

王子臣,陈震,管永祥,等.土壤改良基质对稻虾共作田土壤性状和稻虾生长的影响[J].江苏农业科学,2023,51(12):223-230.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.031

# 土壤改良基质对稻虾共作田土壤性状和稻虾生长的影响

王子臣<sup>1,3,4</sup>, 陈震<sup>2</sup>, 管永祥<sup>2</sup>, 张岳芳<sup>1</sup>, 刘红江<sup>1</sup>, 朱普平<sup>1</sup>, 郑建初<sup>1</sup>, 马艳<sup>1,3,4</sup>

[1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014; 2. 江苏省农业技术推广总站, 江苏南京 210029;

3. 农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室, 江苏南京 210014; 4. 国家农业科学农业环境六合观测实验站, 江苏南京 210014]

**摘要:**为明确土壤改良基质对稻虾共作田土壤性状和稻虾生长的影响,采用稻虾共作水泥池模拟试验,以等量替换的方式设置不施化肥(CK)、常规化肥(CF)、无菌土壤改良基质替代 30% 化肥(NMOSF)、复合菌土壤改良基质替代 30% 化肥(MOSF)4 个施肥处理,分析土壤改良基质施用后土壤性状、水稻产量、田面水质、克氏原螯虾生长指标的变化及相互关系。结果表明:NMOSF、MOSF 处理土壤总氮、总磷、速效氮、有效磷含量均高于 CF 处理,土壤容重低于 CF 处理,其中 NMOSF 处理土壤总磷、速效氮、有效磷含量增幅分别达 15.7%、176.6%、19.8%,差异显著。但 NMOSF、MOSF 处理稻虾产量均显著低于 CF 处理,水稻分别减产 19.0%、18.0%,克氏原螯虾分别减产 55.8%、74.5%。克氏原螯虾成活率、产量与土壤改良基质施用后的田面水化学需氧量(COD)浓度呈极显著负相关,MOSF 处理孕籽克氏原螯虾占比显著低于 NMOSF 处理。试验所用土壤改良基质对稻虾共作田土壤培肥有效,但等量替代 30% 化肥施用会造成稻虾减产,施用后田面水 COD 浓度升高和复合菌的存在是导致克氏原螯虾成活率及繁殖能力下降的重要原因。

**关键词:**土壤改良基质;稻虾共作;次生潜育化;复合菌剂;水稻产量;克氏原螯虾

**中图分类号:**X53;S156.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0223-07

稻虾共作模式是稻田综合种养典型模式之一,将水稻种植与克氏原螯虾养殖组成互利共生复合生态系统,稻在水中长,虾在稻下游,既能节约空间又可实现一水两用、一田双收、稳粮增效、绿色环保。据《中国克氏原螯虾产业发展报告(2021 年)》显示,2021 年克氏原螯虾养殖业产值约为 748.38 亿元,同比增加 11.4%,其中,克氏原螯虾稻田养殖面积约为 126.14 万  $\text{hm}^2$ ,养殖产量 20.623 亿 kg,分别占克氏原螯虾养殖总面积和养殖总产量的 86.6%、86.2%,分别占全国稻渔综合种养总面积和总产量的 49.2%、63.4%。湖北省潜江市发展的稻虾共作生态种养高效模式更是被农业农村部誉为“现代农业发展的成功典范”。然而,稻虾共作模式

亦有其“双刃性”<sup>[1]</sup>,由于长期淹水、地下水位较高,往往造成稻田土壤次生潜育化,成为冷浸田、烂泥田。稻虾共作田土壤颜色偏暗,根系密度增高,土壤结构更为紧密、潜育化明显,且土壤脲酶活性和过氧化氢酶活性均低于常规水稻单作<sup>[1]</sup>。土壤有机碳和全氮含量在 25~50 cm 土层显著低于中稻单作模式,其土壤有机碳和全氮含量较中稻单作模式分别下降了 41.8%、34.8%<sup>[2]</sup>。长期稻虾共作降低了 0~20 cm 土层的团聚体分形维数,增加了 20~30 cm 土层土壤还原性物质总量<sup>[3]</sup>。稻田土壤潜育化是一个严重的土壤退化问题<sup>[4]</sup>,土壤矿化度低,有效养分偏少,供肥性能欠佳。且长期处于渍水状态,土壤缺氧、水土温度低、生物活性差以及还原性有害物质的积累<sup>[5]</sup>,对水稻生长极为不利<sup>[6]</sup>,严重时减产达 54.5%<sup>[7]</sup>。因此,研究稻虾共作模式田土壤培肥、次生潜育化阻控技术对稳产增效具有重要意义和实用价值。

适量的土壤改良剂可提高土壤养分有效性,增加水稻产量,并对潜育化水稻土起到培肥改良效果<sup>[8-9]</sup>。张赓等研究表明,施入石灰、有机质能够提高土壤 pH 值、电荷量,降低还原性物质总量,但对产量影响不明显<sup>[10]</sup>。而石灰和秸秆混合施用不仅能显著提高土壤 Eh 值,而且能降低土壤活性还原性物质

收稿日期:2022-08-12

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)项目(编号:BE2019395、BE2018355-2);江苏省农业重大技术协同推广计划(编号:2020-SJ-047-04-01)。

作者简介:王子臣(1986—),男,安徽利辛人,博士,副研究员,主要从事农业生态与环境养分循环利用工程研究。E-mail:20160028@jaas.ac.cn。

