

DOI: 10.11964/jfc.20220213344

浙江青田稻鱼共生系统浮游动物和大型底栖动物的群落结构特征及动态分析



郑斯迪¹, 高 谦^{1*}, 卜令飞¹, 徐冠洪², 蔡传国¹, 范 珂¹, 刘其根¹

1. 上海海洋大学, 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 国家海洋生物科学国际联合研究中心, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 2. 青田愚公农业科技有限公司, 浙江 丽水 323904

摘要:

【目的】揭示浙江青田稻鱼共生系统(世界重要农业文化遗产)中浮游动物和大型底栖动物的群落结构特征、动态以及鱼类引入的影响。

【方法】实验在2020年12月和2021年4、7、9月对当地的稻-田鱼田、稻-马口鱼田和水稻单作田的浮游动物和大型底栖动物进行调查采样, 鉴定、统计和分析该系统中浮游动物和大型底栖动物的种类组成、密度、生物量、优势种及相关多样性指数。

【结果】通过4个季节的调查, 共鉴定出浮游动物2门30种和大型底栖动物3门9种。浮游动物包括轮虫16种、枝角类7种、桡足类6种, 其中近邻剑水蚤、中型小剑水蚤、萼花臂尾轮虫为全年优势种, 平突船卵溞、光滑平直溞和大肚须足轮虫为季节性优势种。大型底栖动物包括寡毛类2种、摇蚊3种、腹足类3种, 其中全年3种优势种为苏氏尾鳃蚓, 霍普水丝蚓和黄色羽摇蚊。在4次调查取样期间, 稻-田鱼、稻-马口鱼及水稻单作田这三类稻田系统中浮游动物的香农-威纳指数(H_1)、辛普森多样性指数(D_1)和Pielou均匀度指数(J_1)的变化范围分别为2.9~4.1、0.81~0.93和0.67~0.93。浮游动物两种多样性指数的最高值在稻-田鱼和稻-马口鱼田中均出现在水稻移栽前(4月), 水稻单作田中则出现在水稻扬花期(9月); 其最低值在稻-田鱼和稻-马口鱼田中均出现在水稻成熟收割前(12月), 水稻单作田则在水稻拔节期(7月)。三类稻田的浮游动物Pielou均匀度指数均在水稻移栽前最高, 成熟收割前最低。三类稻田系统中大型底栖动物的香农-威纳指数(H_2)、辛普森多样性指数(D_2)和Pielou均匀度指数(J_2)的变化范围分别为1.46~2.24、0.56~0.77和0.52~0.75。大型底栖动物两种多样性指数的峰值在三类稻田中均出现在水稻扬花期; 在稻-田鱼和稻-马口鱼田中其最低值出现在水稻移栽前, 水稻单作田的最低值则在水稻拔节期。大型底栖动物Pielou均匀度指数的峰值在稻-田鱼田中出现在水稻扬花期, 稻-马口鱼和水稻单作田均在成熟收割前; 在稻-田鱼和稻-马口鱼田中其最低值均出现在水稻移栽前, 但水稻单作田最低值在拔节期。

【结论】青田稻鱼系统浮游动物和大型底栖动物的种类、密度、生物量及相关多样性指数在不同季节存在显著差异; 同一采样时期, 浮游

第一作者: 郑斯迪, 从事稻渔综合种养与渔业资源生态学研究, E-mail: zhengshidi@163.com



通信作者: 高谦, 从事鱼类免疫学、病害防控及水产健康养殖研究, E-mail: qgao@shou.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900604)

收稿日期: 2022-02-26
修回日期: 2022-06-09

文章编号:
1000-0615(2025)03-039308-13
中图分类号: S 932.8
文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



动物和大型底栖动物的密度、生物量在两类养鱼稻田之间均无显著差异; 养鱼稻田浮游动物和大型底栖动物的密度、生物量均低于水稻单作田, 但差异不显著。了解稻鱼共生系统浮游动物和大型底栖动物群落结构及其季节动态, 有助于揭示稻-鱼互利共生的机制, 为稻渔综合种养模式的改进和发展提供理论依据。

关键词: 稻鱼共生系统; 浮游动物; 大型底栖动物; 群落结构; 多样性指数; 青田

我国是水稻种植大国, 水稻产量占粮食总产量的 40% 以上^[1]。传统的单一稻作存在空间利用率低、经济效益较差^[2]及农药、化肥投入较大等问题^[3], 使得空间利用率相对更高、经济收益可观且生态绿色的稻田综合种养农业模式受到了广泛关注。以稻-鱼、稻-虾、稻-蟹、稻-鳖共生等形式为代表的稻渔综合种养^[4], 将水稻种植与水产动物养殖相结合, 尽可能使水稻和水产动物产生良性相互作用, 既可获得比传统水稻种植模式更好的经济与生态效益, 也有助于满足全社会日益增长的绿色农产品消费需求。

浙江省丽水市青田县具有悠久的稻田综合种养历史, 青田稻鱼共生系统在 1300 多年前的唐代已有文字记载^[5]。得益于悠久的发展历史和农业科技进步, 当代青田稻鱼共生系统实现了农药和化肥大幅减量使用条件下, 水稻和鱼产双丰收^[6], 作为绿色可持续农业模式的典型, 2005 年被联合国粮农组织评为首批世界重要农业文化遗产 (Globally Important Agricultural Heritage System, GIAHS)^[7]。青田稻鱼共生系统中的青田田鱼 (*Cyprinus carpio qingtianensis*) 是一种经过长期驯化、形态和行为上高度适应稻田环境的鲤地方群体^[8], 与水稻存在良性相互作用^[6], 是青田及其邻近地区的传统养殖种类^[9]。马口鱼 (*Opsariichthys bidens*) 为青田山间溪流常见鱼类, 已有利用水泥池或池塘人工养殖的成功案例^[10], 近年来青田当地农户开始尝试在稻田中饲养马口鱼, 但尚未见有关马口鱼对稻田生态环境影响及其与水稻相互作用的研究报道。

浮游动物和大型底栖动物是水域生态系统的重要组成部分, 已有的研究显示河流、湖泊、水库等水体的理化因子, 如水体富营养化水平^[11]、农药化肥残留量^[12]等, 以及生物因子, 如初级生产力大小和捕食者的密度^[13]等, 都会影响浮游动物和大型底栖动物的群落结构及其丰度。与河流、湖泊等水体相比, 水稻田具有

水体面积小、水浅(水深较小)、环境相对封闭、静水或流速低等特点^[14]。针对水稻田综合种养系统进行浮游动物和大型底栖动物群落结构的研究报道较少, 已有的研究主要涉及稻田养殖中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)、克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 和鲤 (*C. carpio*) 等^[15]。本实验首次对作为世界农业文化遗产的青田稻鱼共生系统中浮游动物和大型底栖动物的群落结构特征及季节动态进行研究, 比较养殖不同鱼类(长期适应稻田环境的田鱼和溪流鱼类马口鱼)及未养鱼的稻田中浮游动物和大型底栖动物的种类、密度、时空分布及相关生态学参数, 探讨稻鱼互利共生的机制, 为进一步改善综合种养稻田的生态环境提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 实验地点、实验稻田分组及调查采样设计

