Province in April 2012. The treatments included four different corn straw returning amounts of 0 (SA_0), 4 500 (SA_{300}), 9 000 (SA_{600}), and 13 500 $kg \cdot hm^{-2}$ (SA_{900}). The record information related to soil organic carbon (SOC) stocks and additional organic carbon input during the 7 years were used to analyze the quantitative relationship and carbon sequestration efficiency. Soil samples were separated into >2 mm, 2-0.25 mm, 0.25-0.053 mm, and <0.053 mm by using the wet sieving method in order to analyze the organic carbon of aggregates and carbon fixation effect. 【Result】 The results showed corn straw returning could significantly increase SOC content, the SOC under SA_{900} and SA_{600} were significantly larger than that under SA_0 and SA_{300} . There were significant differences in soil organic carbon content between SA_{900} and SA_{600} treatments in the last three years. Compared with SA_0 treatment, from 2015 to 2018, SA_{900} increased soil organic carbon by 11.0%, 15.8%, 17.2% and 23.1%, respectively. Significantly positive linear correlation was observed between the SOC stocks and additional organic carbon input ($P<0.01$), and the sequestration efficiency of total organic carbon was 12.9%. Compared with SA_0 treatment, SA_{600} and SA_{900} treatments significantly increased organic carbon contents of aggregates ($P<0.05$), especially in the macroaggregates; the organic carbon storage of SA_{900} treatment increased by 45.5% and 47.7% in the >2 mm and 2-0.25 mm of aggregates, respectively. Except for <0.053 mm aggregate, there was a significant positive linear correlation between the increase of organic carbon storage and cumulative carbon input in other particle aggregates. The carbon sequestration efficiency (CSE) of larger size aggregates was significantly higher than that of smaller size aggregates, and >2 mm and 2-0.25 mm size aggregates were 4.9% and 13.6%, respectively. According to the soil carbon sequestration efficiency, the soil organic carbon storage should be increased by 10%, 20% and 30% in the next 10 years, and about 5.99, 11.98 and 17.97 $t \cdot hm^{-2}$ of air-dried corn straw should be added each year, respectively. 【Conclusion】 Corn straw returning could significantly promote the accumulation of organic carbon in soil and aggregates of Chernozem. The content of soil organic carbon increased with the increase of the amount of straw returning and the experimental years, while the organic carbon sequestration was mainly distributed in the macroaggregates. The results showed that straw returning to field was an important fertilization to improve soil fertility in black soil area, and the macroaggregate organic carbon could be used as an important index to evaluate the rapid response of soil organic carbon to different soil fertility measures

Key words: amount of straw returning field; black soil area; soil organic carbon; aggregate; carbon sequestration efficiency

0 引言

【研究意义】农田土壤有机碳和土壤团聚体特征是评价土壤肥力的重要指标,它们影响着土壤的物理、化学、生物等土壤性质^[1-2],也是土壤中各种养分的贮藏库及肥力供应的核心物质^[3]。因此,探明黑土区农田土壤及团聚体固碳效应对于土壤肥力提升及玉米增产稳产均具有重要意义。【前人研究进展】土壤固碳效率可以反映单位外源有机碳在土壤或团聚体中的转化程度^[4]。美国及加拿大温带地区土壤固碳效率为14%—21%^[5],而印度热带半干旱地区土壤固碳效率为25%^[6]。ZHANG等^[7]根据6个长期土壤肥力定位试验计算了我国不同类型土壤的固碳效率,其中:新疆灰漠土固碳效率为26.7%、吉林公主岭黑土为15.8%、河南潮土为6.8%,并且土壤固碳量都与累积有机碳投入呈极显著的线性正相关关系,很多研究结果也支持这一观点^[8-9]。然而,CAMPBELL等^[10]研究认为,当

外源有机碳长期投入在土壤有机碳含量高的农田上,土壤有机碳含量并不持续增加,而是达到一个稳定碳饱和点之后不再继续增加。秸秆有机碳输入对土壤大团聚体(>0.25 mm)有机碳的增加贡献较大,对小粒级团聚体有机碳含量影响较小^[11]。李景等^[12]通过15年的秸秆覆盖还田试验研究也表明,外源碳累积投入量与 >0.25 mm大团聚体有机碳储量变化量呈极显著的正相关关系,其中大粒级团聚体固碳效率较高,而小粒级团聚体固碳能力较弱。除土壤类型、气候因素、耕作和种植制度外,施用农家肥和秸秆还田也是影响农田土壤有机碳转化和固持的最重要因素之一^[13]。东北地区是我国重要的玉米生产区之一,秸秆资源十分丰富,秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量,进而改善土壤团聚体有机碳的分布^[14]。【本研究切入点】目前关于不同培肥及耕作措施对土壤有机碳变化规律和团聚体特征影响研究较多,对土壤总有机碳固持效率研究也有报道,但关于玉米秸秆还田对东北黑钙土团