通信作者:陈震,硕士,高级农艺师,主要从事水稻、油菜绿色高效新技术新模式新产品的研发及推广。E-mail:jsszzcz@163.com。

和  $\text{Fe}^{2+}$  含量,降幅分别为 40.0%、49.3%,显著增产 19.8%。王飞等研究结果表明,浅脚烂泥田施用干牛粪、油菜籽饼的有机复合改良剂  $7\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,籽粒产量提高 19.3%,差异显著<sup>[11]</sup>。侯红乾等研究表明,施用土壤改良剂对土壤有机质含量、碱解氮含量无显著影响,但对土壤有效磷含量、速效钾含量、pH 值、电导率有显著的提升作用,施用有机材料枯饼、牛粪均能补充潜育性稻田土壤速效养分,从而促进水稻分蘖、提高水稻有效穗数及抽穗期叶绿素含量,最终提升水稻产量。而牛粪、枯饼、粉煤灰、石灰 4 种改良剂配合作用效果更显著,是综合提升鄱阳湖区潜育化稻田水稻产量的最有效措<sup>[12]</sup>。但也有研究表明,未腐熟的有机肥或有机物料不宜在冷泥田中施用或大量施用<sup>[13]</sup>。复合微生物菌剂的土壤改良培肥基质能够提高麦田土壤有机质含量、改善土壤物理环境,并且增强微生物活性和丰富度,促进秸秆降解,进而提升作物产量<sup>[14]</sup>。

稻虾共作模式田施用复合微生物菌剂的土壤改良基质对土壤性状的影响以及对稻虾生长是否存在不利影响还需要进一步探索。为此,本研究以连续 3 年以上稻虾共作的水泥池土壤为对象,分析富含复合微生物菌剂的土壤改良基质对水稻及克氏原螯虾生长、土壤性状、水体环境因子的影响,旨在明确土壤改良基质用于稻虾共作田土壤培肥的效果及生物安全风险,以期为稻虾共作模式田土壤培肥产品开发及土壤次生潜育化阻控技术研发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验于 2019 年在江苏省农业科学院内稻虾共作定位水泥池进行(定位始于 2016 年)。所在地南京属亚热带湿润气候,年平均气温  $15.4\ ^\circ\text{C}$ ,平均降水日数 117 d,平均降水量  $1\ 106.5\ \text{mm}$ ,相对湿度 76%,每年 6 月下旬至 7 月上旬为梅雨季节。试验开始前耕层(0~15 cm)土壤含总氮( $0.65\pm0.06$ ) g/kg、铵态氮( $13.15\pm0.54$ ) mg/kg、硝态氮( $55.05\pm2.05$ ) mg/kg、总磷( $0.80\pm0.05$ ) g/kg、有效磷( $42.73\pm7.55$ ) mg/kg、速效钾( $294.75\pm4.14$ ) mg/kg、有机碳( $10.37\pm1.83$ ) g/kg,pH 值为( $7.22\pm0.11$ )、电导率为( $162.0\pm4.9$ )  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。供试土壤改良基质由某商品有机肥生产企业提供,该批次产品由牛粪、菇渣、矿物土、深海鱼油废料等物

料混合发酵后添加复合微生物菌剂(B3、黑曲霉、枯草芽孢杆菌、蜂房芽孢杆菌等)制成,每克含有效菌落数(CFU)  $\geq 2$  亿个,有机质含量  $\geq 55\%$ ,总氮含量  $\geq 1.2\%$ 、总磷含量  $\geq 1.2\%$ 、总钾含量  $\geq 1.2\%$ ;供试水稻品种为南粳 9108;供试克氏原螯虾幼苗单体平均体质量为( $5.77\pm0.67$ ) g。

### 1.2 试验设计与田间管理

本试验以等量替换的方式设置不施肥(CK)、常规化肥(CF)、无菌土壤改良基质替代 30% 化肥(NMOSF)、复合菌土壤改良基质替代 30% 化肥(MOSF)4 个施肥处理,采用稻虾共作水泥池微区试验,每个处理 3 个重复,随机区组排列,共计 12 个水泥池微区。每个水泥池微区面积  $2\ \text{m}^2$ (长 2 m、宽 1 m)。在不考虑克氏原螯虾饲料投喂带入养分的情况下,设置氮(N)、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )肥施用总量分别为 240、120、120  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,各处理肥料运筹及基质用量见表 1。

表 1 各处理水稻关键生育期肥料用量					kg/hm <sup>2</sup>
处理	基 肥			穗 肥	
	土壤改良基质	复合肥	尿素	复合肥	尿素
CK	0	0	0	0	0
CF	0	640	105	160	156
NMOSF	6 000	160	105	160	156
MOSF	6 000	160	105	160	156

注:土壤改良基质氮、磷、钾含量为 1.2%、1.2%、1.2%;复合肥氮、磷、钾含量为 15%、15%、15%;尿素氮含量为 46%。

6 月 26 日排空水泥池土壤表层积水,撒施基肥,人工翻耙入土;6 月 27 日上水,6 月 28 日移栽水稻秧苗,每池移栽水稻 44 株,每株 1~2 棵基本苗;7 月 3 日投放克氏原螯虾苗,每池放养克氏原螯虾苗 20 尾(放养密度 10 尾/ $\text{m}^2$ ),克氏原螯虾喂养按照平均每 7 d 喂养 1 次颗粒饲料  $171.90\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、每 15 d 喂养 1 次菜籽饼  $63.75\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,克氏原螯虾放养至水稻收获期间,水泥池上搭拱棚覆盖尼龙网防鸟;9 月 28—30 日收获克氏原螯虾,10 月 21 日水稻成熟期测产。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤指标测定 水稻收获当天,用环刀法测定土壤容重,用土钻采集 0~15 cm 土层土壤,风干、粉碎、过筛后,测定土壤 pH 值、有机碳尾、土壤电导率、总氮、总磷含量,测定方法参考土壤农化分析方法<sup>[15]</sup>。图 1 为稻虾共作水泥池试验现场。



