

稻虾共作模式下克氏原螯虾对水稻土团聚体特征及有机碳分布的影响

侣国涵, 朱秀秀, 彭成林, 袁家富, 赵书军, 徐大兵, 谢媛圆, 周剑雄, 杨小红

引用本文:

侣国涵, 朱秀秀, 彭成林, 袁家富, 赵书军, 徐大兵, 谢媛圆, 周剑雄, 杨小红. 稻虾共作模式下克氏原螯虾对水稻土团聚体特征及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 590–596.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响

王润珑, 徐应明, 李然, 罗文文, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2701–2710 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0104>

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响

胡廷飞, 王辉, 谭帅

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 143–151 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0955>

不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征

乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 李孝梅, 李永梅

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1519–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1446>

秸秆施用和作物种植对土壤团聚体和微生物群落组成的影响

李增强, 李丹丹, 赵炳梓, 张佳宝

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1557–1565 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1658>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

侶国涵, 朱秀秀, 彭成林, 等. 稻虾共作模式下克氏原螯虾对水稻土团聚体特征及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 590–596.

SI G H, ZHU X X, PENG C L, et al. Effects of crayfish on aggregate characteristics and organic carbon distribution of paddy soil under integrated rice–crayfish system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 590–596.



开放科学 OSID

稻虾共作模式下克氏原螯虾对水稻土团聚体特征及有机碳分布的影响

侶国涵¹, 朱秀秀¹, 彭成林¹, 袁家富¹, 赵书军¹, 徐大兵¹, 谢媛圆¹, 周剑雄¹, 杨小红²

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/国家土壤质量洪山观测实验站, 武汉 430064; 2. 潜江市农技推广中心, 湖北 潜江 433199)

摘要:为研究长期稻虾共作模式下克氏原螯虾对水稻土团聚体数量、稳定性以及土壤团聚体有机碳含量、分布的影响,本研究依托始于2014年的长期定位试验,设置冬泡无秸秆还田(W)、冬泡+秸秆还田(WS)和冬泡+秸秆还田+养虾(WSC)3个处理,采集各处理表层土壤样品,分析土壤团聚体及有机碳分布特征。结果表明:土壤水稳性团聚体以>1~2 mm粒级为主,在冬泡条件下秸秆还田处理显著提高了土壤中>2 mm团聚体比例、有机碳含量和有机碳贡献率,且增加了土壤团聚体平均质量直径;相对于冬泡+秸秆还田处理,冬泡+秸秆还田+养虾处理土壤>2 mm和>1~2 mm团聚体比例显著提高了19.8%和6.5%,而0.053~0.25 mm团聚体比例则显著下降了9.2%,且>0.25 mm的团聚体数量、平均质量直径和几何平均直径分别提高了7.8%、20.6%和37.5%。冬泡+秸秆还田+养虾处理的土壤总有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳含量较冬泡+秸秆还田处理分别显著提高了6.2%、34.0%和23.1%,且显著提高了<0.25 mm团聚体中有机碳的含量。研究表明,稻虾共作模式下克氏原螯虾养殖促进了土壤大团聚体的形成,增强了团聚体稳定性,增加了土壤有机碳及活性组分含量,尤其提高了微团聚体中有机碳含量,提升了土壤固碳能力。

关键词:稻虾共作模式;克氏原螯虾;水稳性团聚体;有机碳分布

中图分类号:S152;S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0590-07 doi:10.11654/jaes.2023-0224

Effects of crayfish on aggregate characteristics and organic carbon distribution of paddy soil under integrated rice–crayfish system

SI Guohan¹, ZHU Xiuxiu¹, PENG Chenglin¹, YUAN Jiafu¹, ZHAO Shujun¹, XU Dabing¹, XIE Yuanyuan¹, ZHOU Jianxiong¹, YANG Xiaohong²
(1. Plant Protection and Soil Fertilizer Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences / National Agricultural Experimental Station for Soil Quality, Hongshan, Wuhan 430064, China; 2. Qianjiang Agro-Technology Extension Center, Qianjiang 433199, China)

