

文章编号: 1000-0615(2018)05-0711-09

DOI: 10.11964/jfc.20170410796

基于Ecopath模型的复合养殖池塘构建

曾宪磊¹, 魏宝成², 刘兴国^{1*}, 顾兆俊¹, 陆诗敏¹, 车 轩¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 为了从能量量化的角度分析淡水池塘循环水养殖系统的构建, 选择了在中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心(上海泖港, 30°57'1.89"N, 121°08'52.21"E)构建的分隔式和序批式2种复合养殖模式, 并选择了1个传统池塘作为对照。根据2016年全年的实测数据, 应用Ecopath with Ecosim 6.5软件分析了3种淡水池塘循环水养殖系统能量流动特征。结果显示, 传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘饲料的营养传递效率(EE)最高, 依次为0.77、0.75、0.99, 饲料系数依次为2.5、2.8、1.6, 表明按规格区分的序批式池塘系统更有利于饲料转化。枝角类、桡足类、轮虫在传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘中EE依次分别为0.7/0.09/0.39、0.8/0.02/0.12、0.77/0.89/0.07, 表明枝角类能被系统有效利用, 但不同养殖模式影响着不同浮游动物的营养传递效率。另外, 降雨和底泥沉积物EE均小于0.1, 表明功能组底泥沉积物和功能组降雨没有被系统有效利用。生态位重叠分析显示分隔式池塘猎物重叠度指数最大, 序批式池塘捕食重叠度最大, 表明分隔式池塘中饵料竞争强度大, 序批式池塘来自于同一捕食者的捕食压力大, 分隔式池塘可以通过加强区域水体流动来降低饵料竞争强度。能流分析显示淡水池塘循环水养殖系统的主要能量流动方式为牧食链。系统总体特征分析显示, 分隔式和序批式复合池塘在系统成熟度上优于传统池塘, 说明通过复合养殖模式的构建, 在改变单一传统池塘生态脆弱和提高系统多样性上是可行的。

关键词: 池塘; 复合养殖; Ecopath模型; 营养传递效率

中图分类号: S 955.1

文献标志码: A

池塘养殖是我国主要的水产养殖方式, 但传统池塘养殖密度大, 养殖环境污染重^[1]。为了提高水产养殖效益, 目前出现了多种复合池塘养殖模式, 如刘兴国等^[2-3]构建的池塘生态工程化循环水养殖系统, 与传统池塘养殖模式相比, 具有高效、健康、安全、节水、节地的特点。李谷等^[4]构建的复合人工湿地—池塘养殖生态系统, 水质净化单元净化功能强大, 基本实现养殖废水零排放, 表现出明显的生态环境效益和经济效益。Brune等^[5]研发的分隔式池塘养殖系统, 具有一定的生态效益。目前复合养殖池塘模式及其影响研究较多, 但这些复合养

殖的能量流动特征还不清楚。

Ecopath模型因具有强大的分析功能, 在水域生态系统中的应用越来越普遍。如李云凯等^[6]应用Ecopath with Ecosim (EwE) 6.1软件构建了太湖生态系统的食物网模型, 初步分析了太湖生态系统功能与结构特征, 刘恩生等^[7]通过基于Ecopath模型的分析指出巢湖生态系统退化的关键原因是浮游植物的生物量、生产量过高且难以被利用。许祯行等^[8]通过Ecopath模型分析了3个时期獐子岛人工鱼礁海域生态系统的能量流动结构和功能变化。周波^[9]采用EwE软件分析了草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)综合养殖池塘生态

收稿日期: 2017-04-17 修回日期: 2017-11-02

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2016GH01, 2016HY-ZD0704)

通信作者: 刘兴国, E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

系统,首次对池塘生态系统进行了能量流动量化分析。复合养殖池塘的构建目前多采用生态学原理,比如在同一水体中利用养殖品种间在食性、栖息水层、生长季节等方面的差异开展合理混养,但从能量定量的角度研究的较少。本研究选择已在中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心(上海泖港, $30^{\circ}57'1.89''N$, $121^{\circ}08'52.21''E$)构建并运行的分隔式和序批式2类复合养殖池塘,并选择1个传统池塘作为对照,旨在从能量量化的角度为淡水池塘循环水养殖系统优化提供理论参数。本研究通过Eco-path模型首次分析了淡水池塘循环水养殖系统能量流动特征。

