

文章编号: 1000-0615(2017)09-1424-10

DOI: 10.11964/jfc.20160310324

珠江三角洲地区大口黑鲈池塘养殖系统的能值评估

张凯¹, 余德光^{1*}, 谢骏¹, 王广军¹, 郁二蒙¹, 龚望宝¹,
李志斐¹, 魏南¹, 夏耘¹, 王翠翠¹, 刘邦辉²

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所;
农业部热带亚热带水产资源利用与养殖重点实验室, 广东广州 510380;
2. 广东省海洋工程职业技术学校, 广东广州 510320)

摘要: 为评价珠江三角洲地区大口黑鲈池塘养殖系统的生态经济性能, 实验以能值理论为基础, 定量分析该系统的能流和物流特点, 通过建立能值评价指标体系, 综合评估该系统的环境影响及可持续性。结果显示, 大口黑鲈养殖系统投入的资源分为可更新资源(太阳能、风能、雨水能、地球循环能和河水能)和购买的外部资源(设施、苗种、电能、饵料、药品、劳动力、租金、维护费)两部分。养殖系统投入的总能值为 4.51×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 其中可更新资源能值总和为 1.24×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的2.75%。河水能在可更新资源中所占比例最大, 为 9.77×10^{15} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的2.17%。购买的外部资源能值总和为 4.38×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的97.25%。饵料投入在购买的外部资源中所占比例最大, 其能值为 3.49×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的77.33%, 其次是劳动力, 能值为 2.29×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的5.08%。大口黑鲈池塘养殖系统太阳能值转换率TR为 2.18×10^6 sej/J, 产出能值交换率 EER_Y 为2.028, 能值产出率EYR为1.028, 环境负载率ELR为35.39, 能值持续性指数ESI为0.029, 可持续性发展的能值指数EISD为0.059。大口黑鲈池塘养殖系统经济效益较高, 但过多依赖购买的外部资源, 对环境压力较大, 可持续性较差。减少饵料投喂量、提高饵料利用率(如选择优质配合饲料及添加剂、改进投喂策略等)以及开展综合养殖是提高珠江三角洲地区大口黑鲈养殖系统持续性、减小环境负载率的有效途径。

关键词: 大口黑鲈; 池塘养殖系统; 能值; 珠江三角洲

中图分类号: S 965

文献标志码: A

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)隶属鲈形目(Perciformes)、鲈亚目(Porcoidei)、太阳鱼科(Ceetrachidae)、黑鲈属, 为广温性鱼类, 在我国大多数省份均能进行养殖, 是我国淡水养殖常见品种之一^[1-2]。广东省是大口黑鲈重要养殖地区, 年产量约23万t, 占全国总产量68%。其中仅佛山市产量就在10万t, 居全国首位^[3]。然而, 随着大口黑鲈养殖业的快速发展, 养殖活动对生态系统造成了破坏。因此, 定量评价大口黑鲈养殖系统的可持续性并找到有效的解决方法,

对于大口黑鲈养殖产业发展具有重要意义。近年来众多学者从生态学特征角度对大口黑鲈养殖系统进行了不同方向的研究^[4-5], 但目前尚未有将大口黑鲈养殖系统作为一个生态经济系统进行分析研究的报道。

能值理论及其分析方法是定量核算自然资源与经济价值的真实价值的一种研究方法^[6-7]。能值是指一种类别的可用能量, 被直接或间接地用于另一类别的数量^[8]。通常以等量的太阳能量化, 以太阳能焦耳(sej)表示^[9], 反映了该能量

收稿日期: 2016-03-24 修回日期: 2016-10-09

资助项目: 国家科技支撑计划(2012BAD25B04); 广州市珠江科技新星专项(2014J2200088)

通信作者: 余德光, E-mail: gzyudeguang@163.com

的价值。应用能值及其转换单位——能值转换率,可将生态经济系统内各种不同类别的能量和物质转换为同一标准——能值,进而为系统生态经济学对比分析提供有效途径,有助于科学地评估自然资源对社会经济的贡献,从而评价养殖系统的可持续性^[8, 10]。能值分析方法在水产养殖生态系统的研究中已有较多报道,如秦传新等^[11]研究了我国北方刺参(*Apostichopus japonicus*)养殖池塘的环境可持续性,Zhang等^[12]对南四湖3种湿地养鱼系统做了能值评估和经济分析,结果表明能值理论不仅能够评价水产养殖系统的经济效益,而且能够评价水产养殖系统的生态影响。

本实验利用能值理论与分析方法,对大口黑鲈池塘养殖系统的能流和物流进行分析,以期综合评价大口黑鲈养殖产业对环境的影响及其可持续性,进而为大口黑鲈池塘养殖理论与技术的进一步完善提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究地点与数据收集

我国大多数省份均以池塘养殖大口黑鲈,因此本实验以池塘养殖模式作为研究对象,以佛山市为案例点,通过实地调研,对其养殖过程的生态流进行追踪分析。实验时间为2014年1—12月。实验地点分别位于佛山市南海区、三水区和顺德区,共使用18个养殖池塘,单个池塘面积约为0.7 hm²。养殖系统能量来源分为可更新的环境资源投入能值和购买的外部资源投入能值。可更新资源包括太阳能、风能、雨水能、河水能以及地球循环能,购买的外部资源包括苗种、设施、劳动力、电能、饵料投入、维护费用等。

