

文章编号: 1674-5566(2025)03-0541-09

DOI: 10.12024/jsou.20240604584

稻虾种养对土壤有机碳组成和酶活性的影响

彭亮^{1,2}, 郝柳柳², 代梨梨², 陶玲², 张辉², 李谷², 朱建强¹

(1. 长江大学 农学院, 湖北 荆州 432025; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223)

摘要: 为探究稻虾种养对土壤有机碳稳定性和酶活性的影响, 于2021和2022年以“深两优3117”水稻(*Oryza sativa*)和克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)为材料, 开展了稻虾轮作模式与水稻单作模式的对比试验, 分析了土壤有机碳组成、活性有机碳组分和碳氮磷转化相关酶活性。结果显示, 相较于水稻单作模式, 试验期间稻虾种养模式土壤LOC I含量提高25.86%~39.13%, 土壤MBC含量提高96.54%~105.73%, 土壤POC含量提高92.24%~132.32% ($P<0.05$)。土壤 β -XYS活性降低29.35%~59.74%, ACP活性降低41.64%~59.12% ($P<0.05$), 而NAG活性较水稻单作模式升高29.04%~98.86% ($P<0.05$)。Pearson分析显示, 土壤LOC I、ROC、MBC和POC与pH、TN和TOC呈显著正相关 ($P<0.05$), DOC和C/N与pH和TN呈负相关 ($P<0.05$)。稻虾种养模式通过增加土壤pH和TN含量, 降低 β -XYS和ACP活性, 提高土壤NAG活性, 增加了土壤活性有机碳组分含量。

关键词: 稻虾种养; 土壤; 有机碳; 组成; 酶活性

中图分类号: S 153; S 964.2 **文献标志码:** A

有机碳是土壤中的主要成分之一, 对农业生产和环境保护具有重要意义。农田土壤有机碳不仅能够改善农田土壤质量、保持水土和提高农产品质量和品质, 而且能够吸收大气中的二氧化碳, 是一种重要的碳汇^[1]。如今, 越来越多研究认为, 土壤有机碳稳定性取决于土壤中有机碳的生化难分解性、矿物保护和团聚体保护3个方面^[2]。根据有机碳对生化反应的顽固性, 土壤有机碳可以分为不稳定和顽固性碳组分。在土壤有机碳组分中, 不稳定的碳组分很容易被土壤微生物矿化。因此, 其对土地利用的变化很敏感, 相反, 顽固性碳组分则不易被微生物分解, 它们决定了土壤中有机碳的积累和稳定性^[3]。土壤有机碳的变化主要是由不稳定有机碳组分动态驱动的^[4]。因此, 研究土壤有机碳组分变化对预测土壤有机碳动态和明晰土壤有机碳稳定性具有重要意义。

稻虾种养是一种典型的生态循环农业模式, 具有高效的土地利用率和农业生产效率^[5]。已有研究表明, 稻虾种养能够显著提高耕层土壤的总

有机碳含量, 且其含量随着种养年限延长逐渐增加^[6-8]。在6~15年内, 稻虾种养土壤有机碳含量比水稻单作高出约1.2倍^[6], 颗粒有机碳和水溶性有机碳含量也更高^[9]; 稻虾种养有利于形成大于2 mm水稳性大团聚体, 且其含量随着年限延长逐渐增加, 小于0.25 mm的水稳性小团聚体含量却明显低于水稻单作^[10]。可见, 稻虾种养在增加土壤有机碳团聚体保护方面具有明显优势, 有利于土壤团聚体稳定性。然而, 尚未见稻虾种养对土壤有机碳生化难分解性的影响研究, 对土壤有机碳稳定性组分的影响尚不明确。研究稻虾种养对土壤有机碳稳定性组分的影响, 有助于明确稻虾种养在固碳减排方面的潜力, 对农田土壤固碳的可持续性具有重要意义。

本研究连续两年在稻虾种养水稻生长期进行了试验, 通过化学分析方法测定了土壤有机碳组分含量和土壤酶活性, 并利用相关性分析方法分析了有机碳组分含量和理化条件之间的相关性。旨在探讨稻虾种养对土壤有机碳组分构成

收稿日期: 2024-06-23 修回日期: 2024-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(U20A2010); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-45-22)

作者简介: 彭亮(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为渔业生态养殖模式环境效应。E-mail: pengliang@yfi.ac.cn

通信作者: 朱建强, E-mail: 200572@yangtzeu.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

及其酶活性的影响,并为评价稻虾种养的生态环境效应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在湖北省荆州市三湖国营农场进行,该地位于江汉平原腹地,是典型的稻虾种养模式分布区。试验地属于典型的北亚热带季风气候,年平均气温 16 °C,年均降水量 1 100 mm。该区域于 2017 年开始稻田养虾,试验田土壤类型为水稻土,土壤基本理化性状:pH 6.9,总氮 2.44 g/kg,有机质 28.59 g/kg^[11]。

