

半滑舌鳎工厂化循环水养殖模式能值评价

王峰¹, 雷霖霖²

(1. 青岛农业大学海洋科学与工程学院渔业养殖工程实验室, 山东青岛 266109; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室, 山东青岛 266071)

[摘要] 为了更好地评价半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis* Günther)在工厂化循环水养殖模式下的养殖效果及环境可持续性,运用能值理论及分析方法构建了半滑舌鳎循环水养殖模式能值流程图,并对此养殖模式各能值分布进行分析。结果表明:循环水养殖模式环境能值投入只占比1.08%,能值产出率(EYR)为2.433,环境负载率(ELR)为0.313 4,能值可持续发展指标(ESI)为7.763,表明此种养殖模式已经将农业生产提升至工业化水平,其经济系统发展程度高,生产效率较高;同时该养殖模式极大地减轻了对环境的压力,其可持续性和环境容纳量均较高。

[关键词] 半滑舌鳎;循环水养殖;养殖模式;环境可持续性;能值

[中图分类号] X174 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0004-07

1 前言

工厂化循环水养殖模式是水产业诸多养殖模式中工业化程度最高的一种生产方式,与普通流水养殖模式相比,具有节能、节水、节地、减排、安全、高效、不受季节限制等优点,是未来水产业的发展方向^[1-3]。我国的循环水养殖模式虽然起步较晚,但随着近年鲆鲽类产业的大力发展,其养殖基础较好,工业化水平较高,因此,鲆鲽类工厂化循环水养殖模式是最有可能首先获得推广应用的养殖产业模式^[4,5]。

半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis* Günther)属于鲆形目(Pleuronectiformes)舌鳎科(Cynoglossidae),为我国近海名贵经济鱼类,富含不饱和脂肪酸,蛋白质容易消化吸收,有“富贵鱼”、“海洋中的

黄金”的美誉^[6]。半滑舌鳎具有适应性强、生长速度快、个体规格大、出肉率高、肉味鲜美等特色,开展人工养殖具有广阔的前景。

目前,半滑舌鳎的陆基养殖模式有流水和循环水两种,辽宁省、河北省、天津市和山东省现有的循环水养殖面积约为 3.2×10^5 m²,循环水养殖面积只占工厂化养殖总面积的6.72%^[7]。究其原因,工厂化循环水养殖模式因为诸多水处理环节的设置,其建设成本和运营成本比普通工厂化流水养殖要高,尤其是建设成本^[8],但同时其生产力水平也高,单位水体生产能力要远大于流水养殖模式。

能值(emergy)理论及分析方法是美国著名生态学家、系统能量分析先驱Odum于20世纪80年代创立的。依据能值这一新的科学概念和度量标准将生态经济系统内不同类别的物质和能量转换为

[收稿日期] 2014-09-19

[基金项目] 国家鲆鲽类产业技术体系建设专项资金(CARS-50);农业公益性行业科研专项(nyhyzx07-046);农业公益性行业科研专项(201003024);青岛农业大学博士基金(6631446)

[作者简介] 雷霖霖,1935年出生,男,福建宁化县人,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要从事海水鱼类生态、繁殖和增养殖理论与技术研究;E-mail:leijl@ysfri.ac.cn

统一标准的能值,进行定量分析研究,从而评价自然生产和人类经济活动,实现对生态系统和生产模式的综合评价。能值理论及方法遵循热力学定律及最大功率原则,通过对生态系统能量转换过程的分析,为生态经济学的研究提供了新的理论和方法^[9,10]。能值产出率(EYR)、环境负载率(ELR)和能值可持续发展指标(ESI)等能值指数可被用来描述和评价生态与经济之间的关系^[11]。Odum和Vassallo等已成功运用能值理论对不同水产养殖系统进行了生态评估,结果表明能值理论不仅能够客观地评价水产养殖模式的经济效能,而且能够很好地评价不同水产养殖系统与生态环境的相互关系^[12,13]。

本文利用能值理论对工厂化循环水养殖模式进行分析,评价其经济收益与环境可持续性,以期对工厂化循环水养殖模式投资与发展提供科学依据,从而更好地发挥水产养殖业的经济与生态效益。

