长山群岛海水养殖与海域生态环境耦合协调关系分析

曹威威[1,2],孙才志[3]

(1. 洛阳师范学院国土与旅游学院 洛阳 471934;2. 海南大学应用科技学院 儋州 571737;
3. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心 大连 116029)

摘要:海水养殖活动与海域生态环境存在交互影响关系。文章基于超效率 DEA 模型和内梅罗指数评价结果,利用耦合协调关系模型分析了长山群岛 2006—2018 年海水养殖业和海域生态环境质量之间的关系演变过程。结果表明:(1)长山群岛海水养殖业效率呈倒"U"形变化趋势,其发展水平仍处于粗放式发展阶段,在技术应用和规模效率方面亟待提升;(2)受近岸养殖业快速发展的影响,海域生态环境质量在 2006—2013 年逐渐变差,2014 年以后有所好转;(3)海水养殖与海域生态环境的耦合度经历了从拮抗关系向高度耦合转变,协调度在 2006—2011 年呈上升趋势,但绝对值较低,2012 年以后呈现波动变化,表明人海关系处于博弈状态,矛盾仍较为突出。

关键词:海水养殖;海域生态环境;耦合协调关系;长山群岛

中图分类号:F124.5;P76;P74 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2022)05-0088-07

Analysis on Coupling and Coordination Relationship Between Mariculture and Marine Ecological Environment in Changshan Islands

CAO Weiwei[1,2],SUN Caizhi[3]

(1. School of Land and Tourism,Luoyang Normal University,Luoyang 471934,China; 2. College of Applied Science and Technology, Hainan University, Danzhou 571737, China; 3. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development,Liaoning Normal University,Dalian 116029,China)

Abstract: There is an interactive relationship between mariculture and marine ecological environment.Based on the results of super-efficiency DEA model and Nemero index,this paper analyzed the evolution of the relationship between mariculture and marine ecological environment in Changshan Islands from 2006 to 2018 by the coupled coordination relationship model.The results indicated that:(1) The efficiency of mariculture in Changshan Islands showed an inverted U-shaped change trend, and its development level was still in the stage of extensive development, and needed to be improved in terms of technology application and scale efficiency.(2) With the rapid development of the nearshore aquaculture industry,the marine ecological environmental qualities

收稿日期:2021-07-21;**修订日期:**2022-03-25

基金项目:海南省哲学社会科学 2020 年规划课题(HNSK(QN)20-12);教育部人文社会科学重点研究基地重大课题(16JJD790021).

作者简介:曹威威,讲师,博士,研究方向为资源与环境研究

通信作者:孙才志,教授、博士生导师,博士,研究方向为水资源与海洋经济

gradually deteriorated from 2006 to 2013, but improved to a certain extent after 2014. (3) The coupling degree denoted that the relationship between mariculture and marine ecological environment had undergone a transition from antagonistic to highly coupled relationship. The coordination degree showed an upward trend from 2006 to 2011, but fluctuated after 2012 with low absolute value, which indicated that the relationship between human and sea was in a conflict game.

Keywords: Mariculture, Marine ecological environment, Coupling and coordination relationship, Changshan Islands

0　引言

人海关系地域系统是海洋地理学研究的主要对象，从国内外人海关系研究的发展历程来看，20 世纪 90 年代以来，人类活动与海洋资源环境的交互影响研究日渐受到关注[1]，国内外学者从不同空间尺度和经济领域研究了海洋生态－经济系统的耦合协调关系[2-4]。但在海洋渔业中，海水养殖与海洋捕捞的生产过程有着本质区别。海洋捕捞是人类直接从海洋资源环境中获取水产品的产业活动，海水养殖则是人类利用海洋空间资源、环境资源和其中的生物资源培育水产品的生产过程。随着海水养殖技术的不断提升，集约化、工厂化的网箱养殖、浮筏养殖方式得以大规模推广应用，在提高渔业产量的同时，对海洋生物群落和海水养殖区环境产生了较大影响[5]。而海域生态环境为海水养殖活动提供了物质基础，二者的交互响应直接影响到海洋生态系统健康和人类渔业经济活动效益。因此，从人地关系耦合协调角度研究海水养殖活动与海洋生态环境的互馈关系具有重要意义。

本研究以长山群岛海域为研究对象，分别评价海水养殖产业发展效率和周边海域海水环境质量，进而利用耦合协调模型，分析海水养殖业与海域生态环境的耦合协调关系，解析海水养殖活动与海域生态环境之间的交互作用过程，为开展海域生态环境治理提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

