

DOI:10.14188/j.ajsh.2020.03.003

虾稻综合种养系统浮游动物群落结构及其与环境因子的关系

喻记新^{1,2}, 向贤芬³, 李 为¹, 苑 晶¹, 刘家寿¹, 张堂林^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 江汉大学 生命科学学院, 湖北 武汉 430056;

3. 武汉科乐多生物科技有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为探究虾稻综合种养(integrated crayfish-rice co-culture, ICRC)系统浮游动物的群落结构特征及其主要影响因素, 对潜江市典型 ICRC 稻田渔沟和田面水体的浮游动物进行了季度研究, 并分析了浮游动物和浮游植物、水体理化因子之间的相关性。结果显示:(1)共采集浮游动物 60 种, 分别包含原生动物、轮虫、枝角类和桡足类 12、28、10、10 种(属), 其中, 优势类群为剑水蚤目无节幼体、桡足幼体以及蚤状溞(*Daphnia pulex*); Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数的年均值分别为 1.48、3.42 和 0.55;(2)浮游动物密度和生物量的变化范围分别为 7.65~1309.50 ind./L、0.08~50.04 mg/L, 年均值分别为 360.0 ind./L、17.45 mg/L, 桡足类和枝角类在密度和生物量上均占有绝对优势;(3)浮游动物物种数、多样性指数(田面除外)、密度和生物量均表现出明显的季节差异, 其中密度和生物量在春季显著最高, 相关性分析表明浮游动物物种数和资源量主要受总磷、浮游植物密度与生物量的影响;(4)浮游动物的物种数、多样性、密度和生物量在渔沟和田面两种生境间无明显差异。本研究表明 ICRC 系统中有丰富的大型浮游动物资源未得到利用, 同时鉴于浮游动物可作为小龙虾早期生活史阶段的食物来源, 需进一步研究秋冬季浮游动物变化, 以及如何培育和合理利用此阶段的浮游动物以促进幼虾生长、提高存活率。

关键词: 虾稻综合种养; 浮游动物; 现存量; 生物多样性; 时空差异

中图分类号: Q958.8

文献标识码: A

文章编号: 2096-3491(2020)03-0279-08

Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in integrated crayfish-rice co-culture system

YU Jixin^{1,2}, XIANG Xianfen³, LI Wei¹, YUAN Jing¹, LIU Jiashou¹, ZHANG Tanglin^{1*}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. School of Life Sciences, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China;

3. Wuhan Clado Biotechnology Company Limited, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: To understand the zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in the integrated crayfish-rice co-culture (ICRC) system, the species, density and biomass of zooplankton were quarterly investigated in both the trench and rice paddy in four typical ICRC fields in Qianjiang City, China, and the relation of zooplankton to 6 water factors and phytoplankton were analyzed. The main results showed that: (1) There were 60 species in the ICRC system, which included 12, 28, 10 and 10 species of Protozoa, Rotifera, Cladocera and Copepoda, respectively. The dominant taxa were Cyclopoida copepodite, nauplius and *Daphnia pulex*. The annual mean values of the Shannon-

收稿日期: 2020-04-24 修回日期: 2020-05-06 接受日期: 2020-05-26

作者简介: 喻记新(1990-), 男, 博士, 助教, 研究方向: 养殖和渔业生态学。E-mail: jxyu001@126.com

* 通讯联系人: 张堂林(1964-), 博士, 研究员, 研究方向: 水产养殖和渔业生态学。E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2018ABA102; 2016ABA123); 国家重点研发计划课题(2019YFD0900304); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203081-4)

引用格式: 喻记新, 向贤芬, 李为, 等. 虾稻综合种养系统浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生物资源, 2020, 42(3): 279-286.

Yu J X, Xiang X F, Li W, et al. Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in integrated crayfish-rice co-culture system [J]. Biotic Resources, 2020, 42(3): 279-286.

Wiener index, Margalef index and Pielou index were 1.48, 3.42 and 0.55, respectively. (2) The ranges of zooplankton density and biomass were 7.65-1 309.50 ind./L and 0.08-50.04 mg/L, respectively, with annual average values of 360.0 ind./L and 17.45 mg/L, respectively, and Cladocera and Copepoda were the absolutely dominant groups. (3) The number of species, diversity indexes (excepting at rice paddy), density and biomass of zooplankton showed significant seasonal differences, with significantly highest density and biomass in spring, and the Pearson correlation analysis showed that species number, density and biomass of zooplankton were significantly correlated to total phosphorus content, and density and biomass of phytoplankton. (4) There was no significant difference between the trench and rice paddy for any of the indicators of species number, diversity, density and biomass of zooplankton. These results indicate that there is plentiful and unutilized large zooplankton in ICRC system. And as zooplankton is an important food item for the early life history stage of crayfish, zooplankton and its influencing factors in autumn and winter, and how to cultivate and use zooplankton at this stage to promote the growth and survival of juvenile crayfish, should be further studied.