实验稻田位于浙江省青田县仁庄镇的岙垟村 (28°3'13"N, 120°14'47"E), 当地为亚热带季风气候, 年平均气温 18 °C, 年均降水量 1407 mm。当地稻田养殖鱼类为青田田鱼和马口鱼, 鱼种在水稻移栽后投放, 二者不混养。

实验稻田为传统平板式布局, 每块田面积约 200 m²; 稻田底泥厚度 20~35 cm, 水深 30~60 cm(因季节及水稻生长变化); 田埂高度 40 cm, 田埂砌有 50 cm 高防逃逸水泥砖墙。按照稻-田鱼 (rice - carp field, RC)、稻-马口鱼 (rice - Chinese hooksnout carp field, RCHC) 和水稻单作田 (rice field without fish, RWF) 分组, 每组设置 2 个平行。

根据季节变化和当地农事安排, 本研究分别在 2021 年春季水稻移栽前 (4 月)、夏季水稻拔节期 (7 月)、秋季水稻扬花期 (9 月) 和 2020 年冬季水稻成熟收割前 (12 月) 对实验稻田的浮游动物和大型底栖动物进行调查采样。4 次采样均选择在晴天的上午 7:00—9:00, 以避免气

象因素影响采样和实验结果。采样期间使用 YSI 便携式水质分析仪(美国)测定稻田水体基本理化参数, 包括温度、pH 和溶解氧含量。采用过硫酸钾-钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定总磷和总氮。

1.2 实验期间的田间管理

每块实验田均设有进出水口各一, 上覆尼龙网或金属网防逃。水源引自同一山溪, 共用进水渠和排水渠。实验田上方安置尼龙防鸟网。水稻品种为“甬优 17”, 4 月下旬播种, 5 月中旬移栽, 生长期约 200 d。水稻移栽前, 稻田施用复合肥, 至水稻成熟收割前不再施肥。田鱼和马口鱼苗种的平均体重分别为 (120±16) 和 (20±5) g, 投放密度分别为 2 和 8 尾/m², 同种鱼来源一致; 投放后至捕获前, 每日约 13:30 投喂人工配合颗粒饲料。

1.3 浮游动物采集鉴定与定量实验操作方法

浮游动物的定性及定量实验操作依照《淡水浮游生物研究方法》^[16], 定性实验采样使用 25 号浮游生物网捞取浮游动物, 过滤采集 1 min; 自来水从网口上方充分冲洗, 将浓缩的水样转入无菌聚乙烯瓶中, 加等体积 4% 多聚甲醛固定, 多聚甲醛固定的定性标本置 4 °C 冰箱保存。在定量实验中, 每块实验田的 4 个采样点分别位于稻田中部和进、排水口附近, 每个点位采集 5 L 水样; 每块实验田共获 20 L 水样, 水样经 25 号浮游生物网多次过滤、浓缩后, 转移至 100 mL 无菌聚乙烯瓶, 加入相同体积 4% 多聚甲醛, 所获定量标本置于 4 °C 冰箱保存。

带回实验室的定性、定量样品, 均需静置 24 h, 用滴管吸去上层清液, 利用 Nikon 80i 研究显微镜(尼康公司, 日本)进行标本形态观察, 物种鉴定主要依据《中国淡水轮虫志》^[17]、《中国动物志·淡水枝角类》^[18]和《中国动物志·淡水桡足类》^[19]。对定量样品, 使用 1 mL 浮游生物计数板, 分多次进行全部计数并换算为密度(个/L)。利用 WPS Office Excel 2020 软件对获得的所有数据建立数据库。相关计算公式:

Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 计算公式:

$$H' = - \sum [(n_i/N) \times \ln(n_i/N)] \quad (1)$$

Simpson 多样性指数 (D) 计算公式:

$$D = 1 - \sum (n_i/N)^2 \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数 (J') 计算公式:

$$J' = H'/H'_{\max} \quad (H'_{\max} = \ln S) \quad (3)$$

式中各指数符号下标数字 1 和 2 分别代表浮游动物和大型底栖动物

优势度 Dominance (Y) 计算公式:

$$Y = n_i \cdot f_i / N \quad (4)$$

式中, n_i 为种 i 的个体数, N 为所有物种的总个体数, S 为物种数。 f_i 为种 i 出现在各站点的频率, 本研究因水域面积小, f_i 默认为 1。 $Y > 0.1$ 为优势种, $0.01 < Y < 0.1$ 为常见种。

使用 SPSS 25.0 软件对获得的定量数据进行单因素方差分析和差异显著性检验。

1.4 大型底栖动物采集鉴定与定量实验操作方法

在实验田中选取固定点位, 使用 1/16 m² 彼得生采泥器挖取底泥, 重复 2 次, 将泥样混合后分别用 60 目和 100 目金属筛洗去杂质, 从筛网上转移至白色搪瓷盘中, 用镊子分选大型底栖动物, 于无菌聚乙烯瓶中 4% 多聚甲醛固定, 4 °C 冰箱保存。利用 Nikon SMZ1500 体视显微镜(尼康公司, 日本)和 Nikon 80i 研究显微镜进行标本形态观察, 并依据《中国淡水生物图谱》^[20]、《中国北方摇蚊幼虫》^[21] 进行属、种鉴定(少数标本仅鉴定到属)。物种鉴定后, 将大型底栖动物置于吸水纸上充分吸去水分, 使用万分之一电子天平称重, 并将结果换算成平面密度(个/m²)。生物多样性指数计算及相关数据处理方法同“浮游动物采集鉴定与定量实验操作方法”所述。

2 结果

2.1 浮游动物群落组成

共采集到浮游动物 30 种, 分属 2 门 4 目 9 科, 其中轮虫 5 科 16 种, 枝角类 2 科 7 种, 桡足类 1 科 6 种。轮虫种类占浮游动物种类数的 53.3%, 明显多于桡足类和枝角类。轮虫的总体密度只占浮游动物总密度的 34.7%, 枝角类占 24.5%, 桡足类占比则高达 40.6%。近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)、中型小剑水蚤 (*Microcyclops intermedius*)、萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 在 3 类稻田中全年均为优势种。平突船卵蚤 (*Scapholeberis mucronata*)、光滑平直

蚤 (*Pleuroxus laevis*) 在除 7 月外的采样时段在 3 类稻田中均为优势种。大肚须足轮虫 (*Euchlanis dilatata*) 在除 9 月外的采样时段均为优势种。囊形单趾轮虫 (*Monostyla bulla*) 仅在 9 月的水稻单作田中为优势种。双齿同尾轮虫 (*Diurella bidens*) 仅在 4 月采样中发现。奇异尖额蚤 (*Alona eximia*)、无刺大尾蚤 (*Leydigia acanthocercoides*) 和四齿单趾轮虫 (*Monostyla quadridentata*) 仅在 9 月发现。

2.2 浮游动物种类和密度的季节动态

本研究所鉴定浮游动物种类见表 1。在 3 类处理的实验田中其浮游动物种类及构成基本一致, 但种类数在不同季节存在显著差异 ($P < 0.05$)。轮虫种类数在 4 月和 9 月较多, 7 月最少; 桡足类在 7 月和 9 月较多, 4 月最少; 枝角类在 9 月最多, 7 月最少。