长山群岛地处我国黄海北部海域，位于海洋岛渔场的中心位置，是我国海洋渔业重要发展区域[6]。自 20 世纪 70 年代末期开始大规模发展海水养殖业，以农牧化为主的海水增养殖业有了快速发展，海水养殖业占海洋渔业比重逐年提高。2018 年，长山群岛全年水产总量为 56.21 万 t，其中养殖产量达到 40.52 万 t，占总产量的 72.09%[7]。长期的高密度海水养殖活动，导致海洋生物多样性压力加大[8]、近海和海岸带生态环境破坏，海域水质污染、富营养化和海水养殖病害频发等问题凸显[9]，海洋渔业资源环境系统生态压力持续增大，影响了海水养殖业的高质量发展[10]。

1.2　长山群岛海水养殖业发展水平评价

1.2.1　评价方法

海水养殖活动是由人类利用海域空间资源，投入劳动力、渔业生产工具等生产资料，获取水产品的过程。因此，生产效率是评价养殖活动发展水平的关键。在渔业效率评价中，数据包络分析（DEA）是常用分析方法[11-13]。本研究利用超效率 DEA 模型，评价海水养殖业发展效率，模型设置如下：

$$\min\left[\theta-\varepsilon\left(\sum_{i=1}^{m}s_i^-+\sum_{r=1}^{p}s_r^+\right)\right]$$
$$s.t.\begin{cases}\sum_{n}\lambda_j x_{ij}+s_i^-=\theta x_0, i=1,2,\cdots,m\\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j y_{rj}-s_r^+=y_0, r=1,2,\cdots,s\\ \lambda_j\geqslant 0, s_r^+\geqslant 0, s_i^-\geqslant 0, j=1,2,\cdots,n\end{cases}\tag{1}$$

式中：θ 为评价对象（又称决策单元，Decision Making Unit，DMU）的超效率值，表示海水养殖业发展效率；ε 为阿基米德无穷小量；λ 为决策效益指数，表示了 DMU 的有效程度，值越大，则有效程度越高，反之，有效程度越低；m、s、n 分别为投入变量维度、产出变量维度与区域数量，本研究中 $m=3$，$s=1$，$n=5$；s_i^- 和 s_i^+ 为松弛变量；x_{ij} 和 y_{rj} 分别为投入变量和产出变量。当 $\theta<1$ 时，DMU 没有达到最优效率；当 $\theta>1$ 时，DMU 达到最优效率。

1.2.2 评价指标

根据海水养殖业的投入产出分析，综合考虑海洋养殖产业活动中的自然资源、劳动力和物质等要素投入，借鉴已有的海洋渔业经济效率评价指标选取方法[13]，选取劳动力、物质资本、自然资本作为投入指标，以海水养殖业产量作为产出指标，测算2006—2018年长山群岛海水养殖业发展效率。其中：选取海水养殖业从业人员数量作为劳动投入指标；选取养殖业机动渔船量作为海洋渔业物质资本投入指标；选取机动渔船总功率作为海水养殖业生产力投入指标；选取海水养殖面积作为自然资本投入指标；选取海水养殖总产量数据作为产出指标。

1.3 长山群岛海域生态环境质量评价

1.3.1 评价方法

内梅罗指数由美国学者内梅罗（Nemerow N. L）于1974年提出，是由单因素指数评价方法发展来的综合指数评价法，主要应用于水质环境评价[14]。内梅罗指数因数学计算过程简洁、评价使用方便而得到广泛应用。其公式如下：

$$P=\sqrt{\frac{P_{i\max}^2+P_{i\mathrm{ave}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中：P 为内梅罗指数；$P_{i\max}$、$P_{i\mathrm{ave}}$分别为单因子污染指数 P_i 的最大值与平均值。P_i 的计算公式如下：

$$P_i=\frac{C_i}{S_i} \tag{3}$$

式中：C_i 为第 i 项指标的实测质量浓度；S_i 为第 i 项指标的评价标准。长山群岛海域广阔，生态环境良好，拥有黄渤海区域最好的水质条件，属于国家一类海区，是国家海洋公园重点建设海域[15]。因此，本研究中 S_i 采用《海水水质标准》(GB3097—1997)中一类评价标准对水质状况进行评价。内梅罗指数模型中仅强调单因子污染指数最大值指标的作用，而忽略了危害性较大的指标在环境中的影响。针对该问题，有学者引入污染因子权重对其进行改进[14,16]。改进内梅罗指数计算过程如下：