2 材料与方法

2.1 实验设计

本研究在山东莱州明波水产有限公司进行,设计工厂化封闭式循环水养殖系统(见图1),选用处于快速生长期的大规格成鱼。实验用鱼购自潍坊昌邑个体养殖户,共789条,平均体重0.629 kg。实验场地为莱州明波水产有限公司循环水南七实验间。放养后适应驯化7 d,待其状态稳定、摄食正常后开始实验。

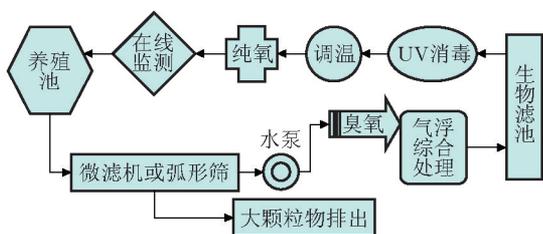


图1 工厂化封闭式循环水养殖一般工艺流程

Fig. 1 General technological process of industrial closed recirculating aquaculture

注:UV为紫外线

2.2 养殖条件

养殖实验于2011年10月在莱州明波水产有限公司进行,首先进行循环水设备间的改造,健全弧形筛过滤、气泡分离、紫外线消毒、臭氧消毒、生物

滤池等水质处理环节,并进行生物滤池生物滤膜的培育。正式养殖实验从2011年12月10日开始,至2012年7月10日结束,共持续216天。养殖池为圆形,底面积为15 m²,水深保持1 m,养殖期间水温保持在18.5~20 ℃,盐度控制在26±1。实验车间为全封闭环境,室温维持在20 ℃左右。

2.3 饲料与日常管理

定期投喂鲆鲧类专用商品饲料(爱乐5号料),粒径5 mm,主要营养成分:粗蛋白47%,粗脂肪14%,粗灰分10%。日投喂3次,投喂时间分别为7:30、16:30和21:30;投喂前20 min调高室内光线并进行换水,刺激鱼轻微运动,进入摄食状态,投喂后30 min进行换水,以排除残饵和粪便,保持水质清新。每天巡池6次,及时记录观测鱼体活动、身体各部位有无异常情况,捞出死鱼并准确计数。月末统计成活率、增重率。如发现死亡病鱼,应详细记录,并分析判断其死亡原因。

2.4 数据收集和生态能值计算分析方法

2.4.1 数据收集

根据能量的来源将能量分为可更新能值和不可更新能值。可更新能值包括光照能、地下水和地热能所带来的能量。不可更新能值包含建设折旧、设备费用等固定投资部分以及养殖期间所投入的苗种费用、劳动力费用、电费、维护费以及饲料、药费等可变投资部分所转化的能量投入。研究数据采用实验所得原始数据,计算整个养殖过程中水、电、人工、饲料等成本,以及养殖对象成活率、增重率、养殖周期等并加以折算,部分数据参照相关研究文献和市场^[14]。

2.4.2 主要能值计算方法

$$Q_s = \bar{Q}_s \cdot S \cdot (1 - \alpha) \quad (1)$$

式(1)中, Q_s 为年太阳能,J; \bar{Q}_s 为年平均单位日照能,J/(m²·a); S 为养殖池底面积,m²; α 为反射率, $\alpha=0.14$ 。

$$Q_w = V_w \cdot \rho_w \cdot G \quad (2)$$

式(2)中, Q_w 为年地下水化学能,J; V_w 为循环水养殖模式下地下水年用水量,m³; ρ_w 为水密度,g/m³; G 为吉布斯自由能, $G=1.76$ J/g。

$$Q_g = V_g \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot \Delta T \cdot (\Delta T/T) \cdot 0.5 \quad (3)$$

式(3)中, Q_g 为地热储存潜能,J; V_g 为储藏体积,由于地热主要以地下水的形式输出,故 $V_g=V_w$; C_w 为水的比热容, $C_w=4.2 \times 10^3$ J/(kg·℃); ΔT 为储存地热温