实验期间浮游动物的密度及其变化见图 1 和图 2。3 类稻田中浮游动物密度均随季节发生显著变化 ($P < 0.05$), 浮游动物的不同类型在 3 类稻田中密度变化情况不同。轮虫在 3 类稻田中的最低密度均出现在 4 月, 在稻-田鱼和稻-马口鱼田中的最高密度出现在 9 月, 在水稻单作田中则为 7 月 (图 2)。枝角类在 3 类稻田中的最低密度均出现在 7 月, 不到 3 个/L, 枝角类密度在 9 月明显升高, 达到稻-田鱼田中的最高密度, 稻-马口鱼和水稻单作田中的最高密度出现在 12 月 (图 2)。桡足类在 3 类稻田中的最低密度均出现在 5 月, 最高密度在水稻单作、稻-田鱼和稻-马口鱼田中依序出现在 7 月、9 月和 12 月 (图 2)。浮游动物总体密度的最大值 (65.4 个/L) 出现在 7 月的水稻单作田, 最小值 (12.05 个/L) 在 4 月的稻-田鱼田。水稻单作田浮游动物总平均密度 (53.2 个/L) 最高, 稻-田鱼田最低 (31.9 个/L)。

2.3 浮游动物生物多样性指数的变动情况

4 次采样调查期间, 3 类稻田的浮游动物香农-威纳指数 (H'_1)、辛普森多样性指数 (D_1) 和 Pielou 均匀度指数 (J'_1) 发生显著变化 ($P < 0.05$)。 H'_1 变动范围为 2.9~4.0, 稻-田鱼和稻-马口鱼田的 H'_1 在 4 月最高、12 月最低, 但水稻单作田 H'_1 则在 7 月最低、9 月最高 (表 2)。 D_1 为 0.78~0.93, 其变动情况与 H'_1 基本一致。3 类稻田的浮游动物均匀度指数均在 4 月最高,

7 月最低 (表 2)。3 种指数的高、低极限值均出现在稻-田鱼田 (表 2)。

2.4 大型底栖动物群落组成

共发现大型底栖动物 9 种, 分属 3 门 6 科, 包括寡毛类 2 种、腹足类 3 种、摇蚊幼虫 3 种。苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*) 和霍普水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 在 3 类稻田中均全年都有发现, 且其数量占大型底栖动物总数的 77.72%, 为稻田大型底栖动物的绝对优势种。黄色羽摇蚊 (*Chironomus flaviplumus*) 幼虫在水稻单作田中全年均为优势种, 在稻-马口鱼田中 7 月和 12 月为优势种, 在稻-田鱼田中 4 次采样都发现数量很少。软体动物个体数量仅占大型底栖动物总数的 5.58%, 但生物量占大型底栖动物总生物量的 95.4%; 方形环棱螺 (*Sinotaia quadrata*) 在 3 类稻田中全年均有发现, 河蚬 (*Corbicula fluminea*) 则仅在稻-田鱼田中发现 (数量只占软体动物总数的 4.81%)。

2.5 大型底栖动物密度和生物量的季节动态

大型底栖动物密度及生物量见表 3。3 类稻田中大型底栖动物的不同类群的密度和生物量均随着采样季节发生显著变化 ($P < 0.05$)。3 类稻田中寡毛类密度和生物量的最大值均出现在 7 月, 最低密度均在 12 月; 稻-田鱼田寡毛类最小生物量也出现在 12 月 (图 3), 稻-马口鱼和水稻单作田则在 9 月 (图 4)。3 类稻田中腹足类密度和生物量的最小值均出现在 4 月, 稻-田鱼田腹足类密度和生物量最大值均出现在 7 月, 稻-马口鱼和水稻单作田则在 9 月 (图 5)。3 类稻田中摇蚊幼虫密度的最大值均出现在 7 月, 此时稻-田鱼和稻-马口鱼田中摇蚊幼虫生物量也是最大, 而在水稻单作田中其最大生物量出现在 9 月; 稻-田鱼和稻-马口鱼田摇蚊幼虫最低密度均出现在 4 月, 水稻单作田中则在 9 月; 稻-田鱼和水稻单作田摇蚊幼虫最小生物量出现在 12 月, 而稻-马口鱼田在 9 月 (图 5)。

2.6 大型底栖动物生物多样性指数的变动情况

实验期间大型底栖动物的香农-威纳指数 (H'_2) 和辛普森多样性指数 (D_2) 均发生显著变化 ($P < 0.05$), 且变化规律相似。3 类稻田中大型底栖动物的两类多样性指数的最大值均出现在 9 月, 稻-田鱼和稻-马口鱼田大型底栖动物多样性指数最小值均出现在 4 月, 而水稻单作田在

表 1 青田稻鱼共生系统浮游动物与大型底栖动物的种类组成

Tab. 1 Species composition of zooplankton and macrobenthos in Qintian Rice-Fish Agriculture System

| 浮游与大型底栖动物种类 species of zooplankton and macrobenthos | 稻田类型 types of the rice filed | | |
|--|------------------------------|---|----------------------------------|
| | 稻-田鱼田 rice-carp field | 稻-马口鱼田 rice-Chinese hooksnout carp field | 水稻单作田 rice field without fish |
| 桡足类 Copepoda | | | |
| 近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 中型小剑水蚤 <i>Microcyclops intermedius</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 双色小剑水蚤 <i>Microcyclops bicolor</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i> | -+++ | -+++ | -+++ |
| 英勇剑水蚤 <i>Cyclops strenuus</i> | -++- | -++- | -++- |
| 无节幼体 nauplius | ++++ | ++++ | ++++ |
| 枝角类 Cladocera | | | |
| 平突船卵溇 <i>Scapholeberis mucronata</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 直额裸腹溇 <i>Moina rectirostris</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 光滑平直溇 <i>Pleuroxus laevis</i> | ++++ | +--+ | ++++ |
| 异形平直溇 <i>Pleuroxus assimilis</i> | +--+ | ++++ | +--+ |
| 肋形尖额溇 <i>Alona costata</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 奇异尖额溇 <i>Alona eximia</i> | --++ | --++ | --++ |
| 无刺大尾溇 <i>Leydigia acanthocercides</i> | --+- | --+- | --+- |
| 轮虫 Rotifera | | | |
| 大肚须足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 十指平甲轮虫 <i>Platyias militaris</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 四角平甲轮虫 <i>Platyias audricris</i> | --+- | --+- | --+- |
| 萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 矩形臂尾轮虫 <i>Brachionus leydigii</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 花萼臂尾轮虫 <i>Brachionus capsuliflorus</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 四齿单趾轮虫 <i>Monostyla quadridentata</i> | --+- | --+- | --+- |
| 蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 高躄轮虫 <i>Scaridium longicaudum</i> | ---- | ---- | ---- |
| 双齿同尾轮虫 <i>Diurella bidens</i> | +--- | +--- | +--- |
| 尖头同尾轮虫 <i>Diurella tigris</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i> | +--+ | +--+ | +--+ |
| 长刺异尾轮虫 <i>Trichocerca longiseta</i> | ---- | ---- | +--- |
| 泡轮虫未定种 <i>Pompholyx</i> sp. | ++++ | ++++ | ++++ |
| 寡毛类 Oligochaeta | | | |
| 苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 摇蚊 Chironomidae | | | |
| 黄色羽摇蚊 <i>Chironomus flaviplumus</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 二叉摇蚊未定种 <i>Dicrotendipes</i> sp. | ++++ | ++++ | ++++ |
| 大粗腹摇蚊未定种 <i>Macroelopia</i> sp. | ++++ | ++++ | ++++ |
| 软体动物 Cephalopod | | | |
| 方形环棱螺 <i>Sinotaia quadrata</i> | ++++ | ++++ | ++++ |
| 大瓶螺 <i>Pomacea canaliculata</i> | -++- | + +- | +++ - |
| 耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i> | -+++ | + -++ | + -++ |
| 河蚬 <i>Corbicula fluminea</i> | ++++ | ---- | ---- |

注：“+”表示发现，“-”表示未发现，从左至右依序代表4、7、9、12月采样。

Notes: "+" and "-" indicating "found" and "no found", respectively, and from left to right in order, they corresponded to the sampling in April, July, September, and December.

