

DOI: 10.5846/stxb201905171011

汪倩, 胡庚东, 宋超, 李丹丹, 郑尧, 裴丽萍, 范立明, 孟顺龙, 陈家长, 邴旭文. 基于 Ecopath 评估蟹-稻复合生态系统营养结构和能量流动. 生态学报, 2020, 40(14): 4852-4862.

Wang Q, Hu G D, Song C, Li D D, Zheng Y, Qiu L P, Fan L M, Meng S L, Chen J Z, Bing X W. Evaluation of nutritional structure and energy flow of crab-rice complex ecosystem based on an ecopath model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4852-4862.

基于 Ecopath 评估蟹-稻复合生态系统营养结构和能量流动

汪倩^{1,2,3}, 胡庚东^{1,2,3}, 宋超^{1,2,3}, 李丹丹^{1,2,3}, 郑尧^{1,2,3}, 裴丽萍^{1,2,3}, 范立明^{1,2,3}, 孟顺龙^{1,2,3,4}, 陈家长^{1,2,3,4}, 邴旭文^{1,2,3,4,*}

1 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 无锡 214081

2 中国水产科学研究院内陆渔业生态环境和资源重点开放实验室, 无锡 214081

3 农业农村部长江下游渔业生态环境监测中心, 无锡 214081

4 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081

摘要:蟹-稻综合种养模式为我国水产养殖以及农业从单一经营转变为复合经营提供了一种新模式, 为了促进蟹-稻共作模式的推广和普及, 应用 Ecopath 生态通道模型对该系统进行了营养结构和能量流动的分析。研究结果表明蟹-稻共作生态系统的最高营养级(3.140)高于稻田单作系统的最高营养级(2.676), 生态系统的能量流动主要有两条途径, 即以沉水植物和其他维管束植物为起点的牧食链及以碎屑为起点的腐质链; 蟹-稻共作农田生态系统在 6 月和 10 月的 Finn's 循环指数(Finn's cycling index, FCI, 0.55 和 1)和 Finn's 循环平均能流路径长度(Finn's cycling mean path length, FCL, 2.066 和 2.077), 稻田单作农田生态系统在 6 月和 10 月的 FCI(1.14 和 0.81)和 FCL(2.089 和 2.137), 说明蟹-稻共作模式可以形成一个稳定的生态系统, 中华绒螯蟹的加入可以促进该完整的生态系统的能量流动, 且随着螃蟹的成长, 系统成熟度有所提高, 只是较单作系统的成熟度低, 共作系统有更大的成熟空间; 蟹-稻共作农田生态系统在 6 月和 10 月的连接指数(Connectance index, CI)分别为 0.135 和 0.135, 稻田单作系统在 6 月和 10 月的 CI 为 0.188 和 0.161, 共作系统的各功能组之间的连接强度较单作系统弱, 稳定程度相对较低, 蟹-稻共作农田生态系统的初级生产力显著高于单作农田生态系统, 且蟹-稻共作农田生态系统的发育良好。

关键词:生态通道模型; 蟹-稻复合生态系统; 营养结构; 能量流动

Evaluation of nutritional structure and energy flow of crab-rice complex ecosystem based on an ecopath model

WANG Qian^{1,2,3}, HU Gengdong^{1,2,3}, SONG Chao^{1,2,3}, LI Dandan^{1,2,3}, ZHENG Yao^{1,2,3}, QIU Liping^{1,2,3}, FAN Liming^{1,2,3}, MENG Shunlong^{1,2,3,4}, CHEN Jiazhang^{1,2,3,4}, BING Xuwen^{1,2,3,4,*}

1 Freshwater Fisheries Research Center of Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China

2 Key Open Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Wuxi 214081, China

3 Fishery Eco-environment Monitoring Center of Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuxi 214081, China

4 Wuxi Fishery College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China

Abstract: The crab-rice comprehensive breeding model provides a new model for aquaculture and agriculture to change from single management to integrate management in China. In order to promote the popularization of crab-rice co-cropping model, a study was conducted to assess the nutritional structure and energy flow in a system using the ecopath ecological channel

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费资助(2016HY-ZD0701)

收稿日期: 2019-05-17; 网络出版日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bingxw@ffrc.cn

model. The results of the study showed that the highest nutrient level of crab-rice co-cropping ecosystem (3.140) was higher compared to that of rice monoculture system (2.676), there are two main ways of energy flow in an ecosystem, namely, the herding and feeding chain with submerged plants and other microtubule plants as the starting point, and the saprophytic chain with detritus as the starting point; rice and crab were used as farmland ecosystem experimental groups in June and October FCI(0.55 and 1) and FCL (2.066 and 2.077). The FCI (1.14 and 0.81) and FCL (2.089 and 2.137) of rice cropping farmland ecosystem control group in June and October showed that the rice-crab joint model can form a stable ecosystem. Besides, *Eriocheir sinensis* could promote the energy flow of the complete ecosystem, and the system maturity increased with the growth of the crab. The maturity of rice-crab co-cropping farmland ecosystem was lower than that of monoculture system, which indicated that the maturity of rice-crab co-cropping system was more space in the rice co-cropping ecosystem. The connection index of rice and crab farming ecosystem in June and October was 0.135 and 0.135 respectively. In the same months, the link index of rice field monoculture system was 0.188 and 0.161, respectively. The link strength between the functional groups of the co-cropping system was weaker than that of the monoculture system, and the degree of stability was relatively low. The primary productivity of rice-crop farming ecosystem was significantly higher than that of single-cropping farmland ecosystem, and the development of rice-shrimp farming ecosystem was better.

Key Words: ecological channel model; crab-rice complex ecosystem; nutritional structure; energy flow

我国是渔业生产大国,改革开放以来,渔业产出已成为保障国家粮食安全的重要组成部分。近 20 年来,以人工强化为主要特征的池塘集约化水产养殖得到迅速发展,并且在提高水产品供给、保障食品安全等方面发挥了重要作用。然而,高密度、高投饵率、高换水率的集约化水产养殖方式不仅造成池塘自身养殖环境压力大、养殖产品质量下降,而且由于养殖过程和捕捞期排水也加重了周边水体的环境负荷,从而引起人们对其能否可持续发展的担忧。据统计调查,我国近 3 百万公顷淡水池塘总用水量约为一千亿方左右,单位产量用水规模达 $7400 \text{ m}^3/\text{t}$,需要依赖自然水源的供给^[1-3]。按照可持续发展的要求,转变养殖生产方式,研究和开发“高效、生态、节水、安全”的健康养殖技术和模式已成为国内外渔业生产的重要发展方向。