1 材料与方法

1.1 实验对象

本研究所所述分隔式养殖池塘是按照80:20的池塘养殖技术构建的一种复合养殖池塘,可以将不同鱼类的立体混养按生态位分隔开,既达到混养效果又有利于不同鱼类生长,提高生态效益和养殖效益,同时也有利于集中管理。所选池塘规格为100 m×50 m,平均水深1.6 m,水面面积0.469 hm²,四周使用1 800 mm×900 mm×120 mm的水泥预制板护坡,坡比约为1:2.5。20%的面积为滤食性鱼类养殖区,80%的面积为吃食性鱼类养殖区,吃食性鱼类养殖区再分为2块区域,可分别单养2种吃食性鱼类^[10],实验期滤食性鱼类养殖品种为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*),放养量共20 000尾,吃食性鱼虾类养殖品种和放养量分别为罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)60 000尾,团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)5 400尾(图1-a)。所述序批式养殖池塘规格为100 m×50 m,平均水

深1.6 m,水面面积0.469 hm²,池塘的80%水面为滤、杂食性鱼类养殖区,20%水面构建养殖不同规格吃食性鱼类的流水养殖池区,此区域由集中设置的多排鱼池组成,每个鱼池四周设置有隔墙,每排鱼池由3种规格的鱼池组为一个养殖单元,3种规格的鱼池分别为切角方形成鱼养殖池、矩形大规格鱼种养殖池和矩形小规格鱼种养殖池,3种鱼池的面积比为7:3.5:1^[11],配备有水流推动装置和集污排污装置(图1-b)。所选对照池塘为传统池塘,池塘规格为100 m×50 m,平均水深1.6 m,水面面积0.469 hm²,实验期滤食性鱼类养殖品种为鲢、鳙,放养量共20 000尾,吃食性鱼类养殖品种为团头鲂,放养量20 000尾,其中鱼苗6 000尾,大规格鱼苗6 000尾,成鱼8 000尾。

1.2 基本方程组

根据热动力学原理, Eco-path模型定义系统中每一个生物功能组的能量输入与输出保持平衡:

生产量-捕食死亡-其他自然死亡-产出量=0
其数学表达式:

$$P_i - B_i \times M2_i - B_i \times (1 - EE_i) - EX_i = 0$$

式中 P_i 为功能组 i 的生产量, B_i 为功能组 i 的生物量, $M2_i$ 为 i 组的被捕食死亡率, $(1-EE_i)$ 为 i 组的其他死亡率, EE (ecotrophic efficiency)为营养传递效率, EE_i 是功能组 i 生态营养转换效率, EX_i 为 i 组的产出(包括捕捞量和迁移量)。此式可进一步表示为:

$$B_i \times (P/B)_i - \sum^{B_j} \times (Q/B)_j \times DC_{ij} - (P/B)_i \times B_i \times (1 - EE_i) - EX_i = 0$$

$(P/B)_i$ 为 i 组的生产量与生物量比值, $(Q/B)_j$ 为消化量与生物量比值, DC_{ij} 为被捕食组 i 占捕食组 j 的

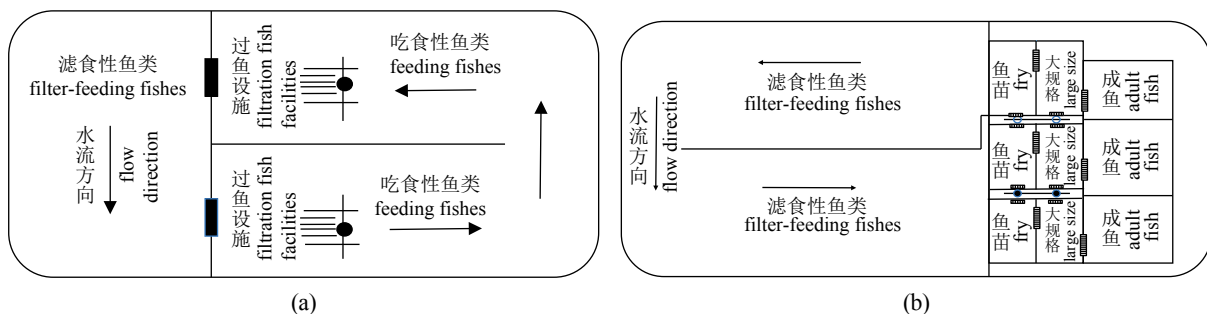


图1 复合养殖模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compound cultivation ponds

总捕食物的比例。

Ecopath软件对上述 n 个线性方程求解, 通过使用方程表示的能量在生态系统每个功能组之间的流动保持平衡, 定量生态系统中各个成分的生物学参数。因此在使用Ecopath软件分析能量物质流动时, 生物量 B 、生产量与平均生物量比值(P/B), 消化量与平均生物量比值(Q/B), 食物矩阵(D_{ij})要求必须输入。

1.3 功能组设置

本实验共定义9个功能组, 即团头鲂、桡足类(copepoda)、枝角类(cladocerans)、轮虫(rotifera)、浮游植物(phytoplankton)、饲料(feed)、降雨(rain)、底泥沉积物(bottom sediment)、水体碎屑(aque-water detritus)。淡水池塘养殖为人工干预的生态系统, 饲料不仅维持着系统的物质能量流动, 而且一部分溶解在养殖水体中, 直接供食浮游植物, 因此将饲料定义为生产者, 将浮游植物定义为消费者。另外本研究将降雨作为生产者引入Ecopath模型。