Abstract: In order to investigate the effects of crayfish on the quantity and stability of paddy soil aggregates, as well as the content and distribution of organic carbon in soil aggregates under a long-term integrated rice–crayfish system, this study utilized a long-term field experiment that was initiated in 2014. Three treatments were set up: winter flooded fallow without straw returning (W), winter flooded fallow + straw returning (WS), and winter flooded fallow + straw returning + crayfish culture (WSC). Surface soil samples were collected from each treatment, and the distribution characteristics of soil aggregates and organic carbon were analyzed. The results showed that the water-stable aggregates were mainly in the >1–2 mm size range. The WS treatment significantly increased the proportion of >2 mm aggregates, organic carbon content, and organic carbon contribution rate, and also increased the average mass diameter of aggregates. Compared with the WS treatment, the proportion of aggregates >2 mm and >1–2 mm in the WSC treatment significantly increased by 19.8% and 6.5%, respectively, while the proportion of aggregates 0.053–0.25 mm decreased significantly by 9.2%. Moreover, the number

收稿日期:2023-03-27 录用日期:2023-06-12

作者简介:侶国涵(1981—),男,河南濮阳人,博士,副研究员,主要从事土壤肥力与养分循环方面的研究。E-mail: siguoh@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901203);湖北省重点研发计划项目(2021BBA075)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2021YFD1901203); Key Research and Development Program of Hubei Province, China (2021BBA075)

of aggregates >0.25 mm, mean weight diameter, and geometric mean diameter in the WSC treatment increased by 7.8%, 20.6% and 37.5%, respectively. The WSC treatment significantly increased the contents of soil total organic carbon, microbial biomass carbon and particulate organic carbon by 6.2%, 34.0% and 23.1%, respectively, and the content of organic carbon in <0.25 mm aggregates was significantly increased compared with that of the WS treatment. These results indicate that crayfish farming in an integrated rice-crayfish system promotes the transformation of small aggregates into large aggregates, improves the stability of soil aggregates, increases the content of soil organic carbon and active components, especially the organic carbon content in micro-aggregates, and enhances the soil carbon sequestration capacity.

Keywords: integrated rice-crayfish system; crayfish; water-stable aggregate; organic carbon distribution

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)俗称小龙虾,属节肢动物门、甲壳纲、十足目、螯虾科、原螯虾属,具有杂食、掘穴、蜕壳等习性^[1]。稻虾共作模式是一种以潜育性稻田为基础,以种稻为中心,稻草还田养殖克氏原螯虾为特点的复合生态系统。该模式充分利用了稻田的浅水环境和冬闲期,把种植业和养殖业有机结合起来,达到了“一水两用、一田双收”的目的,具有良好的经济效益和社会效益^[2]。稻虾共作模式已在湖北、安徽、湖南、江苏、江西等长江中下游区域被广泛应用,且以湖北省的面积最大,截至2021年湖北省稻虾种养面积约为50.6万 hm^2 ,占全国稻虾复合种养总面积的36.1%^[3]。

土壤团聚体能够反映土壤的持水性、通透性和供储养分的能力,不同粒级团聚体的数量、分布以及性质是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理退化过程的重要因素之一^[4-5]。土壤有机碳是促进土壤团聚体形成的良好胶结物质,表土中近90%的有机碳位于团聚体内^[6]。研究稻田复合种养模式对表层土壤团聚体特征(数量分布、稳定性)及有机碳分布的影响对揭示人为干扰对土壤质量及其固碳特性的影响具有重要意义。刘鸣达等^[7]的研究表明,稻田养蟹提高了土壤>2 mm和2~0.25 mm粒级团聚体的含量,降低了<0.25~0.053 mm和<0.053 mm粒级团聚体的含量。沈建凯^[8]的研究表明,稻田养鸭后土壤中1~2 mm团聚体增加了5.29%,1~0.25 mm团聚体增加了1.16%,而<0.25 mm团聚体减少了5.17%。

稻虾共作模式下秸秆还田后,一方面克氏原螯虾的残饵、排泄物及爬行觅食等会促进秸秆的快速腐解,另一方面秸秆泡水腐解过程中产生的植物碎屑及其产生的浮游动物是克氏原螯虾主要的食物来源之一。因此,稻虾共作模式下克氏原螯虾生物扰动对土壤团聚体特征及其有机碳分布势必产生较大影响。目前关于稻虾共作模式影响稻田土壤环境的研究主要集中于对稻田温室气体排放^[9-10]、氨挥发^[11]、土壤理