度与周围环境温度的温差。

$$E_p = 365 \cdot n \cdot \bar{E}_p \quad (4)$$

式(4)中, E_p 为工人一年消耗的能量, J; n 为工人人数; \bar{E}_p 为每个工人日耗能量, $\bar{E}_p = 2\,500 \text{ kcal/d}$, $1 \text{ kcal} = 4\,186 \text{ J}$ 。

2.4.3 生态能值分析方法

EYR 为系统产出能值与经济反馈(输入)能值之比,是衡量系统生产效率的一种标准^[15]。EYR 越高,表明系统获得一定的经济能值投入,生产出来的产品能值(产出能值)越高。

$$EYR = Y/N \quad (5)$$

式(5)中, Y 为系统总产出能值; N 为社会经济反馈投入能值,也是系统不可更新能值^[15]。

ELR 为系统不可更新能源投入能值总量与可更新能源投入能值总量之比^[15],用于评价系统对环境的压力的大小。ELR 越高,说明对环境的压力越小;反之,对环境的压力越大。

$$ELR = N/R \quad (6)$$

式(6)中, R 为可更新能源能值。

ESI 是系统能值产出率与环境负载率之比^[15],用于评价生态系统的可持续发展性能。ESI 越高,说明可持续性越好。

$$ESI = EYR/ELR \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 能值流程图

基于能量系统模型符号构建能值流程图,不同的符号用来描述能量系统中能量来源、流动与储存等^[16]。循环水养殖模式下半滑舌鲷养殖的能值流程图如图2所示,流程图中各线条表示整个养殖过程中各元素之间的相互关系以及物质和能量的流通路径。在工厂化循环水养殖模式中,地下水、地热、太阳光均为可更新能值来源,电能、煤炭以及种苗、饲料、药品、设备、建设和人工为不可更新能值来源。

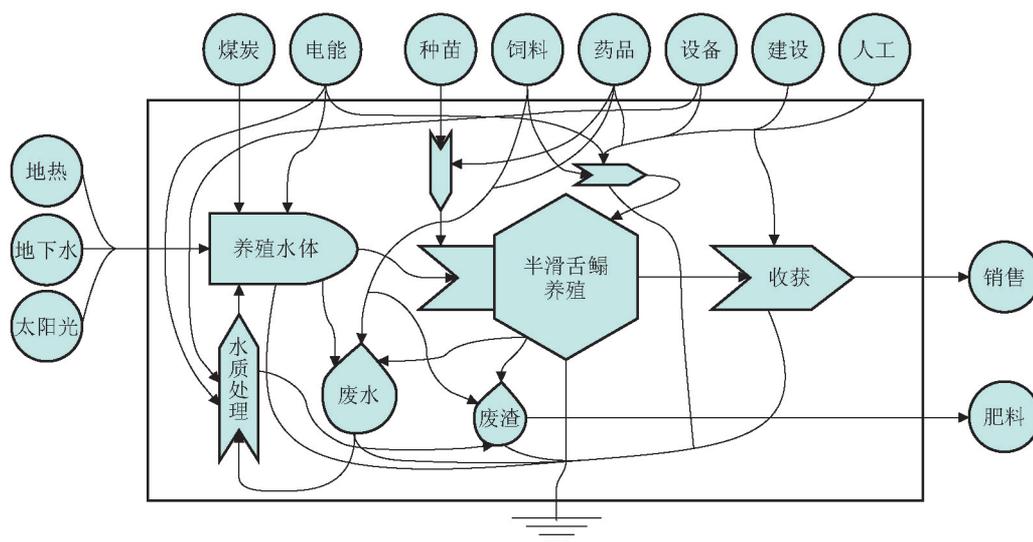


图2 半滑舌鲷循环水养殖模式能值流程图

Fig. 2 Energy flow chart of *Cynoglossus semilaevis* Günther in recirculating aquaculture mode