传统水产养殖本身也不可避免地对周围环境产生污染。以内陆池塘养殖为例,我国的池塘养殖模式发展于 20 世纪 70 年代,至今仍以“进水渠+养殖池塘+排水渠”为主要形式^[4]。随着养殖水平的不断提高,单位水体的渔获量也随之增加,但是大量的饵料投入和鱼类代谢产物的积累导致池塘内源性污染加重,养殖废水的排放也大大加剧了周围水体的富营养化程度。因此,池塘养殖的环境问题已成为制约我国淡水养殖发展的重要因素之一,在对池塘养殖环境进行生态修复的同时保障水产品质量安全的研究日益受到重视^[5]。而渔农复合种养可使农业单一经营转变为综合经营,构建立体渔业体系,使平面生产变为立体生产,必将成为农业生产的重要发展方向。

稻渔综合种养开辟了一条保障水产品供给的新思路,实现了“以渔促稻、提质增效、生态环保、保渔增收”的发展目标,对产业发展起到了重要的支撑作用^[6]。其中,稻渔种养可使农业从单一经营转变为复合经营^[7-9],构建立体的综合种养农业体系使平面生产转变为立体生产,被认为是一种具有稳粮、促渔、增收、提质、环境友好、发展可持续的产业模式,是农业转方式、调结构的重要发展方向。

目前稻渔综合种养的基础理论研究薄弱,基础理论研究落后于产业发展。由于基础理论研究薄弱,从而导致对稻渔综合养种的提质增效原理不能进行充分阐述和解答^[6]。

由于以前的稻田种养研究多集中于稻田养鱼模式,而对稻田养蟹模式则涉及较少,缺乏深入系统的分析和研究,从而不利于稻田养蟹模式的推广和普及^[10]。在生态学角度,蟹-稻复合生态系统是在稻田生态系统中引入螃蟹种群后形成的以蟹、稻为主导生物的蟹-稻共生生态系统^[6]。目前营养通道生态模型的构建软件主要为 Ecopath with Ecosim 软件^[11-16],且已被广泛应用在全球包括海洋、湖泊等多个水生生态系统中,现阶段在农田生态系统中应用较少。

本课题主要采用 Ecopath with Ecosim 软件进行蟹-稻生态系统的建模。运用 Ecopath 建立静态模型,即假设建模对象的生态系统中全部生物功能组是稳定的,用公式表示为: $Q=P+R+U$,其中 Q 是消耗量, P 是生产量, R 是呼吸量, U 为未消化的食物量。Ecopath 模型定义生态系统是由一系列生态关联的功能组组成,所有功能组成分必须覆盖生态系统能量流动全过程,这些成分的相互联系充分体现了整个系统的能量循环过程^[17-18]。通过对蟹-稻复合养殖体系的营养结构和能量流动等方面进行研究,以更深入的探索蟹-稻复合生态系统的稳定性,从而为蟹-稻共作模式的应用及推广提供一定的建议与依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本课题试验于 2016 年在江苏省无锡市某水产公司进行,共设置 3 个平行实验塘,3 个平行对照塘,实验塘为蟹-稻复合共作生态种养系统,对照塘为稻田单作生态系统。实验开展初期,对 6 个塘进行相关的稻田基础设施改造,至 2017 年 4 月对 6 个塘进行相同密度的稻田播种,同年 6 月在实验塘构建蟹-稻复合生态种养系统,投入蟹苗。针对同一种养殖模式,放养水生生物的种类、稻田品种、所用肥料等因素不同,会产生不同的研究结果,另外各地的气候、田间管理方法、水质的不同也是造成研究结果不同的重要因素^[19],因此在三个蟹-稻复合种养生态系统平行实验塘构建过程中,根据当地实际情况,统一选择南梗 46 作为稻田品种、中华绒螯蟹作为养殖品种、挑选个体大小适中的螃蟹投入。同时,为了增加生态系统的多样性,在 6 个塘里分别投入相同密度的沙塘鳢和虾苗以及一定量的小杂鱼。由于螃蟹有挖洞和攀岩的特性,田埂四周用尼龙薄膜等建防逃墙,下部埋入土中 15 cm,上部高出田埂 55 cm,且每隔 1.5 m 用木桩支撑固定,网布上部内侧缝上宽度为 30 cm 左右的钙塑板形成倒挂^[20]。

采集 6 月(投放蟹苗初期)和 10 月(收获成蟹)两种农田生态系统的所有物种的相关生物学指标,通过划分不同的功能组建立两个时期的生态营养通道模型。

1.2 蟹-稻共作农田生态系统营养通道模型的构建步骤

根据蟹-稻共作农田生态系统的营养通道模型的构建要求,本模型的构建步骤如下图所示:

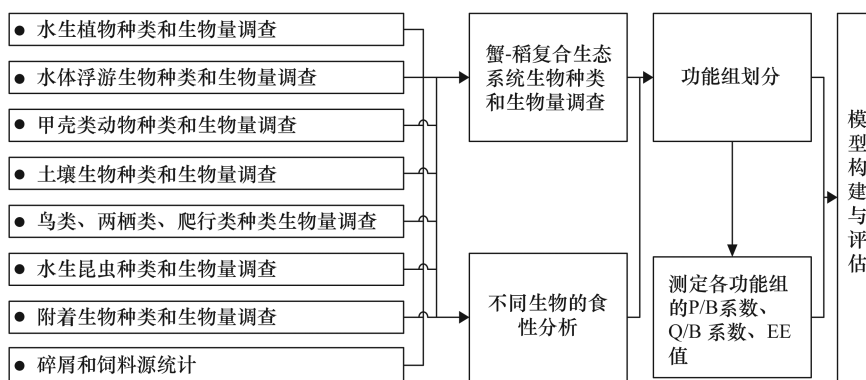


图1 模型构建步骤

Fig.1 Model building steps

P/B 系数:生产量与生物量的比值 Production/biomass ; Q/B 系数:消耗量与生物量的比值 Consumption/biomass ; EE 值:生态营养转化效率 Ecotrophic efficiency

1.2.1 蟹-稻共作生态系统的生物量资料收集和整理

建立蟹-稻共作农田生态系统的 EwE 模型需要真实可靠的数据,本课题数据均来自对江苏省无锡市的蟹-稻共作农田生态系统的实际调研数据,且收集数据基本覆盖了研究区域的所有生物,其中各平行塘间取得的数据最终以平均值呈现于该模型的数据录入中。不同功能组生产量与生物量的比值 (Production/biomass,

P/B系数)来自实际调查数据,消耗量与生物量的比值(Consumption/biomass, Q/B 系数)则是参考了本底数据和同一片区相关论文的 Ecopath 模型获取。