化性状及微生物多样性等方面^[12-15],而关于稻虾共作模式中单一因素诸如克氏原螯虾养殖对稻田土壤肥力影响方面的研究鲜见报道。因此,本文通过冬泡无秸秆还田、冬泡+秸秆还田和冬泡+秸秆还田+养虾3个处理研究了稻虾共作模式下在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾对稻田土壤团聚体分布、稳定性及团聚体有机碳含量等的影响,以期明确该模式下土壤肥力演变过程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区地处湖北省潜江市后湖农场移民村(30°22'41.2"N、112°41'32.5"E),属亚热带季风气候,年平均降雨量1 100 mm,年平均气温16.1℃,无霜期246 d,冬季静态地下水位40~60 cm,种植制度为“中稻-冬闲”,土壤类型为湖积物发育而成的潮土性水稻土。

1.2 试验设计

田间试验始于2014年10月,设置3个处理:①冬泡无秸秆还田(W);②冬泡+秸秆还田(WS);③冬泡+秸秆还田+养虾(WSC)。每个处理设置3次重复,每个小区面积100 m^2 ,为了防止串水、串虾,处理间设宽0.4 m、深1.0 m的沟,养虾处理四周设尼龙拦虾网。

在WSC处理中,供试虾为克氏原螯虾。幼虾(约5 g)于2014年10月按照9.0万只 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 的标准进行投放,虾苗在稻田中自行繁殖,以后每年根据实际情况适量补投亲虾;于每年的3—5月投放虾饲料,平均投入量为1 800 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,饲料中全氮、全磷和全钾的含量分别为46.6、11.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和10.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;于每年6月上旬捕捞成虾完毕,而未成熟的幼虾随水迁移至虾沟中,待整田、施肥、插秧、晒田控蘖及复水后再次进入稻田生活,在中稻收获前收获第2季成熟虾;于每年10月底中稻留高茬(40~50 cm)收获后,灌水冬泡(灌水深度50 cm左右)进行下一季克氏原螯虾养殖,如

此循环轮替^[11]。

于2020年6月29日进行整地施肥,6月30日水稻移栽,栽插的原则是宽行窄株、沟边密植,株距16.7 cm、行距26.6 cm,10月28日收割;N、P₂O₅、K₂O施用量分别为150、69、120 kg·hm⁻²,基肥、分蘖肥和穗肥中氮肥施用量占总施氮量的比例分别为58.0%、18.0%和24.0%,磷肥一次性作基肥施入,基肥和穗肥中钾肥施用量占总施钾量的比例分别为50%和50%。插秧前施入基肥,插秧后15 d施入分蘖肥,插秧后50 d施入穗肥。稻草还田方式为高留茬、田间覆盖,还田量为7 500 kg·hm⁻²,供试水稻品种为中稻“鉴真2号”。

1.3 土壤样品采集

取样时间为2020年10月,于水稻收获后每个小区按照S形五点采样法,采集0~10 cm表层土壤,将土壤样品均匀混合后装入硬质塑料盒转运至实验室。样品带回实验室去除石块、植物残体等杂物后,一部分于4℃保存,用于微生物量碳和可溶性有机碳的测定,另一部分自然风干后,用于土壤团聚体、总有机碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳的测定。

1.4 测定指标及方法

水稳性团聚体使用湿筛法测定^[16]。采用DM2000-Ⅲ型土壤团粒分析仪将土壤样品依次通过筛孔直径为2、1、0.5、0.25、0.053 mm的土壤筛,分离出>2、>1~2、>0.5~1、>0.25~0.5、0.053~0.25 mm和<0.053 mm 6个级别的水稳性团聚体。将分离后的土样在60℃下烘干后称取质量,研磨过100目筛后进行有机碳含量测定。团聚体中平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)的计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$GMD = \text{Exp} \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \times \ln \bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为某粒级团聚体的平均直径; w_i 为该粒级团聚体的质量; n 为筛子的数量。

$$\text{各粒级团聚体有机碳贡献率} = \frac{SOC_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n (SOC_i \times A_i)} \times 100\%$$

式中: SOC_i 为某粒级团聚体有机碳含量; A_i 为该粒级团聚体的质量所占比例; n 为筛子的数量。

采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定土壤总有

机碳含量^[17];采用氯仿熏蒸-硫酸钾提取法测定微生物量碳含量^[18];采用Jiang等^[19]的方法测定可溶性有机碳含量;采用Cambardella等^[20]的方法测定颗粒有机碳含量;采用KMnO₄氧化法测定易氧化有机碳含量^[21]。

1.5 数据处理与分析

采用Excel 2010软件处理数据,采用SPSS 22.0软件对数据进行差异显著性检验(LSD法, $\alpha=0.05$),并对数据进行绘图,采用Pearson相关性分析分析因子之间的关系。