Key words: Integrated crayfish-rice co-culture; zooplankton; standing crop; biodiversity; spatiotemporal change

0 引言

克氏原螯虾(又名小龙虾, *Procambarus clarkii*)的养殖近年在中国取得了迅速发展,成为中国甲壳类淡水养殖第一品种^[1]。目前中国养殖小龙虾的主要方式包括虾稻综合种养、池塘(含虾蟹混养)养殖、藕虾套养等,其中虾稻综合种养的面积和产量均超过全国小龙虾养殖面积和产量的70%^[1]。稻田中具有丰富的天然饵料,蕴含着不可忽略的自然资源和初级生产力^[2],其种类组成和数量变动不仅反映了水环境特征,也与渔业生产力有密切关系,这是稻鱼互利的基础之一。小龙虾为杂食性动物,可摄食稻田中的水生昆虫、小型软体动物、蝌蚪、小鱼、小虾、鱼卵、浮游生物、高等水生植物和碎屑等^[3-5]。认识虾稻综合种养系统天然饵料及其利用情况对提高天然饵料的利用效率、优化投喂具有重要价值。

浮游动物是小龙虾的重要食物源之一。有报道指出,投饲条件下虾稻综合种养田中浮游动物对小龙虾食谱的贡献为11.15%~16.87%^[5]。除了作为饵料生物,浮游动物也是虾稻综合种养生态系统的重要组成部分。浮游动物摄食浮游植物、微生物,进而作为更高营养级捕食者的饵料,同时也可调节水体水华,有利于稻田生态系统的稳定。然而目前对虾稻综合种养系统的浮游动物报道较少,也不清楚其被小龙虾的利用情况,仅隋燚等^[6]报道了4~7月浮游动物的多样性、密度和生物量。为了认识虾稻综合种养系统浮游动物的群落与数量特征,及水环境因子、浮游植物对其的影响,本研究对典型虾稻综合种养系统渔沟和田面两种生境的浮游动物进行了季度研究,分析了其多样性、数量变化,及与重要水环境因子、浮游植物密度与生物量之间的相关性,以期了解、培育和利用虾稻综合种养系统的浮游动物资源、优化饲料投喂等提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在湖北潜江市(112°29'E~113°01'E, 30°04'N~30°39'N)后湖管理区张家窑分场虾稻综合种养基地进行,该基地规模为560亩(一亩为667 m²),共有14块面积相等的稻田,种养方式为虾稻连作+共作(下文将阐述该模式)。潜江位于江汉平原腹地,境内水资源丰富,素有“鱼米之乡”美誉,是“虾稻连作”的发源地和“中国小龙虾之乡”。

1.2 试验设计和田间管理

选取4块种养管理相同的稻田采样,每块稻田的有效面积为35亩,其中田面(种稻区)30亩、渔沟5亩。稻田的结构如图1,渔沟分为环沟和田间沟,环沟深1.5 m,宽4 m;田间沟深1.0 m,宽1.8 m;稻田间有独立的进排水沟;每块稻田四周均安装高0.5 m的石棉瓦防逃墙。

3月初在渔沟中种植伊乐藻(*Elodea nuttallii*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*),水草长势稳定后维持使其覆盖度在渔沟面积的20%左右。3月20日投放种虾,规格为3~5 g,数量为每亩10 000尾。投喂以专用饲料为主(28%粗蛋白,4%粗脂肪,8%粗纤维,扶龙龙虾配合饲料,湖北渴望牧业有限责任公司),投喂量依据摄食情况和天气调整,日投喂量为小龙虾总生物量(估算)的3%~8%。捕捞主要在4月下旬至6月上旬,工具为地笼,并留足虾供自然繁殖。6月下旬插秧,品种为中稻黄华占(粤审稻2005010);插秧前在田间施复合肥(N-P₂O₅-K₂O:17-17-17)每亩20 kg,插秧后施尿素每亩10 kg;10月中下旬割稻。7~8月每半个月换一次水,每次换水量为渔沟水量的30%左右。种稻期间田面基本无水或水位很低,小龙虾基本都在渔沟中;割稻后灌水淹没田面,小龙虾可进入田面活

动、摄食。多年间小龙虾和稻谷的平均产量分别为每亩104和593 kg^[7]。

1.3 样品采集与分析

分别在2014年8月、2014年11月、2015年2月、2015年5月(分别代表夏、秋、冬、春季)采样,其中8月田面基本无水,未采集田面样品。由于稻田水体较小,仅采集了定量样品^[8]。取20 L表层水,用13号浮游生物网过滤,样品现场加4%的甲醛固定。浮游动物的种类鉴定及计数参照相关文献^[9~11]。为探究浮游动物与浮游植物的关系,按标准方法^[11,12]对每个样点浮游植物的物种、密度和生物量等进行研究。