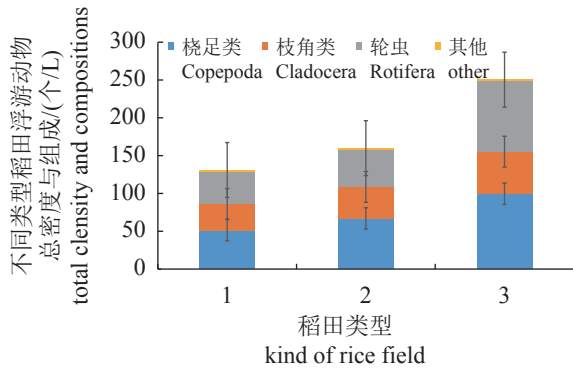


图 1 青田 3 类稻田中浮游动物总密度及其组成

1. 稻-田鱼田; 2. 稻-马口鱼田; 3. 水稻单作田。

Fig. 1 Total density and its compositions of zooplankton in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

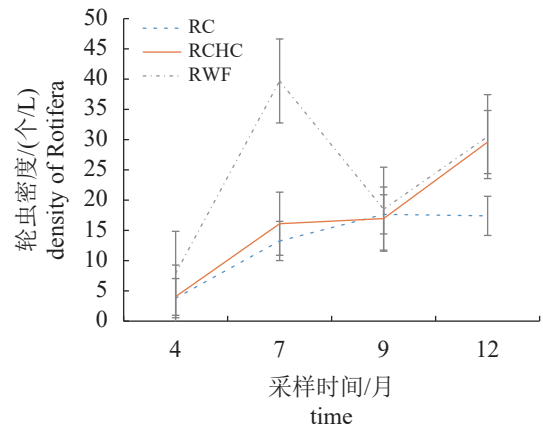
1. rice-carp field; 2. rice-Chinese hooksnout carp field; 3. rice field without fish.

7月(表2)。稻-田鱼田大型底栖动物 Pielou 均匀度指数 (J_2) 的变化规律与两类多样性指数的一致; 稻-马口鱼和水稻单作田 J_2 最小值出现季节与多样性指数一致, 其最大值则均出现在 12月(表2)。3种指数变动范围的高限来源于稻田鱼田, H'_2 低限于水稻单作田, D_2 和 J'_2 的低限源自稻-马口鱼田(表2)。

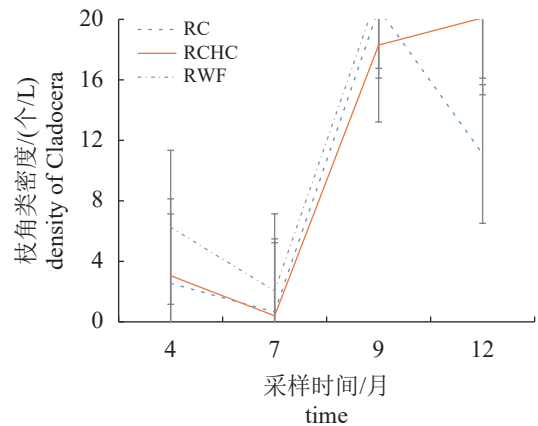
3 讨论

3.1 青田稻鱼系统中浮游动物群落结构及其季节变化特点

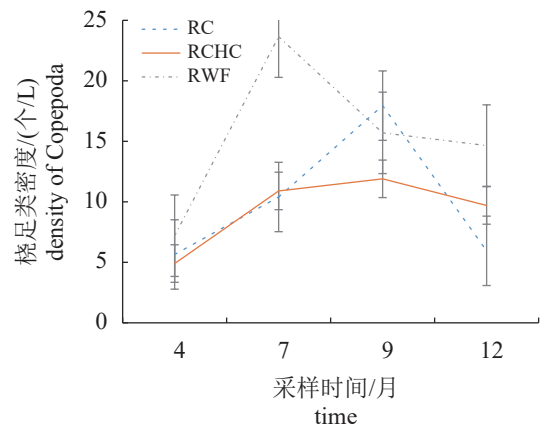
川南地区稻鱼共养田冬季调查发现 45 种轮虫、9 种枝角类和 11 种桡足类^[22]。湖北潜江稻虾共养田发现有 28 种轮虫, 枝角类和桡足类各 10 种^[23]。本研究在浙南山区的实验稻田中发现了 16 种轮虫、6 种枝角类和 7 种桡足类, 尽管浮游动物类群构成与前两者有相似之处, 均是轮虫种类最多、枝角类和桡足类的种类数接近, 但本研究所发现种类数量明显偏少。四川盆地和江汉平原的稻田水源基本来自江河, 而本研究的稻田水源来自山溪, 因此地理位置和水源差异可能是浮游动物种类数偏少的原因。湖北武汉的稻鸭共养田^[24]和稻鱼鸭共养田^[25]以及辽宁盘锦的稻蟹共养田^[26]均是轮虫和原生动物密度占优, 湖北潜江的稻虾共养田^[23]和本研究青田稻鱼系统中则是桡足类密度最大, 轮虫和枝角类平均密度差别不大。本研究浮游动物



(a)



(b)



(c)

图 2 青田 3 类稻田中 3 种浮游动物代表类群密度的季节变动

RC. 稻-田鱼田, RCHC. 稻-马口鱼田, RWF. 水稻单作田, 下同。

Fig. 2 Seasonal variation of three kinds of representative groups of zooplankton density in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

RC. rice-carp field, RCHC. rice-Chinese hooksnout carp field, RWF. rice field without fish, the same below.