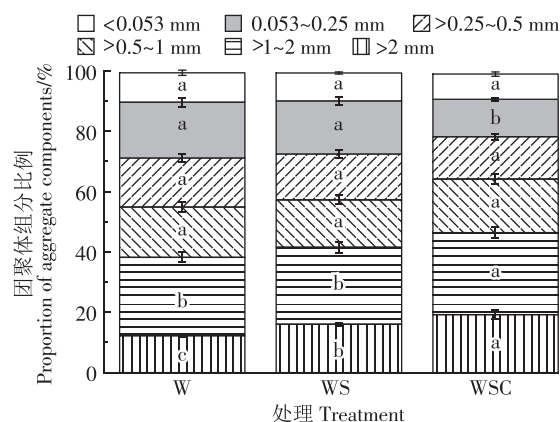
2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体分布特征

图1表明,各处理土壤以>1~2 mm团聚体为主,占比达到25.5%~27.1%。WS处理中>2 mm团聚体比例较W处理显著提高了31.0%,而其他粒级团聚体比例两处理间无显著差异;与WS处理相比,WSC处理中>2 mm和>1~2 mm团聚体比例显著提高了19.8%和6.5%,但0.053~0.25 mm团聚体比例显著下降了9.2%。由此可见,秸秆还田处理显著提高了稻田土壤中>2 mm团聚体比例,在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾增加了稻田土壤>1 mm团聚体比例,但降低了0.053~0.25 mm团聚体比例。

2.2 土壤水稳性团聚体稳定性特征

土壤团聚体的稳定性是评价土壤结构的主要指标,其稳定程度常用>0.25 mm的团聚体数量($R_{0.25}$)、MWD和GMD来表示。表1结果表明,WS处理的



不同字母代表相同粒级团聚体在不同处理间差异达到5%显著水平。下同。

Different letters indicate significant difference between treatments of the same aggregate size at the 5% level. The same below.

图1 不同处理下土壤水稳性团聚体分布

Figure 1 Soil water stable aggregates distribution in different treatments

*MWD*较*W*处理显著提高了18.9%,而 $R_{0.25}$ 和*GWD*两处理间则无显著差异;*WSC*处理土壤团聚体中 $R_{0.25}$ 、*MWD*和*GMD*较*WS*处理分别提高了7.8%、20.6%和37.5%。由此可见,秸秆还田处理主要提高了团聚体平均质量直径,而在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾则显著提高了土壤团聚体的稳定性。

表1 不同处理土壤水稳性团聚体稳定性指标
Table 1 Stability indexes of soil water-stable aggregates in different treatments

处理 Treatment	>0.25 mm的团聚体数量 $R_{0.25}$	平均质量直径 MWD	几何平均直径 GMD
W	71.16±4.24b	0.90±0.03c	0.58±0.03b
WS	72.49±3.97b	1.07±0.03b	0.56±0.05b
WSC	78.15±4.06a	1.29±0.03a	0.77±0.04a

注:同列不同字母表示不同处理间差异达5%显著水平。下同。
Note: Values followed by different letters in a column indicate significant difference between treatments at the 5% level. The same below.

2.3 土壤总有机碳及活性组分的变化特征

表2表明,WS处理的总有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳含量较W处理呈增加趋势,但均未达到显著水平($P>0.05$),而可溶性有机碳含量较W处理显著降低了27.8%。相比WS处理,WSC处理土壤总有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳含量分别显著提高了6.2%、34.0%和23.1%,而可溶性有机碳和易氧化有机碳含量虽呈增加趋势,但均未达到显著水平($P>0.05$)。由此可见,秸秆还田处理降低了土壤可溶性有机碳含量,而在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾提高了土壤总有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳含量。

2.4 土壤团聚体有机碳的变化特征

图2表明,随着土壤团聚体粒级的减小,团聚体有机碳含量呈逐渐降低的趋势。相较于W处理,WS处理中>2 mm团聚体有机碳含量显著提高了14.3%,而其他粒级团聚体有机碳含量两处理间差异不显著。WSC处理在0~10 cm土层中>0.25~0.5、0.053~0.25 mm和<0.053 mm团聚体有机碳含量较WS处理分别显著提高了18.8%、22.3%和22.3%。由此可知,秸秆还田处理提升了>2 mm团聚体有机碳含量,而秸秆还