同时对6项水体理化因子进行了测定,包括水温(WT)、pH、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP),水样采集方法和水质测定方法见Yu等^[7]。

1.4 数据处理

浮游动物多样性分析采用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)来描述浮,采用Pinkas相对重要性指数IRI描述群落优势种的优势度^[13],计算公式如下:

$$H' = -\sum (N_i/N) \times \ln(N_i/N)$$

$$D = (S-1)/\ln N$$

$$J = H'/\ln S$$

$$IRI = (Q\% + W\%) \times F\% \times 10\,000$$

式中: S 为群落中所有的物种数; N 为群落中物

种的总数量; N_i 为第 i 种的数量; $Q\%$ 为某一种类的数量占总数量的百分比; $W\%$ 为某一种类的重量占总重量的百分比; $F\%$ 为某一种类出现的频数占总采样次数的百分比。按照Pinkas相对重要性指数IRI, $IRI > 1\,000$ 为优势种, $100 < IRI < 1\,000$ 为重要种, $10 < IRI < 100$ 为常见种, $1 < IRI < 10$ 为一般种, $IRI < 1$ 为少见种。

数据计算、作图和统计检验用Excel 2007和SPSS 13.0完成。先检验数据的正态性。对于季节间差异,满足正态性的数据用Oneway ANOVA检验,若满足方差齐性,则用LSD(Least-Significant Difference)检验判断差异显著性;若数据不满足正态性或方差齐性,则用Kruskal-Wallis非参数检验,且对有显著差异的结果进行Mann-Whitney检验。用 T 检验比较渔沟和田面各指标的差异。用Pearson相关性分析探讨浮游动物各指标和水质因子、浮游植物密度与生物量的相关性,并对其中具有显著相关的两个参数作散点图,剔除明显不具备线性关系的两个变量。显著和极显著水平分别为 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 种类组成和优势类群

虾稻综合种养系统共检出浮游动物60种(属),原生动物、轮虫、枝角类和桡足类分别为12、28、10和10种(属)(表1)。其中渔沟中共有51种(属),春、

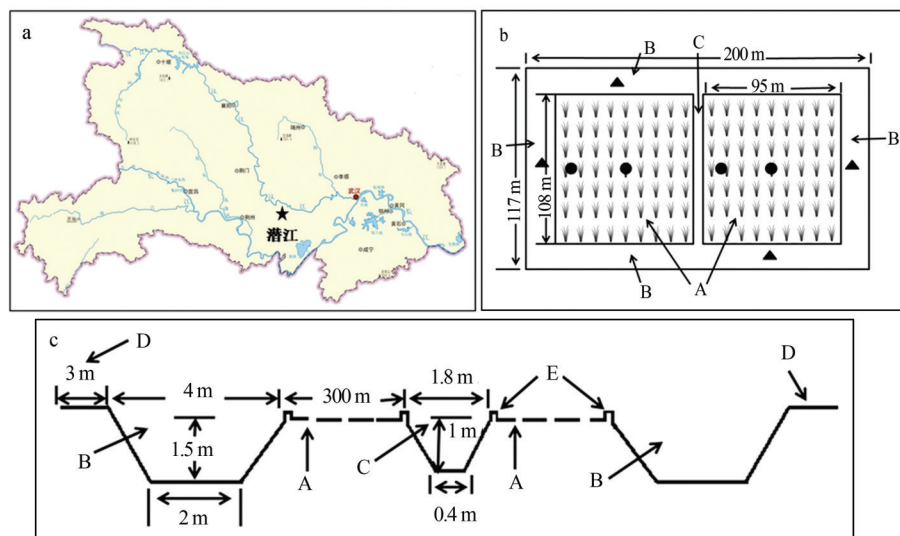


图1 研究样地位置、田间工程设计与样点设置

Fig. 1 Study area, field engineering design and sampling point design

注:a为研究样地位置(五角星);b为稻田平面图及样点设置,其中▲为渔沟采样点,●为田面采样点;c为稻田剖面图,其中A为田面,B为环沟,C为中间沟,D为外堤埂,E为内堤埂

Note: a is study area location (pentagram); b is plane figure of rice-crayfish plot, in which ▲ is trench sampling points, ● is rice paddy sampling points; c is cross-section of rice-crayfish plot, in which A is rice paddy, B is peripheral trench, C is cross trench, D is external ridge, E is internal field ridge

夏、秋和冬季的物种数分别为 19、10、16 和 12 种(属), 春季物种数显著高于秋季和冬季($P<0.01$), 其他季节间的物种数差异不显著; 田面共有 47 种(属), 春、秋和冬季的物种数分别为 20、16 和 15 种(属), 三个季节间物种数无明显差异(表 2)。各季节渔沟和田面的物种数均无显著差异($P>0.05$)。