聚体固碳效率机制等研究比较薄弱, 需进一步探讨和明确。【拟解决的关键问题】本文基于 7 年的秸秆还田量试验, 探讨不同玉米秸秆还田量对土壤固碳效应的影响, 进而阐明秸秆碳输入与土壤及团聚体碳储量的量化关系; 深入剖析各粒级团聚体固碳效应, 以期揭示农田土壤有机碳固持效率机制, 为定量提升土壤有机碳及土壤肥力培育提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于吉林省农安县哈拉海镇吉林省农业科学院哈拉海试验站, 该区域属中温带大陆性季风气候, 光热资源充足, 地势平坦, 四季分明, 年平均日照时数为 2 620 h, 年均气温 4.7℃, 无霜期 145 d, 年均降雨量 507.7 mm, 有效积温 2 800℃。于 2012 年 4 月设置为田间定位试验, 土壤类型为黑钙土, 在该区域具有典型代表性。试验开始时耕层 (0—20 cm) 土壤基础化学性状^[15]: 有机质为 22.3 g·kg⁻¹, 全氮 1.537 g·kg⁻¹, 全磷 0.565 g·kg⁻¹, 全钾 22.7 g·kg⁻¹, 碱解氮 128.2 mg·kg⁻¹, 速效磷 12.9 mg·kg⁻¹, 速效钾 132.5 mg·kg⁻¹, pH 7.75。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理, 按照施用 0、4 500、9 000、13 500 kg·hm⁻² 玉米秸秆量进行设计, 分别为: (1) 秸秆还田量 0 (SA₀); (2) 秸秆还田量 4 500 kg·hm⁻² (SA₃₀₀); (3) 秸秆还田量 9 000 kg·hm⁻² (SA₆₀₀); (4) 秸秆还田量 13 500 kg·hm⁻² (SA₉₀₀), 其中 9 000 kg·hm⁻² 秸秆还田量为当地农户的还田量。每处理 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积为 80 m²。其中, 秸秆还田方式为旋耕还田: 在玉米机械收获后, 根据玉米秸秆不同施用量对各小区进行人工撒施秸秆, 然后利用秸秆粉碎机粉碎秸秆 (长度小于 6 cm), 并采用大马力农机对秸秆进行深旋还田, 深度约 16 cm, 达到秸秆与土壤充分均匀混合, 最后重镇压。

试验供试肥料: 尿素 (N 46%)、重过磷酸钙 (P₂O₅ 46%) 和硫酸钾 (K₂O 50%); 各处理氮、磷、钾肥施用量相同, 分别为 N 210、P₂O₅ 105、K₂O 105 kg·hm⁻²。1/3 的氮肥和全部磷钾肥在春季播种前作底肥施用, 余下 2/3 氮肥在玉米拔节期追肥。玉米秸秆养分含量: C 42.6%、N 0.8%、P₂O₅ 0.32% 和 K₂O 0.75%。供试玉米品种为先玉 335; 每年玉米在 4 月 28 日左右播种, 种植密度 6.5 万株/hm², 9 月 27 日左右收获, 其他田间管理措施按当地生产田进行^[15]。

1.3 土壤有机碳和团聚体样品采集及分析

2014—2018 年秋季收获后, 对每个小区采集耕层土样 (0—20 cm), 按 “S” 形取 5 个点土样, 然后组成一个混合土样。土壤风干过筛后采用重铬酸钾-外加热法测定土壤有机碳。

2018 年 10 月在玉米收获后采集 0—20 cm 土层样品进行团聚体分级。土壤团聚体分级依据 ELLIOT^[16] 的湿筛法, 分离出 >2 mm, 2—0.25 mm, 0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 等 4 个级别团聚体。>0.25 mm 的团聚体称为水稳性大团聚体, <0.25 mm 称为水稳性微团聚体。土壤有机碳含量及分离得到的各粒级团聚体有机碳含量采用 EA3000 元素分析仪测定。

1.4 计算方法

外源有机碳投入量计算方法参照 JIANG 等^[17]; 有机碳储量及团聚体有机碳储量计算方法参照李景等^[12]; 土壤总有机碳及各粒级团聚体有机碳的固碳速率和固碳效率采用公式 (1) — (3)^[18]:

$$\Delta\text{SOC}_{\text{stock}} = \text{SOC}_{\text{stock-t}} - \text{SOC}_{\text{stock-c}} \quad (1)$$

$$\text{SOC}_{\text{SR}} = \Delta\text{SOC}_{\text{stock}}/n \quad (2)$$

$$\text{SOC}_{\text{SE}} = \Delta\text{SOC}_{\text{stock}}/(\text{C}_{\text{input-t}} - \text{C}_{\text{input-c}}) \quad (3)$$

式中, SOC_{stock-t}、SOC_{stock-c} 和 ΔSOC_{stock} 分别代表处理有机碳储量、对照有机碳储量和有机碳储量的增加量; C_{input-t} 和 C_{input-c} 分别代表处理和对照外有机碳输入量; n 代表外源有机碳输入的累积年份; SOC_{SR} 和 SOC_{SE} 分别代表土壤固碳速率和固碳效率。