实验区域接受的年太阳能辐射为5000 MJ/m²,年降水量为1635 mm,风能为4.50×10¹¹ J/(hm²·a)^[13]。雨水能、河水能的计算参照赵欣胜等^[14]和Vassalo等^[15]的方法。

雨水能由雨水化学能和势能组成,其中:

雨水势能=水密度×雨量×面积×平均高度×重力加速度;

雨水化学能=水吉布斯自由能×雨量×面积。

河水能由河水化学能及河水有机物化学能组成,其中:

河水化学能=水吉布斯自由能×养殖池塘容积;

河水有机物化学能的测定参照Zhang等^[16]的方法。在各池塘内设3个采样点,采集表层(30 cm)、中层(90 cm)、底层(150 cm)水样各0.5 L,充分混合后将25 mL水样经Whatman GF/F(滤膜孔径:0.7 μm,直径:25 mm,450 °C灼烧)过滤,盐酸熏蒸去除无机物,由氧弹仪(PARR-1281, USA)测得其能量。

地球循环能(沉积能)的测定参照奉杰等^[17]的方法,在各池塘内设3个沉降物收集管,开口距水体表面1.0 m。沉降物质收集管采用圆柱形的PVC管(直径:9 cm,高度:55 cm),在管口处覆盖一块尼龙网(网眼0.8 cm)以防止大型游泳生物进入。收集管在水体中放置7天后取出,带回实验室,低温静置。将上层水虹吸出,剩余的物质倒入大型培养皿中,用蒸馏水清洗,然后在60 °C烘干48 h,并用粉碎机粉碎后用氧弹仪(PARR-1281, USA)测得沉积物的能量。

实验期间,所有的物品投入量和价格等指标均由养殖场直接提供,根据各项投入的使用寿命,将其平均后折算到一年当中。购买资源投入中,苗种的能量用氧弹仪(PARR-1281, USA)测得^[17],为4.36×10³ J/g。电费单位为千瓦时(kWh),劳动力、租金、维护费用、用药以及饵料等均用资金表示。

以上获得的各资源初始数据分别乘以其对应的能值转换率即为各资源的太阳能值。

1.2 分析方法

根据系统能值分析理论,建立一系列能值指标来定量分析养殖系统(表1)。具体公式如下:

(1) 太阳能值转换率(*TR*)

$$TR=Y/Q, Y=R+F$$

式中,*TR*为太阳能值转换率;*Y*为系统中投入的总能值;*Q*为收获的养殖生物所含总能量;*R*为养殖系统中投入的太阳能、雨水能、风能、地球循环能和河水能等可更新资源的总和;*F*为养殖系统中投入的购买外部资源的总和。*TR*是在产品转换成单位有效能量过程中所需要的能值,它是能量转换系统中或者能量转换过程中效率的表现。对于有较高能值转换率的产品意味着在产品的生产过程中产生一个单位的有效能量需要更多的能值输入^[8, 19]。

(2) 环境负载率(*ELR*)

$$ELR=F/R$$

环境负载率(*ELR*)为购买的外部资源能值(*F*)与可

表1 养殖系统的能值指标

Tab. 1 Emergy indices of aquaculture system.

指标 index	公式 formula	用途 usage
太阳能值转换率 TR	Y/Q	养殖系统中输入的能值在转换过程中的相对效率 ^[8]
环境负载率 ELR	F/R	度量养殖系统对环境造成的生态压力 ^[8]
能值产出率 EYR	Y/F	本地资源对养殖系统生产过程的贡献率 ^[8]
产出能值交换率 EER_Y	Y_M/Y	度量养殖系统养殖生物销售所获得的能值效益 ^[12]
能值持续性指数 ESI	EYR/ELR	养殖系统的可持续性 ^[18]
可持续发展的能值指 EISD	$EYR * EER_Y / ELR$	在考虑市场交换对能值产量影响的条件下, 度量养殖系统的可持续性 ^[18]

更新资源能值(R)的比值, 表示养殖系统对环境造成的生态压力, 值越大表示压力越大。相反, 该值小则系统的可持续性发展仍具有开发的潜力^[20]。

(3) 能值产出率(EYR)

$$EYR = Y/F$$

能值产出率(EYR)是为系统中投入的总能值(Y)与购买的外部资源能值总和(F)的比值, 指该生态系统利用本地可更新资源的效率。

(4) 产出能值交换率(EER_Y)

$$EER_Y = Y_M/Y$$

式中, Y_M 为产量乘以平均售价计算得到的养殖生物的年产值, 再乘以货币的太阳能值转换率。 EER_Y 可以度量养殖生物销售中获得的能值效益。

(5) 能值持续性指数(ESI)

$$ESI = EYR/ELR$$

ESI 是一个广泛用于大范围长时期研究持续性的能值指标, 该指标指示养殖系统的可持续性。

(6) 可持续性发展的能值指数($EISD$)

$$EISD = EYR * EER_Y / ELR$$

$EISD$ 是在考虑市场交换对能值产量影响的条件下, 度量养殖系统的可持续性。

2 结果

2.1 能值分析结果

利用Odum等能值理论及其分析方法进行相关分析。在综合考虑影响系统的自然资源和社会资源的基础上, 根据能值分析理论, 以及养殖过程中的各种物质、能量、信息的输入和输出, 构建养殖系统的能值流动图(图1), 能值流动图的构建参考文献[21-22]。

