

周勇,李皓轩,董洪瑞,等.基于小龙虾田间分布的稻虾共生机制探究[J].华中农业大学学报,2022,41(4):202-209.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.04.025

## 基于小龙虾田间分布的稻虾共生机制探究

周勇<sup>1,2</sup>,李皓轩<sup>1</sup>,董洪瑞<sup>1</sup>,李成伟<sup>1</sup>,朱波<sup>1</sup>,杨军<sup>1</sup>,金涛<sup>1</sup>,刘章勇<sup>1</sup>

1.长江大学农学院/主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心,荆州434025;  
2.湖北工程学院生命科学技术学院/特色果蔬质量安全控制湖北省重点实验室,孝感432000

**摘要** 为探究稻虾共生机制,运用地笼捕获法研究了小龙虾分别在高频分布采样区(GP)、低频分布采样区(DP)和无虾对照区(CK)的田间分布特征,结合稻田土壤性状、病虫害调查和稻谷产量性状分析,研究稻虾共作模式的生态效应。结果显示:小龙虾稻田分布数量与田面水深呈显著正相关关系,一元线性回归方程为 $y=197.69x-25.77$ ;小龙虾高频分布可以改善土壤结构,显著降低0~10 cm土壤容重6.25%~11.76%,显著增加0~10 cm土层总毛管孔隙度8.08%~10.78% ( $P<0.05$ );小龙虾高频分布显著增加0~10 cm土壤有机质含量6.24%~10.30%,显著增加0~20 cm土层的土壤微生物生物量碳( $P<0.05$ ),并能显著抑制杂草生长;小龙虾不同分布频度对病虫害和水稻产量及其构成因子无显著影响,但水稻产量随着分布频度的加大具有增加的趋势。因此,生产和科研上可适当区分小龙虾不同分布频度(水深)进行管理和研究,促进稻虾生态种养绿色可持续发展。

**关键词** 稻虾共作;小龙虾田间分布;生态效应;共生机制

**中图分类号** S511:S966.1;S451.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)04-0202-08

稻虾共作模式被誉为“现代农业发展的成功典范”<sup>[1]</sup>,在稳粮增效<sup>[2]</sup>的同时,不仅使农户增加经济收入9%~48%<sup>[3]</sup>,还具有良好的生态效应<sup>[4-5]</sup>。截至2021年,全国稻虾生态种养面积和小龙虾产量分别达到了126.1万 $\text{hm}^2$ 和206.2万 $\text{t}$ <sup>[6]</sup>。然而,受“重虾轻稻”等思想的影响,稻田土壤潜育化、病虫害生物多样性改变等问题在生产中逐渐呈现<sup>[2,5,7]</sup>。因此,加强对稻虾共作模式生态经济效应的研究对促进水稻和水产产业持续高效发展具有现实意义。

Si等<sup>[8]</sup>比较研究了中稻单作和稻虾共作模式下土壤碳组分和微生物群落结构差异,Xu等<sup>[9]</sup>对稻虾共作等多种稻作模式的净生态系统服务功能进行了比较,Sun等<sup>[10]</sup>分析了稻虾共作模式在秸秆还田和投食交互条件下的温室气体排放特征,郭瑶等<sup>[11]</sup>研究了稻虾共作不同年限条件下稻田杂草生物多样性。但是这些研究主要集中于稻虾共作与中稻单作对比、不同共作年限对比或不同田间管理方式之间的比较,稻虾共生机制尚不明确。目前,关于稻虾共作条件下小龙虾行为规律及其生态效应的研究尚未

见报道,本研究通过地笼捕获法调查小龙虾田间活动与分布特征,并在此基础上研究其生态效应,以期探析稻虾共生机制,为科研和生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2021年在湖北省潜江市后湖管理区长江大学稻虾研究基地(30°37'N,112°73'E)进行,该区域位于江汉平原腹地,属北亚热带季风性湿润气候,无霜期250 d,年均气温16.1℃,年均降雨量1100 mm,土壤为潮土性水稻土,土壤基本理化性质为:碱解氮82.7 mg/kg,有效磷3.45 mg/kg,速效钾118.81 mg/kg,有机质32.6 g/kg,pH 7.3。

### 1.2 田间管理

稻虾共作模式分为2个阶段。第一阶段为田面覆水养虾阶段,2020年10月下旬晒田杀菌,11月6日田面覆水,初始水位15 cm,随气温降低逐步增加水位至50 cm,12月5日按照4.5 m×8 m的密度在田面栽培伊乐藻,12月10日投放150 kg/ $\text{hm}^2$ 复合肥

收稿日期:2022-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31870424);湖北省重点研发计划项目(2020BBA044)