图1 稻虾共作水泥池试验现场

**1.3.2 稻虾生长指标测定** 在水稻成熟期,统计连续 11 株水稻的有效穗数,选取与平均值接近的水稻植株测定每穗粒数、结实率及千粒质量,并将池中的水稻全部收获用于测定实收产量;试验结束前诱捕全部克氏原螯虾,统计成活数量、孕籽克氏原螯虾数量,测算群体指标(克氏原螯虾成活率、孕籽克氏原螯虾占比),测量克氏原螯虾个体指标(体质量、体长、体宽)。

**1.3.3 水体指标测定** 在克氏原螯虾放养 1 d(土壤改良基质施用后 8 d)、放养 40 d(穗肥施用后 1 d)、放养 49 d(穗肥施用后 10 d)采集田面水样,测定田面水 pH 值、电导率、化学需氧量(COD),并用 SAN++ 全自动流动分析仪(荷兰 SKALAR 公司)测定铵态氮、硝态氮、总磷含量。

#### 1.4 数据分析与统计

采用 Office Excel 2016 软件进行试验数据汇总、分析及作图,采用 IBM SPSS Statistics 22 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan's 法进行方差分析和多重比较( $\alpha=0.05$ ),用 Pearson's 法对克氏原螯虾生长指标和田面水体性状进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤改良基质对土壤性状的影响

由图 2 可知,与 CF 处理比较,NMOSF 处理提升了稻田土壤有机碳含量、总氮含量、总磷含量、速效氮含量、有效磷含量以及土壤 pH 值和电导率,并降低了土壤容重,其中土壤总磷含量、速效氮含量、有效磷含量平均提升幅度分别达 15.7%、176.6%、19.8%,差异显著( $P<0.05$ );MOSF 处理提升了土壤总氮含量、总磷含量、速效氮含量、有效磷含量以及土壤 pH 值和电导率,降低了土壤容重和土壤有机碳含量,除速效氮含量差异达显著水平( $P<0.05$ )外,其他差异均不显著。说明本试验采用的土壤改良基质对稻虾共作田土壤具有良好的改良

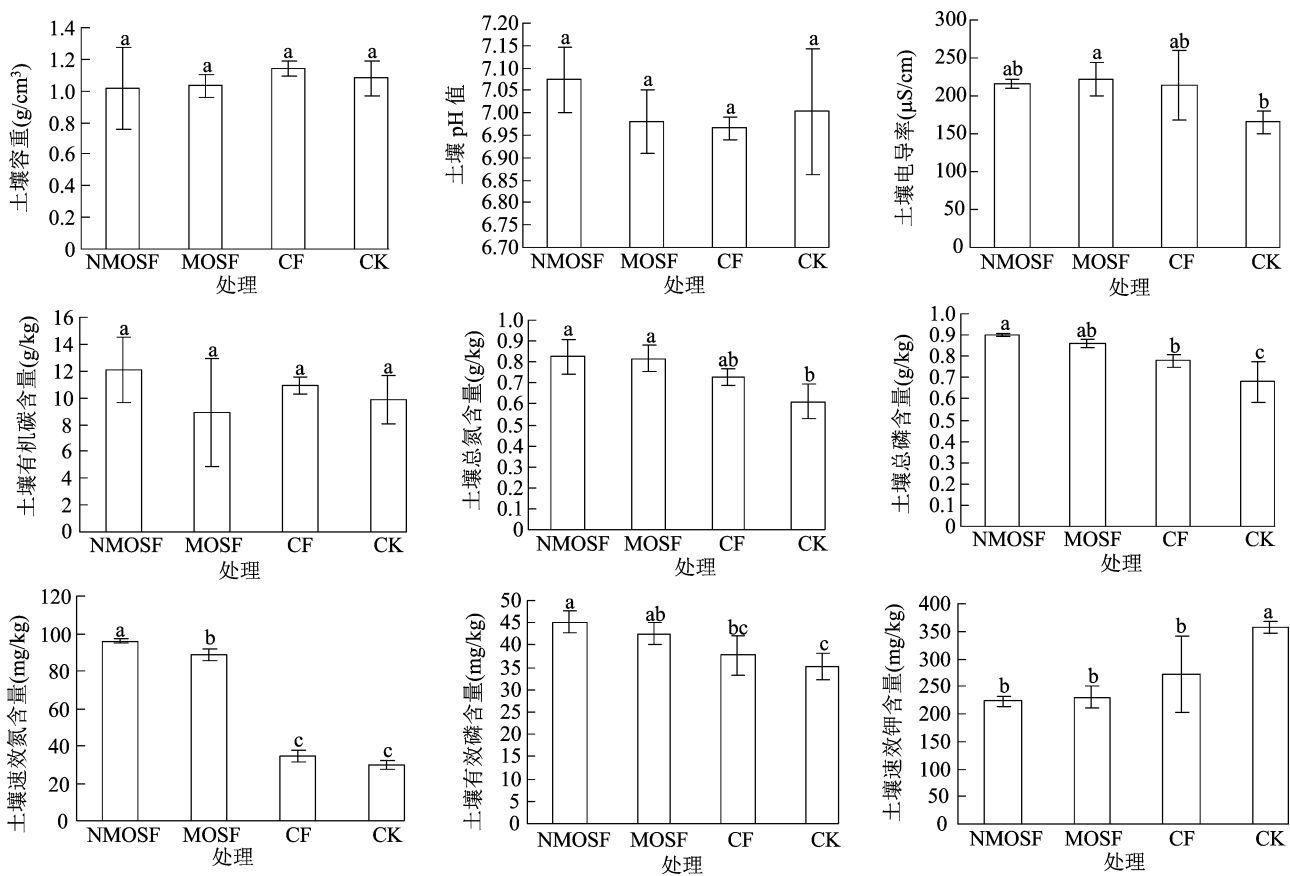
培肥效果,体现在能够提升土壤有机碳含量、总氮含量、总磷含量、速效氮含量、有效磷含量,并降低土壤容重。比较 NMOSF 处理和 MOSF 处理,可发现土壤改良基质中的复合微生物菌剂能起到降低土壤 pH 值、有机碳含量、总磷含量、速效氮含量、有效磷含量,提升土壤电导率的功能。