1.2 实验设计

供试水稻品种为“深两优 3117”(Oryza sativa),供试虾为克氏原螯虾(Procambarus clarkii),俗称小龙虾。试验设置水稻单作模式(RM)和稻虾(克氏原螯虾)种养模式(RC)2 个处理,每个处理设置 3 个重复田块。其中,水稻单作模式面积为 0.25 hm²,种植方式为一季中稻,冬季秸秆粉碎还田模式;稻虾综合种养模式面积为 2.5 hm²,每年 3—5 月为小龙虾养殖期,其间每块稻田虾苗投放量为 375 kg/hm²,饲料投放量为 1 875 kg/hm²,6 月底前完成捕捞,然后进行排水、整地、插秧。水稻种植株行距为 16 cm×30 cm,种植前按尿素 150 kg/hm²,磷酸二铵 225 kg/hm²施底肥,于返青期和分蘖期各追肥 1 次,追肥量为 75 kg/hm²。所有化肥均产自湖北宜化化工股份有限公司。水稻收割后灌水淹田,稻草全量还田,留茬高度 30 cm。除小龙虾养殖外,稻虾种养模式与水稻单作模式的稻田管理方式基本相同。

1.3 样品采集

2021 年和 2022 年于水稻生长期(7 月:分蘖期,9 月:抽穗期和 10 月:成熟期)采集稻田耕层土壤(0~20 cm),采用 5 点取样法在每块稻田采集土壤后混为 1 个样品。样品采回后,剔除肉眼可见的动植物残体和石块等杂质,放置在通风阴凉处进行风干。

1.4 指标测定

土壤基本理化性质如 pH、有机碳(TOC)和总氮(TN)采用《土壤农化分析》中的方法进行测定。易降解有机碳 I(Labile organic carbon I, LOC I)、易降解有机碳 II(Labile organic

carbon II, LOC II)和难降解有机碳(Recalcitrant organic carbon, ROC)按照 ROVIRA 等^[12]的方法逐级提取后测定。即风干的土壤样品经 2 目的筛网后,取 0.5 g,使用 2.5 mol/L H₂SO₄,在 105 °C 下水解 30 min,测定上清液中的有机碳含量,即 LOC I 含量;将烘干的残留物加入 13 mol/L H₂SO₄振荡过夜后,用去离子水将酸稀释到 1 mol/L,再在 105 °C 下水解 3 h,测定上清液中的有机碳含量,即 LOC II 含量;剩余的残留物烘干后,测定其总有机碳含量,即 ROC 含量。总有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定,微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法测定,溶解性有机碳(DOC)采用 1:2.5 的水土比提取测定,颗粒有机碳(POC)采用六偏磷酸钠溶液提取测定。

测定了土壤β-木糖苷酶(β-xylanase, β-XYS)、β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase, β-GC)、乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-1, 4-N-acetylglucosaminidase, NAG)、亮氨酸氨基肽酶(Leucine aminopeptidase, LAP)和酸性磷酸酶(Acid phosphatase, ACP)。β-XYS 活性和 β-GC 活性均以每克风干土样每天生成 1 μmol 对-硝基苯酚定义为 1 个酶活单位;NAG 活性和 LAP 活性以每克风干土样每天生成 1 nmol 对-硝基苯酚定义为 1 个酶活单位;ACP 活性以每克风干土样每天生成 1 μmol 酚定义为 1 个酶活单位。

1.5 数据处理与分析

采用 *t* 检验比较两种模式下各指标的差异,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同生长期之间的差异,采用 Pearson 相关性分析有机碳组分与酶活性的关系。统计分析采用 R 4.3.1 及“rstatix”和“stats”包,作图采用 Origin 2019 Pro。显著性水平设置为 *P*<0.05。

2 结果与分析

2.1 不同稻作模式土壤理化性质及有机碳组分

不同稻作模式土壤理化性质如表 1 所示。2021 年和 2022 年,相较于水稻单作,稻虾种养土壤 pH 提高 9.30%~13.60% (*P*<0.05),TN 含量提高 65.47%~104.21% (*P*<0.05),TOC 含量提高 24.16%~45.43% (*P*<0.05),而土壤 C/N 下降 25.55%~30.00% (*P*<0.05)。

表 1 不同稻作模式土壤理化性质
Tab. 1 Soil physiochemical properties under different rice cultivation model

年份 Year	指标 Parameter	稻虾种养 RC	水稻单作 RM	P
2021	pH	7.77±0.06	6.84±0.29	<0.001
	TN/(g/kg)	3.88±0.24	1.90±0.70	<0.001
	TOC/(g/kg)	47.12±10.68	32.40±13.70	0.014
	CN	12.11±2.44	17.30±5.23	0.014
2022	pH	7.76±0.17	7.10±0.12	<0.001
	TN/(g/kg)	3.69±0.26	2.23±0.65	<0.001
	TOC/(g/kg)	56.23±7.14	45.29±13.1	0.043
	CN	15.24±1.59	20.47±2.58	0.001