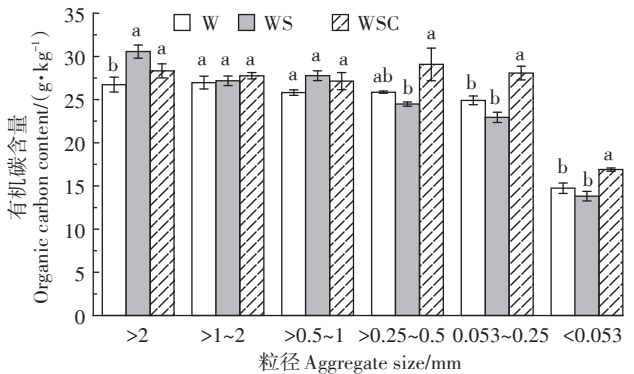


图2 不同处理土壤各粒级团聚体有机碳含量
Figure 2 Organic carbon content of soil aggregates in different treatments

田的基础上养殖克氏原螯虾提升了微团聚体(<0.25 mm)有机碳的含量。

2.5 土壤团聚体有机碳的贡献率

图3表明,不同粒级团聚体中的有机碳对原土有机碳固持贡献率以>2 mm和>1~2 mm团聚体为主,占比为41.2%~48.2%,以<0.053 mm团聚体的有机碳贡献率最小,占比为5.4%~6.1%。相较于W处理,WS处理显著提高了土壤中>2 mm团聚体有机碳贡献率,但显著降低了<0.053、0.053~0.25 mm和>0.25~0.5 mm团聚体有机碳贡献率。相较于WS处理,WSC处理显著降低了土壤中0.053~0.25 mm团聚体有机碳贡献率。由此可见,秸秆还田提高了土壤大团聚体(>2 mm)中有机碳贡献率,降低了微团聚体(<0.5 mm)中有机碳贡献率,而在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾显著降低了土壤中0.053~0.25 mm团聚体有机碳贡献率。

3 讨论

土壤团聚体作为土壤重要的组成部分,其不同粒级团聚体的数量、分布以及性质直接影响着土壤养分的保持与供应^[22]。本研究表明,秸秆还田处理显著提高了稻田土壤中>2 mm团聚体比例,表明秸秆还田有利于团聚体向更大粒级团聚体转化,这与Fan等^[23]的研究结果一致。这可能是因为:一方面秸秆进入土壤

表2 不同处理土壤有机碳及其活性组分含量
Table 2 Contents of soil organic carbon and its active components in different treatments

处理 Treatment	总有机碳 TOC/(g·kg ⁻¹)	微生物量碳 MBC/(mg·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)	颗粒有机碳 POC/(g·kg ⁻¹)	易氧化有机碳 EOC/(g·kg ⁻¹)
W	24.92±0.19b	369.34±32.28b	32.98±3.21a	8.20±0.01b	5.93±0.55a
WS	25.33±0.64b	380.60±5.18b	23.81±1.62b	8.77±0.21b	5.44±0.10a
WSC	26.96±0.35a	510.12±50.79a	26.30±2.42ab	10.80±0.19a	6.06±0.11a

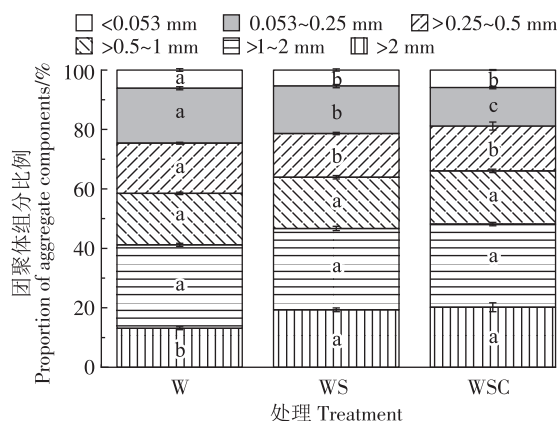


图3 不同处理下各粒级土壤团聚体对全土有机碳固持的贡献率

Figure 3 Contribution rates of organic carbon soil aggregates to bulk soil organic carbon in different treatments