周勇,E-mail:86681379@qq.com

通信作者:朱波,E-mail:1984zhubo@163.com

(N-P-K:25-10-16),12月20日投放生物肥料滤饵多肽20 kg/hm<sup>2</sup>,2月1日之前视小龙虾出苗情况少量投食,2月1日之后按照小龙虾质量的3%~5%逐步增加饲料投喂,2月20日开始捕虾售卖;第二阶段为稻虾共生阶段,5月30日排水晒田,6月13日移栽水稻,移栽密度为16.36万株/hm<sup>2</sup>,8月5日,晒田控蘖后田面灌水投放虾苗85 kg,虾苗规格为(6.19 ± 0.76) g/尾,每日17:00时投喂饲料,投喂量为虾质量的2%~5%,逐日增加投喂量,9月18日排水晒田,10月12日水稻收割,留茬高度30~40 cm。试验田总面积0.51 hm<sup>2</sup>,其中,田面面积为0.36 hm<sup>2</sup>,围沟面积为0.15 hm<sup>2</sup>。稻虾共作期间根据天气与水质变化及时调整田面水深,移栽前2 d施基肥445 kg/hm<sup>2</sup>(N-P-K:25-10-16),追施尿素135 kg/hm<sup>2</sup>作为分蘖肥,施穗肥75 kg/hm<sup>2</sup>(N-P-K:25-10-16),无人机喷洒低毒虫、菌药1次,人工除草1次。水稻供试品种为“荆香优72号”,小龙虾供试品种为克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),试验前稻作模式为稻虾连作。

### 1.3 小龙虾田间分布特征调查

稻虾共作期间,小龙虾田间分布特征采用地笼捕获法调查,地笼规格为11号(3.80 m×0.26 m×0.20 m),按照5×5的阵列在稻田厢沟中布设地笼,布设时间为18:00时,收虾时间为07:00时,统计每个地笼小龙虾捕获数量,分别于8月24日、27日、30日以及9月2日捕虾4次。铺设地笼时,用钢尺沿地笼底部量取水深4处,取平均值作为地笼所处水深;地笼捕获作业间隙,按照5×15的阵列,全面均匀调查田面水深,以分析田面地形。

### 1.4 水体环境指标测定

采用希玛AS803型Digital Lux Meter照度计测量不同水深的日照度,量程为1~20万lx,分辨率为1 lx;采用上海悦丰SGZ-200BS型便携式浊度仪测量不同区域浊度,量程为0~200 NTU,分辨率为0.01 NTU;采用台湾衡欣AZ86031型便携式水质检测仪测量不同区域的水温、pH、溶解氧(DO)等指标,pH值量程为2.0~12.0,分辨率为0.1;DO量程为0~20.0 mg/L,分辨率为0.1 mg/L。

### 1.5 基于小龙虾田间分布的采样区设置

8月5日投苗前,用宽1.2 m的矩形单面渔网在田面西北方向围成8 m×8 m无虾采样区(CK),渔网深入土层15 cm,阻隔小龙虾进入;根据本文“1.3”小龙虾田间分布情况,在田面深水区域设置6 m×10 m小龙虾高频分布采样区(GP),在浅水

区域设置8 m×8 m小龙虾低频分布采样区(DP)。

### 1.6 土壤环境指标测定

在本文“1.5”设置的3个采样区内,分别以S型五点取样法,取0~10和10~20 cm 2个土层土样,同层混合均匀,带回实验室。其中一部分除杂后放入4℃冰箱,用以测定鲜土指标,另一部分掰碎风干,分别过孔径0.850 mm和0.149 mm筛,用以测定干土指标。土壤有机质和可溶性有机碳采用重铬酸钾-外加加热法测定,土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,土壤容重和毛管孔隙度采用环刀法测定。

### 1.7 病虫害调查

在各采样区内按照S型定位5个调查点。水稻成熟期,在每个调查点连续调查10穴水稻,调查整白穗率和部分白穗率,以此评判螟虫危害程度,同时调查稻曲病病穗率<sup>[12]</sup>;水稻灌浆期,在每个调查点放置1 m×1 m木质方框,调查杂草生物多样性,通过Pielou物种均匀度指数( $J$ )、Simpson多样性指数( $D$ )、物种丰富度指数( $R$ )和Shannon多样性指数( $H$ )等指标对稻田杂草的多样性变化进行分析<sup>[11]</sup>。有关计算公式如下:

$$\text{稻曲病病穗率} = \frac{\text{病穗数}}{\text{调查总穗数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{整白穗率} = \frac{\text{整穗白穗数}}{\text{调查总穗数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{部分白穗率} = \frac{\text{部分穗白穗数}}{\text{调查总穗数}} \times 100\% \quad (3)$$

$$R = S \quad (4)$$

$$H = - \sum_{i=1}^s \frac{N_i}{N} \times \ln \frac{N_i}{N} \quad (5)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s \left( \frac{N_i}{N} \right)^2 \quad (6)$$

$$J = \left[ - \sum_{i=1}^s \frac{N_i}{N} \times \ln \frac{N_i}{N} \right] / \ln S \quad (7)$$