对不同稻作模式土壤碳组分特征进行了分析(表2)。相较于水稻单作,稻虾种养土壤 LOC I 含量提高 25.86%~39.13% ($P<0.05$),MBC 含量提高 96.54%~105.73% ($P<0.05$),POC 含量提高 92.24%~132.32% ($P<0.05$)。

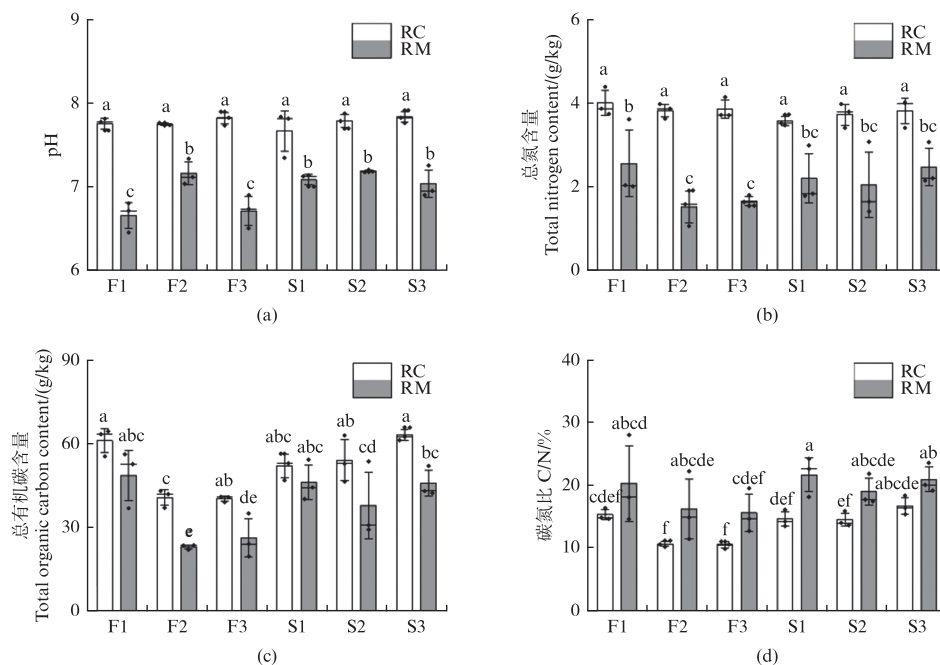
2.2 土壤理化性质及有机碳组分随水稻生长期的变化

在水稻生长的 3 个不同时期,稻田土壤理化性质如图 1 所示。研究期间,稻虾种养田面土壤 pH 比水稻单作升高 8.20%~16.48% ($P<0.05$),且稻虾种养土壤 pH 在生长期无内无明显变化,而水稻单作土壤 pH 呈现出先升高后降

低的趋势。相较于水稻单作,稻虾种养土壤 TN 含量升高 56.83%~152.51% ($P<0.05$),且稻虾种养土壤 TN 含量在生长期无内无明显变化,而稻虾种养土壤 TN 呈现逐渐降低的趋势。稻虾种养土壤 TOC 含量相较于水稻单作升高 25.76%~77.49% ($P<0.05$),且二者均随时间推移呈现出下降趋势。此外,稻虾种养土壤平均 C/N 低于水稻单作,但在生长期无内二者差异并不显著。

表 2 不同稻作模式土壤碳组分特征
Tab. 2 Characteristics of soil carbon fractions under different rice cultivation model

年份 Year	指标 Parameter	稻虾种养 RC	水稻单作 RM	P
2021	LOC I/(g/kg)	9.92±1.07	7.13±1.60	0.003
	LOC II/(g/kg)	9.08±1.08	7.79±2.43	0.340
	ROC/(g/kg)	28.12±10.69	17.48±12.09	0.050
	MBC/(mg/kg)	151.2±65.34	76.93±22.52	0.012
	DOC/(mg/kg)	101.72±58.72	187.77±106.21	0.063
	POC/(g/kg)	9.20±2.10	3.96±1.57	0
2022	LOC I/(g/kg)	9.15±0.78	7.27±2.32	0.047
	LOC II/(g/kg)	7.68±2.24	7.94±2.27	0.806
	ROC/(g/kg)	39.40±5.92	30.08±10.38	0.033
	MBC/(mg/kg)	198.65±109.53	96.56±30.79	0.013
	DOC/(mg/kg)	32.13±11.04	48.13±7.64	0.003
	POC/(g/kg)	6.94±1.46	3.61±1.24	<0.001



F1、F2、F3. 2021 年分蘖期、2021 年抽穗期、2021 年成熟期;S1、S2、S3. 2022 年分蘖期、2022 年抽穗期、2022 年成熟期。
F1、F2、F3. Tillering stage, Heading stage, Maturity stage in 2021; S1、S2、S3. Tillering stage, Heading stage, Maturity stage in 2022.