表 2 青田 3 类稻田中浮游动物和大型底栖动物的多样性指数

Tab. 2 Diversity indexes of zooplankton and macrobenthos in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

| 多样性指数 diversity index | 4月 April | | | 7月 July | | | 9月 September | | | 12月 December | | |
|--------------------------|----------|-------|-------|---------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| | RC | RCHC | RWF | RC | RCHC | RWF | RC | RCHC | RWF | RC | RCHC | RWF |
| H'_1 | 3.944 | 3.869 | 3.899 | 3.46 | 3.371 | 3.299 | 3.85 | 3.37 | 3.827 | 3.004 | 3.039 | 3.389 |
| D_1 | 0.919 | 0.914 | 0.918 | 0.887 | 0.873 | 0.854 | 0.909 | 0.902 | 0.906 | 0.796 | 0.81 | 0.853 |
| J'_1 | 0.898 | 0.881 | 0.874 | 0.846 | 0.824 | 0.807 | 0.84 | 0.813 | 0.824 | 0.684 | 0.681 | 0.759 |
| H'_2 | 1.473 | 1.469 | 1.478 | 1.914 | 1.827 | 1.671 | 2.596 | 2.417 | 2.194 | 2.242 | 2.09 | 2.011 |
| D_2 | 0.562 | 0.560 | 0.533 | 0.617 | 0.630 | 0.566 | 0.768 | 0.758 | 0.704 | 0.726 | 0.716 | 0.663 |
| J'_2 | 0.524 | 0.489 | 0.493 | 0.604 | 0.706 | 0.595 | 0.819 | 0.762 | 0.692 | 0.747 | 0.744 | 0.716 |

注: H' 香农-威纳指数; D 辛普森多样性指数; J' Pielou均匀度指数; 指数符号的数字下标1和2分别代表浮游动物和大型底栖动物; H'_1 浮游动物香农-威纳指数; D_1 浮游动物辛普森多样性指数; J'_1 浮游动物Pielou均匀度指数; H'_2 大型底栖动物香农-威纳指数; D_2 大型底栖动物辛普森多样性指数; J'_2 大型底栖动物Pielou均匀度指数。

Notes: H'_1 . Shannon-Wiener index of zooplankton, D_1 . Simpson diversity index of zooplankton, J'_1 . Pielou evenness index of zooplankton, H'_2 . Shannon-Wiener index of macrobenthos, D_2 . Simpson diversity index of macrobenthos, J'_2 . Pielou evenness index of macrobenthos.

表 3 青田 3 类稻田中大型底栖动物的密度与生物量

Tab. 3 Densities and biomass of macrobenthos in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

| 月份 months | 稻-田鱼田 RC | | 稻-马口鱼田 RCHC | | 水稻单作田 RWF | |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | 密度/(个/m ²) density | 生物量/(g/m ²) biomass | 密度/(个/m ²) density | 生物量/(g/m ²) biomass | 密度/(个/m ²) density | 生物量/(g/m ²) biomass |
| 4月 April | 274 | 38.87 | 386 | 31.07 | 1050 | 12.09 |
| 7月 July | 444 | 115.32 | 638 | 91.73 | 1654 | 101.88 |
| 9月 September | 172 | 106.23 | 250 | 102.03 | 352 | 120.67 |
| 12月 December | 114 | 43.92 | 214 | 24.61 | 300 | 21.07 |

平均密度仅为 40.3 个/L, 低于上述各项研究的密度。山区稻田以山溪水流为水源, 稻田水体常年处于流动状态^[27], 稻田上层水体与溪流来水的高交换率可能是该地稻田浮游动物密度较低的原因。

本研究浮游动物种类数在 7 月最少、9 月最多, 呈现先减后增的趋势; 浮游动物密度则渐次升高。具体到不同门类, 轮虫种类数在 7 月最少, 其余采样月份相对稳定, 但轮虫平均密度则在 7 月和 9 月较高, 4 月最低。本研究枝角类的种类数和密度在 7 月达到最低值, 这应该是 7 月高温所致, 相关研究已表明高水温会抑制枝角类生长繁殖^[28-30]; 9 月稻田水温降至适合温度^[31], 枝角类种类数和密度因此升至峰值。另外, 4 月和 12 月稻田枝角类种类数相对较少, 但 12 月的枝角类密度明显高于 4 月, 推测可能原因: 2 个月份稻田水温低; 另一方面, 水稻移栽前施用复合肥, 提高了 4 月稻田水体

的磷含量, 高的总磷含量可对枝角类生长繁殖产生抑制作用^[32]。本研究桡足类的种类数在 7 月和 9 月较多, 但与其余采样月份差别不大, 总体相对稳定; 其密度则在 12 月最高, 4 月最低。青田稻鱼共生系统采用未开挖沟坑的平板式稻鱼共作模式, 浮游动物种类数、密度和结构与其他地区及其他稻田种养模式均存在一定的差异, 有必要进一步深入研究这些差异产生的机制。

3.2 稻田养鱼对浮游动物群落的影响

投放水产动物后, 稻田水体浮游动物群落总密度通常会降低, 浮游动物种类及其群落结构的改变在不同模式中存在差异^[22-25]。本研究中养鱼稻田浮游动物密度明显低于水稻单作田, 浮游动物种类组成及其群落结构则差别不大。青田田鱼和马口鱼是食性不同的鱼类^[33-35], 但本研究的 2 类养鱼稻田的浮游动物密度在 4—9

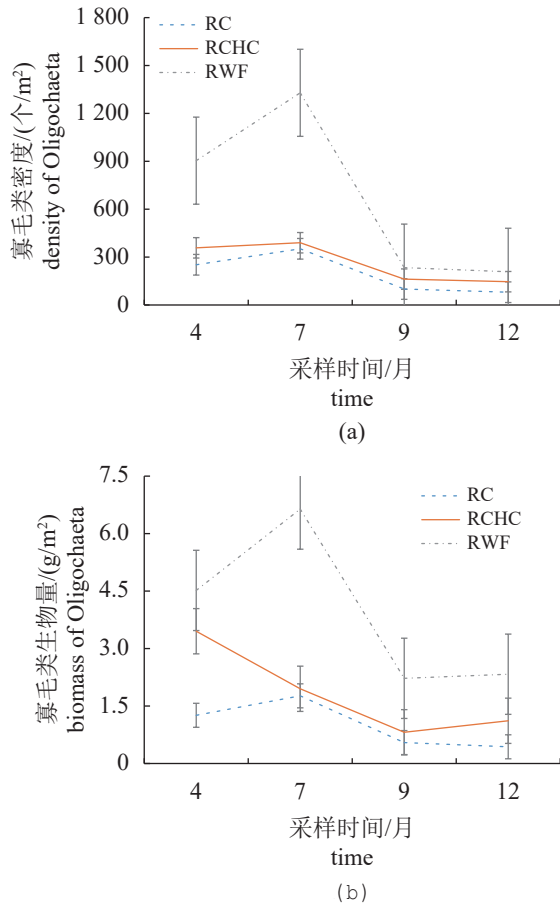


图3 青田3类稻田中寡毛类密度和生物量的季节变动
Fig. 3 Seasonal variations of density and biomass of Oligochaeta in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

月较接近, 且其香农-威纳指数、辛普森多样性指数和 Pielou 均匀度指数的变化趋势也类似。本研究发现平甲轮属、须足轮属和尖额溞属种类作为实验稻田的优势或常见的浮游动物, 已有研究表明它们主要摄食浮游植物, 且多栖息于沉水植物和浮萍附近或在周边活动^[17-18]。杂食性的田鱼在稻田中会摄食大量浮游植物和浮萍^[36], 在此过程中一并吞食其附近的浮游动物是可能的; 另一方面, 本研究投放 (20±5) g 的马口鱼, 这种规格的马口鱼以浮游动物食性为主^[33]。冬季水温低, 两种鱼对颗粒饲料的摄食强度均降低, 但田鱼摄食情况明显好于马口鱼, 这可能是冬季稻-田鱼田的浮游动物密度低于稻-马口鱼田的原因。本研究中鱼类引入对稻田浮游动物密度及其群落结构的影响并不显著, 推测鱼类投饲强度可能是重要原因。后续研究中关联投喂强度、鱼类生长状况及增加采样时间