1.5 数据处理

试验数据和图表采用 Excel 进行处理, 用 SAS 9.0 软件进行两因素方差分析, 处理间多重比较采用 LSD-test 法进行差异显著性检验。采用简单线性关系 ($y=ax+b$) 来拟合土壤及团聚体有机碳增加量与外源有机碳输入的相关关系, 并用 t 检验斜率的差异显著性。

2 结果

2.1 不同秸秆还田量对土壤有机碳含量的影响

不同秸秆还田量对土壤有机碳含量影响显著 (图 1), 2014—2018 年秸秆还田 SA₆₀₀ 和 SA₉₀₀ 两处理土壤有机碳含量均显著高于秸秆不还田 (SA₀)、低量秸秆还田 (SA₃₀₀) 处理; 从第 5 年 (2016 年) 秸秆还田开始, SA₉₀₀ 和 SA₆₀₀ 两处理土壤有机碳含量差异达显著水平 ($P<0.05$)。高量秸秆还田 (SA₉₀₀) 处理 5 年间土壤有机碳较秸秆不还田 (SA₀) 处理分别依年限增加了 9.3%、11.0%、15.8%、17.2%、23.1%; 在

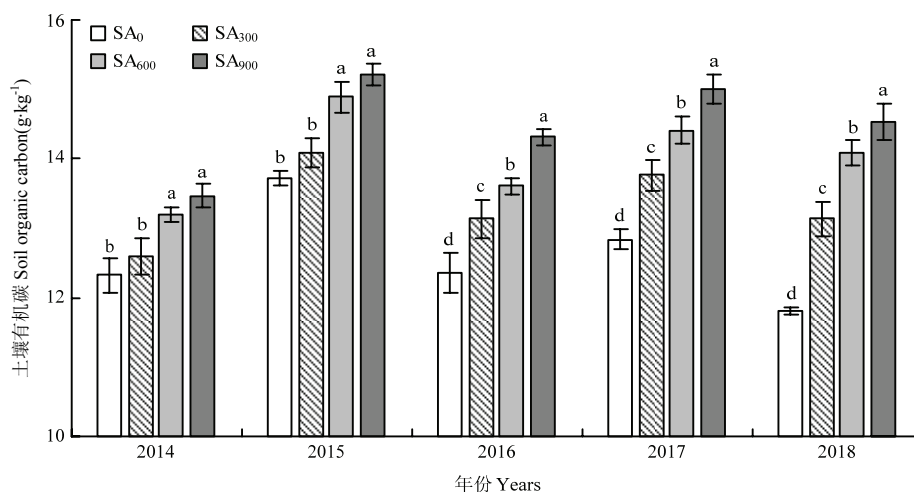


图1 不同秸秆还田量下土壤有机碳的变化

Fig. 1 Changes of soil organic carbon under different straw returning amounts

秸秆还田前4年(2012—2015年),低量秸秆还田SA₃₀₀处理土壤有机碳与SA₀处理相比差异不显著;但在秸秆还田后3年(2016—2018年),两者之间达到差异显著水平($P<0.05$)。总体上,不同秸秆还田量下土壤有机碳含量由高到低依次表现为SA₉₀₀、SA₆₀₀、SA₃₀₀、SA₀。

2.2 不同秸秆还田量对土壤固碳效率变化的影响

由图2分析可知,各处理外源累积碳的投入增加量、以及土壤有机碳储量变化量均存在较大差异,秸秆不还田(SA₀)处理外源有机碳的增加仅归功于玉米地上残茬及根系生物量的投入,累积碳投入量达到10.92 t·hm⁻²;而秸秆还田处理土壤中的有机物料源于收获植株的秸秆还田、玉米地上残茬及根系生物量,其中,SA₉₀₀处理累积碳投入量较SA₀处理增加35.12 t·hm⁻²。随着秸秆碳的累积输入各处理的有机碳储量均有所提高,其中,高量秸秆还田(SA₉₀₀)处理的有机碳储量最高,较秸秆不还田(SA₀)处理土壤有机碳储量(2018年)增加4.74 t·hm⁻²。

由图2可知,土壤总有机碳储量与外源有机碳输入呈极显著正线性相关关系($P<0.01$),即土壤总有机碳储量随外源碳投入量增加而显著提高;土壤的固碳效率为12.9%,即农田投入100 t·hm⁻²外源有机碳,土壤有机碳储量增加12.9 t·hm⁻²。当有机碳储量变化(y)为0时,每年需投入秸秆碳1.08 t·hm⁻²(或干秸秆2.54 t·hm⁻²)维持初始土壤SOC水平,土壤有机碳储量达到平衡。表明秸秆还田对维持和提高土壤有机碳含量具有重要作用。