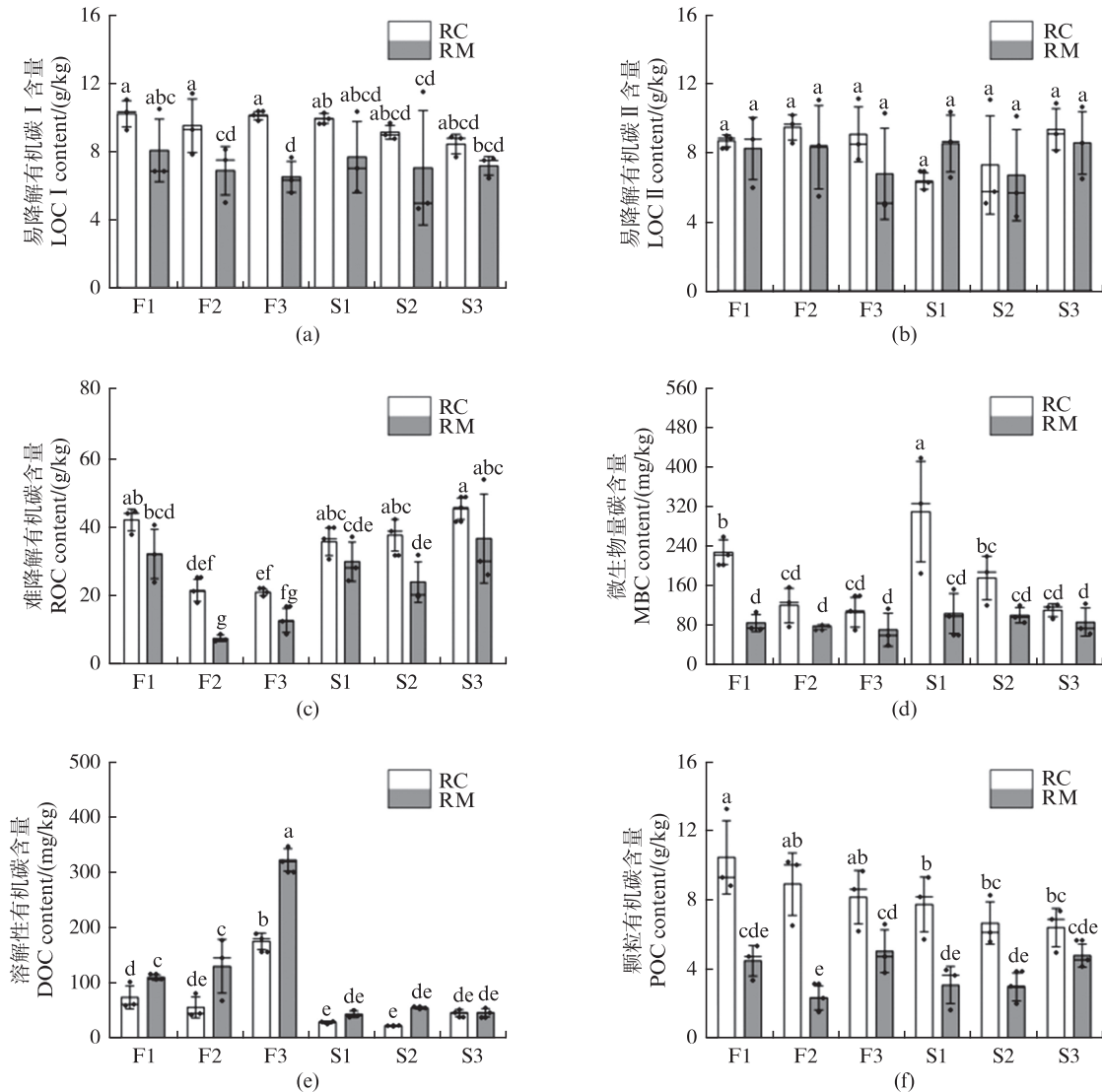
图 1 不同生长期土壤理化性质

Fig. 1 Soil physiochemical properties at different cultivation stages

不同稻作模式下,土壤活性有机碳含量变化如图2所示。不同生长期,稻虾种养土壤LOC I含量较水稻单作升高26.73%~55.04%,且在抽穗期和成熟期差异显著($P<0.05$)。稻虾种养土壤LOC II含量与水稻单作无显著差异,而稻虾种养土壤ROC较水稻单作模式升高64.18%~182.19% ($P<0.05$),且随着生长期推移,两种模式下ROC

含量下降($P<0.05$)。

稻虾种养土壤MBC含量在分蘖期高于水稻单作($P<0.05$),而在抽穗期和成熟期并无显著差异。稻虾种养土壤DOC含量在抽穗期和成熟期高于水稻单作($P<0.05$),且随着生长期推移,DOC含量逐渐升高。相较于水稻单作,稻虾种养土壤POC含量升高61.98%~282.24% ($P<0.05$)。



F1、F2、F3. 2021年分蘖期、2021年抽穗期、2021年成熟期;S1、S2、S3. 2022年分蘖期、2022年抽穗期、2022年成熟期。

F1、F2、F3. Tillering stage, Heading stage, Maturity stage in 2021; S1、S2、S3. Tillering stage, Heading stage, Maturity stage in 2022.