后可直接成为大团聚体形成的核心,使土壤中的细小颗粒附着于秸秆而形成大团聚体;另一方面秸秆还田增加了土壤中有机物质的输入,提高了土壤微生物活性,有机物质经微生物降解产生的有机胶结物质以及菌丝等能够不断胶结土壤黏土颗粒,进而促进大团聚体的形成^[24]。本研究表明,在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾增加了土壤>1 mm团聚体比例,降低了0.053~0.25 mm团聚体比例。研究表明,克氏原螯虾即使在饲料充足的条件下,仍然会摄食有机碎屑、浮游动物、水生植物等^[25],克氏原螯虾食物来源中饲料和有机碎屑的贡献率分别为38.0%~44.2%和21.2%~23.4%^[26],由此可见,克氏原螯虾养殖过程中未食用的饵料以及蜕壳均可增加有机胶结物质,从而有利于微团聚体向大团聚的黏结转化。土壤MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 常被作为评价土壤团聚体稳定性、反映土壤团聚体大小分布的重要指标,土壤中MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 越大,其稳定性越高^[27]。本研究表明,相比于无秸秆还田处理,秸秆还田处理显著提高了土壤团聚体MWD,这与Halder等^[28]的研究结果一致。土壤团聚体稳定性很大程度上取决于有机、无机胶结物质对土粒胶结的能力,秸秆还田增加了有机质胶体含量,改善了颗粒组成,从而提高了团聚体的稳定性。本研究表明,在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾显著提高了土壤团聚体中 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD,这与刘鸣达等^[7]对稻蟹模式团聚体影响的研究结果相似。这主要是由于将秸秆还田后,克氏原螯虾对水稻秸秆的咀嚼、粉碎等加速了秸秆的分解,秸秆还田后分解产生的如木质素、蛋白质和多糖等多种物质增加了水稳性团聚体的稳定性。

土壤有机碳的积累取决于有机碳输入与矿化速率之间的平衡^[29]。本研究表明,相对于无秸秆还田处理,秸秆还田处理的土壤有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳含量均呈增加趋势,但两处理间未达到显著差异水平($P>0.05$),这可能与秸秆还田的时间较短(仅6 a)有关。本研究表明,相对于秸秆还田处理,秸秆还田+养殖克氏原螯虾处理土壤有机碳含量显著增加了6.2%,这可能是因为:一方面克氏原螯虾养殖中未被食用的饲料以及排泄出的粪便中富含的氮素等养分促进了水稻生长发育,提高了水稻产量,增加了水稻根系生物量及根系分泌物的分泌量;另一方面克氏原螯虾活动和秸秆添加均有利于土壤团聚体的形成,从而增强了土壤对有机质的保护、固定和维持能力。土壤微生物量碳是土壤有机碳库中最活跃的组分,易受土壤湿度、温度、管理措施以及易降解有机物的影响^[30]。在本研究中,秸秆还田+养殖克氏原螯虾处理土壤微生物量碳含量较秸秆还田处理显著提高了34.0%,这可能是由于克氏原螯虾掘穴、摄食及排泄等活动改变了土壤环境,促进了土壤微生物的生长和繁殖,从而提高了微生物量碳含量。颗粒有机碳是动植物残体向土壤腐殖质转化的过渡产物,腐殖化程度较低,且易矿化分解^[31]。本研究表明,秸秆还田+养殖克氏原螯虾处理中土壤颗粒有机碳含量较秸秆还田处理显著增加了23.1%,这可能是由于克氏原螯虾对秸秆、杂草等的粉碎、摄食等活动促进了植物凋落物的腐解,从而提高了土壤颗粒有机碳含量。可溶性有机碳是指能够溶于水且能通过0.45 μm 滤膜的有机碳组分,其在土壤中移动较快、易分解氧化,是微生物生命活动的主要能源^[32]。在本研究中,相对于无秸秆还田处理,秸秆还田处理和秸秆还田+养殖克氏原螯虾处理的土壤水溶性有机碳含量均呈下降趋势,且秸秆还田处理下降显著,这可能是因为:一方面秸秆采取覆盖还田+冬泡模式,秸秆腐解产生的水溶性有机碳随养殖废水排出大田;另一方面秸秆还田增加了土壤微生物对可溶性有机碳的利用,从而减少了土壤中可溶性有机碳含量。

团聚体中有机碳的分布特征是土壤重要的理化性质^[33]。Buyanovsky等^[34]的研究表明大团聚体中有机碳生物可利用性较高,而微团聚体中有机碳稳定性较高,更新周期较长。本研究中,秸秆还田处理显著提高了>2 mm团聚体有机碳含量,这与王飞等^[5]的研究结果一致。水稻土中新输入而易矿化分解的动植物残体主要存在于大团聚体中而受物理保护,从而增加