式(4)~(7)中, $S$ 为样方内杂草物种数, $N_i$ 为样框内第*i*个物种的杂草植株数量, $N$ 为样框内所有杂草植株总数。

### 1.8 水稻产量及其构成因子

水稻机收前,在各采样区分别割取3个1 m×1 m样方、长势均匀的水稻,带回实验室自然风干,脱粒测实产;根据大田平均穗数取6穴水稻,带回实验室自然风干,测算有效穗数、穗粒数、千粒重和结实率等指标。

### 1.9 数据处理

运用 SPSS 26.0 进行样本间差异的方差分析 (ANOVA), 采用最小 LSD 方法进行检验, 运用 Origin Pro 9.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 小龙虾田间分布特征

将地笼捕获的 100 笼小龙虾数量与捕获水深进行线性相关分析和回归分析, 结果显示小龙虾捕获量与田面水深存在极显著正相关关系, 皮尔逊相关系数为 0.894; 一元线性回归方程为  $y=197.69x-25.77$ ,  $R^2=0.80$ ,  $P<0.001$  (图 1)。说明小龙虾倾向于在稻田水深处聚集, 水深越深, 田面越低, 则小龙虾分布越密集, 活动强度越大。

### 2.2 不同田面水深水体理化指标

随着田面水深加大, 水体光照强度、温度、pH 和溶解氧均呈下降趋势 (图 2)。如图 2A 所示, 水体光照度在 0~20 cm 水深区间急剧下降, 在 20~50 cm 水深下降趋势减缓, 在阴雨天气条件下, 50 cm 水深处

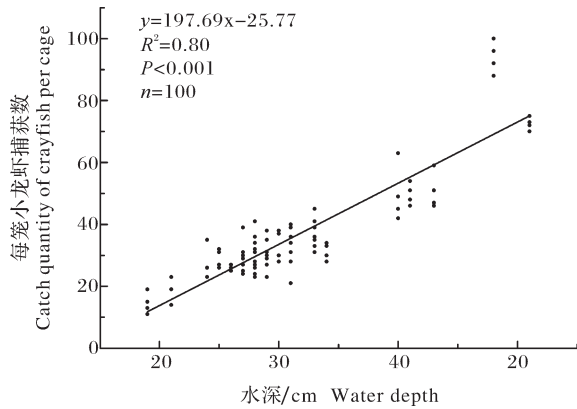
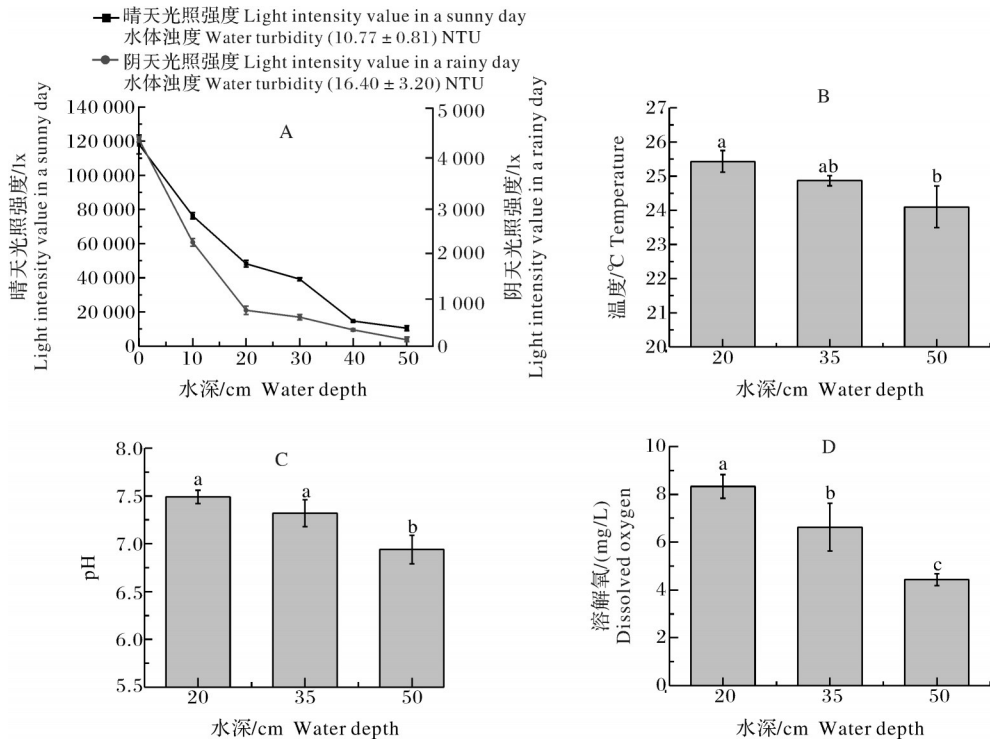