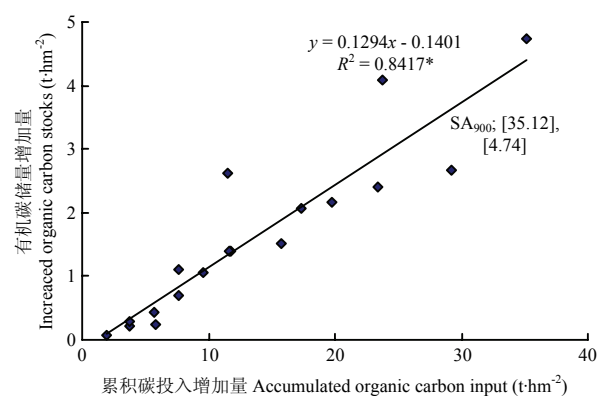


图2 外源累积碳投入与土壤有机碳储量变化的响应关系

Fig. 2 Relative relationship between change of organic carbon stocks and cumulative carbon input

2.3 不同秸秆还田量对土壤团聚体有机碳含量及储量的影响

2.3.1 对土壤团聚体有机碳含量的影响

由图3分析可知,各粒级团聚体大小差异性影响着团聚体碳含量,以2—0.25 mm大粒级团聚体有机碳含量为最高,各处理平均达到15.8 g·kg⁻¹;0.25—0.053 mm和<0.053 mm小粒级团聚体有机碳含量最低,两个粒级各处理平均值分别为10.5和11.9 g·kg⁻¹。表明大团聚体较微团聚体能储存更多的有机碳。

与秸秆不还田(SA₀)相比,对于>2 mm和2—0.25 mm粒级大团聚体,秸秆还田处理都显著提高了该粒级团聚体有机碳含量($P<0.05$),其中,3个秸秆还

田量处理之间差异达显著水平；对于 0.25—0.053 mm 和<0.053 mm 粒级微团聚体，秸秆还田（SA₆₀₀）和（SA₉₀₀）两处理均显著提高了该粒级团聚体有机碳含量（ $P<0.05$ ），但秸秆还田 SA₃₀₀ 和 SA₀ 两处理之间差异未达到显著水平。高量秸秆还田（SA₉₀₀）各粒级团聚体碳含量较其他 3 个处理都有显著增加（ $P<0.05$ ），较 SA₀ 处理提高幅度为 2.3%—22.7%，其中在 2—0.25 mm 和<0.053 mm 粒级中增加幅度最高。表明秸秆还田不仅有利于大团聚体（>0.25 mm）中有机碳的增加，同时也显著提高了微团聚体有机碳含量，尤其高量秸秆还田对土壤团聚体有机碳含量提高贡献更大。

2.3.2 对表层土壤团聚体有机碳储量的影响 由图

4 分析可知，0.25—0.053 mm 粒级团聚体有机碳储量为最高，平均为 12.92 t·hm⁻²，其次为 2—0.25 mm(10.32 t·hm⁻²)，而>2 mm 和<0.053 mm 粒级团聚体储量为最低。与秸秆不还田相比，秸秆还田 SA₆₀₀ 和 SA₉₀₀ 两处理均明显提高了>2 mm 和 2—0.25mm 粒级大团聚体有机碳储量，但没有显著提高<0.25 mm 微团聚体有机碳储量；高量秸秆还田 SA₉₀₀ 处理的>2 mm 和 2—0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量较秸秆不还田（SA₀）分别提高了 45.5%和 47.7%；<0.053 mm 粒级微团聚体碳储量对不同秸秆还田量的影响没有变化。表明秸秆还田不仅有利于大团聚体有机碳储量的增加，而且秸秆还田数量也影响着土壤团聚体有机碳储量的变化。