大口黑鲈养殖系统投入的资源分为可更新

资源和购买的外部资源两部分。养殖系统投入的总能值为 4.51×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 其中可更新资源包括: 太阳能、风能、雨水能、地球循环能和河水能, 总和为 1.24×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的2.75%。河水能在可更新资源中所占比例最大, 为 9.77×10^{15} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的2.17%。购买的外部资源有: 设施、苗种、电能、饵料、药品、劳动力、租金、维护费等, 总和为 4.38×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的97.25%。饵料投入在购买的外部资源中所占比例最大, 其能值为 3.49×10^{17} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的77.33%, 其次是劳动力, 能值为 2.29×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 占总投入能值的5.08%。2014年大口黑鲈的产量为 3.85×10^7 g/ hm^2 , 利用氧弹仪(PARR-1281, USA)测量大口黑鲈的热值为 5.38×10^3 J/g, 产出的大口黑鲈的热量为 2.07×10^{11} J/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)(表2)。

2.2 能值分析指标

将大口黑鲈池塘养殖系统与东极大黄鱼(*Larimichthys crocea*)单养系统^[21]、珠江口日本鳗鲡(*Anguilla japonicas*)单养系统以及乌鳢(*Channa argus*)、鲮鱼(*Mugil cephalus*)混养系统^[13]、珠江三角洲鱼菜共生养殖模式^[24]能值指标进行对比分析, 大口黑鲈池塘养殖系统太阳能值转换率TR为 2.18×10^6 sej/J, 高于东极大黄鱼单养、珠江口乌鳢鲮鱼混养系统、珠江三角洲鱼菜共生养殖系统, 低于珠江口日本鳗鲡单养系统; 环境负载率为35.39, 高于珠江口日本鳗鲡单养、乌鳢鲮鱼混养以及鱼菜共生养殖系统, 低于东极大黄鱼单养系统; 系统能值产出率为1.028, 高于东极大黄鱼单养和珠江三角洲鱼菜共生养殖系统, 低于珠江口日本鳗鲡单养以及乌鳢鲮鱼混养系统; 产出能值交换率为2.028, 高于珠江

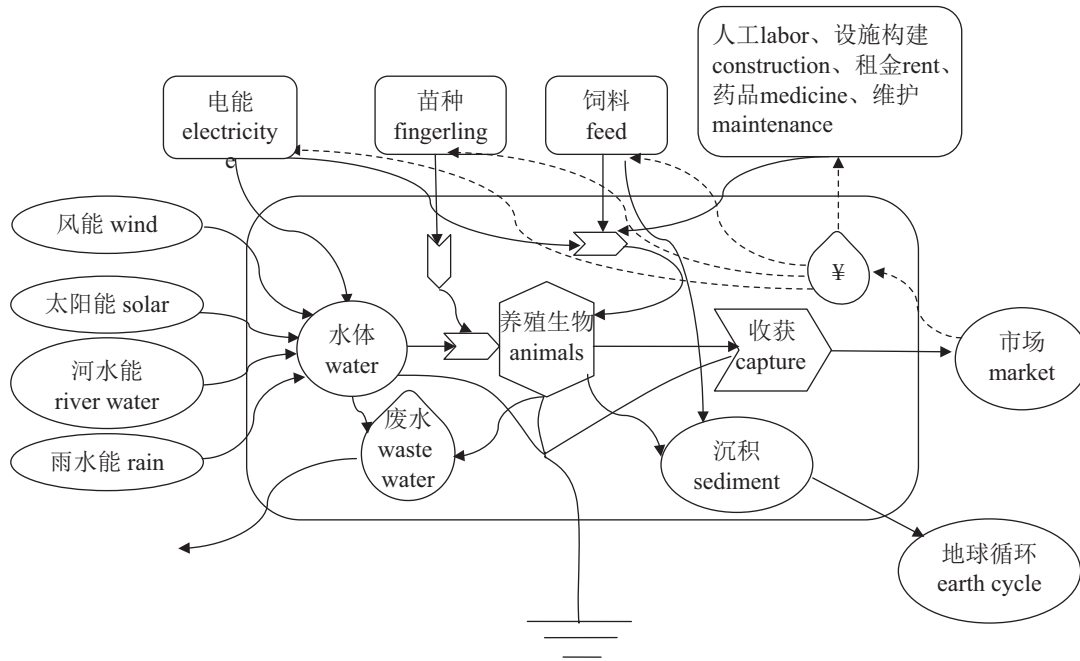


图 1 大口黑鲈池塘养殖系统的能值流动图

Fig. 1 Emergy flow diagram of the *M. salmoides* system

三角洲鱼菜共生养殖系统, 低于东极大黄鱼、珠江口日本鳗鲡和乌鳢鲮鱼混养系统; 系统能值持续性指数为0.029, 可持续性发展的能值指数是0.059, 均高于东极大黄鱼养殖系统, 低于珠江口鳗鲡单养系统、乌鳢鲮鱼混养系统、鱼菜共生养殖系统(表3)。