图1 地笼捕获量与田面水深之间关系

Fig.1 Relationship between cage catch and field water depth

光照度接近 0。由图 2B、C 可知, 50 cm 水深处的温度、pH 均显著低于 20 cm 处, 平均温差可达 1 °C 以上, pH 由偏碱性变为偏酸性; 但 20 与 35 cm 水深处的温度、pH 无显著差异 ( $P>0.05$ )。由图 2D 可知, 溶解氧随水深急剧下降, 3 个不同水深测量点均存在显著差异, 50 cm 处的溶解氧比 20 cm 处显著下降了 46.82%。



不同小写字母表示处理间差异极显著 ( $P<0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level. The same as follows.

图2 不同田面水深条件下水体光照强度(A)、温度(B)、pH(C)及溶解氧(D)变化

Fig.2 Changes of light intensity(A), temperature(B), pH(C) and dissolved oxygen(D) of groundwater under different field water depth

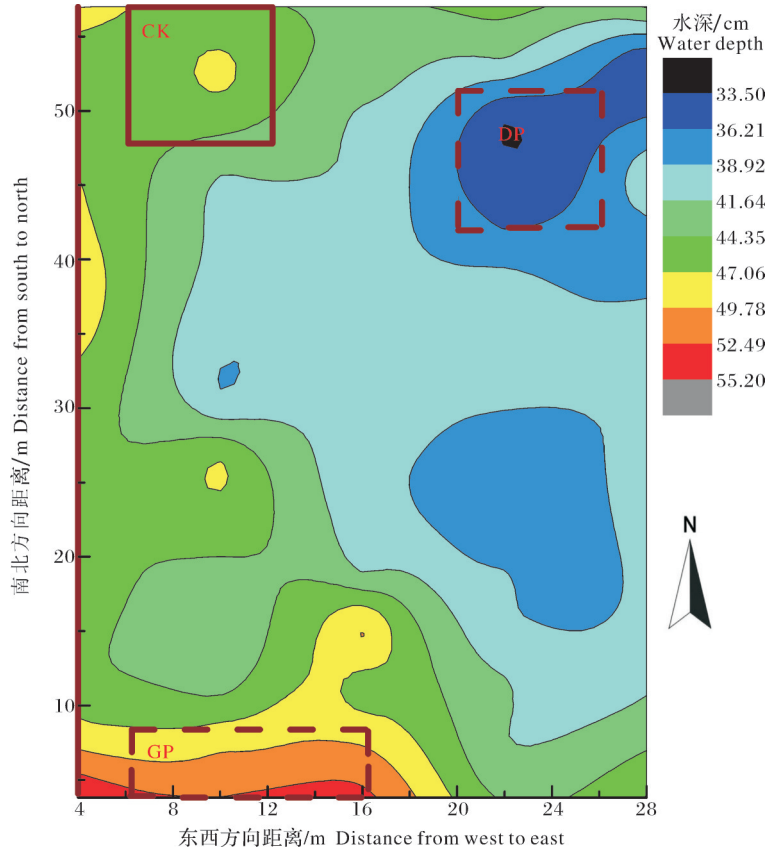
### 2.3 基于小龙虾田间分布特征的采样区

根据田面水深(地形)设置了小龙虾高频分布采

样区 GP、低频分布采样区 DP 以及无虾对照区 CK, 共 3 个矩形区域。根据图 3 所示, 以稻田田面西南角

为原点(0,0),*x*、*y*轴单位为m,则GP矩形区域的西南、东北2个顶点坐标分别为(6.2,0)和(16.2,6),面积60 m<sup>2</sup>,DP的西南、东北2个顶点坐标分别为

(18.0,42.5)和(26.0,50.5),面积64 m<sup>2</sup>,CK的西南、东北2个顶点坐标分别为(6.2,47.8)和(14.2,55.8),面积64 m<sup>2</sup>。



GP:小龙虾高频分布采样区;DP:小龙虾低频分布采样区;CK:无虾对照区;下同。GP: Sampling area of high frequency distribution of crayfish; DP: Sampling area of low frequency distribution of crayfish; CK: Control area of non-crayfish. The same as follows.