根据 IRI 值, 渔沟中的优势种为剑水蚤目桡足幼体 (IRI: 4902) 与无节幼体 (IRI: 3797)、蚤状溞 (IRI: 1886), 重要种包括钟虫 (IRI: 184)、纤毛虫 (IRI: 698)、短尾秀体溞 (IRI: 817)、钩弧网纹溞 (IRI: 244)、方形网纹溞 (IRI: 240)、微型裸腹溞 (IRI:

114)、舌状叶镖水蚤 (IRI: 891)、短尾温剑水蚤 (IRI: 201)。田面的优势种也为剑水蚤目桡足幼体 (IRI: 5342) 与无节幼体 (IRI: 4157)、蚤状溞 (IRI: 2433), 重要种包括纤毛虫 (IRI: 174)、短尾秀体溞 (IRI: 723)、方形网纹溞 (IRI: 349)、微型裸腹溞 (IRI: 256)、舌状叶镖水蚤 (IRI: 314)、锯缘真剑水蚤 (IRI: 173)、近邻剑水蚤 (IRI: 258)、刘氏中剑水蚤 (IRI: 106)、哲水蚤目桡足幼体 (IRI: 148)。

2.2 物种多样性

各季节浮游动物的群落多样性指数 H' 、 D 和 J 值在渔沟中均呈现出明显的季节变化, 但在田面则

表 1 虾稻综合种养系统的浮游动物种类组成
Table 1 List of zooplankton species found in integrated crayfish-rice co-culture system

类别	种名	拉丁名	类别	种名	拉丁名
原生动物		Protozoa		前节晶囊轮虫	<i>Asplanchna priodonta</i>
	球形砂壳虫	<i>Diffugia globulosa</i>		透明囊足轮虫	<i>Asplanchnopus hyalinus</i>
	针棘匣壳虫	<i>Centropyxis aculeata</i>		广布多肢轮虫	<i>Polyarthra vulgaris</i>
	僧帽肾形虫	<i>Colpoda cucullus</i>		前翼轮虫	<i>Proales</i> sp.
	弯凸表壳虫	<i>Arcella gibbosa</i>		盘镜轮虫	<i>Testudinella patina</i>
	普通表壳虫	<i>Arcella vulgaris</i>		中吻轮虫	<i>Encentrum</i> sp.
	纤毛虫	<i>Ciliate</i> sp.		暗小异尾轮虫	<i>Trichocerca pusilla</i>
	绿草履虫	<i>Paramecium bursaria</i>		罗氏异尾轮虫	<i>Trichocerca rousseleti</i>
	钟虫	<i>Vorticella</i> sp.		等刺异尾轮虫	<i>Trichocerca similis</i>
	绿急游虫	<i>Strombidium viride</i>		唇形叶轮虫	<i>Notholca labis</i>
	旋回侠盗虫	<i>Strobilidium gyrans</i>	枝角类		Cladocera
	王氏似铃壳虫	<i>Tintinnopsis wangi</i>		方形网纹溞	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>
	放射太阳虫	<i>Actinophrys sol</i>		短尾秀体溞	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>
轮虫		Rotifera		微型裸腹溞	<i>Moina micrura</i>
	角突臂尾轮虫	<i>Brachionus angularis</i>		同形溞	<i>Daphnia psittacea</i>
	尾突臂尾轮虫	<i>Brachionus caudatus</i>		晶莹仙达溞	<i>Sida crystallina</i>
	裂足臂尾轮虫	<i>Brachionus diversicornis</i>		蚤状溞	<i>Daphnia pulex</i>
	剪形臂尾轮虫	<i>Brachionus forficula</i>		圆形盘肠溞	<i>Chydorus sphaericus</i>
	短棘剪形臂尾轮虫	<i>Brachionus forficula reducta</i>		大洋洲弯尾溞	<i>Camptocercus australis</i>
	皱褶臂尾轮虫	<i>Brachionus plicatilis</i>		萨氏矩形溞	<i>Coronatella rectangula</i>
	长棘方形臂尾轮虫	<i>Brachionus quadridentatus</i>		点滴尖额溞	<i>Alona guttata</i>
	壶状臂尾轮虫	<i>Brachionus urceolaris</i>	桡足类		Copepoda
	无棘龟甲轮虫	<i>Keratella tecta</i>		舌状叶镖水蚤	<i>Phyllodiaptomus tunguidus</i>
	矩形龟甲轮虫	<i>Keratella quadrata</i>		锯缘真剑水蚤	<i>Eucyclops serrulatus</i>
	曲腿龟甲轮虫	<i>Keratella valga</i>		近邻剑水蚤	<i>Cyclops vicinus vicinus</i>
	长圆疣毛轮虫	<i>Synchaeta oblonga</i>		角突刺剑水蚤	<i>Acanthocyclops thomasi</i>
	四角平甲轮虫	<i>Platyas quadricornis</i>		刘氏中剑水蚤	<i>Mesocyclops leuckarti</i>
	钝角狭甲轮虫	<i>Colurella obtusa</i>		台湾温剑水蚤	<i>Thermocyclops taihokuensis</i>
	钩状狭甲轮虫	<i>Colurella uninata</i>		短尾温剑水蚤	<i>Thermocyclops brevifurcatus</i>
	卵形鞍甲轮虫	<i>Lepadella ovalis</i>		哲水蚤目桡足幼体	Calanoida copepodite
	蹄形腔轮虫	<i>Lecane unguolata</i>		剑水蚤目桡足幼体	Cyclopoida copepodite
	大肚须足轮虫	<i>Euchlanis dilatata</i>		剑水蚤目无节幼体	Cyclopoida nauplius