2.3 能值指标敏感性分析

已有研究表明, 为了分析能值投入变化对系统的影响, 可通过敏感性分析研究在养殖过程中改变某些指标投入对养殖系统造成的影响^[25-26]。通过改变相应指标的能值数值, 来分析其对系统持续性的影响^[13, 21]。本实验中, 选取占总投入能值比例最大的饵料投入(77.33%)做敏感性分析。结合生产实际, 将投入饵料量分别设为原投喂量的95%, 90%, 85%和80%, 以此分析对系统持续性的影响(表4)。

3 讨论

3.1 大口黑鲈养殖系统经济效益评估

在本实验中, 大口黑鲈养殖系统的产出能值交换率为2.028, 说明通过大口黑鲈销售所获得的能值比投入的能值多102.8%, 系统经济效益较高。本实验中大口黑鲈系统产出能值交换率

低于东极大黄鱼(2.20)^[21], 珠江口日本鳗鲡养殖系统(4.092)^[13]和乌鳢鲮鱼混养系统(2.468)^[13], 但高于珠江三角洲鱼菜共生系统(1.850)^[24], 这主要是由养殖品种的经济价值差异以及市场价格波动造成。

尽管具有较高的经济效益, 但本实验大口黑鲈池塘养殖系统太阳能值转换率为 2.18×10^6 sej/J, 高于东极大黄鱼单养^[21]、珠江口乌鳢鲮鱼混养系统^[13]、珠江三角洲鱼菜共生养殖系统^[24], 亦高于墨西哥纳里亚特州尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)养殖系统^[27]、地中海大西洋鲷(*Sparus aurata*)养殖系统^[15], 即本实验中大口黑鲈养殖系统的生产效率较低。可能是原因①养殖模式差异。珠江口乌鳢鲮鱼混养以及鱼菜共生养殖系统属于综合养殖模式, 系统对外部购买资源(电能、饵料能等)的依赖较小^[24]。相反, 大口黑鲈单养系统对外部购买资源(电能、饵料能、劳动力等)依赖较大。②养殖周期不同, 本实验中大口黑鲈养殖周期为9~10个月, 而其他单养系统中, 如东极大黄鱼和墨西哥纳里亚特州尼罗罗非鱼养殖周期分别只有6个月和4~5个月。大口黑鲈较长的养殖周期导致投入资源(太阳能、风能、雨水能、电能、饵料能、劳动力等)的增多, 致使系统生产效率降低。

表 2 大口黑鲈池塘养殖系统能值计算分析

Tab. 2 Annual energy accounting and analysis table for the *M. salmoides* system

项目 items	原始数据/(hm ² ·a) raw data	太阳能值转换率/(sej/unit) solar transformity	太阳能值/[sej/(hm ² ·a)] solar energy	各项所占比例/% ratio
可更新的环境资源投入 renewable environment resource inputs				
太阳能 solar radiation/J	5.00×10 ¹³ ^[13]	1 ^[8]	5.00×10 ¹³	0.01
风能/J wind	4.50×10 ¹¹ ^[13]	1.47×10 ³ ^[23]	6.62×10 ¹⁴	0.15
雨水能/J rain	8.01×10 ¹⁰	1.81×10 ⁴ ^[23]	1.45×10 ¹⁵	0.32
地球循环能/J earth cycle	1.35×10 ¹⁰	3.37×10 ⁴ ^[23]	4.55×10 ¹⁴	0.10
河水能/J river water	1.95×10 ¹¹	5.01×10 ⁴ ^[23]	9.77×10 ¹⁵	2.17
合计 subtotal			1.24×10 ¹⁶	2.75
购买的外部资源输入 purchased external resource inputs				
设施/厝 construction	1.65×10 ⁴	8.48×10 ¹¹ ^[13]	1.40×10 ¹⁶	3.10
苗种/J fingerlings	2.61×10 ⁸	1.96×10 ⁶ ^[23]	5.12×10 ¹⁴	0.11
电能/kWh electricity	1.38×10 ⁴	5.76×10 ¹¹ ^[8]	7.95×10 ¹⁵	1.76
饵料/厝 feed	4.11×10 ⁵	8.48×10 ¹¹ ^[13]	3.49×10 ¹⁷	77.33
药品/厝 medicine	2.54×10 ⁴	8.48×10 ¹¹ ^[13]	2.15×10 ¹⁶	4.78
劳动力/厝 labor	2.70×10 ⁴	8.48×10 ¹¹ ^[13]	2.29×10 ¹⁶	5.08
租金/厝 rent	2.59×10 ⁴	8.48×10 ¹¹ ^[13]	2.20×10 ¹⁶	4.87
维护/厝 maintenance	1.12×10 ³	8.48×10 ¹¹ ^[13]	9.50×10 ¹⁴	0.21
合计 subtotal			4.38×10 ¹⁷	97.25
总和 total			4.51×10 ¹⁷	100
大口黑鲈产量/g	3.85×10 ⁷	1.17×10 ¹⁰		
大口黑鲈热值/J	2.07×10 ¹¹	2.18×10 ⁶		