1.2.2 功能组的划分

从生态学角度将分类地位上相似的物种加以整合,根据实际情况,也可把单个物种或者单个物种的某个年龄阶段(成体或幼体)作为独立的功能组。本研究主要根据不同生物种类的食性,以及它们的个体大小和生长特性来划分功能组。一些具有重要经济价值或生态功能的物种,则单独作为一个功能组,以便于对其与其他功能组的关系进行分析和研究。功能组中必须包含 1 个或数个碎屑组。碎屑即生态系统中所有无生命有机物的总和。功能组定义为具有相似功能的生物种群,并不是单纯根据分类学关系进行生物组合,组合所用的标准参考 Milessi Andrés、WIFF 等人^[21-26]对功能组划分的建议。

功能组划分过程中蟹-稻共作系统与稻田单作系统均将鸟类作为一个功能组,包括麻雀(*Passer*)、白鹭(*Egretta garzetta*)和野鸭(*Mallard*);小型鱼类包括棒花鱼(*Abbottina rivularis*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、鳊鲂(*Rhodeinae*);老鼠(*Mouse*)归为哺乳类;青蛙(*Frosch*)归为两栖类;沙塘鳢(*Odontobutis obscurus*)归为肉食性鱼类;泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)归为底栖鱼类;蜘蛛(*Spider*)、青虾(*Macrobrachium nipponense*)、翘嘴鲇(*Culter alburnus*)、仔稚鱼(*Larvae and juveniles*)、稻田(*Oryza sativa*)、底栖动物(*Zoobenthos*)、浮游动物(*Zooplankton*)、浮游植物(*Phytoplankton*)均划分为单独的功能组。其中,在蟹-稻共作系统中,将中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)划为单独的一个功能组,维管束植物包括蒲草(*Typha angustifolia*)、灯芯草(*Juncus effusus* L.)和稗草(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.),水生植物包括微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、水生荇菜(*Nymphoides peltatum*)、浮萍(*Lemna minor*)、青苔(*Green moss*)、伊乐藻(*Elodea nattalii*),碎屑组包括小杂鱼饲料(*Compound feed*)、玉米饲料(*Fodder*)和碎屑(*Detritus*);而在稻田单作系统中,由于维管束植物生物量比较少,不需要为螃蟹投食,故将蒲草(*Typha angustifolia*)、灯芯草(*Juncus effusus* L.)和稗草(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、水生荇菜(*Nymphoides peltatum*)、浮萍(*Lemna minor*)、青苔(*Green moss*)、伊乐藻(*Elodea nattalii*)统一归为水生植物,且碎屑组只含有碎屑(*Detritus*)。因此,蟹-稻共作系统划分有 18 个功能组,稻田单作系统有 16 个功能组。

1.2.3 模型平衡的调整

Patricia Kavanagh 等^[27]对参数的调整与选择提出了许多建议:对于模型建立,需要重点考虑生态营养转化效率(Ecotrophic efficiency, EE)。对于每一个功能组,EE 必须介于 0—1 之间。修改输入,例如 P/B, Q/B 以及食物成分,以适应 EE 的许可范围。其次,要考虑总效率(Gross efficiency, GE),它被定义为生产量和消耗量之比。在许多情况下,GE 的数值范围在 0.1—0.3 之间,但也有例外发生。在输入不切实际的 GE 的情况下,应该检查和修改参数值,特别是对于产量已被估算的类群。另外,在 Ecopath 模型中,呼吸是用来平衡类群间能量流和物质流的因素,关于类群已知的呼吸数据可以与输出相比较,并且可以调整输入以获得合适的呼吸数据。

2 结果与分析

2.1 不同月份农田生态系统营养通道模型参数估算

根据对江苏省无锡市五里湖生物资源的调查得到的相关数据^[28-30],以及参考生态模型的构建方法。利用 EwE6.0 构建蟹-稻共作农田生态系统的 Ecopath 模型,功能组参数的输入和模型调试结果见表 1 和表 2。

根据 EwE 模型输出的 6 月和 10 月的营养级数据,可以看出对照组中不同功能组的营养级发生了明显的改变,特别是处于较高营养级的功能组均呈现下降趋势,反映了此生态系统在 10 月由于初级生产者的生物量加大,以及处于高营养级对初级生产者的捕食强度增加,最终使得高营养级呈下降趋势;实验组中不同功能组的营养级均未发生改变,各个营养级相对稳定,说明实验组的生态系统在不同季节均能维持一个稳定的状态,投入的小杂鱼饲料和玉米饲料均能沿着碎屑食物链被中华绒螯蟹采食,构成了一个完整的生态系统(表 1 和表 2)。

表 1 对照组蟹-稻共作农田生态系统 Ecopath 模型功能组估算参数

Table 1 Estimation parameters of functional group of Ecopath model for farmland ecosystem in the control group

功能组 Functional group	营养级 Nutrition level		生物量 Biomass		生产量/生物量 Production/biomass		消耗量/生物量 Consumption/biomass		营养传输效率 Ecotrophic efficiency	
	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October
鸟类 Birds	2.68 *	2.53 *	2.04	1.78	2.54	2.54	14.68	14.68	0.00 *	0.00 *
哺乳 Mammals	2.00 *	2.00 *	1.67	3.38	5.81	5.81	10.29	10.29	0.00 *	0.00 *
两栖类 Frosch	3.63 *	3.33 *	1.07	1.11	3.28	3.28	11.23	11.23	0.00 *	0.00 *
蜘蛛 Spider	3.33 *	3.00 *	0.11	0.01	255.24	255.24	55.24	55.24	0.17 *	0.00 *
青虾 Macrobrachium nipponense	3.09 *	2.85 *	1.65	1.89	13.54	13.54	3.66	3.66	0.40 *	0.20 *
翘嘴鲇 Culter alburnus	2.80 *	2.00 *	0.03	2.04	0.87	11.87	3.20	3.20	0.00 *	0.27 *
肉食性鱼类 Piscivorous	3.29 *	3.38 *	2.61	3.78	2.16	2.16	11.00	11.00	0.00 *	0.00 *
小型鱼类 Little fishes	2.29 *	2.13 *	1.31	4.28	25.47	25.47	17.10	17.10	0.88 *	0.00 *
底栖鱼类 Misgurnus anguillicaudatus	2.86 *	2.63 *	3.92	12.99	1.13	11.13	12.30	12.30	0.51 *	0.25 *
仔稚鱼 larvae and juveniles	2.40 *	2.00 *	0.11	1.02	365.29	7.55	21.00	21.00	0.80 *	0.95 *
底栖动物 Zoobenthos	2.00 *	2.00 *	0.30	3.03	65.13	65.13	101.00	101.00	0.39 *	0.40 *
浮游动物 Zooplankton	2.00 *	2.00 *	0.09	2.21	237.30	237.30	12.00	12.00	0.74 *	0.04 *
浮游植物 Phytoplankton	1.00 *	1.00 *	0.84	3.04	261.70	261.70	0.00	0.00	0.06 *	0.07 *
稻田 Oryza sativa	1.00 *	1.00 *	450.00	2798.60	2.26	2.26	0.00	0.00	0.03 *	0.01 *
水生植物 Submerged macrophytes	1.00 *	1.00 *	492.80	686.18	2.25	2.25	0.00	0.00	0.03 *	0.04 *
碎屑 Detritus	1.00 *	1.00 *	7.69	4.67					0.01 *	0.02 *