图3 田间地形与采样区设置

Fig.3 Field topography and sampling area setting

2.4 小龙虾不同分布频度对土壤肥力的影响

由表1可知,在0~10 cm土层,GP的土壤有机质比DP和CK分别高6.24%和10.30% ( $P < 0.05$ ),GP的土壤微生物生物量碳比DP和CK分别高43.70%和60.02% ( $P < 0.05$ );3个处理间的可溶性有机碳

(DOC)、铵态氮和硝态氮含量无显著差异。在10~20 cm土层,GP的MBC比DP和CK分别高25.07%和45.23% ( $P < 0.05$ )。说明小龙虾高频分布能显著增加0~10 cm土壤有机质,显著增加0~20 cm土层的土壤微生物生物量碳。

表1 小龙虾不同分布频度对土壤肥力的影响

Table 1 Effects of different distribution frequencies of crayfish on soil fertility

处理 Treatments	土壤有机质/(g/kg) Soil organic matter		微生物生物量碳/(mg/kg) Microbial biomass C		可溶性有机碳/(mg/kg) Dissolved organic C		铵态氮/(mg/kg) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N		硝态氮/(mg/kg) NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
GP	34.48± 1.13a	31.06± 1.92a	35.17± 7.83a	23.06± 3.42a	97.76± 16.07a	59.81± 7.16b	20.65± 1.84a	10.23± 1.26a	2.29± 0.15a	2.00± 0.06b
DP	32.33± 0.53b	29.03± 1.41a	19.80± 0.91b	17.28± 2.04b	133.18± 42.09a	82.56± 5.95a	17.67± 1.74a	13.55± 1.66a	2.63± 0.21a	2.50± 0.38a
CK	30.93± 1.06b	29.68± 1.25a	14.06± 2.16b	12.63± 2.97b	112.81± 12.41a	75.04± 6.73a	17.85± 2.48a	10.65± 1.20a	2.66± 0.27a	1.81± 0.15b

## 2.5 小龙虾不同分布频度对土壤结构的影响

由表2可知,在0~10 cm土层,GP的土壤容重显著低于其他处理,孔隙度则均显著高于其他处理;DP的土壤容重显著低于CK,但是两者的土壤孔隙度差

异不显著。在10~20 cm土层,3个处理的土壤容重和孔隙度均无显著差异,但各项指标数据均与0~10 cm土层保持相似的趋势。说明小龙虾高频分布能显著改善0~10 cm土壤结构。

表2 小龙虾不同分布频度对土壤结构的影响

Table 2 Effects of different distribution frequencies of crayfish on soil structure

处理 Treatments	土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density		毛管孔隙度/% Capillary porosity		非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity		总孔隙度/% Total porosity	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
GP	1.20±0.05c	1.26±0.03a	47.30±0.80a	41.27±0.75a	5.57±0.21a	3.43±0.25a	52.87±0.78a	44.70±1.00a
DP	1.28±0.01b	1.32±0.06a	43.57±1.34b	40.00±1.44a	5.03±0.15b	3.47±0.15a	48.60±1.25b	43.47±1.44a
CK	1.36±0.02a	1.37±0.06a	42.40±0.78b	39.27±0.91a	4.77±0.31b	3.30±0.44a	47.17±0.57b	42.57±1.10a

## 2.6 小龙虾不同分布频度对病虫害的影响

由表3可知,各处理的稻曲病病穗率和螟虫危害产生的白穗现象均无显著差异。说明小龙虾不同分布频度对病虫害无显著影响。由表4可知,GP处理的5项杂草生物多样性指标均低于DP和CK,除

Pielou均匀度指数外,其他4项指标均达到显著差异;DP的物种丰富度指数显著高于CK,其他4项指标无显著差异。说明小龙虾高频分布能显著抑制杂草的种类和数量,显著降低Shannon和Simpson生物多样性指数。

表3 小龙虾不同分布频度对病虫害的影响

Table 3 Effects of different distribution frequencies of crayfish on diseases and insect pests

处理 Treatments	稻曲病病穗率 Diseased panicle rate of rice false smut	整白穗率 Whole white panicle rate	部分白穗率 Partial white panicle rate
GP	8.00±3.74a	2.00±2.00a	4.00±2.45a
DP	6.00±4.00a	4.00±2.45a	4.00±2.45a
CK	6.00±2.45a	2.00±2.00a	2.00±2.00a

表4 小龙虾不同分布频度对杂草生物多样性的影响

Table 4 Effects of different distribution frequencies of crayfish on weed biodiversity

处理 Treatments	杂草密度/(株/m <sup>2</sup> ) Total number of weeds	物种丰富度指数 Species richness	Shannon指数 Shannon index	Simpson指数 Simpson index	Pielou均匀度指数 Evenness index
GP	4.00±1.41b	2.40±0.55c	0.75±0.20b	0.48±0.10b	0.87±0.10a
DP	7.40±1.14a	5.20±0.45a	1.58±0.09a	0.78±0.02a	0.96±0.02a
CK	7.40±1.82a	4.40±0.55b	1.39±0.11a	0.73±0.03a	0.94±0.02a