### 2.2 土壤改良基质对水稻产量的影响

由表 2 可见,与 CF 处理比较,NMOSF 和 MOSF 处理均显著降低了水稻产量( $P<0.05$ ),理论产量平均降幅分别达 19.0% 和 18.0%,实收产量平均降幅分别达 20.9% 和 17.6%,表明本试验采用的土壤改良基质等量替代 30% 化肥时,会造成水稻显著减产,在产量构成因素上表现为有效穗数和结实率增加,但每穗粒数及千粒质量均下降。与 NMOSF 处理比较,MOSF 处理水稻理论产量平均增加了 1.3%,实收产量平均增加了 4.2%,差异未达显著水平,表明土壤改良基质中的复合微生物菌剂有促进水稻增产的功效,但增产效果不显著,在产量构成因素上表现为有效穗数、结实率和千粒质量增加,但每穗粒数下降。

### 2.3 土壤改良基质对田面水质的影响

克氏原螯虾放养 1 d(土壤改良基质作为基肥施用 8 d)、40 d(穗肥施用 1 d)、49 d(穗肥施用 10 d)稻田水体指标变化情况见图 3。可知,土壤改良基质施用 8 d,与 CF 处理相比,NMOSF 处理降低了田面水 pH 值、铵态氮含量、硝态氮含量,平均降幅分别达 11.1%、72.2%、3.5%,提高了田面水 COD 浓度、电导率、总磷浓度,平均增幅分别达 340.7%、36.0%、49.7%,其中,田面水 pH 值、COD 浓度、铵态氮、总磷浓度变化均达显著性差异( $P<0.05$ )。MOSF 处理较 NMOS 处理降低了田面水 pH 值、总磷、铵态氮、硝态氮浓度,平均降幅分别达 1.5%、3.0%、71.4%、7.3%,提高了田面水 COD 浓度和电导率,平均增幅分别达 148.5%、22.2%,其中,田面水 COD、铵态氮浓度变化在 0.05 水平下差



柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。图3同

图2 水稻收获后稻田土壤性状指标

表2 水稻产量及产量构成因素

处理	有效穗数 (穗/m <sup>2</sup> )	每穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	理论产量 (g/m <sup>2</sup> )	实收产量 (g/m <sup>2</sup> )
CK	156.00 ± 22.27b	113.65 ± 25.82b	88.5 ± 7.2a	24.16 ± 2.23a	369.00 ± 30.72c	365.20 ± 40.13c
CF	193.33 ± 10.07a	157.23 ± 24.62a	87.4 ± 4.6a	24.86 ± 0.87a	655.46 ± 61.16a	635.69 ± 40.25a
NMOSF	198.07 ± 16.60a	123.26 ± 8.48ab	88.5 ± 3.7a	24.62 ± 0.77a	530.92 ± 50.26b	502.78 ± 36.41b
MOSF	203.33 ± 11.02a	116.87 ± 19.30ab	92.1 ± 2.2a	24.78 ± 1.95a	537.71 ± 58.09b	523.73 ± 61.64b

注:同列数字后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表3同。

异显著。穗肥期以后,与 CF 处理比较,NMOSF 处理和 MOSF 处理仍持续增加田面水 COD 浓度和电导率,其中 NMOSF 处理增加田面水 COD 浓度的效果显著( $P<0.05$ ),其他各指标随稻虾共作期的延长,差异逐步缩小。比较 NMOSF 和 MOSF 处理,可知土壤改良基质组分中的复合微生物菌剂能够降低水体 COD 含量(图 3)。

2.4 土壤改良基质对克氏原螯虾生长的影响

土壤改良基质的施用降低了稻田克氏原螯虾产量,与 CF 比较,NMOSF 处理、MOSF 处理克氏原螯虾产量分别降低 55.8%、74.5%,差异达显著水平( $P<0.05$ )。MOSF 处理与 NMOSF 处理比较,克

氏原螯虾产量降低 42.3%,差异显著( $P<0.05$ ),说明土壤改良基质中的基质载体和复合微生物菌剂均是构成克氏原螯虾产量下降的原因。从克氏原螯虾生长指标可以看出,与 CK 处理比较,NMOSF 处理、MOSF 处理克氏原螯虾的成活率分别下降 72.0%、78.0%,孕籽克氏原螯虾占比分别下降 37.5%、100%,下降显著( $P<0.05$ );与 CF 处理比较,克氏原螯虾成活率分别下降 57.6%、66.7%,差异均达显著水平( $P<0.05$ ),NMOSF 处理孕籽克氏原螯虾占比下降 11.0%,MOSF 处理孕籽克氏原螯虾占比下降 100%。说明土壤改良基质等量替代 30% 化肥不利于稻田克氏原螯虾的成活与繁殖(表