图2 不同稻作模式下土壤有机碳组分含量

Fig. 2 Content of soil organic carbon fractions under different rice cultivation model

2.2 稻虾种养对土壤酶活性的影响

不同处理土壤酶活性的分析结果如表3所示。相较于水稻单作,2021年和2022年试验期间稻虾种养土壤 β -XYS和ACP活性降低

29.35%~59.74%和41.64%~59.12% ($P<0.05$),而NAG活性升高29.04%~98.86% ($P>0.05$)。稻虾种养土壤 β -GC平均活性低于水稻单作,且在2022年达到显著性水平($P<0.05$)。

表 3 不同稻作模式土壤酶活性
Fig. 3 Soil enzyme activity under different rice cultivation model

年份 Year	酶种类 Enzyme	稻虾种养 RC	水稻单作 RM	P
2021	β-XYS/[μmol/(24h·g)]	1.98±0.42	2.81±0.49	0.001
	β-GC/[μmol/(24h·g)]	4.20±1.78	5.07±2.50	0.407
	NAG/[nmol/(24h·g)]	13.88±5.99	6.96±4.50	0.014
	LAP/[nmol/(24h·g)]	3.65±0.63	3.43±0.48	0.436
	ACP/[μmol/(24h·g)]	8.24±1.65	14.12±2.59	0
2022	β-XYS/[μmol/(24h·g)]	1.35±0.42	3.35±1.22	0
	β-GC/[μmol/(24h·g)]	3.18±1.00	6.78±1.52	0
	NAG/[nmol/(24h·g)]	36.36±3.89	28.18±7.98	0.014
	LAP/[nmol/(24h·g)]	3.59±1.09	3.64±0.57	0.906
	ACP/[μmol/(24h·g)]	7.06±1.38	17.27±2.31	0

2.3 土壤有机碳组分与环境因子的关系

对土壤有机碳组分与环境因子进行 Pearson 相关性分析(图 3),结果显示,稻田土壤 LOC I 含量与土壤 pH、TN、TOC、ROC 和 POC 呈正相关关系($P<0.05$),却与 C/N 和 DOC 含量呈负相关关系($P<0.05$)。ROC 含量与 TN、TOC、LOC I 和 POC 呈正相关关系($P<0.05$),MBC 含量与 pH、TN、TOC、ROC 和 POC 呈正相关关系($P<0.05$),而 DOC 含量则与 pH、TN、TOC、LOC I 均呈负相关关系($P<0.05$)。POC 含量与 pH、TN、TOC、

LOC I、ROC 和 MBC 呈正相关关系($P<0.05$)。此外,土壤 C/N 与 pH、TN 和 LOC I 含量呈负相关关系($P<0.05$)。

土壤 β-XYS 与 TOC 和 ROC 呈正相关关系($P<0.05$),β-GC 与 DOC 呈正相关关系($P<0.05$)。NAG 与 TN、LOC I 和 POC 呈正相关关系($P<0.05$),而与 C/N 呈负相关关系($P<0.05$)。ACP 与 C/N、DOC 呈正相关关系($P<0.05$),而与 pH、TN、LOC I、LOC II 和 POC 呈负相关关系($P<0.05$)。

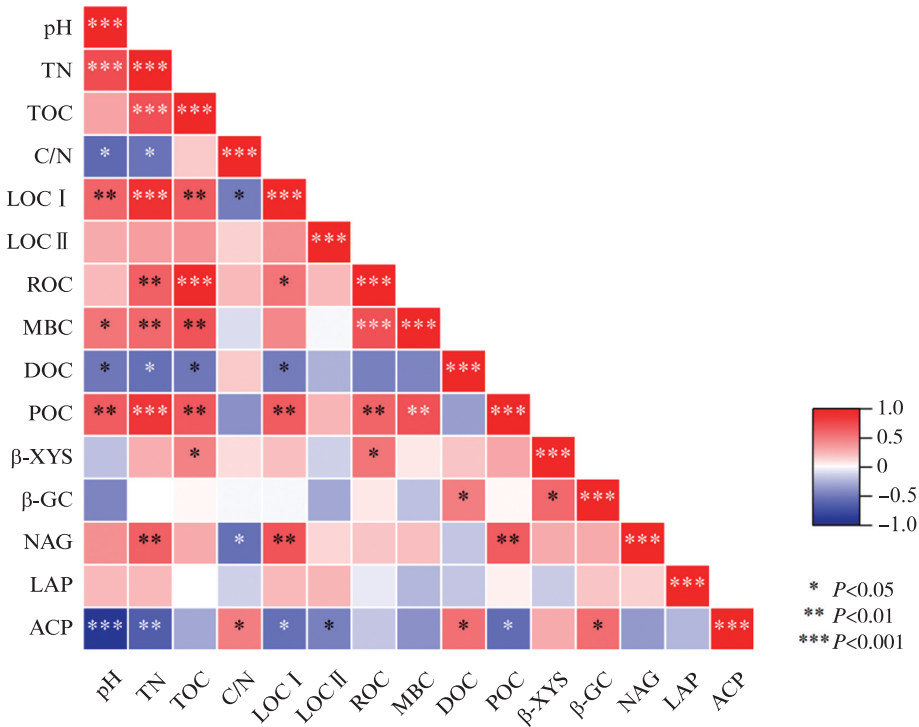


图 3 土壤有机碳组分与环境因子的关系
Fig. 3 Correlation analysis of soil organic carbon fractions and environmental factors