了大团聚体有机碳含量。本研究表明,秸秆还田+养殖克氏原螯虾处理较秸秆还田处理显著提高了 <0.25 mm团聚体中有机碳的含量,由此可见,养殖克氏原螯虾有利于土壤微团聚体中有机碳稳定性的提高。水稻土中微团聚体主要以多糖或无机胶体胶结方式形成^[35]。稻虾共作模式中投入的幼虾经过6次蜕壳至成虾,累积的蜕壳量可达 $201.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[36],蜕壳中富含的50.5%的甲壳素及其降解物——壳聚糖可能会优先胶结微团聚体,从而提高 <0.25 mm团聚体中有机碳含量^[37-38]。团聚体对土壤有机碳的贡献率大小主要受其团聚体比例及有机碳含量的影响^[39]。本研究表明,秸秆还田增加了土壤 >2 mm团聚体中有机碳贡献率,降低了小团聚体(<0.5 mm)中有机碳贡献率,这主要是由于秸秆还田显著提高了 >2 mm团聚体比例及团聚体有机碳含量,而降低了小团聚体(<0.5 mm)中有机碳含量。本研究表明,秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾显著降低了土壤中 $0.053\sim 0.25$ mm团聚体有机碳贡献率,这主要是由于秸秆还田虽然提高了 $0.053\sim 0.25$ mm团聚体有机碳含量,但降低了 $0.053\sim 0.25$ mm团聚体比例。

4 结论

冬泡条件下在秸秆还田的基础上养殖克氏原螯虾显著提高了土壤 >1 mm团聚体比例,降低了 $0.053\sim 0.25$ mm团聚体比例,增强了土壤团聚体的稳定性,显著提高了土壤总有机碳、颗粒有机碳和微生物量碳含量,尤其提高了 <0.25 mm团聚体中有机碳的含量。研究表明,稻虾共作模式下克氏原螯虾促进了土壤大团聚体的形成,增强了土壤团聚体稳定性,提高了土壤有机碳及活性组分含量,尤其提高了微团聚体中有机碳含量,提升了土壤固碳能力。

参考文献:

- [1] 郑生顺. 克氏螯虾生活习性观察[J]. 水产养殖, 1999(4): 9-10. ZHENG S S. Observation on the living habits of crayfish[J]. *Journal of Aquaculture*, 1999(4): 9-10.
- [2] 曹湊贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1245-1253. CAO C G, JIANG Y, WANG J P, et al. “Dual character” of rice-crayfish culture and strategy for its sustainable development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1245-1253.
- [3] 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. “十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告[J]. 中国水产, 2022(1): 43-52. National Fisheries Technology Extension Station, Chinese Fisheries Society. Report on the development of China's rice and fishery integrated planting and breeding industry during the 13th Five-Year Plan Period[J]. *China Fisheries*, 2022(1): 43-52.
- [4] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3257-3266. LI X Y, LI B, MO T X, et al. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus, and potassium in paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3257-3266.
- [5] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 不同施肥处理对黄泥田团聚体有机碳固持及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 315-324. WANG F, LI Q H, HE C M, et al. Long-term fertilization effects on soil aggregates organic carbon sequestration and distribution in a yellow-mud paddy soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 315-324.
- [6] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [7] 刘鸣达, 郝旭东, 安辉, 等. 不同稻蟹模式对土壤团聚体腐殖质特征的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3): 306-310. LIU M D, HAO X D, AN H, et al. Effects of different rice-cray production modes on soil humus characteristics in different aggregates[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(3): 306-310.
- [8] 沈建凯. 稻田养鸭对土壤及杂草生物多样性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010: 7-16. SHEN J K. Effects of rice-duck eco-farming on soil and biodiversity of weed in paddy fields[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010: 7-16.
- [9] 徐祥玉, 张敏敏, 彭成林, 等. 稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1591-1603. XU X Y, ZHANG M M, PENG C L, et al. Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1591-1603.
- [10] SUN Z, GUO Y, LI C, et al. Effects of straw returning and feeding on greenhouse gas emissions from integrated rice-crayfish farming in Jiangnan Plain, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(12): 11710-11718.
- [11] 侣国涵, 彭成林, 袁家富, 等. 稻虾共作模式下秸秆还田对稻田氨挥发的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 360-368. SI G H, PENG C L, YUAN J F, et al. Effect of rice straw returning to field on ammonia volatilization in paddy fields under the integrated rice-crayfish system[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 360-368.
- [12] 蔡晨, 李谷, 朱建强, 等. 稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 217-226. CAI C, LI G, ZHU J Q, et al. Effects of rice-crawfish rotation on soil physicochemical properties in Jiangnan Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 217-226.
- [13] SI G, PENG C, YUAN J, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2856.
- [14] 侣国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 61-68. SI G H, PENG C L, XU X Y, et al. Effect of integrated rice-crayfish farming system on soil physico-chemical properties in waterlogged paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 61-68.
- [15] 朱秀秀, 彭成林, 侣国涵, 等. 稻虾共作模式对稻田土壤细菌群落结构与多样性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1121-1128. ZHU X X, PENG C L, SI G H, et al. Effect of rice-crayfish integrated system