如图2所示,循环水养殖模式经过水质处理,不仅没有废水、废渣等能量流失,反而将废渣转化为肥料,扩大了能值产出。

3.2 能值分析基础数据

半滑舌鲷工厂化循环水养殖模式的评价结果如表1所示,表1中数据可更新能值计算来自相关参考文献^[16],不可更新能值来自实验结果,部分数据进行了必要的数据转换。

在流水养殖模式中,地热和地下水是其主要能值来源,太阳光只起到跟水温之间交流交换的作用,影响较小。电费输入是一个主要负担,主要用于地下水的抽提,克服地下水的势能。随着这种养殖模式的发展,地下水的更新速度跟不上开发利用压力,从而导致地下水逐渐枯竭,为了保证生产,生产者会将井位打得更深,对电力的消耗会更大,体现出对环境的强势压力,是不可持续的。

表1 半滑舌鳎工厂化循环水养殖模式能值分析

Table 1 Emergy analysis of *Cynoglossus semilaevis* Günther in industrial recirculating aquaculture mode

项目	单位	原始数据	能值转换率/(sej·J ⁻¹ 或g)	太阳能值/(E+12 sej·a ⁻¹)	投入类别
太阳能	J	4.64E+12	1	4.64	R
地下水	J	6.635E+10	8.1E+4	5 370	R
地热能	J	5.07E+12	6055	30 700	R
煤炭	g	3.52E+7	4.0E+4	1.41	N
电费	J	5.652E+11	2.0E+4	11 304	N
种苗	US \$	2.230 8E+5	1.19E+13	2 654 650	N
饲料	US \$	3.39E+4	1.19E+13	403 410	N
药品	US \$	7.69E+2	1.19E+13	9 151	N
设备	US \$	4.62E+3	1.19E+13	54 978	N
建设	US \$	9.86E+3	1.19E+13	117 334	N
劳动力	J	7.64E+9	7.56E+6	57 758	N
总计		—	—	3 344 661	
年产值 ^a	US \$	6.765E+5	1.19E+13	8 050 350 ^b	

注:^a半滑舌鳎的年产值是用货币表示的;^b该值是转化后的太阳能值

循环水养殖模式下,地下水和地热尽管也是系统正常运转的主要可更新能值,可是因为能够实现95%的循环,每天只需要补充5%的水体,对地下水和地热的利用强度只是流水养殖模式的5%。同时,电能的使用更多是为系统循环提供动力,不存在逐步升高的可能性,而且随着水质处理装备和养殖管理效率的提升,电能的消耗呈减小趋势。

3.3 工厂化循环水养殖模式能值评价

对工厂化循环水养殖模式能值消耗进行评价,如表2所示。可更新能值消耗只占总能值消耗的1.08%,不可更新能值投入占总能值消耗的98.92%。其产出能值是总投入能值的2.41倍。说明工厂化循环水养殖模式对环境依赖较小,生产等级较高。

半滑舌鳎工厂化循环水养殖模式下能值指标如表3所示。能值投资率(EIR)是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标。EIR越大,表明系统经济发展程度越高;反之,则说明发展水平越低而对环境的依赖性越强。循环水养殖模式EIR是91.715。EYR是衡量系统产出对经济贡献大小的指标,与经济分析中“产投比(产出/投入比)”类似,EYR越高,表明系统获得一定的经济能值投入,生产出来的产品能值越高,即系统的生产效率越高。循环水养殖模式EYR是2.433。能源自给率(ESR)

表2 半滑舌鳎工厂化循环水养殖模式能值评价表

Table 2 The emergy evaluation of *Cynoglossus semilaevis* Günther in industrial recirculating aquaculture mode

项目	太阳能值/ (E+12 sej·a ⁻¹)	可更新能值/ (E+12 sej·a ⁻¹)	不可更新能值/ (E+12 sej·a ⁻¹)
太阳能	4.64	4.64	
地下水	5 370	5 370	
地热能	30 700	30 700	
煤炭	1.41		1.41
电费	11 304		11 304
种苗	2 654 650		2 654 650
饲料	403 410		403 410
药品	9 151		9 151
设备	54 978		54 978
建设	117 334		117 334
劳动力	57 758		57 758
汇总	3 344 661	36 074.64	3 308 586
产出	8 050 350		