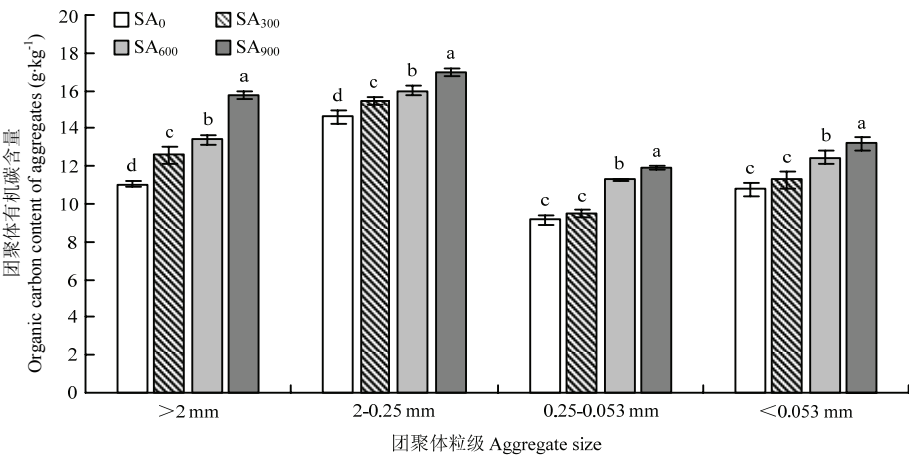


图 3 不同秸秆还田量下各粒级团聚体有机碳含量

Fig. 3 Aggregates organic carbon content under different straw returning amounts

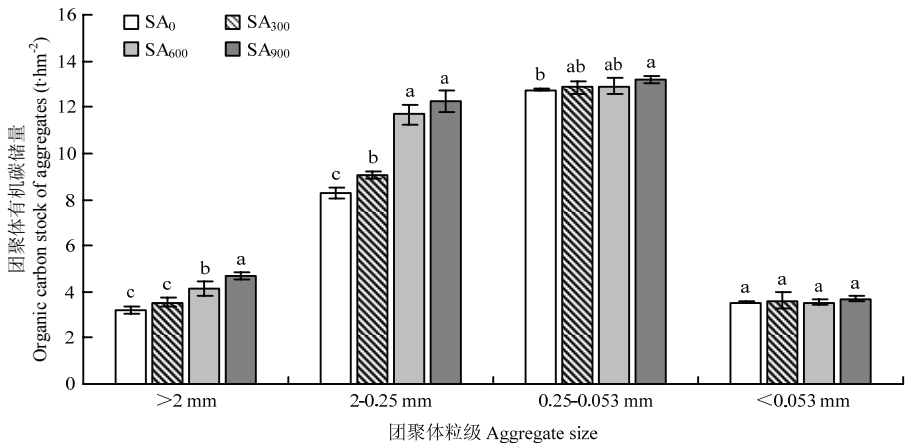


图 4 不同秸秆还田量下各粒级团聚体有机碳储量变化

Fig. 1 Changes of Aggregates organic carbon stocks under different straw returning amounts

2.4 不同秸秆还田下各粒级团聚体有机碳固持速率与固碳效率

2.4.1 不同粒级团聚体有机碳固持速率 不同秸秆还田量对 0—20 cm 土层各粒级团聚体有机碳储量的固持速率影响差异较大(表 1)。 >2 mm 和 2—0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳在秸秆还田 3 个处理中平均固

碳速率分别为 0.15 和 0.45 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，并明显高于 0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 各粒级微团聚体固碳速率。秸秆还田 SA_{900} 和 SA_{600} 处理 >2 mm 和 2—0.25 mm 粒级大团聚体固碳速率明显高于秸秆不还田 (SA_0) 和低量还田 (SA_{300}) 处理；在微团聚体 0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级中，各处理土壤固碳速率差异不显著。

表 1 各粒级团聚体有机碳固持速率 (2018)
Table 1 Sequestrated rates of aggregates organic carbon

处理 Treatment	累积碳输入量 Cumulative C input ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	各粒级团聚体固碳速率 Sequestrated rates of aggregates organic carbon ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)			
		>2 mm	2—0.25 mm	0.25—0.053 mm	<0.053 mm
SA_0	10.92				
SA_{300}	22.40	0.05±0.02c	0.13±0.01c	0.02±0.02a	0.01±0.02a
SA_{600}	34.62	0.16±0.03b	0.56±0.04b	0.03±0.02a	0.01±0.01a
SA_{900}	46.04	0.25±0.01a	0.66±0.03a	0.07±0.02a	0.03±0.02a
平均值 Average		0.15	0.45	0.04	0.01

2.4.2 不同粒级团聚体有机碳固持效率 随着连续 7 年外源有机碳累积输入下， >2 mm、2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 各粒级团聚体碳储量均显著提高 ($P<0.05$)，图 5)，表明这些粒级团聚体中有机碳均没有出现碳饱和现象。 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳储量并未随累积碳投入量的增加而增加，表现出碳饱和迹象。图 5 中的直线斜率表示各粒级团聚体固碳效率，斜率越大固碳效率也越大。2—0.25 mm 粒级团聚体的固碳效率为最高，显著

高于其他各粒级团聚体固碳效率 ($P<0.05$)，固碳效率为 13.6%；其次为 >2 mm 粒级团聚体，固碳效率为 4.9%；0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级微团聚体固碳效率为最低。表明不同粒级团聚体有机碳以 2—0.25 mm 粒级大团聚体对秸秆还田响应最敏感，对土壤总有机碳储量的增加起决定性作用，可作为表征土壤有机碳响应土壤管理措施变化指标。

3 讨论

3.1 土壤总有机碳变化及固碳效率

秸秆还田和有机肥等外源有机碳的输入是农田土壤有机碳增加的主要途径和碳源^[19]。许多研究表明长期秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量^[20-21]。本研究中，秸秆还田 SA_{600} 和 SA_{900} 两处理土壤有机碳含量均显著高于秸秆不还田 (SA_0)、低量秸秆还田 (SA_{300})，并且后 3 年 SA_{900} 和 SA_{600} 两处理土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)。同时，随着玉米秸秆还田量增加和还田时间的延长，土壤有机碳含量逐渐明显提升。关于土壤有机碳是否随着秸秆还田量的增加而同步提高，文献报道也存在一些差异。有许多学者认为，随着秸秆还田量的增加，土壤有机碳含量和碳库活性均增加，并与秸秆还田量呈极显著线性正相关关系^[22-23]，这与本研究结果一致。但白建忠等^[24]在水旱轮作农田上研究发现，秸秆还田对年际间水旱轮作农田土壤有机质提升