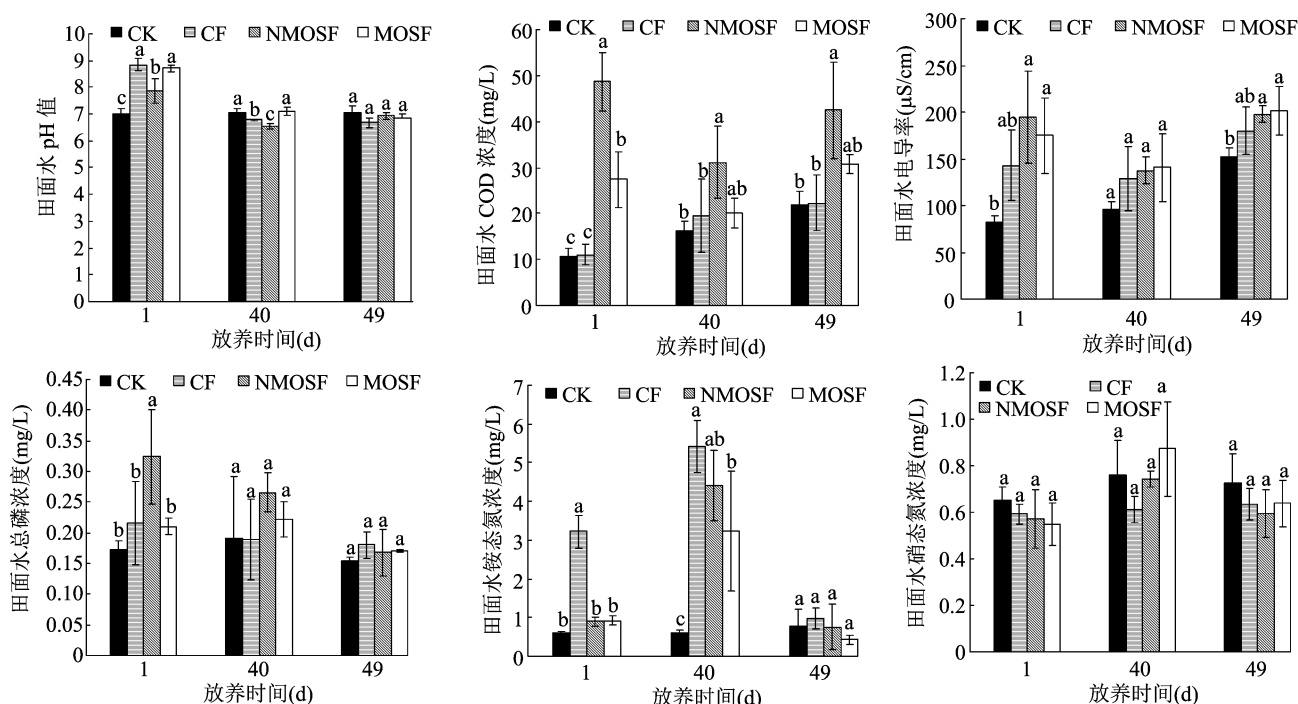


图3 稻虾共作期间田面水质指标变化

3)。与 NMOSF 处理比较, MOSF 处理克氏原螯虾成活率和孕籽克氏原螯虾占比分别下降 21.4%、100%, 其中孕籽克氏原螯虾占比下降显著 ( $P < 0.05$ )。说明土壤改良基质中的复合微生物菌剂是造成克氏原螯虾繁殖能力降低的主要因素。此外,

MOSF 处理克氏原螯虾体质量增长量、体质量增长率、体长及体宽均最低, 且体质量增长量及体质量增长率与 CF 和 CK 处理相比, 下降幅度均达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

表3 克氏原螯虾生长指标

处理	克氏原螯虾成活率 (%)	孕籽克氏原螯虾占比 (%)	体质量增长量 (g/尾)	体质量增长率 (%)	体长 (cm)	胸宽 (cm)	产量 (g/m <sup>2</sup> )
CK	83.3 ± 2.9a	56.0 ± 3.0a	11.65 ± 0.88b	201.1 ± 11.4b	8.61 ± 0.15a	1.76 ± 0.07ab	87.24 ± 6.06b
CF	55.0 ± 5.0b	39.3 ± 2.7b	13.45 ± 1.17a	198.8 ± 24.1b	8.81 ± 0.07a	1.82 ± 0.04a	108.01 ± 13.91a
NMOSF	23.3 ± 2.9c	35.0 ± 8.7b	13.66 ± 0.69a	254.5 ± 22.4a	8.35 ± 0.10b	1.76 ± 0.04ab	47.72 ± 10.22c
MOSF	18.3 ± 2.9c	0.0 ± 0.0c	7.00 ± 0.68c	123.3 ± 23.1c	7.72 ± 0.12c	1.70 ± 0.07b	27.52 ± 2.79d