* 数据由模型估算得出,其他数据为调查、采样所得

表 2 实验组蟹-稻共作农田生态系统 Ecopath 模型功能组估算参数

Table 2 Estimation parameters of functional group of Ecopath model for farmland ecosystem in the experimental group

功能组 Functional group	营养级 Nutrition level		生物量 Biomass		生产量/生物量 Production/biomass		消耗量/生物量 Consumption/biomass		营养传输效率 Ecotrophic efficiency	
	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October
鸟类 Birds	3.14 *	3.14 *	2.05	4.23	2.54	2.54	14.68	14.68	0.00 *	0.00 *
哺乳类 Mammals	2.00 *	2.00 *	0.48	0.56	5.81	5.81	10.29	10.29	0.00 *	0.00 *
两栖类 Frosch	3.35 *	3.35 *	1.55	1.50	3.28	3.28	11.23	11.23	0.00 *	0.00 *
蜘蛛 Spider	2.39 *	2.39 *	0.11	1.01	155.24	155.24	55.24	55.24	0.82 *	0.09 *
中华绒螯蟹 Eriocheir sinensis	2.00 *	2.00 *	23.06	49.98	3.09	3.09	41.22	41.22	0.03 *	0.05 *
青虾 Macrobrachium nipponense	2.40 *	2.40 *	2.68	18.90	13.54	13.54	3.66	3.66	0.21 *	0.06 *
翘嘴鲇 Culter alburnus	2.80 *	2.80 *	0.08	0.03	0.87	0.87	3.20	3.20	0.00 *	0.00 *
肉食性鱼类 Piscivorous	3.90 *	3.90 *	2.63	20.87	2.16	2.16	11.00	11.00	0.53 *	0.14 *
小型鱼类 Little fishes	2.90 *	2.90 *	5.55	6.47	25.47	35.47	17.10	17.10	0.19 *	0.75 *
底栖鱼类 Misgurnus anguillicaudatus	3.35 *	3.35 *	2.36	2.44	1.13	1.13	12.30	12.30	0.00 *	0.00 *
仔稚鱼 larvae and juveniles	2.90 *	2.90 *	0.11	1.03	256.55	97.77	121.00	121.00	0.95 *	0.95 *
底栖动物 Zoobenthos	2.00 *	2.00 *	0.21	1.06	285.31	285.31	143.00	143.00	0.95 *	0.22 *
浮游动物 Zooplankton	2.00 *	2.00 *	0.40	2.21	165.13	165.13	101.00	101.00	0.86 *	0.52 *

功能组 Functional group	营养级 Nutrition level		生物量 Biomass		生产量/生物量 Production/biomass		消耗量/生物量 Consumption/biomass		营养传输效率 Ecotrophic efficiency	
	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October
	June	October	June	October	June	October	June	October	June	October
维管束植物 Macrophytes	1.00 *	1.00 *	665.47	540.03	2.25	2.25	0.00	0.00	0.32 *	0.88 *
稻田 Oryza sativa	1.00 *	1.00 *	2720.00	8837.20	2.26	2.26	0.00	0.00	0.02 *	0.01 *
水生植物 Submerged macrophytes	1.00 *	1.00 *	686.36	1460.50	2.25	2.25	0.00	0.00	0.25 *	0.26 *
浮游植物 Phytoplankton	1.00 *	1.00 *	0.46	2.36	261.70	261.70	0.00	0.00	0.39 *	0.36 *
碎屑 Detritus	1.00 *	1.00 *	50.26	154.29					0.00	0.01

* 由模型估算得出,其他数据为调查、采样所得

综合实验组和对照组的营养级可以看出,实验组最高营养级(3.140)高于对照组最高营养级(2.676)。其次,实验组在 6 月和 10 月之间每个功能组的营养级差异不明显,而对照组在不同月份之间的营养级差异明显。

2.2 不同月份两种农田生态系统食物网结构

建立在物质循环基础上的生态系统的能量流动方式可以通过营养流动分析图来说明。通过构建不同月份两种养殖方式的生态系统的营养结构模型,从模型的模拟结果可以得到图 2。图中每个圆分别代表对应的功能组,连线代表能量传递过程,圆面积代表相对生物量的多少,图 2 呈现了实验组和对照组在 6 月和 10 月的营养结构图,其中对照组的能量流动通道分为两类,一是牧食链:以沉水植物和其他微束管植物为起点,分别向小型鱼类、青虾、肉食性鱼类流动;另一条是腐质链:以碎屑为起点,分别向底栖动物、小型鱼虾类、肉食性