均无显著的季节变化($P>0.05$)。在渔沟中,秋季的 H' 显著最高($P<0.01$),冬季显著最低($P<0.01$); D 值在夏季显著最高($P<0.01$),冬季显著最低($P<0.01$); J 值在冬季显著低于其他季节($P<0.01$),其他季节间差异不明显($P>0.05$)。不论是春季、秋季还是冬季,各个指数在渔沟与田面间无明显差异($P>0.05$)(表2)。

2.3 密度和生物量

浮游动物全年的平均密度为 342.4 ind./L,其中原生动物、轮虫、枝角类和桡足类的平均密度分别为 12.3、6.9、130.4 和 192.7 ind./L(表3),可见枝角类和桡足类在密度上占有绝对优势,尤其是春季和冬季。不论是渔沟还是田面,秋季与冬季的密度均无显著差异($P>0.05$),其他季节间则均有极显著差异($P<0.01$),其中春季的密度最高。渔沟与田面的密度在各季节均无明显差异($P>0.05$)。

浮游动物全年的平均生物量为 16.742 mg/L,其中原生动物、轮虫、枝角类和桡足类的平均生物量分别为 0.0006、0.0509、6.59 和 10.10 mg/L(表4),桡足类和枝角类在生物量中的占比超过 99.7%。在渔沟中,夏季生物量显著最低($P<0.01$),春季显著最高($P<0.05$);在田面,春季的生

物量显著高于冬季($P<0.05$),其他季节间则无明显差异($P>0.05$)。渔沟与田面的生物量在各季节均无显著差异($P>0.05$)。

2.3 浮游动物与环境因子的相关性

虾稻综合种养系统渔沟和田面 6 个水质理化因子及浮游植物的密度与生物量的均值和标准误差见表 5。相关性分析表明,浮游动物物种数、密度和生物量均与 NO_2^- -N、TP、浮游植物密度、浮游植物生物量呈极显著正相关($P<0.01$),Shannon-Wiener 指数与 NO_2^- -N、TP 呈显著正相关($P<0.05$),Margalef 指数与 pH 呈极显著正相关关系($P<0.01$),Pielou 指数与 6 项环境因子之间均无明显的相关性($P>0.05$)(表6)。

3 讨论

本研究共检出浮游动物 60 属,这与黄明显等^[14]报道的鱼稻综合种养(鲤, *Cyprinus carpio*; 鲫, *Carassius auratus*)中的 75 种,及范红深^[15]报道的鱼-稻-鸭种养(异育银鲫, *Carassius auratus gibelio*)中的 59 种差异不大。各门类中轮虫的物种数最多,这与黄明显等^[14]、范红深^[15]和隋焱等^[6]的研究结果一致。除了钟虫和纤毛虫,本研究中其他的关键种和重要

表 2 虾稻综合种养系统浮游动物的群落多样性指数(均值±标准误)

Table 2 Community diversity indices of zooplankton in integrated crayfish-rice co-culture system (mean±stand error)

指数	渔沟				田面		
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	秋季	冬季
物种数	19±3 ^b	10±2 ^a	16±2 ^{ab}	12±3 ^a	20±2 ^a	16±5 ^a	15±4 ^a
H'	1.76±0.13 ^{bc}	1.42±0.32 ^{ab}	1.94±0.40 ^c	1.06±0.41 ^a	1.61±0.14 ^a	1.48±0.49 ^a	1.01±0.27 ^a
D	2.87±0.43 ^b	6.92±2.51 ^c	3.12±0.50 ^b	2.16±0.56 ^a	2.86±0.21 ^a	2.99±1.01 ^a	2.65±0.70 ^a
J	0.60±0.04 ^b	0.64±0.15 ^b	0.71±0.14 ^b	0.42±0.13 ^a	0.54±0.05 ^a	0.53±0.14 ^a	0.38±0.07 ^a

注: H' 、 D 和 J 分别为 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数;每行中不同小写字母表示渔沟或田面季节间存在显著差异

Note: H' 、 D and J mean Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index; different lowercases within a row mean significant differences among seasons for the trench or rice paddy

表 3 虾稻综合种养系统浮游动物的密度(均值±标准误)

Table 3 Zooplankton density in integrated crayfish-rice co-culture system (mean±stand error)