3 讨论

3.1 稻虾种养对土壤有机碳组分的影响

稻虾种养是一种经济高效的生态种养模式,在涝渍地、低洼地推行广泛,具有一地两用、一田双收的优势。研究稻虾种养对土壤理化性质及其生物性状的影响是稻虾种养模式推广和应用的保障。

本研究结果显示,稻虾种养提高了土壤 pH,这与蔡晨等^[13]研究结果一致。这可能与养殖期使用生石灰调节水质有关,研究发现长期施用氮肥可能导致土壤酸化^[14],而稻虾种养在春季养虾过程中,经常使用生石灰调节水质,可能起到中和土壤酸性的作用^[15]。稻虾种养提高了土壤 TN 含量,这可能与稻虾种养中额外输入的外源物质(饲料等)有关。有研究表明,1 个种养周期内,稻虾种养投入饲料的氮含量(295.07 kg/hm²)是水稻单作氮肥投入氮(140.10 kg/hm²)的两倍以上^[16]。稻虾种养模式增加了土壤 TOC 含量,这与大多数研究结果^[7-8]一致。然而,本研究发现,稻虾种养显著降低了稻田土壤的 C/N,与之前的研究结果^[9]不一致。这可能是因为之前的研究多在水稻收获后采集土壤样品,此阶段的土壤样本受水稻种植的影响较大,而本研究在水稻种植期间连续测定土壤 C/N,结果显示稻虾种养分蘖期和抽穗期土壤 C/N 显著低于水稻单作。这可能与养殖期土壤外源输入有关,养殖期低 C/N 饲料和水草的投入可能会降低土壤的 C/N。

稻虾种养土壤 LOC I 和 ROC 含量高于水稻单作土壤,而 LOC II 含量与水稻单作并无显著差异,这与 SI 等^[8]研究一致。LOC I 代表的是非纤维素多糖等易分解的有机碳组分,ROC 代表的是木质素、脂肪和叶蜡等有机碳组分。稻虾种养通过投饵、秸秆还田、养殖动物排泄等增加了表层土壤的易分解有机碳组分含量和难分解有机碳组分含量^[7,16]。ROC 随着生长期推移有降低趋势,这可能是因为水稻生长过程中根系活动增强,其分泌的有机酸、酚类化合物等增加,加速了 ROC 的分解。其中,2022 年并未出现明显下降趋势,这可能是因为 2022 年研究期间降雨多,稻田土壤含水率较高,高含水量可能抑制了水稻根系活动和微生物活性。

土壤 MBC 是反映土壤有机碳变化和土壤质

量是否敏感的指标。本研究发现,在分蘖期稻虾种养土壤 MBC 含量高于水稻单作,这与 WANG 等^[17]对微生物坏死物的研究结果一致。而在抽穗期和成熟期 MBC 含量在稻虾和水稻单作之间并无显著性差异,SI 等^[8]在水稻收获后也未发现显著差异。在多个时间,水稻单作土壤 DOC 含量均高于稻虾种养土壤,这与曹湊贵等^[18]研究结果一致,一方面这可能与稻虾种养模式灌水淹田引起 DOC 随水流失有关^[19],另一方面稻虾种养模式下土壤较高的 MBC,也可能引起土壤 DOC 含量的降低。POC 由未完全分解的有机物残体组成。研究期间,稻虾种养模式土壤 POC 含量在不同时期均高于水稻单作模式,这可能意味着稻虾种养模式积累了更多的 POC。研究指出,秸秆还田、小龙虾对植物凋落物的粉碎、摄食等行为都会增加土壤 POC 含量^[20-21]。

3.2 稻虾种养对稻田土壤酶活性的影响

土壤酶活性的高低反映着土壤对有机物质转化能力的强弱。 β -XYS 反映了土壤对植物残体中木糖苷类化合物的分解能力,ACP 则反映了土壤中有有机磷的分解转化活性。可以认为,试验期间稻虾种养模式土壤 C、P 循环相关的酶活性较低。这与 ZHANG 等^[22]对土壤细菌的潜在功能预测结果一致,其发现长期稻虾种养显著降低了碳水化合物代谢相关微生物的相对丰度。LI 等^[23]发现,连续的稻虾种养降低了稻田有效磷和总有机磷含量,这可能与 ACP 含量的降低有关。土壤 NAG 与几丁质的分解有关^[24]。土壤 NAG 活性增加,可能是因为克氏原螯虾的蜕壳生长为土壤带来了大量含几丁质的碳源底物,诱导了土壤中具有几丁质酶基因的真菌增殖^[25]。