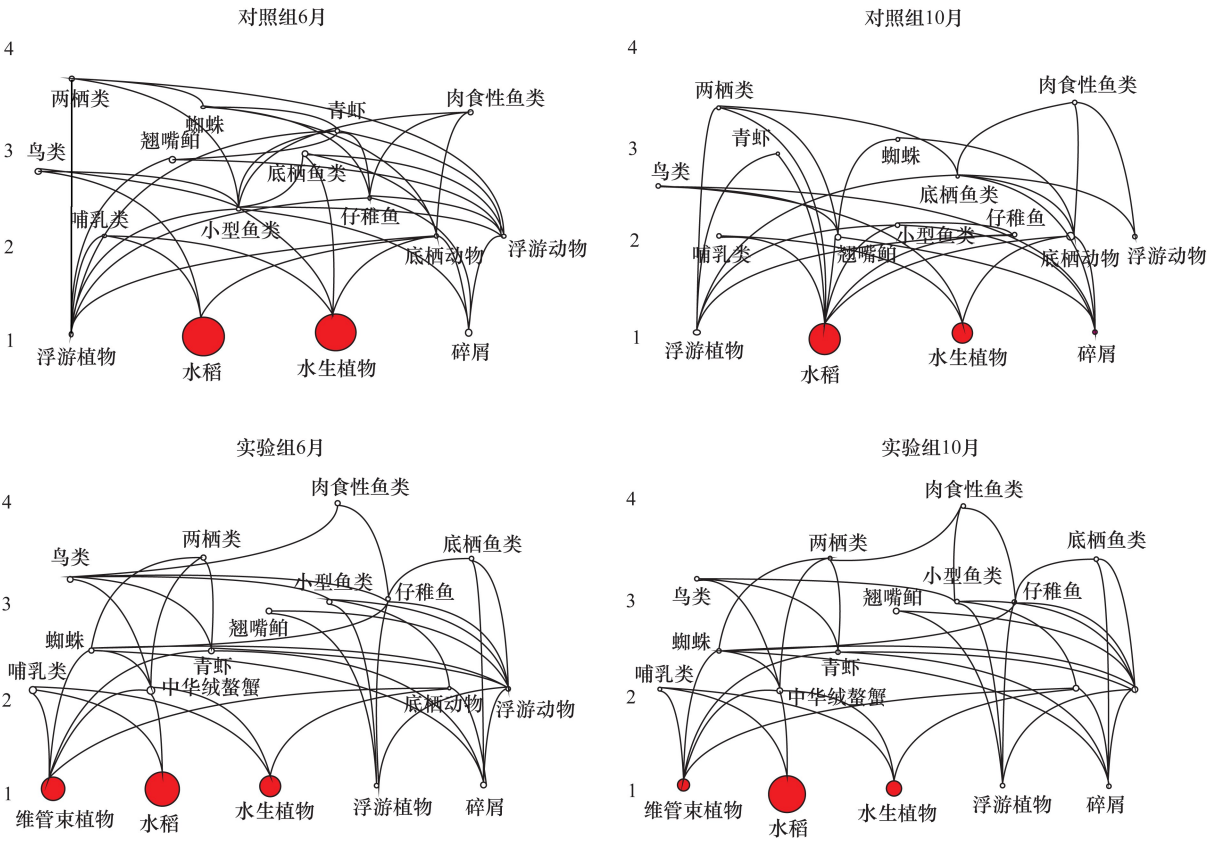


图 2 营养结构图
Fig.2 Nutritional structure group

鱼类流动。实验组的能量流动通道主要包括两条经典的食物链,一是牧食链:同样以沉水植物和其他维管束植物为起点,分别向中华绒螯蟹、小型鱼虾类、肉食性鱼类流动;另一条是腐质链:以碎屑为起点,分别向底栖动物、小型鱼虾类、肉食性鱼类流动。实验组与对照组在能量流动方式上,由于实验组增加了中华绒螯蟹这一中间功能组,一定程度上促进了蟹-稻共作生态系统中能量的流动。

2.3 不同月份两种农田生态系统成熟度分析

生态系统的成熟程度还可以用 Finn's 循环指数(Finn's cycling index, FCI)和 Finn's 循环平均能流路径长度(Finn's cycling mean path length, FCL)来评价^[31]。FCL 是每个循环流经过食物链的平均长度。越是成熟的系统,其物质再循环的比例越高,营养流所经过的食物链也越长。蟹-稻共作生态系统在 6 月和 10 月的 FCI(0.55 和 1)和 FCL(2.066 和 2.077);稻田单作生态系统在 6 月和 10 月的 FCI(1.14 和 0.81)和 FCL(2.089 和 2.137);一方面表明蟹-稻共作农田生态系统实验组成熟度低,还有更大的成熟空间;另一方面说明随着螃蟹的成熟,蟹-稻共作生态系统越来越成熟稳定(见表 3)。

表 3 不同月份蟹-稻共作农田生态系统循环路径长度分析

Table 3 Analysis of the length of circulation path of farmland ecosystem in rice and crab in different months

参数 Parameter	实验组 Test group		对照组 Control group		单位 Unit
	6 月 June	10 月 October	6 月 June	10 月 October	
能量循环(除去碎屑组) Throughput cycled (excluding detritus)	66.77	0	0	0	t km ⁻² a ⁻¹
掠夺性循环指数 Predatory cycling index	3.73	0	0	0	% of throughput without detritus
能量循环(包含碎屑组) Throughput cycled (including detritus)	107.34	527.29	56.43	154.41	t km ⁻² a ⁻¹
Finn's 循环指数 Finn's cycling index	0.55	1	1.14	0.81	% of total throughput
Finn's 平均能流路径长度 Finn's cycling mean path length	2.066	2.077	2.089	2.137	

2.4 两种生态系统混合营养动力影响分析

混合营养影响(Mixed Trophic Impacts, MTI)是分析生态系统内部不同种群相互之间直接和间接作用的有效途径,是 EwE 软件的基本功能之一^[32]。图 3—图 6 分别为不同年份蟹-稻生态系统的 MTI 分析图,从图中可以看出,6 月和 10 月实验组中的中华绒螯蟹对生态系统的诸多功能组(维管束植物、稻田和水生植物)均产生了较大的负面作用,稻田对鸟类和哺乳类均产生了比较强烈的正面作用。而对照组中不同功能组在六月份与其他功能组的影响程度较剧烈,而在十月份功能组之间的相互作用较为平缓。说明通过在稻田单作生态系统中引入中华绒螯蟹,一方面可以抑制杂草等的生长,减少农药的喷洒,另一方面这些植物还可以作为螃蟹的少部分饵料,以促进螃蟹的生长,达到增产创收的目的。

2.5 能量转换效率的林氏锥分析

林氏锥分析法是判定整合营养级间能量传递效率的有效方式^[31,33]。通过生态通道模型建立的林氏锥分析图可以看出,蟹-稻共作农田生态系统共存在两条食物链:碎屑食物链和牧食食物链。从营养级 VI 到营养级 VII 的捕获量很小,所以蟹-稻共作农田生态系统可以粗略估算有 5 个整合营养级(图 7—图 10)。各营养级占系统总输入量(Total system throughput, TST)的数值沿牧食食物链逐级降低。这可能是由于蟹-稻共作农田生态系统中投放了中华绒螯蟹,并且增加了碎屑(玉米和小杂鱼)的生物量,使得蟹-稻共作农田生态系统的碎屑食物链输出量显著增加。