## 2.7 小龙虾不同分布频度对水稻产量及其构成因子的影响

由表5可知,3个处理的产量及其产量构成因子均无显著差异,但GP的各项指标均为最高。每穗粒

数、结实率指标均呈现出GP>DP>CK的趋势。DP的有效穗数、千粒重和实际产量低于CK。说明小龙虾不同分布频度对水稻产量及其构成因子无显著影响,但小龙虾高频分布具有增加产量的趋势。

表5 小龙虾不同分布频度对产量及其构成因子的影响

Table 5 Effects of different distribution frequencies of crayfish on Yield and its components

处理 Treatments	有效穗数/(万穗/hm <sup>2</sup> ) Valid panicles	每穗粒数 Grain number per spike	结实率/% Filled grains rate	千粒重/g 1 000-grain weight	实际产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Actual yield
GP	337.04±13.76a	146.67±14.18a	95.22±0.02a	21.30±0.43a	7 601±490a
DP	326.08±12.38a	136.67±23.56a	94.55±0.02a	20.96±0.37a	7 348±421a
CK	328.82±20.80a	130.33±19.86a	94.07±0.04a	21.14±0.76a	7 423±523a

### 3 讨论

克氏原螯虾喜好底栖爬行, 偏好深水区域, 具有喜阴怕光、昼伏夜出的生活习性<sup>[13-15]</sup>。这是沉底地笼捕虾的生物学基础, 本试验中深水区域的小龙虾捕获量高于浅水区域, 符合这些特点。水稻与小龙虾主要共生时期为6—8月, 高温、强光不利于小龙虾生长, 本研究发现水体光照度和温度随水深的增加呈现下降趋势, 这可能是小龙虾趋利避害、偏好深水区域的重要原因<sup>[14]</sup>。虽然溶解氧和pH也随着水深降低, 但小龙虾具有较强的耐受性, 这2项指标并未超出小龙虾耐受范围<sup>[15]</sup>。

稻虾共作可以提升稻田土壤肥力<sup>[2,16]</sup>, 土壤有机质含量随着稻虾共作年限的增加呈上升趋势<sup>[8]</sup>, Yuan等<sup>[17]</sup>研究认为长期稻虾共作可以提高土壤有机碳和微生物生物量碳。本研究结果显示小龙虾高频活动可以提高0~10 cm土层有机质、微生物生物量碳、铵态氮和硝态氮, 其中前两者达到显著差异, 可以使10~20 cm土层微生物生物量碳显著增加, 这些变化的原因可能是由于小龙虾高频的摄食、排泄等生理活动将更多的饲料、杂草等有机物料带入土壤中, 增加了土壤有机质含量<sup>[4]</sup>, 同时大量排泄物为微生物提供了丰富的碳源, 促使微生物生物量碳增加<sup>[17]</sup>。Si等<sup>[8]</sup>研究指出长期稻虾共作可以使土层可溶性有机碳显著增加, 但微生物生物量碳无显著差异, 与本研究结果正好相反, 这可能是由于不同采样区域选择方式和不同采样时机造成的差异。稻虾共作可以改善土壤结构<sup>[17-18]</sup>, 蔡晨等<sup>[19]</sup>认为, 在0~20 cm和20~40 cm土层中, 稻虾共作可以降低土壤容重、增加孔隙度, 本研究结果显示小龙虾高频分布能显著改善0~10 cm土壤结构, 但对10~20 cm土壤结构影响不大, 这可能是由于田面覆水条件下, 小龙虾主要在田埂而非田面掘穴, 其活动集中于田面表层, 主要影响田面浅层土壤<sup>[13-16]</sup>。本试验中DP与CK在土壤结构和土壤肥力上的差异仅表现在0~10 cm土壤容重和10~20 cm土壤硝态氮上存在显著差异, 而其他指标无显著差异, 这一现象可能是由于试验地经过连续多年稻虾种养以及上半年田面养虾后机械整田, 导致DP和CK区域土壤结构和肥力差异降低。

小龙虾是杂食性动物<sup>[13-14]</sup>, 会取食田泥中的杂草种子或嫩芽, 进而降低稻田杂草数量<sup>[20]</sup>。与之类似, 河蟹也会摄取杂草种子和幼芽, 稻蟹共生的杂草植株和鲜重防效可达50%<sup>[21]</sup>, 肖求清<sup>[22]</sup>认为稻虾共

作可以有效降低杂草生物多样性, 郭瑶等<sup>[11]</sup>研究指出随着稻虾共作年限的增加杂草生物多样性指标呈先降低或升高的趋势, 但均低于中稻单作, 可能是由于长期稻虾共作改变了杂草优势物种。上述结果在本研究中得到了验证。