注：本实验中能值转换率均按 9.44×10^{24} sej/a的基准进行折算；表中斜体数字为根据系统结果计算得出

Notes: All the solar transformity were converted to 9.44×10^{24} sej/a baseline. The italic value shows the transformity of a product from the system under study

能值产出率表征系统利用本地可更新资源的效率，其最小值为1，此时系统中投入的能值全部来自购买的外部资源，没有可更新资源投入^[28]。本实验中，大口黑鲈养殖系统仅为1.028，说明大口黑鲈养殖过程中更多依赖于购买的外部资源，对可更新资源利用率非常低，导致大口黑鲈养殖系统的社会经济成本高，在市场竞争中缺乏优势，有必要对该养殖模式进行进一步的优化研究。

3.2 大口黑鲈养殖系统生态影响评估

环境负载率表示养殖对生态环境造成的压力的大小。理论上若养殖系统没有不可更新资源的投入，仅靠可更新资源驱动，则该系统环境负载率等于零^[21]。在本研究中，大口黑鲈养殖

系统购买的外部资源能值 $[4.38 \times 10^{17}$ sej/(hm²·a)]远远大于可更新资源能值 $[1.24 \times 10^{16}$ sej/(hm²·a)]的输入，其所占能值投入总量的比例在97%以上，环境负载率为35.39，远高于珠江三角洲鱼菜共生养殖系统(3.51)^[24]、地中海大西洋鲷养殖系统(5.00)^[23]、美国佛罗里达对虾(3.43)^[29]及大西洋鲑(*Salmo salar*)(4.24)^[30]养殖系统，亦高于珠江口日本鳗单养(23.42)和乌鳢鲮鱼混养(20.18)系统^[13]。主要原因是本实验中大口黑鲈养殖系统饵料投入比例(77.33%)明显高于其他养殖系统。因此，减少饵料用量、提高饵料利用率是提高本研究大口黑鲈养殖系统可持续性的关键。

能值持续性指数和可持续发展的能值指数均是用以度量养殖系统的可持续性的指标^[31]。在本实验中，大口黑鲈系统系统能值持续性指数

表3 大口黑鲈池塘养殖系统与其他养殖系统相关能值指标对比分析

Tab. 3 The emergy indices comparison of the *M. salmoides* system with other aquaculture systems

指标 index	大口黑鲈(本实验) <i>M. salmoides</i> (this study)	大黄鱼 ^[21] <i>L. crocea</i>	鳊鱼 ^[13] <i>A. japonicas</i>	乌鳢、鲮混养 ^[13] <i>C. argus</i> and <i>M. cephalus</i>	鱼菜共生 ^[24] aquaponics
太阳能值转换率/(sej/J) TR	2.18×10 ⁶	1.46×10 ⁶	2.24×10 ⁶	1.89×10 ⁶	1.08×10 ⁶
环境负载率 ELR	35.39	91.10	23.42	20.18	3.51
能值产出率 EYR	1.028	1.011	1.043	1.050	1.000
产出能值交换率 EER _v	2.028	2.20	4.092	2.468	1.850
能值持续性指数 ESI	0.029	0.011	0.045	0.052	0.285
可持续发展的能值指数 EISD	0.059	0.02	0.182	0.128	0.530

表4 大口黑鲈池塘养殖系统的敏感性分析

Tab. 4 Sensitivity analysis of the *M. salmoides* system

指标 indices	饵料 feed			
	95%	90%	85%	80%
太阳能值转换率 TR	-3.87	-7.73	-11.60	-15.47
环境负载率 ELR	-3.98	-7.95	-11.93	-15.90
能值产出率 EYR	0.11	0.24	0.37	0.52
产出能值交换率 EER _v	4.02	8.38	13.12	18.30
能值持续性指数 ESI	4.26	8.90	13.96	19.53
可持续发展能值指数 EISD	8.45	18.02	28.92	41.40

为0.029, 可持续性发展的能值指数是0.059, 均低于珠江口日本鳊鱼单养系统(ESI 0.045, EISD 0.182)^[13]、乌鳢鲮鱼混养系统(ESI 0.052, EISD 0.128)^[13]、鱼菜共生养殖系统(ESI 0.285, EISD 0.530)^[24], 亦低于南四湖养鱼系统(ESI 0.38~4.61, EISD 0.20~2.21)^[12]。这和环境负载率反映的结果一致, 说明大口黑鲈养殖过程过多依赖购买的外部资源, 可持续性发展受到影响, 因此降低环境负载率的措施也是提高系统可持续性的有效途径。