首先，计算各污染因子权重。①按照海水水质标准，确定评价标准级别 j；②将评价因子 S_i 按照 j 类标准浓度由大到小顺序排列，将其最大值 $S_{\max}$ 与 S_i 相比，以 R_i 为第 i 种污染因子的相关性比值，第 i 种污染因子权重计算公式如下：

$$R_i=\frac{S_{\max}}{S_i} \tag{4}$$

$$W_i=\frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n}R_i} \tag{5}$$

式中：W_i 为第 i 种污染因子权重，$\sum_{i}^{n}W_i=1$，n 为评价指标数。

其次，根据污染因子权重，修正最大的因子污染指数，修正公式如下：

$$P'_{i\max}=\frac{P_{i\max}+P_{w\max}}{2} \tag{6}$$

$$P'_{i\mathrm{ave}}=\sum_{i=1}^{n}P_iW_i \tag{7}$$

式中：$P'_{i\max}$、$P'_{i\mathrm{ave}}$ 分别为修正后单因子污染指数最大值和污染指数平均值；$P_{i\max}$、$P_{w\max}$分别为单因子污染指数 P_i 的最大值、权重最大的因子污染指数。

最后，计算修正内梅罗指数，其公式如下：

$$P'=\sqrt{\frac{P'^2_{i\max}+P'^2_{i\mathrm{ave}}}{2}} \tag{8}$$

式中：P' 为修正内梅罗指数。根据已有研究成果[17]，将海水污染程度与内梅罗指数对应关系划分为5个等级(表1)。

表1 内梅罗指数污染等级划分

序号	内梅罗指数	评价结果	评价等级
1	$P'<0.60$	清洁	Ⅰ
2	$0.60\leqslant P'<1.00$	较清洁	Ⅱ
3	$1.00\leqslant P'<2.60$	轻度污染	Ⅲ
4	$2.60\leqslant P'<5.00$	中度污染	Ⅳ
5	$P'\geqslant 5.00$	严重污染	Ⅴ

1.3.2 评价因子

根据《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T087—2005)，选取 pH 值、化学需氧量(COD)、活性磷酸盐(DIP)、无机氮(DIN)以及石油类含量作为海域生态环境质量评价因子。通过公式(4)和公式(5)计算得到各污染因子权重，结果见表2。

表 2　各污染因子权重计算

污染因子	水质标准/(mg·L^{-1})	R_i值	权重值
悬浮物	10	1	0.001 1
pH 值	7.8～8.5	1.176 5	0.001 3
化学需氧量	2	5	0.005 4
无机氮	0.2	50	0.054 1
活性磷酸盐	0.015	666.666 7	0.721 6
石油类	0.05	200	0.216 5
总计		923.843 2	1

1.4　海水养殖业与海域生态环境耦合协调关系评价

根据系统论思想，采用系统耦合协调度模型，评价海水养殖业与海域生态环境的耦合协调关系。其中，耦合度评价公式如下：

$$C=\sqrt{\left((E\times P)/(\frac{E+P}{2})^{2}\right)} \tag{9}$$

式中：C 为海水养殖业与海域生态环境的耦合度，表示海水养殖系统与海域生态环境间相互作用影响的程度，$0\leqslant C\leqslant 1$，值越大表明海水养殖业与海域生态环境之间相互作用关系越强烈；E 为海水养殖业经济系统发展效率；P 为海域水环境质量，采用内梅罗指数（三类水体污染指数的平均值）表征。借鉴相关研究[18]，将海水养殖业与海域生态环境的耦合度分为 4 个阶段等级（表 3）。

表 3　海水养殖业与海域生态环境耦合度等级划分

耦合度	耦合度等级	特征
$0\leqslant C\leqslant 0.30$	低度耦合	海水养殖业与海域生态环境存在着一定的联系，但相互作用关系不强。当 $C=0$ 时，二者无关联，表现为无关联发展状态
$0.30<C\leqslant 0.60$	拮抗阶段	海水养殖业与海域生态环境之间相互作用加强，二者呈现一定的相关性，处于错综复杂的拮抗作用状态
$0.60<C\leqslant 0.80$	磨合阶段	海水养殖业与海域生态环境存在着比较紧密的联系，二者处于不断磨合与适应的状态
$0.80<C\leqslant 1.00$	高度耦合	海水养殖业与海域生态环境表现为高度关联状态，二者联系密切。当 $C=1$ 时，二者处于有序状态，同步变化