类群	渔沟				田面		
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	秋季	冬季
原生动物	8.6±3.4	1.4±1.7	15.4±13.4	10.6±9.7	3.5±2.4	15.5±10.9	8.3±8.8
轮虫	3.2±1.6	0.6±0.9	15.4±13.4	1.2±1.1	3.0±1.8	24.8±28.8	2.3±2.2
枝角类	317.7±143.4	0.9±1.1	8.2±1.9	128.4±30.3	328.8±154.9	3.1±2.3	142.6±41.3
桡足类	476.2±235.9	11.5±13.1	101.4±91.9	37.2±49.4	539.1±207.8	207.8±213.3	11.6±11.7
合计	805.7±360.4 ^c	19.6±13.7 ^a	156.2±123.4 ^b	177.4±35.0 ^b	874.4±296.9 ^b	251.1±246.0 ^a	164.7±52.2 ^a

注:每行中不同小写字母表示渔沟或田面季节间存在显著差异

Note: different lowercases within a row mean significant differences among seasons for the trench or rice paddy

表4 虾稻综合种养系统浮游动物的生物量(均值±标准误)
Table 4 Zooplankton biomass in integrated crayfish-rice co-culture system (mean ± stand error)

类群	渔沟				田面		
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	秋季	冬季
原生动物	0.000 4± 0.000 2	0.000 3± 0.000 1	0.001 6± 0.002 5	0.000 5± 0.000 5	0.000 3± 0.000 1	0.000 8± 0.000 5	0.000 4± 0.000 4
轮虫	0.016±0.020	0.001±0.001	0.084±0.98	0.002±0.002	0.001±0.001	0.262±0.331	0.005±0.004
枝角类	10.47±4.24	0.04±0.05	0.85±0.35	12.33±3.52	328.8±154.9	0.24±0.21	11.11±7.15
桡足类	20.13±10.13	0.68±0.78	6.56±5.45	6.31±4.48	539.1±207.8	14.89±14.83	2.62±2.57
合计	30.61±13.63 ^c	0.72±0.79 ^a	7.50±5.28 ^b	18.64±3.23 ^b	32.96±10.88 ^b	15.39±15.33 ^{ab}	13.74±8.52 ^a

注: 每行中不同小写字母表示渔沟或田面季节间存在显著差异

Note: different lowercases within a row mean significant differences among seasons for the trench or rice paddy

表5 虾稻综合种养系统的水质理化特征和浮游植物的密度和生物量(均值±标准误)
Table 5 Water physicochemical characteristics and density and biomass of phytoplankton in integrated crayfish-rice co-culture system (mean ± stand error)

指标	渔沟				田面		
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	秋季	冬季
水温/℃	26.30±0.05	29.40±0.30	11.80±0.20	10.90±0.05	26.10±0.15	11.20±0.10	10.50±0.05
pH	7.94±0.03	8.84±0.04	7.80±0.07	7.95±0.03	7.92±0.04	7.80±0.07	7.90±0.02
总氮/mg·L ⁻¹	1.23±0.07	0.59±0.04	3.57±0.16	0.56±0.08	1.26±0.08	3.31±0.16	0.66±0.04
氨氮/mg·L ⁻¹	0.71±0.16	0.21±0.16	0.52±0.07	0.48±0.02	0.45±0.03	0.43±0.04	0.53±0.03
亚硝酸盐氮/ mg·L ⁻¹	0.036±0.005	0.001±0	0.005±0.001	0.001 0± 0.000 5	0.038±0.003	0.002 0± 0.000 5	0
总磷/mg·L ⁻¹	0.227±0.009	0.092±0.012	0.062±0.006	0.016±0.003	0.230±0.014	0.076±0.015	0.030±0.009
浮游植物密度/ ind.·L ⁻¹	382±33	2.36±1.87	7.60±12.08	0.53±0.86	324±36	12.42±15.64	1.55±1.58
浮游植物 生物量/mg·L ⁻¹	21.26±3.38	1.71±0.50	0.77±0.45	2.67±5.25	17.46±2.89	0.80±053	7.47±6.53

表6 浮游动物指数与环境因子的相关性
Table 6 The correlation between zooplankton indexes and environmental factors

指数	pH	水温	总氮	氨氮	亚硝态氮	总磷	浮游植物 密度	浮游植物 生物量
物种数	-0.476	0.030	0.269	0.515**	0.657**	0.578**	0.638**	0.544**
香农威纳指数	-0.154	0.378	0.186	0.157	0.408*	0.389**	0.366	0.216
Margalef指数	0.751**	0.204	-0.178	-0.541	-0.204	-0.065	-0.192	-0.223
Pielou指数	0.135	0.446	0.056	-0.107	0.160	0.192	0.124	-0.019
密度	-0.218	0.248	0.050	0.299	0.818**	0.790**	0.833**	0.781**
生物量	-0.321	0.129	0.046	0.336	0.639**	0.585**	0.672**	0.621**