3.3 大口黑鲈养殖系统的优化

国内已有应用能值分析方法进行养殖系统优化的报告。Li等^[13]对珠江口三种养鱼模式进行能值分析发现增加换水量能有效降低养殖系统的环境负载率, 提高能值持续性指数和可持续性发展指数。但也有研究认为, 增加换水量会浪费淡水资源, 并对周边水体造成污染, 不符合我国淡水资源匮乏的国情^[32-33]。宋科等^[21]对东极大黄鱼养鱼模式进行能值敏感性分析发现增

加雨水能的投入对能值持续性指数和可持续性发展指数影响最大, 因此建议将养殖系统的地址选择在降雨量较高的区域。但降雨的增多会加大养殖动物浮头甚至泛塘的风险^[34], 导致电能投入的增加以及管理成本的提高。通过本实验敏感性分析得知, 随着饵料投入量的逐渐降低, 大口黑鲈养殖系统产出能值交换率增加了4.02%~18.30%, 能值持续性指数增加了4.26%~19.53%, 可持续性发展的能值指数增加了8.45%~41.40%, 养殖系统的环境负载率降低了3.98~15.90%。减少饵料投入量、提高饵料利用率是实现大口黑鲈养殖系统可持续发展的关键因素。已有研究发现, 选择优质配合饲料及添加剂^[35]、合理设置投喂时间及频率^[36]等措施均能降低饵料系数, 减少饵料投入量。因此, 研发大口黑鲈优质配合饲料和添加剂, 改进大口黑鲈的投喂策略是提高大口黑鲈养殖系统持续性、减小环境负载率的有效途径。

综合养殖系统有效增加了系统的物种多样性、分布空间的层次性, 较多的能量循环途径, 从而有效提高了系统的能量利用与转化效率, 降低系统对外部购买资源(电能、饵料能等)的依赖, 进而提高系统可持续性^[24]。杨海龙等^[37]对稻鱼共生系统与水稻单作系统进行对比分析, 发现稻鱼共生系统太阳能转化效率较高, 投入购买能值较少, 能值产出率高, 对环境压力较小。同样, 班文波等^[38]的研究表明, 养殖种类最多的三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)养殖模式, 可持续性最强。本实验中, 珠江口乌鳢、鲮鱼混养系统以及鱼菜共生系统的环境负载率、可持续发展指数均优于其他单养系统。因此, 发展综合养殖, 亦是提高大口黑鲈养殖系统持续性、减小环境负载率的有效途径。

4 结论

本实验通过能值分析法将大口黑鲈池塘养殖系统自然投入和人为投入的资源转换为能值, 对该养殖系统发展的可持续性做了综合分析。研究表明: 大口黑鲈池塘养殖系统可更新资源所占比重很小, 购买的外部资源投入中饵料占主导优势, 系统环境负载率非常高, 养殖系统对购买的外部资源的依赖程度相对较高。能值持续性指数和可持续性发展的能值指数表明该养殖系统的环境持续性较差。敏感性分析表明: 降低饵料的使用量、提高饵料利用率(如选择优质配合饲料及添加剂、改进投喂策略等)是减小环境负载率、提高养殖系统持续性的有效途径。本研究表明, 发展综合养殖亦是提高养殖系统持续性的有效途径。

参考文献:

- [1] 徐磊, 白俊杰, 李胜杰. 大口黑鲈生长性状相关标记的聚合效果分析[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 53-58.
Xu L, Bai J J, Li S J. The effect of pyramiding growth-related genotypes in largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(1): 53-58(in Chinese).
- [2] 郁二蒙, 张振男, 夏耘, 等. 摄食不同饵料的大口黑鲈肠道菌群分析[J]. 水产学报, 2015, 39(1): 118-126.
Yu E M, Zhang Z N, Xia Y, et al. Effects of different diets on intestinal microflora of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(1): 118-126(in Chinese).
- [3] 白俊杰, 李胜杰. 我国大口黑鲈产业现状分析与对策[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(5): 104-108.
Bai J J, Li S J. Current status and development trend on China largemouth bass industry[J]. Chinese Fisheries Economics, 2013, 31(5): 104-108(in Chinese).
- [4] 李志斐, 谢骏, 郁二蒙, 等. 基于Biolog-Eco技术分析杂交鳊和大口黑鲈高产池塘水体微生物碳代谢特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 185-192.
Li Z F, Xie J, Yu E M, et al. Carbon metabolic diversity of microbial communities in intensive ponds for hybrid snakehead and large-mouth bass based on biolog-eco plates[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(1): 185-192(in Chinese).
- [5] 王广军, 吴锐全, 谢骏, 等. 大口黑鲈投喂两种不同饲料对水质指标的影响[J]. 水产学杂志, 2009, 22(1): 35-46.
Wang G J, Wu R Q, Xie J, et al. Effects of feeding two kinds of food on the water quality in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) aquarium[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(1): 35-46(in Chinese).
- [6] 陆宏芳, 蓝盛芳, 彭少麟. 系统可持续发展的能值评价指标的新拓展[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 150-154.
Lu H F, Lan S F, Peng S L. Extending study on energy indices for sustainable development[J]. Chinese Journal Environmental Science, 2003, 24(3): 150-154(in Chinese).
- [7] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
Lan S F, Qin P. Emergy analysis of ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 129-131(in Chinese).
- [8] Odum H T. Environmental accounting, emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 370.
- [9] Ulgiati S, Brown M T. Emergy and ecosystem complexity[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(1): 310-321.
- [10] 席力蒙, 刘存歧, 王军霞, 等. 能值分析在水生生态系统中的应用[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(3): 144-149.
Xi L M, Liu C Q, Wang J X, et al. Application of emergy analysis in aquatic ecosystem[J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33(3): 144-149(in Chinese).
- [11] 秦传新, 董双林, 王芳, 等. 能值理论在我国北方刺参(*Apostichopus japonicus*)养殖池塘的环境可持续性分析中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, 55(3): 319-323.
Qin C X, Dong S L, Wang F, et al. Sustainability analysis of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) culturing in earthen ponds China using the emergy approach[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2009, 55(3): 319-323(in Chinese).
- [12] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, et al. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 683-694.
- [13] Li L J, Lu H F, Ren H, et al. Emergy evaluations of three aquaculture systems on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China[J]. Ecological Indicators, 2011,