是衡量环境投入能值与系统能值投入总量关系的比值,反映了系统对环境资源的依赖性。与EIR正好相反,ESR越高,说明对环境依赖越强;其值越小,说明对环境依赖越小。循环水养殖模式ESR是0.010 8。ELR代表了不可更新能源能值与可更新能源能值的关系。ELR越高说明生产模式等级水平越高,对自然环境的依赖越小;反之,则说明生产

模式对自然环境能源输入依赖性越强。ESI是衡量生产模式可持续性的指标。循环水养殖模式ESI为7.763,处于较高水平,说明此养殖模式对地下水资源和地热资源进行了合理的维护和有序开发,可持续性较好。系统可持续发展的能值指标(EISD)同样也是评价系统可持续发展性能的指标,具有与ESI相似的判别意义。

表3 半滑舌鲷工厂化循环水养殖模式能值指标
Table 3 The emergy index of *Cynoglossus semilaevis* Günther in industrial recirculating aquaculture mode

指标	公式	循环水养殖模式
EIR	$EIR = \frac{\text{社会经济反馈投入能值}}{\text{环境投入能值}}$	91.715
EYR	$EYR = \frac{\text{系统总产出能值}}{\text{社会经济反馈投入能值}}$	2.433
ESR	$ESR = \frac{\text{环境投入能值}}{\text{系统能值投入总量}}$	0.010 8
ELR	$ELR = \frac{\text{不可更新能源能值}}{\text{可更新能源能值}}$	0.313 4
ESI	$ESI = EYR / ELR$	7.763
EER	$EER = \frac{\text{系统输入能值}}{\text{系统输出能值}}$	0.415 5
EISD	$EISD = EYR \times EER / ELR$	3.226

注: EER为能值交换律

4 讨论

4.1 生态经济能值评价方法在养殖模式评价中的优势

养殖模式优劣的评价不能仅从生产效益方面来比较,还要考虑养殖系统对环境资源的影响。能值理论及其分析方法是一种环境-经济价值论和系统分析方法,可以很好地衡量分析自然环境资源与经济活动的价值以及它们之间的关系,有助于协调生态环境与经济平衡,对自然资源的科学评价和合理利用、经济发展方针的制定及可持续发展战略的实施均具有重要意义^[17]。

国外已广泛运用能值理论及分析方法评价养殖模式的可持续性。Juliana等运用能值理论及方法分析了传统养虾模式和有机养虾模式,从可更新能源能值指标(%R,即可更新能源能值所占百分数)、EYR、EIR来看,有机养虾模式更具优势;但有机养虾模式需要进一步提高生产效率以保证其经济可持续性^[18]。Odum运用能值理论分析厄瓜多尔海虾养殖模式是一个经典案例。厄瓜多尔海岸曾

有丰富的红树林覆盖,1980—1990年,当地人用推土机除去红树林而建设养虾池塘,不少人因此脱贫致富。1990年,Odum在调查海岸资源利用模式时对这种生产模式进行了能值分析。研究结果表明这种生产模式超出资源环境的承载能力,在获得一定经济效益的同时也破坏了自然生态系统,是不可持续的。建议减少养殖池塘面积和养殖强度,减少渠道开挖,并开展海虾增殖放流,重建红树林生态系统,改变河道水坝修建计划从而维持水流漫过海岸生态系统。但这个建议并没有被采纳,最后这种养殖生产模式伴随着人工高强度养殖条件下对虾病毒性白斑病的大规模爆发而终结^[15,19,20]。Vas-sallo等运用能值理论分析评价了鱼类养殖场投喂生产过程的环境可持续性,并建立了一个用于分析计算生产过程中各环节转化效率及花费的模型,从而指导生产环节用于可持续生产的最优化。通过模型的应用,发现小杂鱼提供了生产系统最大的能值预算,因此,对此能值流的数量、频率和时间进行研究是实现生产可持续性的重点^[21]。