3.3 土壤有机碳组分与环境因子的关系

土壤有机碳对土壤结构和功能有着重要影响,有机碳转化与环境因子的变化密切相关。pH 被认为是影响土壤有机碳转化的重要环境因素之一,土壤 pH 会影响土壤中有机碳的化学稳定性和微生物活性,改变有机碳组分含量^[26]。TN 含量与 LOC I、ROC、MBC 和 POC 均呈正相关关系,这可能是因为稻虾种养模式促进了土壤氮的累积^[27],而这一部分氮累积主要来源于外源的饲料和秸秆^[16],高 C/N 的外源有机物一方面改变了表层土壤 C/N,另一方面也为微生物可利用碳源提供了合适的条件,促进了土壤微生物大量增

殖。本研究中土壤 C/N 的变化也说明了这一点。值得注意的是,土壤 TOC 含量与 LOC I、ROC 和 POC 含量呈正相关,且 POC 又与 LOC I 和 ROC 呈正相关,这可能反映出稻虾种养模式 TOC 的增加主要来源于土壤 POC。

土壤有机碳的转化受酶活性影响较大。本研究发现,土壤 TOC 和 ROC 含量与 β -XYS 活性呈正相关关系,这可能是因为 β -XYS 能够将木聚糖分解为木糖和其他单糖,有助于土壤有机碳的形成。土壤 DOC 含量与 β -GC 活性呈负相关关系,这与之前的研究结果不一致^[28]。这可能是因为稻虾种养模式的淹水条件会诱导水稻分泌 β -GC^[29],但淹水又容易导致 DOC 的流失。NAG 是一种几丁质分解酶,可能由真菌诱导产生^[25]。已有研究^[30]证实,NAG 与土壤中可利用氮和有机碳的含量密切相关,其与土壤 C/N 负相关关系也反映出土壤微生物活性随 C/N 降低而增加。ACP 是一种在酸性条件下活性最高的酶,本研究结果也发现其活性与 pH 呈负相关关系,同时,其活性与 DOC 含量呈正相关关系,而与 LOC I、LOC II 和 POC 含量呈负相关关系,这可能是因为这些有机碳组分的分解可能会产生 ACP 和增加 DOC 的含量^[31]。

4 结论

本研究发现,稻虾种养模式显著提高了稻田土壤 LOC I、MBC 和 POC 含量,提升了稻田土壤活性有机碳含量。稻虾种养模式通过增加土壤 pH 和总氮含量,降低 β -XYS 和 ACP 活性,提高土壤 NAG 活性,增加了土壤活性有机碳组分含量。下一步研究应结合稻虾种养模式的特点,从稻虾种养的养殖管理、水稻施肥管理和种养期转换管理等方面,不断优化稻虾种养模式的碳固存能力,减少碳排放,探寻稻虾双收、水土两利的生态高效种养结合新模式。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] KUDEYAROV V N. Soil respiration and carbon sequestration: a review[J]. Eurasian Soil Science, 2023, 56(9): 1191-1200.
- [2] 周正虎,刘琳,侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 11-22. ZHOU Z H, LIU L, HOU L. Soil organic carbon stabilization and formation: mechanism and model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 11-22.
- [3] 黄凯文,马珍,苦君月,等. 土壤有机碳损失机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(24): 26-32. HUANG K W, MA Z, SHAN J Y, et al. Research progress on mechanism of soil organic carbon losses [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(24): 26-32.
- [4] 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.
- [5] JIANG Y, CAO C G. Crayfish-rice integrated system of production: an agriculture success story in China. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2021, 41(5): 68.
- [6] ZHANG Z, DU L S, XIAO Z Y, et al. Rice-crayfish farming increases soil organic carbon [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 329: 107857.
- [7] 易芙蓉,杨天娇,赵宇辰,等. 稻虾共作对稻田土壤耕作层养分的影响——基于益阳市南县的实证分析[J]. 作物研究, 2019, 33(5): 424-427. YI F R, YANG T J, ZHAO Y C, et al. Effects of rice-shrimp co-cultivation on the nutrients in the topsoil layer of paddy field: based on the empirical analysis of Nan County, Yiyang City [J]. Crop Research, 2019, 33(5): 424-427.
- [8] SI G H, PENG C L, YUAN J F, 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.
- [9] SI G H, YUAN J F, XU X Y, et al. Effects of an integrated rice-crayfish farming system on soil organic carbon, enzyme activity, and microbial diversity in waterlogged paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 29-35.
- [10] ZHANG D Y, CAI C, ZHU J Q. Changes of soil water-stable aggregates after rice-crawfish rotation in low-lying paddy fields: a case study in Jiangnan Plain of China [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(19): 2358-2372.
- [11] 李成伟,刘章勇,龚松玲,等. 稻作模式改变对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 961-968. LI C W, LIU Z Y, GONG S L, et al. Effects of changing rice cropping patterns on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(5): 961-968.