多数研究认为稻虾共作模式下水稻产量高于常规单作稻田<sup>[2,18,23]</sup>, 曹凑贵等<sup>[2]</sup>指出稻虾模式较水稻单作模式可增产4.63%~14.01%, 佘国涵等<sup>[18]</sup>认为增幅可达9.5%, 王金华<sup>[23]</sup>研究指出稻虾田投食能显著增加水稻的产量、有效穗数、结实率和每穗粒数, 但对千粒重的影响不显著。但是, 也有研究认为水稻产量无显著差异<sup>[24]</sup>, Sun等<sup>[10]</sup>在江汉平原稻虾模式试验研究中发现稻虾田水稻产量比水稻单作田低。本研究结果表明小龙虾高频分布有利于提高稻虾产量, 一方面可能是未被小龙虾吸收的饲料氮和小龙虾排泄物中氮素进入土壤水体被根系吸收<sup>[25]</sup>, 另一方面可能是由于小龙虾在田面频繁活动和取食能疏松表土, 改善稻田土壤的通透性, 刺激水稻生长<sup>[15,26]</sup>。

综上所述, 稻虾共作模式中, 小龙虾并非在田面均匀分布, 而是随水深加深而分布频度加大, 小龙虾的高频分布, 利于控制稻田杂草、改善土壤结构并部分提高土壤肥力, 具有增产潜力, 因而可以起到“减肥减药”和增产的生态效果。因此, 生产上可以适当在田面深水区域多进行投喂与捕捞, 既可避免人力资源浪费, 又可避免饲料投喂不均衡导致的环境负担与小龙虾竞争内耗; 科研上可以适当区分小龙虾高、低频分布区域进行稻虾共作模式研究分析, 进一步解析稻虾共生机理, 推进稻虾生态种养绿色可持续发展。

### 参考文献 References

- [1] 秦尊文. 以“虾稻共作”模式为抓手推进体制机制创新——潜江市全国中小城市综合改革的观察与思考[J]. 中国发展, 2016, 160(6): 51-56. QIN Z W. Propel the innovation of system and mechanism with the “Rice-crayfish co-culture” mode: observation and reflection of comprehensive reform in Qianjiang as a nation wide small-medium city[J]. China development, 2016, 160(6): 51-56(in Chinese).
- [2] 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 strategy for its sustainable development[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(9): 1245-1253(in

- Chinese with English abstract).
- [3] YUAN P L, WANG J P, CHEN S W, et al. Certified rice-crayfish as an alternative farming modality in waterlogged land in the Jiangnan Plain region of China [J]. *Agronomy journal*, 2021, 113 (6): 4568-4580.
- [4] JIANG Y, CAO C G. Crayfish-rice integrated system of production: an agriculture success story in China, a review [J/OL]. *Agronomy for sustainable development*, 2021, 41: 68 [2022-05-06]. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00724-w>.
- [5] 朱波, 曹鹏, 周勇, 等. 试论稻虾综合种养模式与水稻可持续发展: 以湖北省为例 [J]. *作物研究*, 2021, 35 (5): 474-478, 537. ZHU B, CAO P, ZHOU Y, et al. Rice-crawfish cropping system and rice production sustainable development: a case study of Hubei Province [J]. *Crop research*, 2021, 35 (5): 474-478, 537 (in Chinese with English abstract).
- [6] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国小龙虾产业发展报告(2021) [J]. *中国水产*, 2021 (7): 27-33. Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Extension Station, China Fisheries Society. China crayfish industry development report (2021) [J]. *China fisheries*, 2021 (7): 27-33 (in Chinese).
- [7] 陈松文, 江洋, 汪金平, 等. 湖北省稻虾模式发展现状与对策分析 [J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39 (2): 1-7. CHEN S W, JIANG Y, WANG J P, et al. Situation and countermeasures of integrated rice-crayfish farming in Hubei Province [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39 (2): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [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/OL]. *Scientific reports*, 2017, 7: 2856 [2022-05-06]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02984-7>.
- [9] XU Q, LIU T, GUO H L, et al. Conversion from rice-wheat rotation to rice-crayfish co-culture increases net ecosystem service values in Hung-tse Lake area, east China [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 319: 128883 [2022-05-06]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128883>.
- [10] SUN Z C, GUO Y, LI C F, 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] 郭瑶, 肖求清, 曹湊贵, 等. 稻虾共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39 (2): 17-24. GUO Y, XIAO Q Q, CAO C G, et al. Effects of rice-crayfish co-culture ecosystems on weed community composition and species diversity in paddy fields [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39 (2): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刁春友, 朱叶芹. 农作物主要病虫害预测预报与防治 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2006: 49-129. DIAO C Y, ZHU Y Q. Prediction and control of major crop diseases and pests [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2006: 49-129 (in Chinese).
- [13] 谢文星, 董方勇, 谢山, 等. 克氏原螯虾的食性、繁殖和栖息习性研究 [J]. *水利渔业*, 2008, 28 (4): 63-65. XIE W X, DONG F Y, XIE S, et al. Study on feeding habits, reproduction and habit at of crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Reservoir fisheries*, 2008, 28 (4): 63-65 (in Chinese).
- [14] 徐加元. 影响克氏原螯虾繁殖与生长的物理和营养因子的研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2008. XU J Y. Study on physical and nutritional factors affecting the reproduction and growth of crayfish [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [15] 程慧俊. 克氏原螯虾稻田养殖生态学的初步研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2014. CHENG H J. A preliminary study on the ecological aspects of culture the crayfish (*Procambarus clarkii*) in rice fields [D]. Wuhan: Hubei University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [16] 许元钊. 克氏原螯虾养殖对稻田生态系统影响的初步研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2020. XU Y Z. Preliminary study on the impact of shrimp culture on paddy ecosystem [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [17] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set [J/OL]. *Soil and tillage research*, 2020, 204: 104732 [2022-05-06]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104732>.
- [18] 卞国涵, 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 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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 physico-chemical properties in Jiangnan Plain [J]. *Acta pedologica sinica*, 2019, 56 (1): 217-226 (in Chinese with English abstract).
- [20] 徐大兵, 贾平安, 彭成林, 等. 稻虾共作模式下稻田杂草生长和群落多样性的调查 [J]. *湖北农业科学*, 2015, 54 (22): 5599-5602. XU D B, JIA P A, PENG C L, et al. Investigation of weed growth and community diversity in the rice-crayfish symbiosis farming [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2015, 54 (22): 5599-5602 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生对稻田杂草的生态防控试验研究 [J]. *湖北农业科学*, 2011, 50 (8): 1574-1578. LÜ D F, WANG W, MA X Z, et al. Ecological prevention and control of weeds in rice-crab poly cultured field [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2011, 50 (8): 1574-1578 (in Chinese with English abstract).
- [22] 肖求清. 稻虾共作对稻田生物多样性的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. XIAO Q Q. Effects of rice-crayfish farming on biodiversity of paddy field [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王金华. 稻虾系统中土壤氮素动态特征与转化规律研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. WANG J H. Study on dynamic characteristics and transformation law of soil nitrogen in rice shrimp sys-