### 3 讨论与结论

#### 3.1 土壤改良基质对土壤性状的影响

土壤改良剂分为无机改良剂、有机改良剂以及有机无机复合调配改良剂, 针对稻田土壤的改良培肥, 因种类、用量、调配方式不同而作用效果不同<sup>[9-13, 16]</sup>。本研究采用的土壤改良基质作为有机改良剂、无机改良剂混合调配产品类型之一, 由牛粪、菇渣、矿物土、深海鱼油废料等物料混合发酵后添加复合微生物菌剂 (B3、黑曲霉、枯草芽孢杆菌、蜂房芽孢杆菌等) 制成, 提升土壤有机碳、总氮、总磷、速效氮、有效磷含量的效果与张赓等的研究

结果<sup>[10-12]</sup>一致。这是由于土壤改良基质的施用, 直接提升了土壤碳氮比<sup>[17]</sup>, 减缓了土壤原有有机碳的分解, 并刺激土壤中可利用性氮、磷固定形成稳定土壤有机质<sup>[18]</sup>, 降低氮磷养分向下层土壤淋溶迁移量。MOSF 处理降低了土壤有机碳含量, 可能与复合微生物活动有关<sup>[14]</sup>。土壤改良基质的施用提升了土壤 pH 值和电导率, 可有效防止土壤酸化<sup>[19]</sup>, 但受复合微生物菌剂成分影响, 提升效果略有不同, 这与有机物质中高碱度灰分的中和作用有关<sup>[20-21]</sup>。

#### 3.2 土壤改良基质对水稻产量的影响

有机土壤改良剂对促进水稻增产有功效, 但离

不开合适的产品配方以及科学的施用技术。侯红乾等指出有机改良剂通过显著影响水稻的穗数、每穗粒数进而影响水稻产量<sup>[12]</sup>。陈琨等研究表明,泥炭、商品有机肥、鸡粪等处理均能提升水稻结实率,但泥炭、商品有机肥处理没有增产效果,反而使水稻出现小幅减产<sup>[13]</sup>。王飞等在研究中发现,干牛粪、菇渣、秸秆、猪粪、油菜籽饼等处理均能增加冷浸田水稻单位面积有效穗数,但 3 750 kg/hm<sup>2</sup> 干牛粪和 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 秸秆处理水稻籽粒产量均降低<sup>[11]</sup>。本研究在设置土壤改良基质替代 30% 化肥用量时,综合考虑了生产企业推荐量 4 500 ~ 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 和 水稻 有机 肥 替 代 化 肥 比 例 49% 的 适 宜 用 量<sup>[22]</sup>。施用土壤改良基质后水稻单位面积有效穗数及结实率均有所提升,与王飞等的研究结果<sup>[11,13]</sup>一致。造成减产的可能原因是土壤改良基质中的有机物质被复合微生物分解形成了还原性物质<sup>[23]</sup>,增加了土壤 pH 值、电导率及氧化还原电位<sup>[24]</sup>,对水稻正常穗分化和籽粒灌浆造成胁迫伤害,导致每穗粒数减少,千粒质量降低,最终形成减产。

3.3 土壤改良基质对克氏原螯虾生长的影响

稻虾共作模式田与常规潜育化稻田有所区别,在选择和施用土壤改良剂时,除考虑土壤培肥及水稻增产效果外,还需特别关注克氏原螯虾生长情况,以不影响克氏原螯虾生长为前提。邵乃麟等研究发现,枯草芽孢杆菌能够提升鳊虾稻共作水体溶解氧,降低 pH 值,去除氨氮、亚硝酸氮、总氮、总磷含量最高分别达 68. 1%、86. 5%、50. 0% 和 58. 8%<sup>[25]</sup>。程建平等认为,增施富含微生物菌剂的营养料可稳定维持稻虾共作水体弱碱性环境,降低水体中氨氮、亚硝酸盐类物质含量,增加水体总磷含量,为克氏原螯虾健康生长创造适宜水体环境,促进克氏原螯虾生长<sup>[26]</sup>。本研究所用土壤改良基

质中的复合微生物菌剂对克氏原螯虾生长不利,可能原因是复合菌与克氏原螯虾在同一环境中存有竞争关系,或复合菌活动代谢产物对克氏原螯虾生长有毒副作用,相关机理需要进一步深入研究。表 4 是克氏原螯虾生长指标与田面水质之间的相关性分析,克氏原螯虾成活率与田面水 COD 浓度、电导率呈极显著负相关( $P < 0. 01$ ),与总磷浓度呈显著负相关( $P < 0. 05$ ),且克氏原螯虾产量与 COD 浓度呈极显著负相关。此外,孕籽克氏原螯虾占比与田面水 pH 值呈极显著负相关,克氏原螯虾体质量增长率与总磷浓度呈显著正相关,克氏原螯虾体长与铵态氮浓度呈显著正相关。COD 表征了水中受还原性物质污染的程度<sup>[27]</sup>,其降解过程需要消耗水体中的溶解氧。Plumb 等指出,处于连续低溶氧环境中的动物,其免疫力下降,对病原体的抵抗力减弱<sup>[28]</sup>。本研究所用无菌和复合菌土壤改良基质在克氏原螯虾放养初期均显著增加了水体 COD 含量,造成水中溶解氧下降,是造成克氏原螯虾成活率低的重要因素之一。在稻虾共作过程中,水体 pH 值要求保持在 7. 0 ~ 8. 5,适度提高水体 pH 值有利于克氏原螯虾生长<sup>[26,29-30]</sup>,本研究中无菌土壤改良基质在施用初期显著降低了稻田水体 pH 值,不利于克氏原螯虾幼苗成活及生长繁育。大多数天然淡水的电导率为 50 ~ 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,电导率与水体营养物质浓度和悬浮物质含量呈一定的正相关性<sup>[31]</sup>,本研究验证了这一观点(表 5),其中田面水电导率与水体 COD 和总磷浓度呈极显著正相关( $P < 0. 01$ )。稻田水体适宜的营养物质含量对克氏原螯虾生长指标有利(表 6),但浓度过高也会形成毒害作用<sup>[25-26]</sup>,本研究水体总磷浓度能促进克氏原螯虾体质量增长,但总磷浓度与 COD 含量呈极显著正相关,无菌土壤改良基质处理显著增加水体总磷浓度也是造成克氏原螯虾成活率降低的重要因素。