注: *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关

Note: * and ** mean significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$, respectively

种均为桡足类和枝角类物种,这是由于桡足类和枝角类的密度和个体均大于原生动物和轮虫。通常认为放养滤食性或摄食浮游生物的杂食性水产动物会导致大型枝角类下降、浮游动物小型化^[16,17],养殖密度的升高还会进一步加剧这种趋势^[18]。如小龙虾和

河蟹(*Eriocheir sinensis*)混养池塘中就存在这一现象^[19]。但本研究中桡足类和枝角类的密度在各个季节均远高于原生动物和轮虫,并未表现出浮游动物小型化,这是桡足类、枝角类的饵料生物(上行效应)和小龙虾等捕食者(下行效应)共同作用的结果。目

前虾稻综合种养中投喂饲料十分普遍,小龙虾对大型浮游动物的捕食率可能因此降低(捕食浮游动物的时间和能量成本显然比摄食饲料更高),即下行效应较弱,大型浮游动物的被捕食压力和捕食压力均较小,因而成为优势类群。从不同类群浮游动物的密度和生物量占比可以看出,虾稻综合种养田中仍有大量的桡足类和枝角类未被利用。

浮游动物的物种数、群落多样性指数、密度和生物量表现出了较明显的季节变化,其中春季的物种数、密度和生物量均显著高于其他季节,而夏季则显著最低。黄明显等^[14]在鲤鱼、鲫鱼养殖稻田中也发现了类似的现象。研究表明,水温、*pH*、流速、营养盐浓度、食物的种类与数量及捕食压力等是影响浮游动物群落结构、季节动态的重要因素^[10,20,21]。本研究中的物种数、密度和生物量均与水体总磷和浮游植物的密度、生物量呈极显著正相关,表明浮游植物作为浮游动物的重要饵料来源,会对后者产生重要影响,而总磷则可能是通过影响浮游植物进而影响浮游动物。尽管本研究中浮游动物的各指标均与水温没有明显的相关性,水温依然可能是引起这种季节变化的重要因素,即通过影响浮游植物及浮游动物的生命活动产生作用的。本研究中2、5、8和11月的平均水温分别为11、25、30和12℃左右^[7]。春季的水温适合大多数浮游动物的生长,同时此阶段投入的饲料和肥料滋养了大量的浮游植物(春季浮游植物密度和生物量最高,比其他季节高1~2个数量级,表5),为浮游动物提供了充足的食物。而夏季的高水温抑制了浮游动物的繁殖和摄食(浮游植物密度和生物量也较低),生物量和密度均处于最低水平。尽管秋季和冬季温度,及浮游植物密度与生物量均较低,也没有肥料和饲料的投入,但此阶段小龙虾的活动水平也较低,对浮游动物的捕食大大减少。同时我们观察到冬季田面中腐烂的稻茬周围聚集了非常多的大型浮游动物,密度非常高,肉眼很容易观察到,这些腐烂的稻茬可能是此阶段浮游动物的主要食物来源。这可能是秋季和冬季的密度和生物量显著高于夏季的主要原因。鉴于长江中下游地区小龙虾的仔虾孵化主要是在秋季,早春也有一批^[22,23],而仔虾和幼虾阶段偏动物食性^[24,25],因此浮游动物在此阶段的重要性会高于其他生长阶段,有必要进一步研究秋冬季的浮游动物及其影响因素,及如何培育和充分利用浮游动物以促进幼虾的生长、存活。

前言和材料与方法部分已介绍了虾稻综合种养田渔沟和田面在结构和种养管理上的差异,我们在前期研究中也发现渔沟和田面的水体理化因子指标

有一定的差异性^[7],因此推测这两种生境中浮游动物也可能存在一定差异。然而结果显示不论是在春季、秋季还是冬季,浮游动物的物种数、Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Pielou指数、密度和生物量在渔沟和田面间均无明显差异。可以认为虾稻综合种养系统的渔沟和田面两种生境中浮游动物的资源无显著差异。

参考文献

- [1] 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(2019)[N]. 中国渔业报, 2019-09-02(A04).
Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. Report on the industrial development of crayfish in China (2019) [N]. China Fisheries Reports, 2019-09-02(A04).
- [2] Halwart M. Biodiversity and nutrition in rice - based aquatic ecosystems [J]. J Food Compos Anal, 2006, 19 (6-7): 747-751.
- [3] Correia A M. Food choice by the introduced crayfish *Procambarus clarkia* [J]. Ann Zool Fenn, 2003, 40(6): 517-528.
- [4] Alcorlo P, Geiger W, Otero M. Feeding preferences and food selection of the red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*, in habitats differing in food item diversity [J]. Crustaceana, 2004, 77(4): 435-453.
- [5] 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.
- [6] 隋焱,夏德军,石小平,等. 稻虾连作模式下稻田水体浮游生物调查研究[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(18): 43-47.
Yi S, Xia D J, Shi X P, *et al.* Study on the effect of plankton in rice - crayfish continuous production rice fields [J]. Anhui Agricultural Science Bullitin, 2018, 24 (18): 43-47.
- [7] Yu J X, Ren Y, Xu T, *et al.* Physicochemical water quality parameters in typical rice-crayfish integrated systems (RCIS) in China [J]. Int J Agr Biol Eng, 2018, 11 (3): 54-60.
- [8] 孟顺龙,李丹丹,裘丽萍,等. 添加藻类和有机肥对罗非鱼养殖水体浮游植物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2099-2105.
Meng S L, Li D D, Qiu L P, *et al.* Effect of organic fer-