- tem[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [24] 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(in Chinese with English abstract).
- [25] HU L L, REN W Z, TANG J J, et al. The productivity of traditional rice-fish co-culture can be increased without increasing nitrogen loss to the environment[J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2013, 177: 28-34.
- [26] 石世杰, 李纯杰, 曹凑贵, 等. 稻虾共作模式下不同播种期对水稻产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 25-32. SHI S J, LI C J, CAO C G, et al. Effects of different sowing date on yield and quality of high quality rice in rice crayfish ecosystem[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 25-32(in Chinese with English abstract).

## Symbiotic mechanisms of rice-crayfish based on field distribution of crayfish

ZHOU Yong<sup>1,2</sup>, LI Haoxuan<sup>1</sup>, DONG Hongrui<sup>1</sup>, LI Chengwei<sup>1</sup>,  
ZHU Bo<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, JIN Tao<sup>1</sup>, LIU Zhangyong<sup>1</sup>

1. Hubei Province Collaborative Innovation Centre for Grain Industry/College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Quality Control of Characteristic Fruits and Vegetables/College of Life Science and Technology, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China

**Abstract** Rice-crayfish co-culture system is a successful model of the coupling development of green rice and green aquatic products. The field distribution characteristics of crayfish in high-frequency distribution sampling area (GP), low-frequency distribution sampling area (DP) and none-crayfish control area (CK) were studied with cage capture method to explore the symbiotic mechanism of rice and crayfish. The soil properties, diseases, pests and weeds in rice field and the yield of rice were investigated to study the ecological effects of rice-crayfish co-culture system. The results showed that there was a significant positive correlation between the distribution quantity of crayfish in paddy field and the water depth, with the univariate linear regression equation of  $y=197.69x-25.77$ . The high frequency distribution of crayfish improved the soil structure, significantly reduced the soil bulk density of 0-10 cm by 6.25%-11.76%, and significantly increased the total capillary porosity of 0-10 cm soil layer by 8.08%-10.78% ( $P<0.05$ ). The high frequency distribution of crayfish significantly increased the content of organic matter in 0-10 cm soil by 6.24%-10.30% and the microbial biomass carbon in 0-20 cm soil layer ( $P<0.05$ ), and significantly inhibited the growth of weeds. Different distribution frequencies of crayfish had no significant impacts on diseases and pests, yield and yield components of rice, but the yield tended to increase with the increase of distribution frequency. Therefore, different distribution frequencies (water depth) of crayfish can be properly distinguished by management and studied in terms of production and scientific research to promote the green and sustainable development of ecological planting and breeding of rice and crayfish.

**Keywords** rice-crayfish co-culture system; field distribution of crayfish; ecological effect; symbiotic mechanism

(责任编辑: 张志钰)