表 4 土壤改良基质施用后克氏原螯虾生长指标与田面水质指标之间的相关系数

水质	相关系数						
	克氏原螯虾成活率	孕籽克氏原螯虾占比	体质量增长量	体质量增长率	体长	胸宽	产量
pH 值	-0. 457	-0. 649 **	-0. 272	-0. 331	-0. 186	-0. 019	-0. 120
COD 浓度	-0. 713 **	-0. 184	0. 136	0. 402	-0. 431	-0. 084	-0. 646 **
电导率	-0. 677 **	-0. 446	-0. 010	0. 139	-0. 394	-0. 028	-0. 460
总磷含量	-0. 533 *	0. 014	0. 420	0. 591 *	-0. 029	0. 237	-0. 339
铵态氮含量	0. 080	0. 089	0. 388	0. 053	0. 539 *	0. 486	0. 609 *
硝态氮含量	0. 499	0. 336	0. 196	0. 194	0. 343	0. 341	0. 346

注: \*、\*\* 分别表示在 0. 05、0. 01 水平上显著相关。表 5、表 6 同。

表 5 土壤改良基质施用后田面水质指标之间的相关系数

水体指标	相关系数				
	pH 值	COD 浓度	电导率	总磷含量	铵态氮含量
COD 浓度	-0.026				
电导率	0.362	0.721 **			
总磷含量	0.045	0.789 **	0.682 **		
铵态氮含量	0.580 *	-0.384	0.034	-0.006	
硝态氮含量	-0.179	-0.118	0.109	0.057	-0.017

表 6 土壤改良基质施用后克氏原螯虾生长指标之间的相关系数

生长指标	相关系数				
	克氏原螯虾成活率	孕籽克氏原螯虾占比	体质量增长量	体质量增长率	体长
孕籽克氏原螯虾占比	0.679 **				
体质量增长量	0.302	0.780 **			
体质量增长率	0.179	0.617 *	0.877 **		
体长	0.679 **	0.749 **	0.787 **	0.574 *	
胸宽	0.298	0.622 *	0.695 **	0.443	0.706 **
产量	0.790 **	0.625 *	0.575 *	0.331	0.882 **

降。土壤改良基质施用后的田面水 COD 浓度上升是导致克氏原螯虾成活率下降、克氏原螯虾减产的主要原因,土壤改良基质中的复合菌剂是降低克氏原螯虾繁殖能力的重要因素。在开发稻虾共作田土壤培肥产品及研发稻虾共作田土壤次生潜育化阻控技术时,应将田面水 COD 浓度作为表征克氏原螯虾生长的安全风险指标,并控制复合菌剂的投入量。

#### 参考文献:

- [1]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.
- [2]佘国涵,彭成林,徐祥玉,等. 稻-虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响[J]. 土壤,2016,48(3):503-509.
- [3]佘国涵,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.
- [4]赖庆旺,刘 勋,黄庆海. 鄱阳湖地区水稻土潜育化的发生及其改良对策[J]. 中国农业科学,1989,22(4):65-74.
- [6]龚子同,张效朴,韦启璠. 我国潜育性水稻土的形成、特性及增产潜力[J]. 中国农业科学,1990,23(1):45-52.
- [7]王昌燎,何电源. 潜育化水稻土的肥力特性及施肥效应的研究: I. 潜育化水稻土的某些肥力特性及氮、磷、钾肥效应的研究[J]. 农业现代化研究,1983(1):31-37.
- [8]余喜初,李大明,黄庆海,等. 过氧化钙及硅钙肥改良潜育化稻田土壤的效果研究[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):138-146.
- [9]胡柯鑫,董春华,罗尊长,等. 不同释放速率过氧化钙对模拟潜育环境下稻田土壤理化特性的影响[J]. 土壤,2020,52(4):853-

## 4 结论

土壤改良基质等量替代化肥能够提升稻虾共作田土壤总氮、总磷、速效氮、有效磷含量,并降低土壤容重,可作为稻虾共作田土壤培肥产品。但等量替代 30% 化肥施用会造成水稻和克氏原螯虾显著减产,水稻减产主要体现在每穗粒数和千粒质量下降,克氏原螯虾减产体现在成活率与繁殖能力下

861.

- [10]张 赓,李小坤,鲁剑巍,等. 不同措施对冷浸田土壤还原性物质含量及水稻产量的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(27):153-157.
- [11]王 飞,林 诚,李清华,等. 基于不同类型冷浸田的有机无机物料改良剂增产效应研究[J]. 土壤通报,2017,48(5):1203-1209.
- [12]侯红乾,冀建华,刘秀梅,等. 土壤改良剂对鄱阳湖区潜育性稻田的改良作用研究[J]. 土壤通报,2016,47(6):1448-1454.
- [13]陈 琨,秦鱼生,喻 华,等. 不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(3):773-781.
- [14]宋时丽,吴 昊,黄鹏伟,等. 秸秆还田土壤改良培肥基质和复合菌剂配施对土壤生态的影响[J]. 生态学报,2021,41(11):4562-4576.
- [15]鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999:146-194.
- [16]Westcott M P, Mikkelsen D S. The response of rice seedlings to O<sub>2</sub> released from CaO<sub>2</sub> in flooded soils[J]. Plant and Soil, 1983, 74(1):31-39.
- [17]邵兴芳,徐明岗,张文菊,等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):326-335.
- [18]Blesh J, Drinkwater L E. Retention of <sup>15</sup>N - labeled fertilizer in an Illinois prairie soil with winter rye[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(2):496-508.
- [19]Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Nitrification and acidification from urea application in red soil (Ferralic Cambisol) after different long-term fertilization treatments[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(9):1526-1536.