1.4 采样设置

本研究9个功能组的部分数据来自于中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心现场实验或调查计算所得, 选取的时间节点为8月初至10月底共90 d, 每个月初采集样本。采样时采取5点采样法, 分隔式池塘按区域分为8-1、8-2、8-3采集, 然后将3个样本平均混合作为分隔式总体样本, 序批式池塘按区域分为9-1、9-2、9-3、9-4、9-5采集, 然后将5个样本平均混合作为序批式总体样本, 传统池塘在进水口2~3 m处、出水口2~3 m处采集, 然后将2个样本平均混合作为传统池塘总体样本。

1.5 数据来源

本研究中生物量采用 t/km^2 (湿重)为计算单位, 参数中所输入的生物量为最后一次采样时的实测生物量, 计算 P/B 值和 Q/B 值时生物量为实验周期内平均生物量。

饲料: 实验期间统计每天的实际投入量, 以最后一天的实际投喂量为生物量(B)。通过统计实验期间投入饲料累积量和平均每天投入量计算 P/B 系数; 降雨: 通过记录统计实验期间每天和累积降雨量计算生物量(B)和 P/B 系数; 浮游植物、浮游动物: 分别采用25号网和13号网采集, 鲁格试剂固定浓缩后, 通过镜检法定量计

算每次采样生物量, 浮游动植物的 P/B 和 Q/B 系数参考相似系统数据^[9, 12]。团头鲂: 生物量以及 P/B 系数通过放养量、收获量以及每月的平均采样重量计算得出。团头鲂的生产量(P)等于实验期间的实际增重量, Q/B 系数通过放养量、收获量、饵料系数以及每月的平均采样重量计算得出。EwE模型的具体参数输入见表1。食物矩阵数据参照相似系统研究^[9], 具体参数见表2。

1.6 模型平衡

由于营养转换效率的值为0~1, 在模型平衡调试过程中, 将 $EE < 1$ 作为其基本限制条件。如果某功能组的 $EE > 1$, 则逐步调整其食物组成($\pm 5\%$ 每次), 直到所有功能组的 $EE < 1$ 。

2 结果

2.1 营养传递效率

营养传递效率是基于食物链上的能量流动效率, 可以反映某物种对于生态系统的能量流动贡献, 其表达为上一营养级的总同化量与下一营养级的总同化量之比, 营养传递效率越高越有利于能量在系统中的传递。通过对不同复合养殖模式营养传递效率的对比(表3), 纵向分析表明整体上饲料功能组和枝角类功能组营养传递效率高(EE 均大于0.7), 降雨和底泥沉积物营养传递效率低(EE 均小于0.1)。横向分析中, 浮游植物功能组在传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘中的营养传递效率分别为0.13、0.21、0.25, 虽呈逐渐增加的趋势, 但值变化不大。3种池塘在桡足类、轮虫、水体碎屑功能组中的营养传递效率变化较大。对于桡足类功能组, 序批式池塘营养传递效率最高($EE=0.89$), 其余2种池塘较低(EE 均小于0.1)。对于轮虫功能组, 其营养传递效率依次从传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘递减($EE: 0.39 > 0.12 > 0.07$)。对于水体碎屑功能组, 传统池塘营养传递效率最高($EE=0.64$), 其余2种池塘基本为0($EE < 0.01$)。

2.2 生态系统特征指数

据Ecopath软件使用指南介绍, 联结指数是基于食物链上实际的连接数与潜在的连接数的比值, 与系统成熟度有关。系统杂食性指数衡量摄食交互作用在营养级之间的分布, 可以补充由功能组定义不同导致的联结指数差异。传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘的联结指数

分别为0.429、0.437、0.437，2类池塘生态养殖模式比传统池塘高。系统杂食性指数序批式池塘高于分隔式池塘和传统池塘(0.123>0.087>0.077)。香农多样性指数序批式池塘高于传统池塘和分隔式池塘(0.469>0.398>0.382)。对比于自然生态系统，淡水池塘养殖生态系统联结指数更高，这可能与人为干预有关(表4)。

2.3 生态位重叠

猎物重叠度指数是指两个功能组之间的食物来源相似性，可以反映捕食者之间的饵料竞争强度，捕食重叠度指数可以反映两个功能组之间存在相似天敌的程度。生态位重叠分析显示，枝角类和轮虫的食物来源具有极高的相似