- 11(2): 526-534.
- [14] 赵欣胜, 崔保山, 杨志峰. 红树林湿地生态效益能值分析——以南沙地区十九涌红树林湿地为案例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 841-844.
Zhao X S, Cui B S, Yang Z F. Energy analysis of ecological benefit in mangrove wetland-Case study of the Nineteenth Chong mangrove wetland in Nansha[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 841-844(in Chinese).
- [15] Vassallo P, Bastianoni S, Beiso I, *et al.* Emergy analysis for the environmental sustainability of an inshore fish farming system[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 290-298.
- [16] Zhang K, Tian X L, Dong S L, *et al.* An experimental study on the budget of organic carbon in polyculture systems of swimming crab with white shrimp and short-necked clam[J]. Aquaculture, 2016, 451: 58-64.
- [17] 奉杰, 田相利, 董双林, 等. 不同三疣梭子蟹混养系统能量收支的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(3): 39-47.
Feng J, Tian X L, Dong S L, *et al.* Studies on the energy budget of different polyculture systems of swimming crab[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(3): 39-47(in Chinese).
- [18] Lu H F, Kang W L, Campbell D E, *et al.* Emergy and economic evaluations of four fruit production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(12): 1743-1757.
- [19] Odum H T. Self-organization, transformity and information[J]. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [20] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation[J]. Ecological Engineering, 1997, 9(1-2): 51-69.
- [21] 宋科, 赵晟, 蔡慧文, 等. 舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3846-3854.
Song K, Zhao S, Cai H W, *et al.* The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3846-3854(in Chinese).
- [22] 王国栋. 刺参陆基养殖系统的能值分析和生命周期评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang G D. Emergy analysis and life cycle assessment of land-based sea cucumber farming systems[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [23] Campbell D E, Brandt-Williams S L, Meisch M E A. Environmental accounting using emergy: evaluation of the state of West Virginia[R]. EPA/600/R-05/006. Washington DC: USEPA, 2005.
- [24] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 等. 基塘农业生态工程模式的能值评估[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1622-1626.
Lu H F, Peng S L, Lan S F, *et al.* Emergy value evaluation of dike-pond agro-ecological engineering modes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1622-1626(in Chinese).
- [25] Odum H T, Odum E C. Modeling for all scales: An introduction to system simulation[M]. Boston, MA, USA: Academic Press, 2000.
- [26] Martin J F, Diemont S A W, Powell E, *et al.* Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2006, 115(1-4): 128-140.
- [27] Brown M T, Green P, Gonzalez A, *et al.* Emergy Analysis perspectives, public policy options, and development guidelines for the coastal zone of Nayarit, Mexico[M]. Gainesville: Center for Wetlands, University of Florida, 1992.
- [28] 胡秋红, 张力小, 王长波. 两种典型养鸡模式的能值分析[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7227-7234.
Hu Q H, Zhang L X, Wang C B. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perspective of organic production model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7227-7234(in Chinese).
- [29] Odum H T, Arding J E. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador[M]. Gainesville: Center for Wetlands, 1991.
- [30] Johnston, Richard S, Odum H T. Emergy evaluation of salmon pen culture[M]. Gainesville: University of Florida Press, 2001.
- [31] Lima J S G, Rivera E C, Focken U. Emergy evaluation of organic and conventional marine shrimp farms in Guaraíra Lagoon, Brazil[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 35: 194-202.
- [32] 董双林. 高效低碳——中国水产养殖业发展的必由之路[J]. 水产学报, 2011, 35(10): 1595-1600.