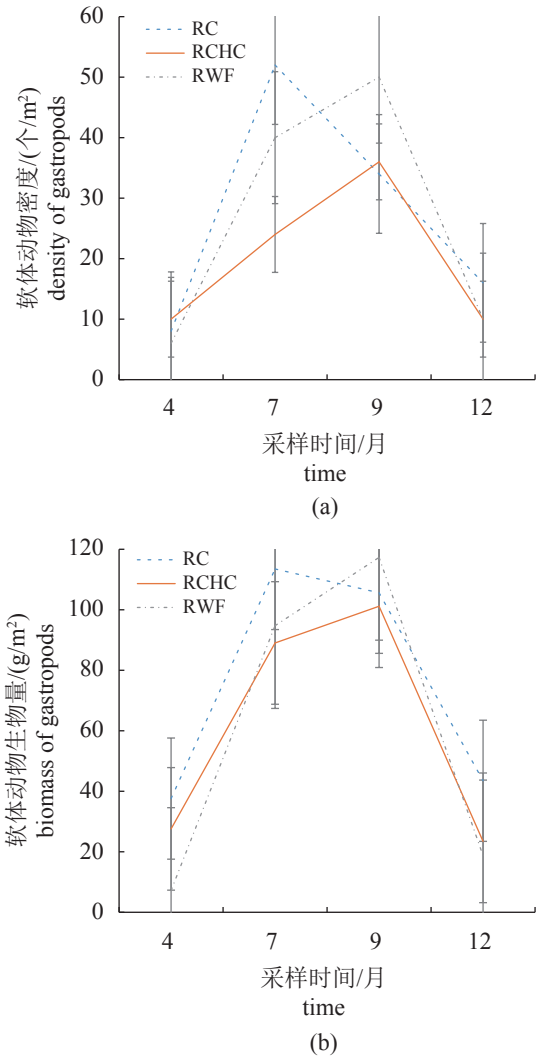


图4 青田3类稻田中软体动物密度和生物量的季节变动
Fig. 4 Seasonal variations of density and biomass of gastropods in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

频次是必要的。

3.3 青田稻鱼系统中大型底栖动物的群落结构及其季节变化特点

一般而言, 稻田水体相对封闭, 水流缓, 底层水体交换频率低^[14, 37-38], 加之水稻种植需施用肥料^[39], 底质普遍呈富营养状态^[40], 因此稻田中大型底栖动物群落多以耐污损生物为主。本次调查也发现青田稻鱼共生系统中大型底栖动物的优势种及常见种为苏氏尾鳃蚓、霍普水丝蚓、黄色羽摇蚊幼虫及方形环棱螺等耐污种类。类似的, 李岩^[41]和黄明显等^[22]均发现稻田

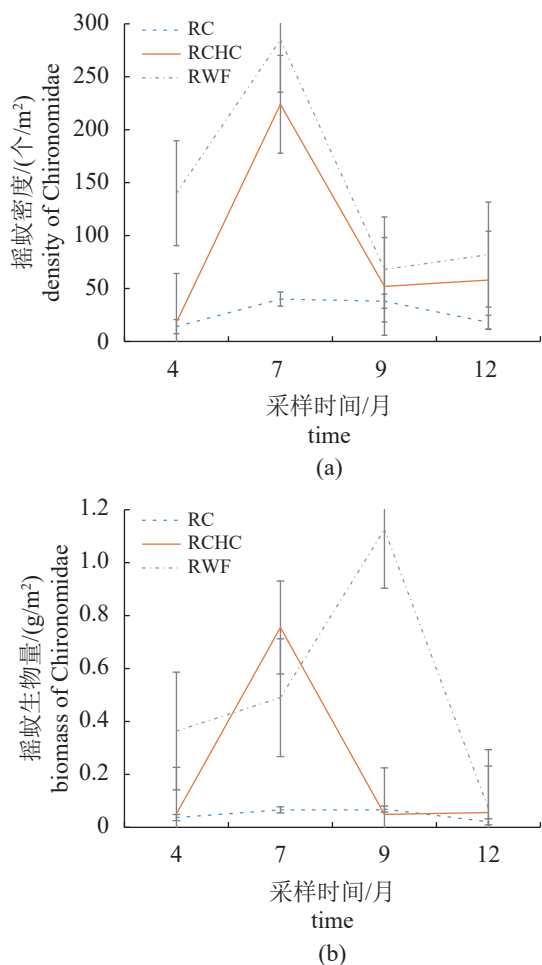


图5 青田3类稻田中摇蚊密度和生物量的季节变动
Fig. 5 Seasonal variations of density and biomass of Chironomidae in the three kinds of rice field from the Qingtian Rice-Fish Agriculture System

大型底栖动物优势种主要为尾鳃蚓、水丝蚓和摇蚊幼虫。本研究3类稻田中的绝对优势类群均为寡毛类,其密度远大于摇蚊幼虫和软体动物,但对生物量的贡献度明显却低于腹足类。腹足类个体重量较大,故其在生物量上占绝对优势。

本研究调查期间,青田稻鱼系统的大型底栖动物种类数基本稳定,总体密度和生物量则呈现先高后低,其中寡毛类的密度和生物量在4月和7月较高,9月和12月降低;摇蚊幼虫的密度和生物量7月达到峰值,在其后的采样月份降低。摇蚊作为完全变态昆虫^[42],其密度和生物量受生活史以及水温、鱼类摄食效率等综合因素影响。方形环棱螺全年均有发现,且密度、生物量相对稳定,构成了该系统中软体动物的主体。耳萝卜螺和大瓶螺的繁殖能力和

生长速率随温度升高而提高^[43],7月和9月软体动物的密度和生物量升高,主要是大瓶螺和耳萝卜螺的贡献。

3.4 稻田养鱼对大型底栖动物群落的影响

稻渔综合种养系统中常见的水禽和水产动物如鸭子、中华绒螯蟹、克氏原螯虾和鲤等普遍大量摄食底栖动物,会导致大型底栖动物的种类、密度和生物量下降^[40-41, 44-45]。本研究养鱼稻田大型底栖动物的密度比水稻单作稻田低,但其生物量反而更高;两种养鱼稻田之间,大型底栖动物群落结构和多样性均没有显著差异。鲤摄食使得寡毛类和摇蚊幼虫的密度显著降低^[35]。尽管马口鱼主要捕食游泳生物,但肠道内容物分析表明,马口鱼也可摄食寡毛类和水生昆虫^[33]。寡毛类和摇蚊幼虫是稻田大型底栖动物密度的主要贡献者,推测田鱼和马口鱼对它们的摄食导致养鱼稻田大型底栖动物密度低于水稻单作田。田鱼喜食螺类^[36],但本研究的田鱼苗种体型较小,可能难以有效捕食体型较大的螺类。马口鱼摄食的大型底栖动物主要是寡毛类和摇蚊等体型相对较小且身体柔软的种类^[33]。养鱼稻田每日投喂颗粒饲料,有可能会吸引其他环境中的腹足类迁移到养鱼稻田中,而腹足类是稻田大型底栖动物生物量的主要贡献者,养鱼稻田大型底栖动物生物量较水稻单作田高能否归因于“饵料间接导致养鱼稻田腹足类数量增加”,尚需进一步研究证实。