表 1 EwE模型的基本参数输入

Tab. 1 Basic parameters input of EwE model

功能组 group name	传统池塘 traditional pond				分隔式池塘 separated pond				序批式池塘 sequencing pond			
	生物量 (B)/ (t/km ²) biomass	生产量/生 物量(P/B) production/ biomass (90 d)	消化量/生物 量(Q/B) consumption/ biomass (90 d)	碎屑 输入量/ (t/km ² / 90 d) detritus input	生物量 (B)/ (t/km ²) biomass	生产量/生 物量(P/B) production/ biomass (90 d)	消化量/生物 量(Q/B) consumption/ biomass (90 d)	碎屑 输入量/ (t/km ² / 90 d) detritus input	生物量 (B)/ (t/km ²) biomass	生产量/生 物量(P/B) production/ biomass (90 d)	消化量/生物 量(Q/B) consumption/ biomass (90 d)	碎屑 输入量/ (t/km ² / 90 d) detritus input
饲料 fodder	16.80	90.00			10.40	90.00			15.33	90.00		
桡足类 copepoda	6.48	12.00	30.00		6.38	12.00	30.00		1.74	12.00	30.00	
枝角类 cladocerans	11.46	14.25	35.75		2.53	14.25	35.75		5.87	14.25	35.75	
浮游植物 phytoplankton	39.00	140.33	174.32		28.00	140.33	174.32		39.00	140.33	174.32	
降雨 rain	7 633	90.00			7 633	90.00			7 633	90.00		
团头鲂 <i>M. amblycephala</i>	897.00	1.01	1.34		888.00	0.58	0.78		1 260.00	0.93	1.23	
轮虫 rotifera	5.87	29.25	73.25		11.73	29.25	73.25		22.22	29.25	73.25	
底泥沉积物 bottom sediment	168.00			15 120	192.00			17 280	120.00			10 800
水体碎屑 aque-water detritus	100.30			171.1	171.10			0.00	214.50			60.70

表 2 不同复合养殖模式食物矩阵(传统池塘/分隔式池塘/序批式池塘)

Tab. 2 Food matrix of different compound cultivation patterns (traditional pond/separated pond/sequencing pond)

被捕食者/捕食者 prey/predator	2	3	4	6	7
1			0.04/0.04/0.04	0.742/0.738/0.708	
2				0.006/0.002/0.012	
3	0.46/0.13/0.46			0.02/0.006/0.026	
4	0.38/0.63/0.38	0.766/0.736/0.736			0.74/0.74/0.74
5			0.95/0.95/0.95		
6					
7	0.094/0.134/0.094	0.094/0.074/0.074		0.009/0.015/0.015	
8	0.058/0.093/0.058	0.121/0.161/0.161		0.21/0.206/0.206	0.223/0.223/0.223
9	0.008/0.013/0.008	0.019/0.029/0.029	0.01/0.01	0.013/0.033/0.033	0.037/0.037/0.037

注：1. 饲料；2. 桡足类；3. 枝角类；4. 浮游植物；5. 降雨；6. 团头鲂；7. 轮虫；8. 底泥沉积物；9. 水体碎屑

Notes: 1. fodder; 2. copepoda; 3. cladocerans; 4. phytoplankton; 5. rain; 6. *M. amblycephala*; 7. rotifera; 8. bottom sediment; 9. aque-water detritus

表 3 不同复合养殖模式营养传递效率(EE)对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of nutrient transfer efficiency of different compound cultivation pattern

功能组 group name	传统池塘 traditional pond	分隔式池塘 separated pond	序批式池塘 sequencing pond
饲料 fodder	0.77	0.75	0.99
桡足类 copepoda	0.09	0.02	0.89
枝角类 cladocerans	0.70	0.80	0.77
浮游植物 phytoplankton	0.13	0.21	0.25
降雨 rain	0.01	0.01	0.01
团头鲂 <i>M.amblycephala</i>	0.00	0.00	0.00
轮虫 rotifera	0.39	0.12	0.07
底泥沉积物 bottom sediment	0.03	0.02	0.07
水体碎屑 aque-water detritus	0.64	0.00	0.00
饲料系数 feed coefficient	2.5	2.8	1.6

表 4 不同复合养殖模式生态系统特征

Tab. 4 Ecosystem characteristics of different compound cultivation patterns

生态系统 ecosystem	联结指数 connectance index	系统杂食性指数 system omnivory index	香农多样性指数 Shannon diversity index
传统池塘 traditional pond	0.429	0.077	0.398
分隔式池塘 separated pond	0.437	0.087	0.382
序批式池塘 sequencing pond	0.437	0.123	0.469
獐子岛鱼礁区 ^[6] Zhangzi Island reef zone	0.224	0.172	
太湖生态系统 ^[4] Taihu Lake ecosystem	0.188	0.041	