- on soil bacterial community structure and diversity in paddy field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5):1121–1128.
- [16] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627–633.
- [17] 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, 2000: 146–190. LU R K. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146–190.
- [18] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction: an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8):1167–1169.
- [19] JIANG P K, XU Q F, XU Z H, et al. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(1):30–36.
- [20] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3):777–783.
- [21] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155:399–402.
- [22] TOTSCHKE K U, AMELUNG W, GERZABEK M H, et al. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181:104–136.
- [23] FAN W, WU J, AHMED S, et al. Short-term effects of different straw returning methods on the soil physicochemical properties and quality index in dryland farming in NE China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7):2631.
- [24] LIU S, YAN C G, HE W Q, et al. Effects of different tillage practices on soil water-stable aggregation and organic carbon distribution in dryland farming in northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4):65–69.
- [25] 周晖, 汤保贵, 龚汉夫, 等. 克氏原螯虾食性、形态学参数、质量参数和出肉率的相关性分析[J]. 动物营养学报, 2023, 35(4):2455–2464. ZHOU H, TANG B G, GONG H F, et al. Correlation analysis for feeding habits, morphological parameters, weight parameters and abdomen meat percentage of *Procambarus clarkii*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(4):2455–2464.
- [26] 李聪, 成永旭, 管勤壮, 等. 用稳定性同位素技术分析稻-虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(11):1778–1786. LI C, CHENG Y X, GUAN Q Z, et al. Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(11):1778–1786.
- [27] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5):1833–1840. AN W L, GAO D Z, PAN T, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1833–1840.
- [28] HALDER M, AHMAD S J, RAHMAN T. Effects of straw incorporation and straw-burning on aggregate stability and soil organic carbon in a clay soil of Bangladesh[J]. *Geoderma Regional*, 2023, 32:e00620.
- [29] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2):317–331. ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2):317–331.
- [30] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报, 2015, 35(23):7625–7633. XIAO Y, HUANG Z G, WU H T, et al. Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7625–7633.
- [31] DIJKATRA F A, ZHU B, CHENG W. Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword[J]. *New Phytologist*, 2021, 230(1):60–65.
- [32] 朱宣霖, 朱长伟, 陈琛, 等. 轮耕对豫北潮土速效养分及可溶性有机碳结构特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4):683–693. ZHU X L, ZHU C W, CHEN C, et al. Effects of rotation tillage on available nutrients and structural characteristics of dissolved organic carbon of Fluvo-aquic soil in northern Henan Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4):683–693.
- [33] 张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳分布及其固持特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1):71–78. ZHANG Q, YU E J, LIN H B, et al. Distribution and sequestration of aggregate organic carbon affected by continuous different kind of green manure cultivation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1):71–78.
- [34] BUYANOVSKY G A, ASLAM M, WAGNER G H. Carbon turnover in soil physical fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4):1167–1173.
- [35] 潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 等. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8):940–951. PAN G X, LU H F, LI L Q, et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: a new emerging frontier for sustainable soil management[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8):940–951.
- [36] 倡国涵, 袁家富, 彭成林, 等. 稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9):1309–1318. SI G H, YUAN J F, PENG C L, et al. Nitrogen and phosphorus cycling characteristics and balance of the integrated rice-crayfish system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9):1309–1318.
- [37] MUSGROVE R J B, GEDDES M C. Tissue accumulation and the moult cycle in juveniles of the Australian freshwater crayfish *Cherax destructor*[J]. *Freshwater Biology*, 1995, 34(3):541–558.
- [38] 胡祥, 王瑞霞, 奥岩松. 壳聚糖对土壤理化性状的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(1):68–72. HU X, WANG R X, AO Y S. Effects of chitosan in soil physical and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):68–72.
- [39] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20):4007–4015. LI W J, YANG J F, PENG B F, et al. Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20):4007–4015.

(责任编辑:李丹)