- Dong S L. High efficiency with low carbon: the only way for China aquaculture to develop[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(10): 1595-1600(in Chinese).
- [33] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 中国节水农业战略思考与研发重点[J]. *科技导报*, 2006, 24(5): 86-88.
Wu P T, Feng H, Niu W Q, *et al.* Research emphasis and reflection of strategy for water saving agriculture in China[J]. *Science and Technology Review*, 2006, 24(5): 86-88(in Chinese).
- [34] 黄永平, 刘可群, 苏荣瑞, 等. 淡水养殖水体溶解氧含量诊断及浮头泛塘气象预报[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(5): 638-643.
Huang Y P, Liu K Q, Su R R, *et al.* Meteorological influencing elements of dissolved oxygen concentration in fish ponds and new models to forecast fish floating head[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 638-643(in Chinese).
- [35] Peng M, Xu W, Ai Q H, *et al.* Effects of nucleotide supplementation on growth, immune responses and intestinal morphology in juvenile turbot fed diets with graded levels of soybean meal (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. *Aquaculture*, 2013, 392-395: 51-58.
- [36] 房景辉. 半滑舌鳎(*Cynolossus semilaevis* Günther)对温度和营养胁迫的生长响应及其生理生态学机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Fang J H. Effects of temperature and nutrition stress on the growth of tongue sole *Cynolossus semilaevis* Günther and eco-physiological mechanisms[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [37] 杨海龙, 吕何耀, 闵庆文, 等. 稻鱼共生系统与水稻单作系统的能值对比——以贵州省从江县小黄村为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(1): 48-55.
Yang H L, Lv H Y, Yan Q W, *et al.* Energy comparison of rice-fish agriculture and rice monocropping: a case study of Xiaohuang Village, Congjiang County, Guizhou Province[J]. *Resources Science*, 2009, 31(1): 48-55(in Chinese).
- [38] 班文波, 田相利, 董双林, 等. 四种三疣梭子蟹养殖系统的能值评价[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(3): 31-40.
Ban W B, Tian X L, Dong S L, *et al.* Emergy evaluation of four *Portunus trituberculatus* aquaculture systems[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(3): 31-40(in Chinese).

Emergy evaluation of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) aquaculture system in the Pearl River Delta, China

ZHANG Kai¹, YU Deguang^{1*}, XIE Jun¹, WANG Guangjun¹, YU Ermeng¹, GONG Wangbao¹,
LI Zhifei¹, WEI Nan¹, XIA Yun¹, WANG Cuicui¹, LIU Banghui²

(1. Key Laboratory of Tropical & Subtropical Fishery Resource Application & Cultivation, Ministry of Agriculture;
Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China;

2. Guangdong Ocean Engineering Vocational-technology School, Guangzhou 510320, China)

Abstract: In this study, emergy analysis method was used to evaluate the benefits and driving forces of largemouth bass (*M. salmoides*) aquaculture system from ecological and economic points. For analysis, a number of different inputs have been identified and grouped in two categories: renewable environment resource inputs and purchased external resource inputs. The first group counted five natural, free and renewable inputs (solar radiation, wind, rain, earth cycle and river water), while the second group included eight external inputs (construction, fingerlings, electricity, feed, medicine, labor, rent and maintenance). Emergy indices for the largemouth bass aquaculture system calculated from the emergy evaluation, such as Transformity (TR), Emergy Yield Ratio (EYR), Environmental Loading Ratio (ELR), Emergy Exchange Ratio of Yield (EER_Y), Emergy Sustainability Index (ESI) and Emergy Index for Sustainable Development (EISD), were applied to characterize the resource utilization, environmental impact and the overall sustainability of the largemouth bass aquaculture system. These indices were compared with those of four other fish farming systems: the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji Island in Zhoushan, China, the eel aquaculture systems on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China, the polyculture system of ophicephalus and mullet on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China and the dike-pond agro-ecological engineering system in Sanshui city of the Pearl River Delta. The results showed that the total emergy inputs was 4.51×10^{17} sej/(hm²·a). The renewable emergy inputs was 1.24×10^{16} sej/(hm²·a), which accounted for 2.75% of the total emergy inputs. The external emergy inputs was 4.38×10^{17} sej/(hm²·a), which accounted for 97.25% of the total emergy inputs. More than 70% of the emergy inputs into the largemouth bass aquaculture system was feed (77.33%). Labor was the second largest emergy input to the system (5.08%). The river water emergy was the major renewable environment resource input for largemouth bass aquaculture system (2.75%). The TR of this system was 2.18×10^6 sej/J, EER_Y was 2.028, and EYR was 1.028. The ELR was 35.39, ESI was 0.029, and EISD was 0.059. The lower ESI with EISD and the higher ELR showed that the purchased external resource emergy inputs achieved a greater effect than renewable environmental resource emergy in largemouth bass aquaculture system, and the system had more dependence on purchased external resource emergy inputs, which indicated that the largemouth bass aquaculture system was less sustainable. The result showed that measures which reduced feed inputs and improved the feed utilization efficiency, such as using feed and additives with low feed coefficient, increasing feeding frequency, etc., could reduce the purchased external resources inputs, and then elevate the ESI and EISD of the largemouth bass aquaculture system. Integrated aquaculture was another method which could get the same result.

Key words: *Micropterus salmoides*; the pond aquaculture system; emergy; Pearl River Delta

Corresponding author: YU Deguang. E-mail: gzyudeguang@163.com

Funding projects: National Key Technology R & D Program of China (2012BAD25B04); Pearl River Nova Program of Guangzhou (2014J2200088)