性(猎物重叠度指数均大于0.9), 但捕食重叠度在3种池塘中有差异。其中分隔式池塘猎物重叠度指数大于0.9, 序批式池塘约为0.8, 传统池塘小于0.5。在分隔式池塘中, 桡足类与枝角类以及桡足类与轮虫猎物重叠度指数均大于其他2类池塘, 说明分隔式池塘中饵料竞争强度大。在序批式池塘中, 桡足类与枝角类以及桡足类与轮虫捕食重叠度指数均大于其他2类池塘, 说明序批式池塘来自于同一捕食者的捕食压力大(图2)。

2.4 营养级能流特征

营养级的流量(throughput)是指单位时间内流经某个营养级的物质的量, 每个营养级的总流量由被摄食、呼吸(生产者不考虑呼吸)和流至碎屑的量共同组成。生产者和碎屑的流量等于其生产量, 2级及以上的营养级的流量则等于其摄食量, TST (total system throughput)为系统总流量。

3种淡水养殖池塘碎屑功能组(底泥沉积物+水体碎屑)的流量均占系统总流量的一半以上

[TST(%)>50], 其中在传统池塘中占比最高, 达到73.96%(图3)。生产者功能组(饲料+降雨)与碎屑功能组流量之和均占系统总流量的90%以上, 传统池塘、分隔式池塘、序批式池塘占比依次为92.4%、99.53%、99.27%。由于定义的生产者除了饲料外, 还引入了生物量基数大的降雨, 导致分隔式池塘和序批式池塘初级生产者的生产量流向碎屑的占比高达99%以上, 这说明降雨对于系统能量流动贡献不大, 与营养传递效率分析结果一致。3个月内, 传统池塘碎屑物质有518.5 t/km²进入食物链被营养级 II 摄食, 分隔式池塘有474.2 t/km², 序批式池塘有905.5 t/km², 可见序批式池塘的碎屑利用率高。从营养级 II 所摄食的来源比例分析, 传统池塘有93.6%来源于生产者, 分隔式池塘有91.8%, 序批式池塘有89.6%, 这说明在淡水池塘养殖中牧食链是主要能量流动方式。从营养级 II 到营养级 VI 之间的传递效率, 传统池塘依次为30%、24.5%、12.8%、4.48%。分隔式池塘依次为14.4%、6.48%、

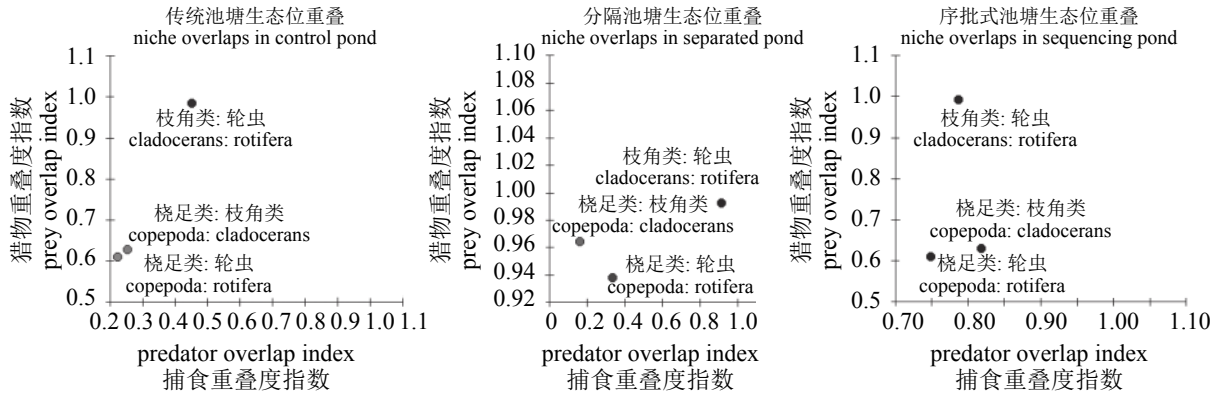


图 2 不同复合养殖模式生态位重叠分析

Fig. 2 Niche overlaps analysis of different compound cultivation patterns

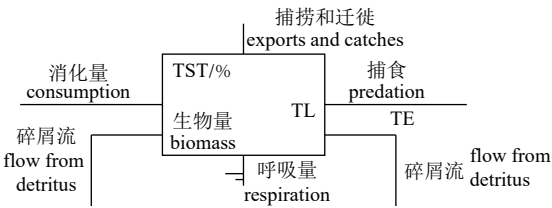
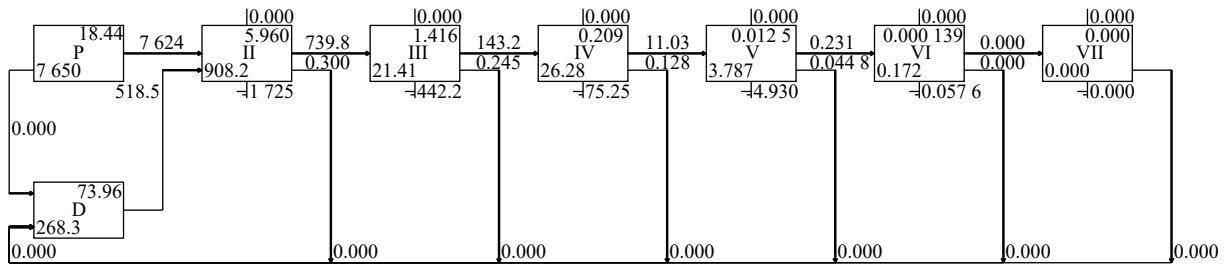