随着20世纪末期能值理论及分析方法被引入中国,其已被广泛用于分析地区资源环境、城市复合生态系统、滩涂湿地自然保护区、农业生态系统等^[22-27]。Zhao等运用生态能值足迹方法分析了小型养鱼场的环境可持续性,通过分析一个小型养鱼场所需的自然资源能值得出其生态能值足迹范围是1 953.19 hm²。养鱼场最大的能值输入来自饲料,占总能值输入的60.6%,占第二位和第三位的分别是小杂鱼和燃油。研究表明,生态能值足迹可以作为一个使用工具来比较和监控养鱼场对环境的影响,对外界能值依赖性越强如对野生小杂鱼的利用强度越大,养鱼场的环境可持续性越差^[28]。Zhang等对南四湖地区的3种鱼类养殖模式即网箱养殖、池塘集约化养殖和半自然粗放式养殖进行了能值和经济分析。结果显示,3种养殖模式的主要能值投入差异来自食物来源的不同;通过对比EYR、ELR、ESI等指标,发现集约化养殖模式可持续发展性不占优势,但其获取能值却是3种养殖模式中最高;具环境可持续性的生产模式必须具备省水、省地、绿色无污染,保持生产运行在环境生态系统的承载能力范围之内^[29]。秦传新等利用能值理论及方法对我国北方仿刺参海水养殖池塘的经济效益和环境可持续性进行了分析。通过比较仿刺参池塘养殖和几种集约化鱼类池塘养殖的EYR、

ELR 和 ESI 等指标,表明仿刺参池塘养殖收益率明显高于几种鱼类的池塘养殖收益率,其可持续性和环境容纳量均较高^[30,31]。

4.2 循环水养殖模式的可持续性

在本文所提的两种养殖模式里,流水养殖模式利用较大的环境能值投入比率来进行养殖生产,极大地利用了自然环境的无偿投入,因此,此种养殖模式曾经焕发巨大的生命活力,从无到有发展成一个巨大产业。但随着 10 多年对地下水及地热资源的无序利用,环境资源的更新速度远远跟不上开发利用速度,这种开发利用就会转变为对环境生态系统的破坏。流水养殖模式对资源的大规模无序应用给生态系统带来了负面影响,这种变化直接改变了自然生态系统中长期适应该环境形成的顶级状态。这是人类生产方式对环境质量破坏的一种典型积累效应,长此以往,可更新能源能值也会转变为不可更新能源能值,使得这种生产方式无以为继。

而循环式养殖模式已经将农业生产提升至工业化水平,其环境能值投入只占比 1.08%,极大地减轻了对环境的压力,给地下水和地热的自我修复提供了休养生息的时间。其 EYR 为 2.433, ELR 为 0.313 4,表明其可持续性和环境容纳量均较高。除此之外,循环水养殖模式还有由废渣转化的肥料输出,因为目前利用率不高所以没有计算,将来随着工艺提升,其能值输出会扩大。而流水养殖模式的废水排出其实对自然环境起到了明显的副作用,近几年沿海污染严重、病害逐渐增多是无可争议的事实。

人类一时一刻也离不开自然资源,没有自然资源就没有人类社会经济发展。虽然自然资源不是社会性质和变革的决定力量,但却对社会生产发展起着重要的基础性决定作用。正如其他环境资源一样,地下水和地热带给人的福利的能值远比人们支付的货币相当的能值大。目前,我国陆基海水养殖模式正处于转变经济发展方式,技术升级改造的关键时期,随着国家相关环境保护政策的密集出台,节能减排政策的进一步推进,在国内循环水养殖模式将逐步替代流水养殖模式,水产业将进入可持续发展的工业化养殖新时代。

参考文献

[1] Timmons M B, Ebeling J M. The role for recirculating aquaculture systems [J]. AES News, 2007, 10(1): 2-9.