3 两种生态系统的总体特征讨论

蟹-稻共作农田生态系统的特征参数如总消耗量、总输出量、总呼吸量等参数见表 4。生态系统总消耗量

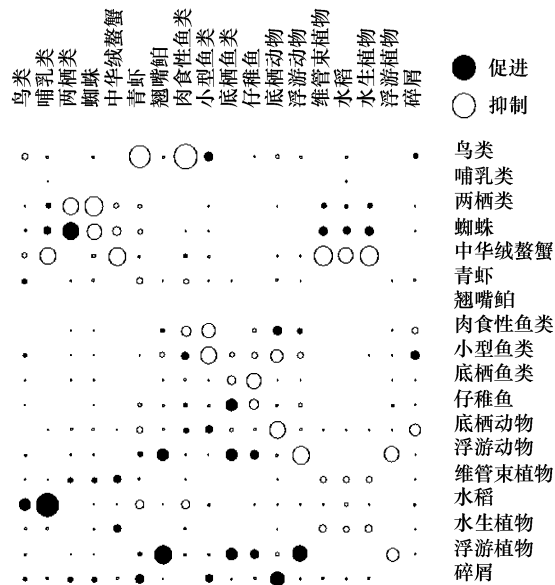


图3 6月实验组各生物种群之间的混合营养影响

Fig.3 Mixed nutrition effects among various biological populations in the experimental group in June

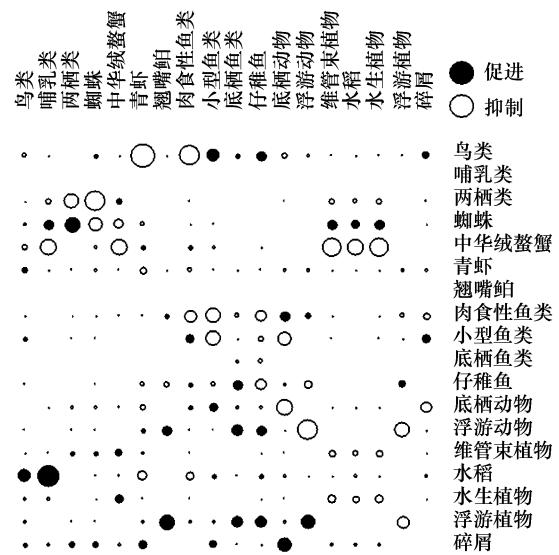


图4 10月实验组各生物种群之间的混合营养影响

Fig.4 Mixed nutrition effects among various biological populations in the experimental group in October

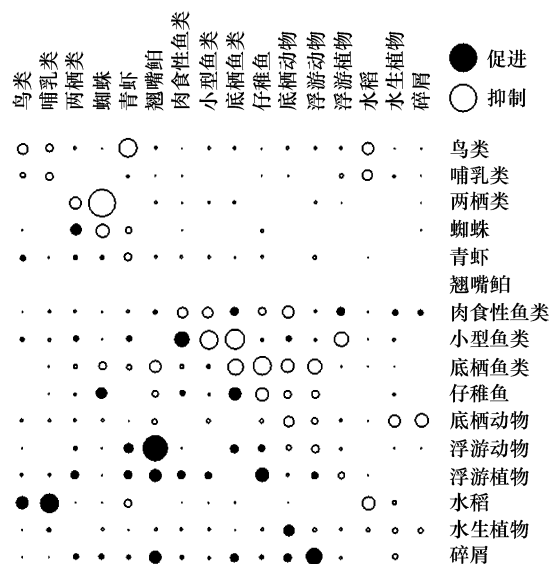


图5 6月对照组各生物种群之间的混合营养影响

Fig.5 Mixed nutrition effects among various biological populations in the control group in June

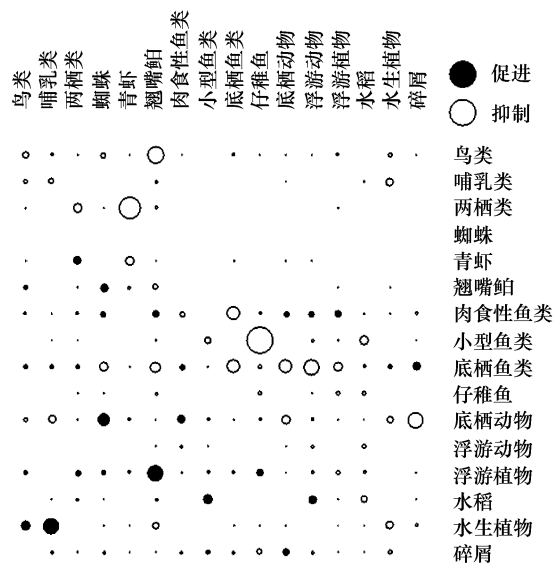


图6 蟹-稻共生生态系统10月对照组各生物种群之间的混合营养影响

Fig.6 Mixed nutrition effects among various biological populations in the control group in October

TQ 是表征系统规模的指标,它是总摄食、总输出、总呼吸以及流入碎屑能量的总和。从表4可以看出,实验组的总体消耗量显著高于对照组的总体消耗量,并且10月的总体消耗值高于6月的值。农田生态系统初级生产力(Calculated total net primary production, TPP)6月实验组为 $9321.42 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,10月实验组为 $25123.66 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,6月对照组 $2348.46 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,10月对照组为 $8674.90 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,说明实验组生态系统的初级生产力显著高于对照组。实验组系统总初级生产量/总呼吸量的比值在6月和10月分别为16.32和28.54,而在对照组则不可计算,可以看出实验组生态系统能够利用生态系统初级生产者,即实验组生态系统

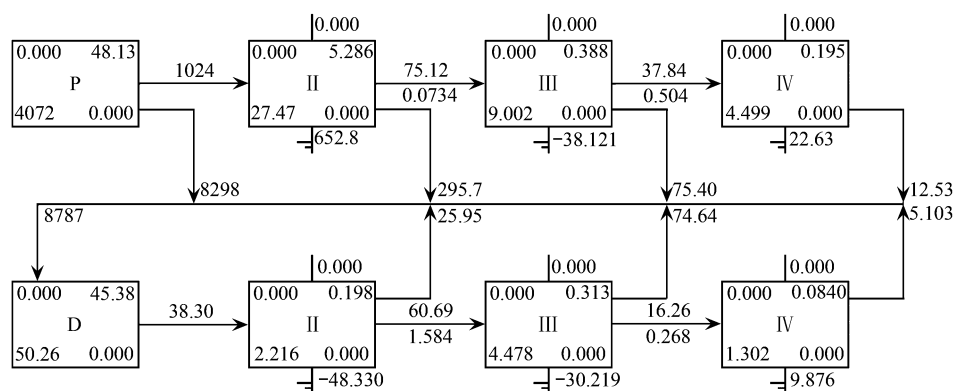


图7 6月实验组各生物种群之间的林氏锥分析

Fig.7 Lin's cone analysis between biological populations in the experimental group in June