图 3 传统池塘林德曼椎型示意图

P. 生产者, D. 碎屑组, TL. 营养级水平, TST. 系统总流量, TE. 传递效率, 下同

Fig. 3 Lindeman spine diagram in traditional pond

P. producer, D. detritus, TL. trophic level, TST. total system throughput, TE. transfer efficiency, the same below

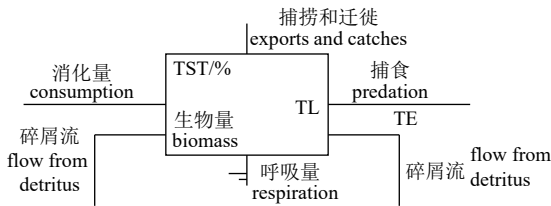
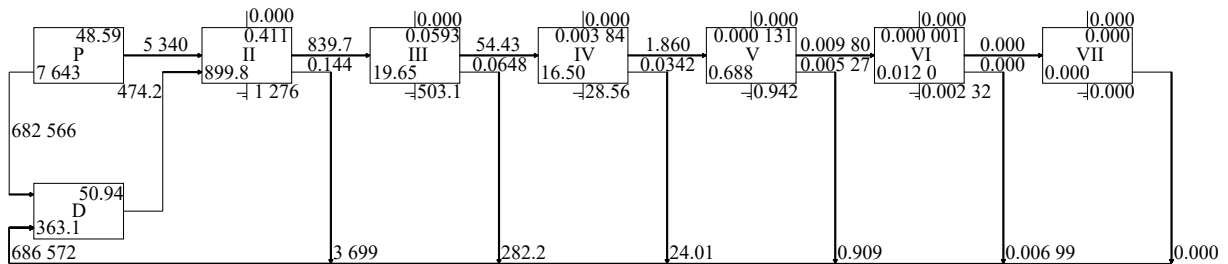


图 4 分隔式池塘林德曼椎型示意图

Fig. 4 Lindeman spine diagram in separated pond

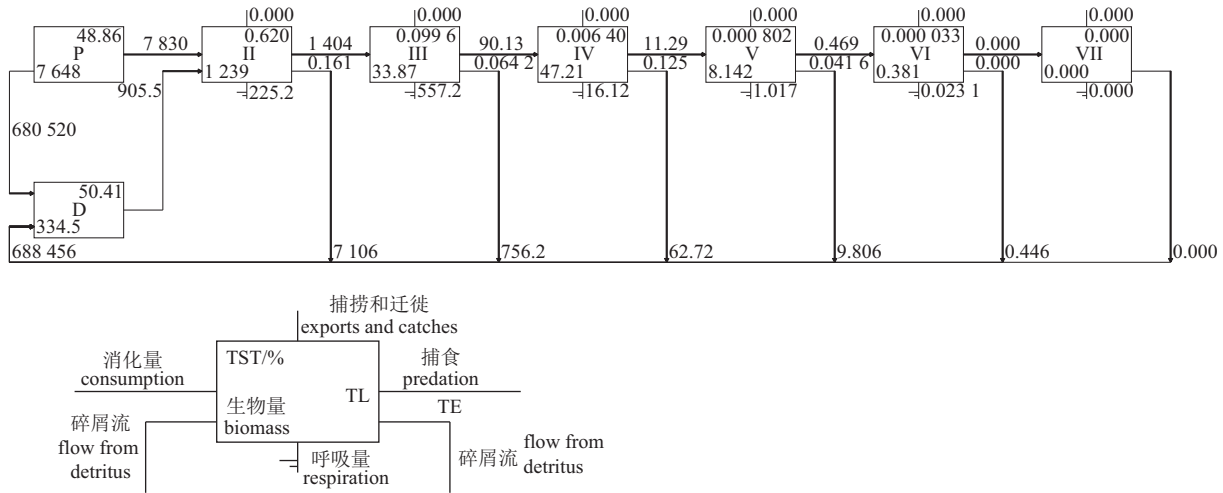


图 5 序批式池塘林德曼椎型示意图

Fig. 5 Lindeman spine diagram in sequencing pond

3.42%、0.53%。序批式池塘依次为 16.1%、6.42%、12.5%、4.16%。从营养级 II 到营养级 III 的传递效率普遍高于林德曼 10% 的效率。