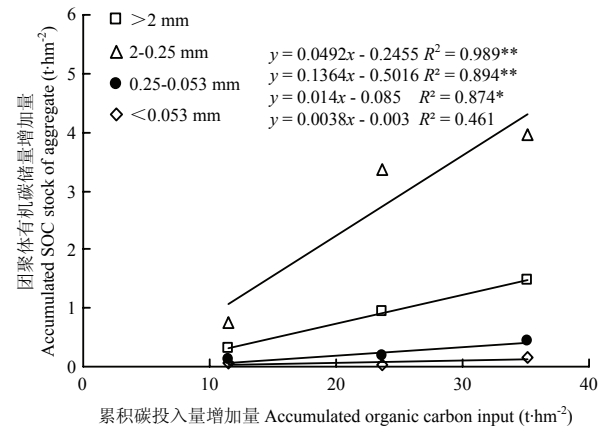


图 5 不同粒级团聚体有机碳储量增加量与累积碳投入量的关系 (2018)

Fig. 5 Relationship between organic carbon stocks of soil aggregates and cumulative C input

并不呈叠加效应,而且土壤有机质也不随秸秆还田量增加而同步提高,因为过量秸秆还田降低了土壤 pH 及秸秆的腐解速率,从而不利于土壤有机碳累积^[25]。

有学者研究表明^[26],土壤有机碳储量对系统的碳输入水平的提升无显著响应,但大量研究表明^[7,27],土壤总有机碳储量与外源有机碳输入呈极显著正线性相关关系($P<0.01$),这与本研究结果一致,黑钙土土壤固碳效率为 12.9%,土壤有机碳尚未达到碳饱和点,还存在很大的固碳空间,该结果略低于张文菊等^[7]在吉林省公主岭黑土长期定位试验的研究结果(固碳效率为 15.8%),但要高于河南潮土(6.8%),江西红壤(8.1%)^[19],这主要是由于土壤质地、气候因素(温度和水分)和有机物料种类及施用方式等诸多因素造成土壤固碳效率差异较大;如公主岭土壤固碳效率比农安高,可能是施用有机物料类型不同造成的,公主岭处理施用农家肥,而农安处理为秸秆还田,施用农家肥土壤固碳速率显著高于秸秆还田^[28],施用农家肥不仅可显著提高土壤有机质含量,而且农家肥本身是处于半分解状态的有机质,有利于土壤碳的固持;也可能是由于公主岭典型黑土比黑钙土质地黏粒含量高,黏粒吸附能力强、比表面积较大、固碳能力强,所以黏粒固碳效率明显高于砂粒和粉粒,这与蔡岸冬等^[17]在红壤长期定位施肥试验报道的结果相似。

3.2 各粒级团聚体对土壤有机碳的固持

土壤团聚化过程是土壤团聚体固碳的重要驱动途径^[29]。本研究发现,各粒级团聚体有机碳含量以 2—0.25 mm 和 >2 mm 粒级大团聚体有机碳含量为最高。与秸秆不还田(SA₀)相比,秸秆还田 SA₆₀₀ 和 SA₉₀₀ 两处理均显著提高了各粒级团聚体有机碳含量($P<0.05$),尤其是对大团聚体(>0.25 mm)有机碳含量增加贡献更大;其中 3 个秸秆还田量处理各粒级团聚体碳含量之间差异达显著水平,这与本人前期报道^[15]的不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响研究结果一致。刘恩科等^[30]研究也认为,长期有机肥和化肥配施可明显提高各粒级团聚体有机碳含量,尤其是对大团聚体有机碳含量增加贡献更大。这是由于秸秆还田能促进土壤有机碳的积累,腐殖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,从而提高了大团聚体有机碳含量^[31]。所以,>0.25 mm 粒级大团聚体有机碳对农业管理措施的变化更灵敏,可作为评价土

壤有机碳变化对不同土壤培肥措施快速响应的重要指标。

KOOL 等^[32]提出不同碳库存在等级饱和模型,随着外源碳输入量的增加,各粒级团聚体由最小粒级到最大粒级依次逐渐达到碳饱和,最终土壤碳库饱和。本研究结果也支持了这种饱和理论,随秸秆碳输入量的增加,<0.053 mm 粒级团聚体碳储量没有增加,0.25—0.053 mm 粒级团聚体碳储量增加不明显,而 2—0.25 mm 和 >2 mm 粒级团聚体有机碳储量增加显著。本研究也发现,>2 mm、2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 各粒级土壤团聚体有机碳储量增加量与累积碳投入量增加量呈显著正线性关系,表明这些粒级团聚体中有机碳均没有出现碳饱和现象,而<0.053 mm 粒级团聚体有机碳出现碳饱和迹象。这是由于微团聚体中固持的碳稳定性强、周转较慢,固碳能力有限,新输入的颗粒有机碳主要分布在大团聚体中。