参考文献 (References):

- [1] 程德华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 223-226.
Cheng S H, Hu P S. Development strategy of rice science and technology in China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(3): 223-226 (in Chinese).
- [2] 杨学利, 张少杰. 当前我国粮食安全现状及对策研究[J]. 经济纵横, 2010(6): 46-49.
Yang X L, Zhang S J. The present situation of China food security and the countermeasure of solving the question[J]. Economic Review Journal, 2010(6): 46-49 (in Chinese).
- [3] 杨万江, 李琪. 稻农化肥减量施用行为的影响因素[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2017, 16(3): 58-66.
Yang W J, Li Q. The impact on less use of chemical fertilizers[J]. Journal of South China Agricultural University

- (Social Science Edition), 2017, 16(3): 58-66 (in Chinese).
- [4] 郑华斌, 贺慧, 姚林, 等. 稻田饲养动物的生态经济效应及其应用前景[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 510-517.
Zheng H B, He H, Yao L, *et al.* Ecological economic effects and its prospects of raising animals in paddy field[J]. Wetland Science, 2015, 13(4): 510-517 (in Chinese).
- [5] 焦雯璐, 闵庆文. 浙江青田稻鱼共生系统 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Jiao W J, Min Q W. Rice-Fish symbiotic system in Qingtian County, Zhejiang Province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese).
- [6] Xie J, Hu L L, Tang J J, *et al.* Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): E1381-E1387.
- [7] 王思明, 卢勇. 中国的农业遗产研究: 进展与变化[J]. 中国农史, 2010, 29(1): 3-11.
Wang S M, Lu Y. China's agricultural heritage research: progress and change[J]. Agricultural History of China, 2010, 29(1): 3-11 (in Chinese).
- [8] 郭梁, 任伟征, 胡亮亮, 等. 传统稻鱼系统中“田鲤鱼”的形态特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 665-672.
Guo L, Ren W Z, Hu L L, *et al.* Morphological traits of indigenous field carps maintained in traditional rice-based farming systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 665-672 (in Chinese).
- [9] 孟宪德, 吴万夫. 我国稻田养殖现状的分析[J]. 北京水产, 2001(5): 10-12.
Meng X D, Wu W F. Analysis on the current situation of rice field breeding in China[J]. Journal of Beijing Fisheries, 2001(5): 10-12 (in Chinese).
- [10] 吴燕琴, 黄富友, 陆君, 等. 马口鱼池塘养殖技术探讨[J]. 水产养殖, 2021, 42(1): 46-48.
Wu Y Q, Huang F Y, Lu J, *et al.* Discussion on pond culture technology of Chinese hooksnout carp[J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(1): 46-48 (in Chinese).
- [11] 戴纪翠, 倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2107-2111.
Dai J C, Ni J R. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 2107-2111 (in Chinese).
- [12] 徐吉洋, 张文萍, 李少南. 浮游动物物种构成对于淡水测试系统抗农药胁迫能力的影响[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 155-173.
Xu J Y, Zhang W P, Li S N. Relevance of species composition of freshwater zooplankton to resistance of the systems towards pesticide stresses[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(1): 155-173 (in Chinese).
- [13] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010 (in Chinese).
- [14] 张志剑, 王兆德, 姚菊祥, 等. 水文因素影响稻田氮磷流失的研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1789-1794.
Zhang Z J, Wang Z D, Yao J X, *et al.* Effects of hydrological practices on nutrients export from paddy field: A review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1789-1794 (in Chinese).
- [15] 张澜澜. 浅谈北方地区稻田综合种养[J]. 黑龙江水产, 2018(1): 23-26.
Zhang L L. Discussion on comprehensive planting and breeding of paddy field in North China[J]. Fisheries of Heilongjiang, 2018(1): 23-26 (in Chinese).
- [16] 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.
Zhang Z S, Huang X F. Research techniques of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese).
- [17] 王家楫, 中国科学院水生生物研究所. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
Wang J J, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. Freshwater Rotifers of China[M]. Beijing: Science Press, 1961 (in Chinese).
- [18] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Jiang X Z, Du N S. Fauna Sinica, Crustacea, freshwater Cladocera[M]. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese).
- [19] 中国科学院甲壳动物研究组, 动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Research Group of Carcinology, Institute of Zoology, Academia Sinica. Fauna Sinica, Crustacea, freshwater Copepoda[M]. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese).
- [20] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.

- Han M S, Shu Y F. Atlas of freshwater biota in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1995 (in Chinese).
- [21] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫 [M]. 北京: 中国言实出版社, 2011.
- Wang J C, Wang X H. Chironomid larvae in northern China[M]. Beijing: China Yanshi Press, 2011 (in Chinese).
- [22] 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]. 西南农业学报, 1986(1): 25-30.
- 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]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1986(1): 25-30 (in Chinese).
- [23] 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 (in Chinese).
- [24] 曹凑贵, 汪金平, 邓环. 稻鸭共生对稻田水生动物群落的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2644-2649.
- Cao C G, Wang J P, Deng H. The impact of rice-duck inter-growth on aquatic animals community of rice fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2644-2649 (in Chinese).
- [25] 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 on the zooplankton community of cultivating duck and fish in the rice-field[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [26] 张庆阳, 吕东锋, 马旭洲, 等. 稻蟹共作系统对浮游甲壳动物群落的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(6): 834-841.
- Zhang Q Y, Lü D F, Ma X Z, *et al.* The impact of rice-crab culture system on crustacean zooplankton community[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(6): 834-841 (in Chinese).
- [27] 闵宽洪, 郁桐炳. 浙江青田“稻鱼共生”系统发展的新模式——从传统田鱼生产到现代渔业文化产业[J]. 中国渔业经济, 2009, 27(1): 25-28.
- Min K H, Yu T B. “Rice-fish farming” system in Zhejiang Province[J]. Chinese Fisheries Economics, 2009, 27(1): 25-28 (in Chinese).
- [28] 李静, 陈非洲. 太湖夏秋季大型枝角类(*Daphnia*)种群消失的初步分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 552-556.
- Li J, Chen F Z. Preliminary analysis on population decline of *Daphnia* in summer and autumn in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(4): 552-556 (in Chinese).
- [29] Dumont H J. Biogeography of rotifers[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 104: 19-30.
- [30] Dussart B H, Fernando C H, Matsumura-Tundisi T, *et al.* A review of systematics, distribution and ecology of tropical freshwater zooplankton[J]. *Hydrobiologia*, 1984, 113(1): 77-91.
- [31] Rinke K, Vijverberg J. A model approach to evaluate the effect of temperature and food concentration on individual life history and population dynamics of *Daphnia*[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 186(3): 326-344.
- [32] Smith A S, Acharya K, Jack J. Overcrowding, food and phosphorus limitation effects on ephippia production and population dynamics in the invasive species *Daphnia lumholzi*[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 618: 47-56.
- [33] 苏家勋, 邱发绪, 周维祥, 等. 三道河水库马口鱼的年龄与生长、繁殖和食性[J]. 水利渔业, 1993(1): 15-18.
- Su J X, Qiu F X, Zhou W X, *et al.* Age, growth, reproduction and feeding habits of horsemouth fish in Sandaohu reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 1993(1): 15-18 (in Chinese).
- [34] 黄尚务, 吴清江, 易伯鲁, 等. 黑龙江流域鲤鱼的繁殖、食性和生长[J]. 水生生物集刊, 1959(2): 210-214.
- Huang S W, Wu Q J, Yi B L, *et al.* Reproduction, feeding habits and growth of carp in Heilongjiang Basin[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1959(2): 210-214 (in Chinese).
- [35] 熊晶, 谢志才, 陈静, 等. 转基因鲤鱼对大型底栖动物群落及多样性的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 377-382.
- Xiong J, Xie Z C, Chen J, *et al.* Effects of ‘allfish’ gh transgenic common carp (*Cyprinus carpio* L.) on benthic macroinvertebrate community structure and biodiversity in the isolation lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(4): 377-382 (in Chinese).
- [36] 张剑, 胡亮亮, 任伟征, 等. 稻鱼系统中田鱼对资源的利用及对水稻生长的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 299-307.
- Zhang J, Hu L L, Ren W Z, *et al.* Effects of fish on field resource utilization and rice growth in rice-fish coculture[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 299-307 (in Chinese).
- [37] 黄瑜. 稻田水肥调控对氮磷流失影响和田沟塘对氮磷拦截研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- Huang Y. Effects of regulation of paddy water and fertilizer on