3 讨论

人工干预的池塘养殖生态系统，依靠饲料投入维持系统的物质能量流动，科学合理的投饲不仅可以提高饲料转化率，还可减轻环境负载。本研究所述序批式池塘的饲料转化效率最高，这说明按规格区分的序批式池塘更有利于饲料转化。按规格区分来投饲可以进一步精准投饲，防止小鱼吃不了，大鱼吃不饱的现象发生，有利于减少饲料的浪费，减轻环境的污染。浮游动物在结构单一的人工干预池塘养殖生态系统中起着承上启下的作用，一方面通过摄食浮游植物和有机碎屑同化部分太阳能和化学能，另一方面又通过鱼类的摄食将能量转移到鱼肉中。营养传递效率分析显示，枝角类浮游动物在 3 种池塘中传递效率普遍较高，桡足类在序批式池塘中效率较高，其余 2 种池塘较低，轮虫在传统池塘中效率高，其余 2 种池塘低。这说明浮游动物的能量传递到团头鲂的效率较高，但不同养殖模式影响着不同浮游动物的营养传递效率，优化浮游动物种群结构，增加营养传递效率高的优势种将有利于团头鲂淡水池塘的能量流动效率。生态位重叠分析显示，分隔式池塘中饵料竞争强度大，序批式池塘来自于同一捕食者的捕食压力大。对于分隔式池

塘，为了达到混养而又有利于不同鱼类生长的效果，通过水泥墙按生态位分隔成 3 个区域，虽然降低了不同鱼类之间的相互作用，但同时也削弱了浮游动植物之间的流动，导致区域性饵料补充不及时，增加饵料竞争强度。区别于分隔式池塘，序批式池塘同样也是水泥墙隔开，但是通过配套的水流及增氧设施使得每个区域之间能够一直保持水体互相流动，因此不会造成区域性饵料补充不及时。然而由于隔开的面积小，主养鱼密度大，因此对浮游动物的摄食压力将会变大。

本研究将降雨作为生产者引入Ecopath模型中分析，结果显示其营养传递效率较低(EE=0.01)，这说明除饲料和光能够被系统利用外，雨能没有被系统有效利用。营养传递效率同样较低的还有底泥沉降物(EE<0.07)，对底泥沉降物进行资源化处理或开发集污排污的装置是解决底泥沉降物效率低、环境污染大的 2 条途径。由于生物量基数大、营养传递效率低的降雨功能组和底泥沉降物的引入，一方面导致碎屑流量占系统总流量的一半以上，另一方面导致系统回收利用的碎屑占比较低。本研究所述序批式池塘碎屑功能组流量占系统总流量的值最低[TST(%)=50.41]，且被系统回收利用的碎屑量最大，主要原因可能是序批式池塘的集污吸污装置将大量底泥沉积物排出所致。碎屑流占比虽然很大，但流向其他营养级的较小，这说明团头鲂淡水养殖池塘的主要能量流动方式为牧食

链, 营养级 II 所摄食的来源比例结果也同样说明了这点。

系统总体特征分析显示, 序批式池塘杂食性指数和香农多样性指数高于其余2种池塘, 联结指数高于传统池塘, 与分隔式池塘相当, 而分隔式池塘各种指数高于传统池塘。这说明本研究所述的2种复合养殖池塘在系统成熟度上优于传统池塘, 通过生态养殖模式的构建, 在改变单一传统池塘生态脆弱和提高系统多样性方面是可行的。

参考文献:

- [1] 聂湘平, 王翔, 陈菊芳. 水产养殖与有毒有害污染物残留及其环境影响[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 106-110.
- Nie X P, Wang X, Chen J F. Aquaculture and the residues of environmental xenobiotics and its impacts upon aquatic environment[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(4): 106-110(in Chinese).
- [2] 刘兴国, 刘兆普, 徐皓, 等. 生态工程化循环水池塘养殖系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 237-243.
- Liu X G, Liu Z P, Xu H, *et al.* Ecological engineering water recirculating ponds aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 237-243(in Chinese).
- [3] 刘兴国. 池塘养殖污染与生态工程化调控技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Liu X G. Study on the pond aquaculture pollution and ecological engineering regulation techniques[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese).
- [4] 李谷, 吴恢碧, 姚雁鸿, 等. 循环流水型池塘养鱼生态系统设计与构建[J]. 渔业现代化, 2006(4): 6-7, 19.
- Li G, Wu H B, Yao Y H, *et al.* Design and construction of recirculation pond fish culture system[J]. Fishery Modernization, 2006(4): 6-7, 19(in Chinese).
- [5] Brune D E, Tucker C, Massingill M, *et al.* Partitioned aquaculture systems[M]. Wiley - Blackwell, 2004, 34(34): 561-584.
- [6] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 等. 基于Ecopath模型的太湖生态系统结构与功能分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2033-2040.
- Li Y K, Liu E S, Wang H, *et al.* Analysis on the ecosystem structure and function of Lake Taihu based on Ecopath model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2033-2040(in Chinese).
- [7] 刘恩生, 李云凯, 臧日伟, 等. 基于Ecopath模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析[J]. 水产学报, 2014, 38(3): 417-425.
- Liu E S, Li Y K, Zang R W, *et al.* A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on Ecopath model[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(3): 417-425(in Chinese).
- [8] 许祯行, 陈勇, 田涛, 等. 基于Ecopath模型的獐子岛人工鱼礁海域生态系统结构和功能变化[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(1): 85-94.
- Xu Z X, Chen Y, Tian T, *et al.* Structure and function of an artificial reef ecosystem in Zhangzi Island based on Ecopath model[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(1): 85-94(in Chinese).
- [9] 周波. 基于EwE模型的草鱼综合养殖池塘生态系统研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Zhou B. Research on grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) integrated aquaculture pond ecosystem: Based on EwE model[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015 (in Chinese).
- [10] 顾兆俊, 刘兴国, 田昌凤, 等. 异育银鲫“中科3号”、长丰鲢、松浦镜鲤分隔式高效混养模式[J]. 科学养鱼, 2015, 31(11): 84.
- Gu Z J, Liu X G, Tian C F, *et al.* A study on efficient collection mode-Allogynogenetic crucian carp “zhongke 3”, changfeng silver carps, songpu mirror carp[J]. Scientific Fish Farming, 2015, 31(11): 84(in Chinese).
- [11] 刘兴国, 朱浩, 顾兆俊, 等. 一种提高能效的养殖池塘系统: 中国, CN201410415815.6[P]. 2014-12-03.
- Liu X G, Zhu H, Gu Z J, *et al.* Culture pond system capable of improving energy efficiency: China, CN201410415815.6[P]. 2014-12-03 (in Chinese).
- [12] 张天文. 对虾高位池精养模式和生态养殖模式中碳流通特征的解析——Ecopath with Ecosim在养殖生态系统中应用的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Zhang T W. The model of carbon flux in intensive penaeid shrimp culture and ecological cultivation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).

Analysis of compound culturing pond build based on Ecopath model

ZENG Xianlei¹, WEI Baocheng², LIU Xingguo^{1*}, GU Zhaojun¹, LU Shimin¹, CHE Xuan¹

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aimed at analyzing how to build a fresh water recirculating ponds aquaculture system from energy quantization point of view, separated pond and sequencing pond were selected in Pond Ecological Engineering Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences (Shanghai, 30°57'1.89"N, 121°08'52.21"E), as well as a traditional pond (control pond). According to a whole-year data tested in 2016, energy flow characteristics of three kinds of fresh water recirculating ponds aquaculture system were discussed by applying software Ecopath with Ecosim 6.5. The results show that ecotrophic efficiency of fodder the highest in traditional pond ($EE=0.77$), separated pond ($EE=0.75$), sequencing pond ($EE=0.99$). Feed coefficient of traditional pond, separated pond, sequencing pond were 2.5, 2.8, 1.6, separately. These indicated that sequencing ponds which feeding amounts were distinguishing among different size specification were more advantageous to feed conversion. Ecotrophic efficiency of cladocerans, copepod, rotifer in traditional pond, separated pond, sequencing pond were 0.7/0.09/0.39, 0.8/0.02/0.12, 0.77/0.89/0.07, separately. This suggested that cladocerans could be used effectively by system. But different culturing modes can affect the ecotrophic efficiency of zooplankton. In addition, ecotrophic efficiency of rain group and bottom sediment group both less than 0.1, indicated that the energy from rain group and bottom sediment group could not be used effectively by system. Niche overlap analysis suggested that prey overlap index of separated pond were the highest and predator overlap index of sequencing pond were most highest than others. It means that the intensity of bait competition in seperated pond were the largest and sequencing pond had more pressure from the predator prey. Seperated pond could reducethe intensity of bait competition by strengthening regional water flow. Lindeman spineanalysis showed that the dominant energy flow ways of fresh water recirculating ponds aquaculture systemwere grazing food chain. System characteristic analysis suggested that the system maturity of separated pond and sequencing pond were superior to the traditional pond, means that it is possible to change the traditional single fragile pond ecological and improve system diversity by constructing compound aquaculture mode.

Key words: pond; compound aquaculture; Ecopath model; ecotrophic efficiency

Corresponding author: LIU Xingguo. E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

Funding projects: Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes; Chinese Academy of Fishery Sciences (2016GH01, 2016HY-ZD0704)