- [2] Blancheton Jean Paul. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species [J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22(1/2): 17-31.
- [3] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 16-23, 32.
- [4] 雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [5] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100-1111.
- [6] 滕瑜, 郭晓华, 苑德顺, 等. 不同规格鲆鲽类的生化组成及营养价值比较[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 120-125.
- [7] 雷霖霖. 国家鲆鲽类主产区养殖模式调研工作报告——国家鲆鲽鱼类产业技术体系 2011 总结报告[R]. 2011.
- [8] 刘鹰, 曲克明. 封闭循环水养殖[M]. 北京: 现代教育出版社, 2009.
- [9] Odum H T. Emergy evaluation [C]// The International Workshop on Advances in Energy Studies: Energy Flows in Ecology and Economy. Porto Venere, Italy, 1998.
- [10] Odum H T. Energy systems concepts and self organization: A rebuttal [J]. Oecologia, 1995, 104(4): 518-522.
- [11] Odum H T, Peterson Nils. Simulation and evaluation with energy systems blocks [J]. Ecological Modelling, 1996, 93(1-3): 155-173.
- [12] Odum H T. Emergy evaluation of salmon pen culture [C/CD]// International Institute of Fisheries Economics & Trade 2000 Proceedings. Corvallis: Oregon State University, 2000.
- [13] 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.
- [14] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluation of natural capital and biosphere services [J]. AMBIO, 1999, 28(6): 10-25.
- [15] Odum H T, Arding J E. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador [R]. Gainesville: University of Florida, 1991.
- [16] Otávio Cavalett, Júlio Ferraz de Queiroz, Enrique Orteg. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil [J]. Ecological Modelling, 2006, 193(3/4): 205-224.
- [17] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [18] Juliana Schober Gonçalves Lima, Elmer Ccopa Rivera, Ulfert Focken. Emergy evaluation of organic and conventional marine shrimp farms in Guaraira Lagoon [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 35: 194-202.
- [19] Olsen S B. Struggling with an emergy analysis: Shrimp mariculture in Ecuador in hall [C]// Charles A S, ed. Maximum Power: The Ideas and Applications of H. T. Odum. Colorado: University Press of Colorado, 1995: 207-215.
- [20] Odum Elisabeth. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador: A review [J]. Ecological Modelling, 2004, 178(1/2): 239-240.
- [21] Vassallo P, Beiso I, Bastianoni S, et al. Dynamic emergy evaluation of a fish farm rearing process [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2699-2708.
- [22] 蓝盛芳, 俞新华. 能量生态学——理论、方法与实践[M]. 长春: 吉林科学出版社, 1993.
- [23] 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.
- [24] 张耀辉, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 海南省资源环境与可持续发展的能值分析[J]. 生态科学, 1998, 17(2): 123-124.
- [25] 隋春花, 蓝盛芳. 城市生态系统能值分析(EMA)的原理与步骤[J]. 重庆环境科学, 1999(2): 20-22.

- [26] 万树文, 钦佩, 朱洪光, 等. 盐城自然保护区两种人工湿地模式评价[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 760-765.
- [27] 张耀辉, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 海南省农业能值分析[J]. 农村生态环境, 1999, 15(1): 5-9.
- [28] Zhao Sheng, Song Ke, Gui Feng, et Al. The emergy ecological footprint for small fish farm in China [J]. Ecological Indicators, 2013, 29: 62-67.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 秦传新. 刺参(*Apostichopus japonicus Selenka*)的池塘养殖结构及其优化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.

Emergy evaluation of *Cynoglossus semilaevis* Günther in industrial recirculating aquaculture

Wang Feng¹, Lei Jilin²

(1. Fisheries Aquaculture Engineering Laboratory, Marine Science and Engineering College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2. Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao, Shandong 266071, China)

[Abstract] In order to preferably evaluate breeding effect and environmental sustainability of recirculating aquaculture mode, the emergy flow chart of *Cynoglossus semilaevis* Günther in industrial recirculating aquaculture was built to analyze the emergy of different parts in the aquaculture mode. The results showed that: The environment emergy input occupied only 1.08 %, emergy yield ratio (EYR) was 2.433, emergy loading ratio (ELR) was 0.313 4, and emergy sustainable index (ESI) was 7.763, indicating that agricultural production was promoted to the level of industrialization with the use of this kind of aquaculture mode, which gains highly developed economic system and higher production efficiency; meanwhile, this kind of aquaculture mode greatly alleviates the pressure of environment and gains higher sustainability and carrying capacity.

[Key words] *Cynoglossus semilaevis* Günther; recirculating aquaculture; aquaculture mode; environmental sustainability; emergy