- nitrogen and phosphorus loss and interception of nitrogen and phosphorus by ditch pond[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [38] Haygarth P M, Jarvis S C. Transfer of phosphorus from agricultural soil[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 26: 195-249.
- [39] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. *经济地理*, 2018, 38(10): 201-210,240.
- Kong F B, Guo Q L, Pan D. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(10): 201-210,240 (in Chinese).
- [40] Wang K, Zhang Z J, Zhu Y M, *et al.* Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertiliser and manure phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2001, 42(2): 209-214.
- [41] 李岩, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对稻田水体底栖动物多样性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(7): 838-843.
- Li Y, Wang W, Ma X Z, *et al.* Effect of rice-crab culture system on zoobenthos diversity in paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(7): 838-843 (in Chinese).
- [42] 李志宇, 杨洪, 傅强, 等. 稻田摇蚊的研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(6): 150-154.
- Li Z Y, Yang H, Fu Q, *et al.* Research progress on non-biting midges in rice field[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 150-154 (in Chinese).
- [43] 杨倩倩, 李迦南, 赵星星, 等. 温度对福寿螺生物学特性的影响及高低温适应机制研究进展 [J]. *水生生物学报*, 2022, 46(11): 1754-1760.
- Yang Q Q, Li J N, Zhao X X, *et al.* Effects of temperature on biological characteristics of the apple snails and their adaptive mechanisms of tolerance to high and low temperatures[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(11): 1754-1760 (in Chinese).
- [44] 周正, 米武娟, 许元钊, 等. 克氏原螯虾两种养殖模式的食物网结构及其食性比较[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(1): 133-142.
- Zhou Z, Mi W J, Xu Y Z, *et al.* Feeding habits of *Procambarus clarkii* and food web structure in two different aquaculture systems[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(1): 133-142 (in Chinese).
- [45] 许越, 房景辉, 徐钢春, 等. 不同海拔稻鲤综合种养梯田大型底栖动物群落结构特征[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(5): 624-634.
- Xu Y, Fang J H, Xu G C, *et al.* Characteristics of the macrobenthic community structure in integrated rice-carp farming terraces at different altitudes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(5): 624-634 (in Chinese).

Study on community structure and seasonal dynamics of zooplankton and macrobenthos in Rice-Fish Symbiotic System in Qingtian, Zhejiang Province

ZHENG Sidi¹, GAO Qian^{1*}, BU Lingfei¹, XU Guanhong²,
CAI Chuanguo¹, FAN Ke¹, LIU Qigen¹

1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, International Research Center for Marine Biosciences, Ministry of Science and Technology, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Qingtian Yugong Agriculture Science and Technology Co., Ltd., Lishui 323904, China

Abstract: Zooplanktons and macrobenthos are key consumers and decomposers in the rice-fish complex ecosystem and serve as important natural food sources for fish. To investigate the effects of fish on the Rice-Fish Symbiosis System in Qingtian, Zhejiang Province—recognized as the Globally Important Agricultural Heritage System by the FAO in 2005—we examined the community structure and seasonal dynamics of zooplankton and macrobenthos in rice paddy. Specifically, we compared these communities in three types of rice paddies: rice-carp field (RC), rice-Chinese hooksnout carp fields (RCHC), and rice fields without fish (RWF) during December 2020 and April, July and September 2021. Our results identified 30 species of zooplankton (including 16 species of rotifers, 6 species of cladocerans and 7 species of copepods) and 10 macrobenthos species (including 2 oligochaetes species, 3 chironomids species, and 3 gastropods species). In zooplankton communities, *Cyclops vicinus*, *Microcyclops intermedius*, and *Brachionus calyciflorus* were dominant throughout the year, while *Scapholeberis mucronata*, *Pleuroxus laevis*, and *Euchlanis dilatata* were seasonal dominants. In macrobenthos, *Branchiura sowerbyi*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, and *Chironomus flaviplumus* were dominant species throughout the year. The Shannon-Weiner index (H'_1), Simpson diversity index (D_1), and the Pielou evenness index (J'_1) of zooplankton in the three rice paddy systems ranged from 2.9–4.1, 0.81–0.93 and 0.52–0.75, respectively. The highest H'_1 and D_1 in RC and RCHC occurred in April, while in RWF, they peaked in September. Conversely, the lowest values in RC and RCHC appeared in December, and in RWF in July. The J'_1 were the highest in April and lowest in December across all paddy types. For macrobenthos, the Shannon-Weiner index (H'_2), Simpson diversity index (D_2) and Pielou evenness index (J'_2) varied from 1.46–2.24, 0.56–0.77 and 0.52–0.75, respectively. The H'_2 and D_2 peaks occurred in September for all three paddy types, while the lowest values in RC and RCHC appeared in April and in RWF in July. The J'_2 peaked in September in RC, and in December in RCHC and RWF, with the lowest values appearing in April for RC and RCHC and in July for RWF. Our study found that the species richness, density, biomass, and diversity indexes of zooplankton and macrobenthos in the rice-fish system varied significantly across seasons (all $P < 0.05$). With the same season, the density and biomass of zooplankton and macrobenthos in RC and RCHC were lower than in RWF, although these differences were not significant (all $P > 0.05$). In summary, elucidating the community structure and seasonal dynamics of zooplankton and macrobenthos in the rice-fish symbiosis system can help reveal the intrinsic mechanisms of the mutually beneficial relationship between rice and fish. This knowledge can further promote the development and comprehensive improvement of the cropping-breeding coupled mode of rice and fishery.

Key words: rice-fish symbiosis system; zooplankton; macrobenthos; community structure; diversity index; Qingtian

Corresponding author: GAO Qian. E-mail: qgao@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900604)