P:捕食者 Predation; D:碎屑 Detritus

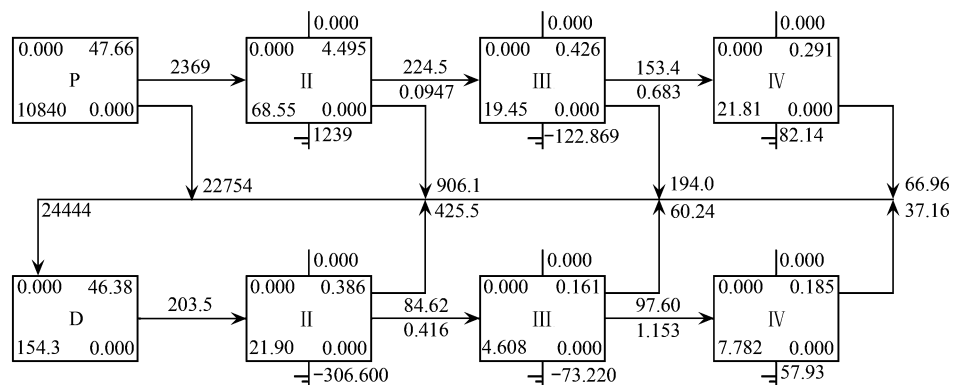


图8 10月实验组各生物种群之间的林氏锥分析

Fig.8 Lin's cone analysis between biological populations in the experimental group in October

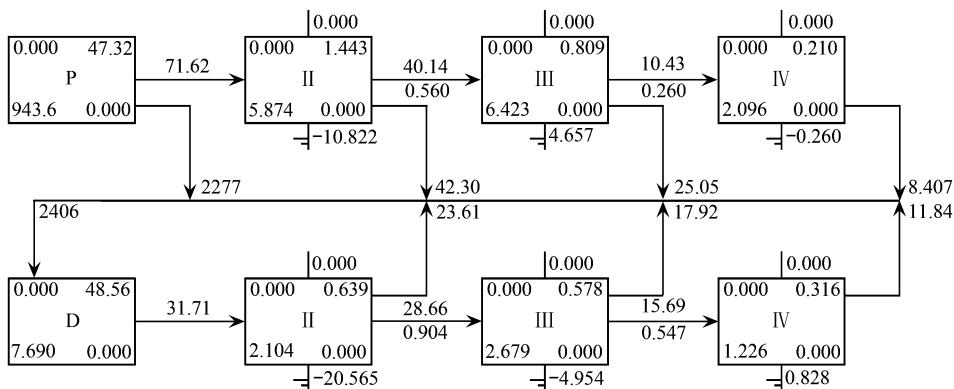


图9 6月对照组各生物种群之间的林氏锥分析

Fig.9 Lin's cone analysis between biological populations in the control group in June

发育良好。从生态系统发育的信息学特征来分析生态系统的发育程度,连接指数(Connectance index, CI)是表征系统内部联系复杂程度的指标,越是成熟的系统,其各功能组间的联系越强,系统越稳定,实验组在6月

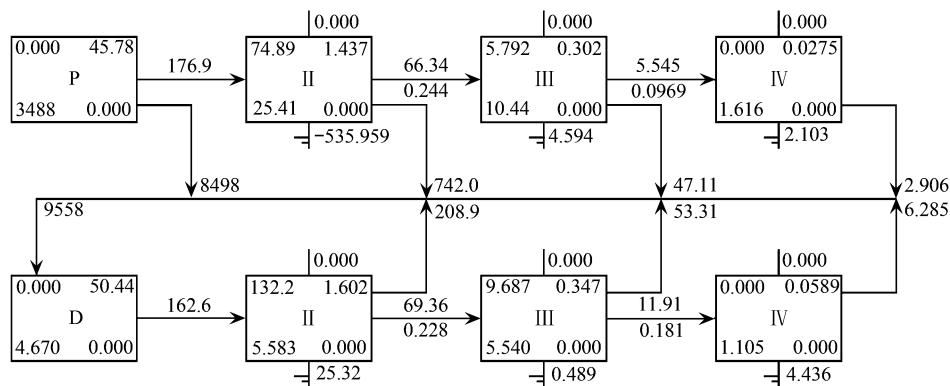


图 10 10 月对照组各生物种群之间的林氏锥分析
Fig.10 Lin's cone analysis between biological populations in the control group in October

和 10 月的 CI 分别为 0.135 和 0.135,对照组在 6 月和 10 月的 CI 分别为 0.188 和 0.161,由此可知,实验组的各功能组间的连接强度较对照组弱,稳定程度相对较低。因此,根据生态系统多样性与稳定性关系的角度,建议在下一步的蟹-稻共作模式种养过程中,可以通过投加多种饵料组分以及增加系统功能组组分的方式,加以促进蟹-稻共作农田生态系统的稳定性。

表 4 不同月份农田生态系统总体统计学参数分析
Table 4 Analysis of General Statistical Parameters of Farming Ecosystem in Different Months

参数 Parameter	实验组 Test group		对照组 Control group		单位 Unit
	6 月	10 月	6 月	10 月	
	June	October	June	October	
总消耗量 Sum of all consumption	1255.78	3139.71	204.36	715.87	t km ⁻² a ⁻¹
总输出 Sum of all exports	8750.41	24243.38	2378.31	9396.17	t km ⁻² a ⁻¹
总呼吸量 Sum of all respiratory flows	571.01	880.28	-29.85	-498.70	t km ⁻² a ⁻¹
流向碎屑总量 Sum of all flows into detritus	8788.71	24446.87	2410.02	9558.76	t km ⁻² a ⁻¹
系统总流量 Total system throughput	19365.90	52710.25	4962.83	19172.09	t km ⁻² a ⁻¹
总生产量 Sum of all production	9763.11	26755.15	2541.80	9746.29	t km ⁻² a ⁻¹
总初级生产计算量 Calculated total net primary production	9321.42	25123.66	2348.46	8674.90	t km ⁻² a ⁻¹
总初级生产量/总呼吸量 Total primary production/total respiration	16.32	28.54	不可计	不可计	
连接系数 Connectance index	0.135	0.135	0.188	0.161	

4 结论

通过本文研究,说明蟹-稻共作模式可以形成一个稳定的生态系统,且中华绒螯蟹的加入可以促进该完整的生态系统的能量流动,且随着螃蟹的长成,系统成熟度有所提高,只是较单作系统的成熟度低,有更大的成熟空间;共作系统的各功能组之间的链接强度较单作系统弱,稳定程度相对较低;但是蟹-稻共作农田生态系统的初级生产力显著高于单作农田生态系统,且蟹-稻共作农田生态系统的发育良好。因此,建议在蟹-稻共作系统推广的过程中,为了更好地增产创收,可以增加饵料的多样性,为该生态系统增加一定的功能组成分,更好地促进系统的稳定性。