潘杰华,凌宇,吴猛,等. 乡村国土空间演化影响机理、阶段划分与演化趋势[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):230-237.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.032

# 乡村国土空间演化影响机理、阶段划分与演化趋势

潘杰华<sup>1</sup>, 凌宇<sup>1</sup>, 吴猛<sup>2</sup>, 张林波<sup>3</sup>, 杨小艳<sup>4</sup>

(1. 江苏省土地开发整理中心, 江苏南京 210024; 2. 江苏省徐州市土地储备中心, 江苏徐州 221009;

3. 江苏省徐州市自然资源和规划局, 江苏徐州 221009; 4. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:**作为区域有机统一的国土空间系统构成要素,乡村与城市空间一起为人类社会的生存和发展提供了重要的空间和资源基础,具有支撑乡村乃至城市区域发展的关键生态、生产及生活功能。在系统分析乡村国土空间内涵、乡村国土空间演化影响因素与基础的基础上,将乡村国土空间演化过程划分为古代文明时期自然主导型、农耕文明时期农业生产主导型、近代工业文明时期乡村资源输出型、现代时期城乡交互融合型发展 4 个阶段,总结 4 个演化阶段的主导影响因素、空间格局、功能发挥以及城乡交互作用特征,并分析展望不同地理区位、资源禀赋及产业特征的 4 类乡村国土空间演化趋势。初步建立乡村国土空间及演化的理论体系,对于科学合理编制我国国土空间规划以管控、指导和保障区域经济社会可持续发展具有重要作用,对于乡村国土空间利用与优化管理等具有较强的理论参考价值。

**关键词:**乡村国土空间;演化;驱动机制;阶段划分

**中图分类号:**P96;F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0230-08

乡村指以农业生产活动为主体、以社会经济和生态环境物质信息交换为纽带形成的包括乡村聚

落以及周围生产生态区域构成的相对独立的非城市区域<sup>[1-2]</sup>。据 2019 年国民经济和社会发展统计公报,截至 2018 年我国依然有 39.40% 的人口常住于乡村区域,此外有 16.22% 居住于城镇的农村户籍人口并未彻底实现城镇化的转变。由于乡村区域基础设施落后,农民收入水平较低,乡村发展成为我国经济社会发展战略实现的重点区域<sup>[3]</sup>。从区域发挥的功能来看,乡村既为城市乃至全社会提供了重要的物质与劳动力资源<sup>[4-5]</sup>,还提供最重要

收稿日期:2023-03-20

基金项目:江苏高校人文社会科学“特色小镇建设与土地管理研究基地”开放课题(编号:19JDXM05)。

作者简介:潘杰华(1967—),男,浙江宁海人,硕士,高级工程师,主要从事城乡土地整理及规划利用研究。E-mail: panjehua1967@163.com。

通信作者:杨小艳,博士,副教授,主要从事城乡土地利用与规划研究。E-mail: yangxy0705@163.com。

[20] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, et al. Sustaining crop productivity while reducing environmental nitrogen losses in the subtropical wheat-maize cropping systems: a comprehensive case study of nitrogen cycling and balance[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 1-14.

[21] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: a case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 450-458.

[22] 纪彦涛,周世庆,梁忠信,等. 洋县水稻有机肥替代化肥用量田间试验[J]. *中国农技推广*, 2019, 35(3): 44-45.

[23] 丁昌璞. 水稻土中的还原性物质[J]. *土壤学进展*, 1984, 12(2): 1-12.

[24] de Datta S K. Principles and practices of rice production[M]. New York: Wiley, 1981.

[25] 邵乃麟,郭印,沈站,等. 枯草芽孢杆菌和空心菜对鳊虾稻共作池塘水质的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(3):

415-421.

[26] 程建平,文玲梅,杨涛,等. 增施微生物营养料对稻虾共作养殖水体水质及克氏原螯虾产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2018, 57(23): 121-123.

[27] 王子臣,王鑫,张岳芳,等. 沼液 COD 对黄瓜幼苗生长及土壤环境因子的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(4): 15-22.

[28] Plumb J A, Grizzle J M, Defigueiredo J. Necrosis and bacterial infection in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) following hypoxia[J]. *Journal of Wildlife Diseases*, 1976, 12(2): 247-253.

[29] 刘旭艳,张心昱,袁国富,等. 近 10 年中国典型农田生态系统水体 pH 值和矿化度变化特征[J]. *环境化学*, 2019, 38(6): 1214-1222.

[30] 易芙蓉,林玮诗,张鸣宇,等. 稻虾共作对稻田水体环境的影响[J]. *作物研究*, 2019, 33(5): 362-365, 373.

[31] 杨富亿,文波龙,李晓宇,等. 达里诺尔湿地水环境和鱼类多样性调查 I. 达里湖水体中的主要离子、含盐量和电导率[J]. *湿地科学*, 2020, 18(5): 507-515.