不同粒级土壤团聚体周转对土壤固碳效率高低具有决定性的作用^[31]。大粒级团聚体固碳效率显著高于小粒级团聚体,>2 mm 和 2—0.25 mm 粒级固碳效率分别为 4.9%和 13.6%。而 0.25—0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级微团聚体固碳速率和固碳效率均为最低。随着秸秆碳的增加<0.053 mm 粒级微团聚体固碳效率并没有同步增加。李景等^[12]研究结果表明,长期秸秆覆盖还田更有利于大团聚有机碳储量的增加,>2 mm 粒级团聚体固碳效率为最高,这可能是由于秸秆还田增加了新鲜植物残体有机碳,通过有机质的胶结作用形成大团聚体并增加其有机碳含量,更多的有机碳被大团聚体保护起来,进而提高其固碳效率^[33]。

3.3 土壤固碳效率在土壤有机碳定量提升中的应用与预测

通过土壤对不同有机物料碳的固持效率,可以计算出提升和维持有机碳水平的外源有机物料施用量。以玉米秸秆还田为例,根据表 2 该地区秸秆还田下土壤固碳效率为 12.9%,以 0—20 cm 土层土壤 SOC 储量等于 33 t·hm⁻²(初始 SOC 储量)为基础计算秸秆还田投入量,要维持该地区土壤有机碳储量平衡,每年最低需投入玉米风干秸秆(有机碳含量约为 42.7%,含水量约为 14%)约 2.54 t·hm⁻²;如未来 10 年内,土壤有机碳储量要提升 10%、20%、30%,预测每年需额外分别投入风干玉米秸秆约 5.99、11.98、17.97 t·hm⁻²。

表 2 土壤有机碳储量提升所需玉米秸秆投入量及相关参数

Table 2 Corn Straw input and related parameters for soil organic carbon stocks enhancement

		有机碳储量 SOC stocks (t·hm ⁻²)	每年提升碳储量 Increased SOC stocks (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	固碳效率 C sequestration efficiency (%)	年所需碳投入量 Carbon input (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	年所需投入玉米秸秆量 Corn straw input (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
初始值	Initial value	33	0			
10 年提升 10%	Increased by 10% over 10 years	36.3	0.33	12.9	2.56	5.99
10 年提升 20%	Increased by 20% over 10 years	39.6	0.66	12.9	5.12	11.98
10 年提升 30%	Increased by 30% over 10 years	42.9	0.99	12.9	7.67	17.97

4 结 论

秸秆还田量 9 000—13 500 kg·hm⁻² 土壤的固碳效果较好,有效促进了黑土区土壤有机碳的累积与固定,并且土壤有机碳含量均随秸秆还田量以及还田年限的延长而增加。土壤总有机碳储量与外源有机碳输入呈极显著正线性相关关系 ($P<0.01$),该土壤固碳效率为 12.9%。秸秆还田不仅有利于大团聚体有机碳储量的增加,而且秸秆还田数量也影响着各粒级土壤团聚体有机碳储量的转化。随着秸秆碳累积投入量的增加,各粒级团聚体存在明显的由最小粒级到最大粒级依次逐渐达到碳饱和等级顺序;除<0.053 mm 粒级团聚体外,其他各粒级团聚体中有机碳均没有出现明显的碳饱和迹象,各粒级团聚体固碳效率最高的为 2—0.25 mm 和>2 mm 粒级大团聚体,固碳效率分别为 13.6%和 4.9%。>0.25 mm 粒级大团聚体有机碳对外源碳投入量的影响更灵敏,可作为表征土壤有机碳响应土壤培肥措施的变化指标。

References

[1] 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.土壤学报,1994,31(1): 18-25.
CHEN E F, ZHOU L K, WU G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level. *Acta Pedologica Sinica*, 1994(1): 18-25. (in Chinese)

[2] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, DITTMAR T, GUGGENBERGER G, JANSSENS I A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.

[3] SIX J, BOSSUYT H, DENEFF K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 17-31.

[4] YAN X, ZHOU H, ZHU Q H, WANG X F, ZHANG Y Z, YU X C, PENG X. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland

soil under long-term fertilization in southern China. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130(6): 42-51.

[5] SRINIVASARAO C, VENKATESWARLU B, LAL R. Soil carbon sequestration and agronomic productivity of an Alfisol for a groundnut-based system in a semiarid environment in southern India. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 40-48.

[6] RASMUSSEN P E, COLLINS H P. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 1991, 45: 93-134.

[7] ZHANG W J, WANG X J, XU M G, HUANG S M, LIU H, PENG C. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 409-425.

[8] RASMUSSEN P E, PARTON W J. Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 523-536.

[9] HUGGINS D R, BUYANOVSKY G A, WAGNER G H, BROWN J R, DARMODY R G, BUNDY L G. Soil organic C in the tall grass prairie-derived region of the Corn Belt: Effects of long-term crop management. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 219-234.