- tilizer and algae addition to tilapia aquaculture water on the community structure of phytoplankton [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2099-2105.
- [9] Koste W. Rotatoria [M]. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1978, 14-48.
- [10] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979, 1-104.
- Jiang X Z, Du N S. Fauna sinica [M]. Beijing: Science Press, 1979, 1-104.
- [11] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 18-327.
- Zhang Z S, Huang X F. Research methods of freshwater plankton [M]. Beijing: Science Press, 1991, 18-327.
- [12] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类--系统、分类及生态[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006, 23-915.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae in China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006, 23-915.
- [13] 董双林, 赵文. 养殖水域生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004, 211-212.
- Dong S L, Zhao W. Ecology of aquacultural waters [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004, 211-212.
- [14] 黄明显, 龙治海, 杜军. 养鱼冬水稻田的饵料生物种群结构和数量变化[J]. 农业科学导报, 1986(1): 23-30.
- Huang M X, Long Z H, Du J. A study on the population components and the dynamics of the food organism in the fish cultural paddy field [J]. *Herald of Agricultural Sciences*, 1986(1): 23-30.
- [15] 范红深. 稻、鸭、鱼共育稻田浮游动物群落研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- Fan H S. Studies of the zooplankton community of cultivating duck and fish in the rice-field [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [16] Yang Y F, Huang X F, Liu J K, *et al.* Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China [J]. *Fisheries management and ecology*, 2005, 12(2): 81-89.
- [17] Ke Z X, Xie P, Guo L G. Impacts of two biomanipulation fishes stocked in a large pen on the plankton abundance and water quality during a period of phytoplankton seasonal succession [J]. *Ecological engineering*, 2009, 35(11): 1610-1618.
- [18] 吴振斌, 张世羊, 高云霓, 等. 循环水养殖池中浮游生物的群落结构及其动态研究[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(1): 90-94.
- Wu Z B, Zhang S Y, Gao Y N, *et al.* Studies on plankton community structure and its dynamics in a recycling aquaculture system [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(1): 90-94.
- [19] 张萍, 周鑫, 秦伟, 等. 克氏原螯虾池塘放养密度对浮游生物群落的影响[J]. 广东农业科学, 2014(6): 133-137.
- Zhang P, Zhou X, Qin W, *et al.* Effect of stocking density of *Procambarus clarkia* on plankton community in pond [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014(6): 133-137.
- [20] 都雪, 王齐东, 张超文, 等. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 269-276.
- Du X, Wang Q D, Zhang C W, *et al.* Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2): 269-276.
- [21] 李志斐, 谢骏, 张晓可, 等. 珠三角高产养殖池塘浮游动物群落结构及水质评价[J]. 水生生物学报, 2017, 41(5): 1071-1079.
- Li Z F, Xie J, Zhang X K, *et al.* Community characteristics of zooplankton and assessment of water quality in the aquaculture ponds of the Pearl River Delta [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(5): 1071-1079.
- [22] 魏青山. 武汉地区克氏原螯虾的生物学研究[J]. 华中农学院学报, 1985, 4(1): 16-24.
- Wei Q S. Study of the biology of the crayfish *Procambarus clarkia* (Girard) in Wuhan [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1985, 4(1): 16-24.
- [23] 龚世园, 吕建林, 孙瑞杰, 等. 克氏原螯虾繁殖生物学研究[J]. 淡水渔业, 2008, (6): 23-25.
- Gong S Y, Lv J L, Sun R J, *et al.* The study on reproductive biology of *Procambarus clarkii* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2008, (6): 23-25.
- [24] Brown P B, Wetzel II J E, Spacie A, *et al.* Evaluation of naturally - occurring organisms as food for juvenile crayfish *Procambarus clarkia* [J]. *J World Aquacult Soc*, 1992, 23(3): 211-216.
- [25] 徐增洪, 周鑫, 水燕. 克氏原螯虾的食物选择性及其摄食节律[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(2): 166-170.
- Xu Zeng H, Zhou X, Shui Y. Food preference and feeding rhythm in red swamp crayfish *Procambarus clarkia* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(2): 166-170.

□

(编辑: 张丽红)