- [12] ROVIRA P, RAMÓN VALLEJO V. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 202-215.
- [13] 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.
- [14] DAI Z M, SU W Q, CHEN H H, et al. Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of *Actinobacteria* and *Proteobacteria* in agro-ecosystems across the globe[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3452-3461.
- [15] WANG Y, YAO Z S, ZHAN Y, et al. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2807-2821.
- [16] LIU C H, HU N J, SONG W X, et al. Aquaculture feeds can be outlaws for eutrophication when hidden in rice fields? A case study in Qianjiang, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(22): 4471.
- [17] WANG A C, HAO X L, CHEN W L, et al. Rice-crayfish co-culture increases microbial necromass' contribution to the soil nitrogen pool[J]. *Environmental Research*, 2023, 216: 114708.
- [18] 曹凑贵, 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 strategies for its sustainable development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1245-1253.
- [19] 喻记新, 李为, 刘家寿, 等. 稻虾综合种养对稻田土壤肥力和金属元素含量的影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 453-461.
- YU J X, LI W, LIU J S, et al. Effects of integrated rice-crayfish co-culture on soil fertility and metal element content[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 453-461.
- [20] HURYN A D, WALLACE J B. Production and litter processing by crayfish in an Appalachian mountain stream[J]. *Freshwater Biology*, 1987, 18(2): 277-286.
- [21] HOU Y R, JIA R, JI P, et al. Organic matter degradation and bacterial communities in surface sediment influenced by *Procambarus clarkia*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 985555.
- [22] ZHANG C M, MI W J, XU Y Z, et al. Long-term integrated rice-crayfish culture disrupts the microbial communities in paddy soil[J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 29: 101515.
- [23] LI Q M, XU L, XU L J, et al. Influence of consecutive integrated rice-crayfish culture on phosphorus fertility of paddy soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3413-3422.
- [24] 周玉玲, 蒋思婧, 贺妮莎, 等. 微生物几丁质酶研究进展及其在N-乙酰氨基葡萄糖制备中的应用[J]. *微生物学报*, 2021, 61(8): 2192-2204.
- ZHOU Y L, JIANG S J, HE N S, et al. Research progress of microbial chitinase and its application in the preparation of N-acetylglucosamine[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(8): 2192-2204.
- [25] FAN L M, LI F J, CHEN X, et al. Co-culture of red swamp crayfish *Procambarus clarkia* influenced glycoside hydrolase families and fungal communities in the rice-paddy soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 186: 104816.
- [26] LIANG Y, RILLIG M C, CHEN H Y H, et al. Soil pH drives the relationship between the vertical distribution of soil microbial biomass and soil organic carbon across terrestrial ecosystems: a global synthesis[J]. *CATENA*, 2024, 238: 107873.
- [27] HOU J, ZHANG D Y, ZHU J Q. Nutrient accumulation from excessive nutrient surplus caused by shifting from rice monoculture to rice-crayfish rotation[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116367.
- [28] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 721-729.
- BAO J P, YUAN G S, DONG F Y, et al. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 721-729.
- [29] FRISCH T, AGERBIRK N, DAVIS S, et al. Glucosinolate-related glucosides in *Alliaria petiolata*: sources of variation in the plant and different metabolism in an adapted specialist herbivore, *Pieris rapae*[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, 40(10): 1063-1079.
- [30] 巴晓博, 隋鑫, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物-玉米间作对土壤碳氮含量及相关酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 577-587.
- BA X B, SUI X, BAO X L, et al. Impacts of intercropping with cover crops and maize on soil carbon and nitrogen contents and related enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 577-587.
- [31] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540.
- WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 528-540.

Effect of rice–crayfish farming on soil organic carbon component and enzyme activity

PENG Liang^{1,2}, HAO Liuliu², DAI Lili², TAO Ling², ZHANG Hui², LI Gu², ZHU Jianqiang¹

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 432025, Hubei, China; 2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: To explore the effect of rice–crayfish farming on the stability of soil organic carbon and enzyme activity, a comparative experiment was conducted between rice–crayfish farming model and rice monoculture model using *Oryza sativa* “Shen Liang You 3117” and *Procambarus clarkii* as material in 2021 and 2022. The results showed that, compared to the rice monoculture model (RM), the soil LOC I content in the rice–crayfish farming model (RC) increased by 25.85% to 39.13%, the soil MBC content increased by 96.54% to 105.73%, and the soil POC content increased by 92.24% to 132.32% ($P<0.05$). Meanwhile, the activity of soil β -XYS in RC decreased by 29.35% to 59.74%, β -GC activity decreased by 17.16% to 53.10%, and ACP activity decreased by 41.64% to 59.12% ($P<0.05$). Pearson analysis revealed that soil LOC I, ROC, MBC, and POC were positive correlated with pH, TN, and TOC ($P<0.05$), while DOC and C/N ratio were negative correlated with pH and TN ($P<0.05$). The rice–crayfish farming model increased the soil pH and TN, reduced the activity of β -XYS and ACP, enhanced the activity of NAG in the soil, and thus increased the content of active organic carbon in the soil.

Key words: rice–crayfish farming; soil; organic carbon; component; enzyme activity