参考文献 (References) :

[1] 宋超,陈家长,戈贤平,孟顺龙,范立民,胡庚东. 池塘循环水养殖模式下养殖面积与净化面积的配比关系研究(英文). 农业科学与技

- 术, 2013, 14(4): 684-688.
- [2] 鲍伟君. 淡水池塘工程化循环水养殖系统性能评估及基于粒径分布的悬浮颗粒物去除研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 96-96.
- [3] 中国水产科学研究院. 淡水池塘规范化建设技术在各地示范推广. 中国渔业报, 2016, 08(A03).
- [4] 胡庚东, 宋超, 陈家长, 吴伟, 孟顺龙, 范立民, 戈贤平. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 82-86.
- [5] 宋超, 陈家长, 戈贤平, 吴伟, 范立民, 孟顺龙, 胡庚东. 浮床栽培空心菜对罗非鱼养殖池塘水体中氮和磷的控制. 中国农学通报, 2011, 27(23): 70-75.
- [6] 孟顺龙, 胡庚东, 李丹丹, 裴丽萍, 宋超, 范立民, 郑尧, 吴伟, 陈家长, 邴旭文. 稻田综合种养技术研究进展. 中国农学通报, 2018, 34(02): 146-152.
- [7] Huang S W, Liu L M, Fu Q, Zhu D F. Nonchemical pest control in China rice: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 275-291.
- [8] Frei M, Becker K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture. *AQUACULTURE*, 2005, 244(1/4): 119-128.
- [9] 李嘉尧, 常东, 李柏年, 吴旭干, 朱泽闻, 成永旭. 不同稻田综合种养模式的成本效益分析. 水产学报, 2014, 38(9): 1431-1438.
- [10] 陈飞星, 张增杰. 稻田养蟹模式的生态经济分析. 应用生态学报, 2002, 13(3): 323-326.
- [11] De Haast J A, Treasure A M, Ruzicka J J, Moloney C L. A donor-driven approach to modelling anchovy-sardine dominance shifts in the southern Benguela ecosystem. *Journal of Marine Systems*, 2018, 188: 117-132.
- [12] Mukherjee J, Karan S, Chakrabarty M, Banerjee A, Rakshit N, Ray S. An approach towards quantification of ecosystem trophic status and health through ecological network analysis applied in Hooghly-Matla estuarine system, India. *Ecological Indicators*, 2019, 100: 55-68.
- [13] Webber M, Persad G, Harris N, Wilmot I, Webber D. An ecological assessment of Foul and Folly Bays, Morant wetlands area, Jamaica using Ecopath with Ecosim. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 105: 127-137.
- [14] Geers T M, Pikitch E K, Frisk M G. An original model of the northern Gulf of Mexico using Ecopath with Ecosim and its implications for the effects of fishing on ecosystem structure and maturity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 129: 319-331.
- [15] Frisk M G, Miller T J, Latour R J, Martell S J D. Assessing biomass gains from marsh restoration in Delaware Bay using Ecopath with Ecosim. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 190-200.
- [16] Ståbler M, Kempf A, Temming A. Assessing the structure and functioning of the southern North Sea ecosystem with a food-web model. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 165: 280-297.
- [17] 宋兵, 陈立侨, Chen Y. Ecopath with Ecosim 在水生生态系统研究中的应用. 海洋科学, 2007, 31(1): 83-86.
- [18] 林群, 金显仕, 郭学武, 张波. 基于 Ecopath 模型的长江口及毗邻水域生态系统结构和能量流动研究. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 28-36.
- [19] 李伦, 罗强, 吴士龙, 詹忠国. 渔稻养作及其在涝渍地综合利用中的研究综述. 节水灌溉, 2016, (5): 75-80.
- [20] 曾立东. 稻田养殖泥鳅和鳌虾的技术浅谈. 农业与技术, 2016, 36(16): 112-112.
- [21] Jaureguizar A J, Cortés F, Milessi A C, Cozzolino E, Allegra L. A trans-ecosystem fishery: Environmental effects on the small-scale gillnet fishery along the Río de la Plata boundary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166: 92-104.
- [22] Ocampo Reinaldo M, Milessi A C, Romero M A, Crespo E, Wolff M, González R A. Assessing the effects of demersal fishing and conservation strategies of marine mammals over a Patagonian food web. *Ecological Modelling*, 2016, 331: 31-43.
- [23] Vögler R, Milessi A C, Quiñones R A. Influence of environmental variables on the distribution of *Squatina guggenheim* (Chondrichthyes, Squatinidae) in the Argentine - Uruguayan Common Fishing Zone. *Fisheries Research*, 2008, 91(2/3): 212-221.
- [24] Wiff R, Barrientos M A, Milessi A C, Quiroz J C, Harwood J. Modelling production per unit of food consumed in fish populations. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, 365: 67-75.
- [25] Milessi A C, Sellanes J, Gallardo V A, Lange C B. Osseous skeletal material and fish scales in marine sediments under the oxygen minimum zone off northern and central Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(2/3): 185-190.
- [26] Milessi A C, Danilo C, Laura R G, Daniel C, Javier S, Rodríguez-Gallego L. Trophic mass-balance model of a subtropical coastal lagoon, including a comparison with a stable isotope analysis of the food-web. *Ecological Modelling*, 2010, 221(24): 2859-2869.
- [27] Chamberlain P, Patterson G, Reid J, Kavanagh K, Forgatch M. Observation of client resistance. *Behavior Therapy*, 1984, 15(2): 144-155.
- [28] 黄孝锋, 邴旭文, 陈家长. 五里湖生态系统能量流动模型初探. 上海海洋大学学报, 2012, 21(1): 78-85.
- [29] 黄孝锋, 邴旭文, 陈家长. 基于 Ecopath 模型的五里湖生态系统营养结构和能量流动研究. 中国水产科学, 2012, 19(3): 471-481.
- [30] 黄孝锋. 五里湖生态系统 ECOPATH 模型的构建与评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [31] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 贡艺. 基于 Ecopath 模型的太湖生态系统结构与功能分析. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2033-2040.
- [32] Hannon B. The structure of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 41(3): 535-546.
- [33] 米玮洁, 胡菊香, 赵先富. Ecopath 模型在水生生态系统评价与管理中的应用. 水生态学杂志, 2012, 33(1): 127-130.