[10] CAMPBELL C A, ZENTNER R P, BOWREN K E, SCHNITZER M. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 377-387.

[11] 邱佳颖,刘小粉,杜章留,肖小平,杨光立,任图生.长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响.中国生态农业学报,2014,22(10): 1129-1138.
DI J Y, LIU X F, DU Z L, XIAO X P, YANG G L, REN T S. Influences of long-term organic and chemical fertilization on soil aggregation and associated organic carbon fractions in a red paddy soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1129-1138. (in Chinese)

[12] 李景,吴会军,武雪萍,蔡典雄,王碧胜,梁国鹏,姚宇卿.15 年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响.中国农业科学,2015,48(23): 4690-4697.

- LI J, WU H J, WU X P, CAI D X, WANG B S, LIANG G P, YAO Y Q. Effects of 15-year conservation tillage on soil and aggregate organic carbon sequestration in the Loess Hilly Region of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4690-4697. (in Chinese)
- [13] HUTCHINSON J J, CAMPBELL C A, DESJARDINS R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2-4): 288-302.
- [14] 孙汉印, 姬强, 王勇, 王旭东. 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, WANG X D. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 369-376. (in Chinese)
- [15] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 李强, 贾立辉, 朱平. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 75-79.
- GAO H J, PENG C, ZHANG X Z, LI Q, JIA L H, ZHU P. Effects of different straw returning modes on characteristics of soil aggregates in Chernozem soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 75-79. (in Chinese)
- [16] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627-633.
- [17] JIANG G, XU M, HE X, SHIRATO Y, IIZUMI T, WANG J. Soil organic carbon sequestration in upland soils of northern China under variable fertilizer management and climate change scenarios. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28: 319-333.
- [18] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 韩天富, 徐明岗. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1431-1438.
- CAI A D, ZHANG W J, SHEN X R, HAN T F, XU M G. Soil carbon sequestration efficiency of different particle-size fractions after long-term fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1431-1438. (in Chinese)
- [19] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 黄庆海, 骆坤. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 868-875.
- ZHANG J Y, ZHANG W J, XU M G, HUANG Q H, LUO K. Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 868-875. (in Chinese)
- [20] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 322-328.
- DONG S S, DOU S. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 322-328. (in Chinese)
- [21] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 董红云, 杨丽萍, 张锡金. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130-135.
- LI X H, GUO H H, ZHU Z L, TONG H Y, YANG L P, ZHANG X J. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130-135. (in Chinese)
- [22] 夏海勇, 王凯荣, 赵庆雷, 张正. 秸秆添加对土壤有机碳库分解转化和组成的影响. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 386-393.
- XIA H Y, WANG K R, ZHAO Q L, ZHANG Z. Effects of straw addition on decomposition transformation and composition of soil organic carbon pool. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 386-393. (in Chinese)
- [23] LOU Y L, XU M G, WANG W, SUN X L, ZHAO K. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 70-73.
- [24] 白建忠, 陈泽, 丁永锋, 张珞, 赵营. 秸秆还田量对水旱轮作作物产量和土壤肥力的影响. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1185-1191.
- BAI J Z, CHEN Z, DING Y F, ZHANG L, ZHAO Y. Effect of different straw incorporation rates on crops yields and soil fertility in the paddy - upland rotation system. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5): 1185-1191. (in Chinese)
- [25] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 王维, 路文涛, 张惠, 杨宝平. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2518 - 2525.
- ZHANG P, LI H, JIA Z K, WANG W, LU W T, ZHANG H, YANG B P. Effect of straw returning on soil organic carbon content and soil carbon mineralization in the arid region of Ningnan. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518-2525. (in Chinese)
- [26] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, PAUSTIAN K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [27] CAMPBELL C A, VANDENBYGAART A J, GRANT B, ZENTNER R P, MCCONKEY B G, LEMKE R, GREGORICH E G, FERNANDEZ

- M. Quantifying carbon sequestration in a conventionally tilled crop rotation study in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 2007, 87(1): 23-38.
- [28] PURAKAYASTHA T J, RUDRAPPA L, SINGH D, SWARUP A, BHADRARAY S. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system. *Geoderma*, 2008, 144(1): 370-378.
- [29] LAL R, KIMBLE J M. Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1/3): 243-253.
- [30] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, HWAT Bing-So, 李秀英, 李娟. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- LIU E K, ZHAO B Q, MEI X R, HWAT B S, LI X Y, LI J. Distribution of water-stable aggregate sand organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035-1041. (in Chinese)
- [31] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:2099-2103.
- [32] KOOL D M, CHUNG H, TATE K R, ROSS D J, NEWTON P C D, SIX J. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282-1293.
- [33] 李景, 吴会军, 武雪萍, 蔡典雄, 姚宇卿, 吕军杰, 郑凯, 刘志平. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 378-386.
- LI J, WU H J, WU X P, CAI D X, YAO Y Q, LÜ J J, ZHENG K, LIU Z P. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 378-386. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)