海水养殖业的综合效率指数和海域生态环境的污染指数为各自系统得分，二者不具备可比性。为保证经济系统和生态环境系统之间的耦合度评价具有实际意义，采用数据标准化方法将系统各自得分做归一化处理。综合效率指数为正向指标，污染指数为负向指标，归一化公式分别如下：

$$\text{正向指标：}x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{10}$$

$$\text{负向指标：}x'_{ij}=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{11}$$

式中：x_{ij} 为第 i 年 j 项指标数值；x'_{ij} 为 x_{ij} 的归一化值；$\max(x_{ij})$、$\min(x_{ij})$ 分别为研究期内 j 指标的最大值和最小值，为避免受到 0 和 1 的边界值干扰，将指标最大值增大 10%，将最小值缩小 10%。

耦合度仅表示海水养殖业与海域生态环境间的相互作用强度，但当两个系统的发展水平都很低时，耦合度依然较高，此时会出现系统“假协调”的现象。为避免此种情况，引入协调度模型，以客观地评价养殖业与海域生态系统协调发展水平。公式为：

$$D=\sqrt{(C\times T)},\ T=\alpha\cdot E+\beta\cdot P \tag{12}$$

式中：D 为协调度，$0\leqslant D\leqslant 1$，D 值越大则表示海水养殖业与海域生态环境协调发展水平越高，D 值越小则表示二者失调越严重；T 为海水养殖业与海域生态环境协调的综合水平；α、β 分别为待定系数，且 $\alpha+\beta=1$，取 $\alpha=\beta=0.5$。根据多数研究的经验值[18-20]，将协调度等级划分为 5 个等级（表 4）。

表 4　协调度等级划分

协调度	协调度等级	特征
$0\leqslant D<0.20$	严重失调	海水养殖业与海域生态环境矛盾冲突强烈，二者呈现相互制约的状态
$0.20\leqslant D<0.40$	中度失调	海水养殖业与海域生态环境存在一定的矛盾冲突，在一定程度上处于制约状况
$0.40\leqslant D<0.60$	基本协调	海水养殖业与海域生态环境基本协调，二者存在一定相互促进关系，但并不明显
$0.60\leqslant D<0.80$	中度协调	海水养殖业与海域生态环境处于较为明显的协调状态，二者相互促进，共同发展
$0.80\leqslant D<1.00$	高度协调	海水养殖业与海域生态环境处于高度协调发展状态，存在良好的相互促进关系

1.5 数据来源

长山群岛共有 6 镇 1 乡，其中大连市长海县辖大长山岛、小长山岛、獐子岛、广鹿岛和海洋岛等 5 镇，庄河市辖王家镇和石城乡。考虑数据可得性和统计口径的一致性，本研究的范围为长海县行政辖区。海水养殖业投入产出指标数据、海域水环境质量评价因子数据由 2006—2018 年《长海县统计年鉴》整理获取。

2 结果与分析

2.1 长山群岛海水养殖业发展水平评价

本研究基于超效率 DEA 模型测算长山群岛海水养殖业经济发展效率结果表明：2006—2018 年长山群岛海水养殖业效率呈现倒“U”形变化趋势（图 1）。其中，2006—2014 年海水养殖业效率快速上升，2015—2018 年，表现为波动下降。20 世纪 90 年代，长山群岛开始高度重视海水养殖产业发展，尤其是进入 21 世纪，大规模资金和技术要素被投入用以发展海水养殖业，使海水养殖规模和养殖技术得到提升。虽然 2006—2014 年海水养殖面积和渔船功率大幅增加，养殖规模扩大，但随着养殖技术的投入，劳动力投入量大幅减少，生产效率提高。表明这一时期海水养殖的发展主要依赖生产技术和养殖空间资源的投入。2014 年以后，随着海水养殖业持续扩张，养殖密度增大，饵料减少、水质下降、病害增加，给养殖环境带来较大压力，养殖业面临的风险增加，产量下滑，养殖效率下降。从整体来看，长山群岛海水养殖业效率处于较低水平，2006—2018 年效率平均值为 0.51。

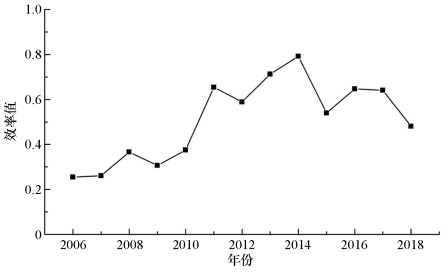

图 1 长山群岛海水养殖业效率变化

2.2 长山群岛海域生态环境质量评价

内梅罗指数评价表明，2006—2018 年长山群岛海域各因子污染指数较低，但受海域人类活动影响，部分指标变化趋势较为明显（图 2）。

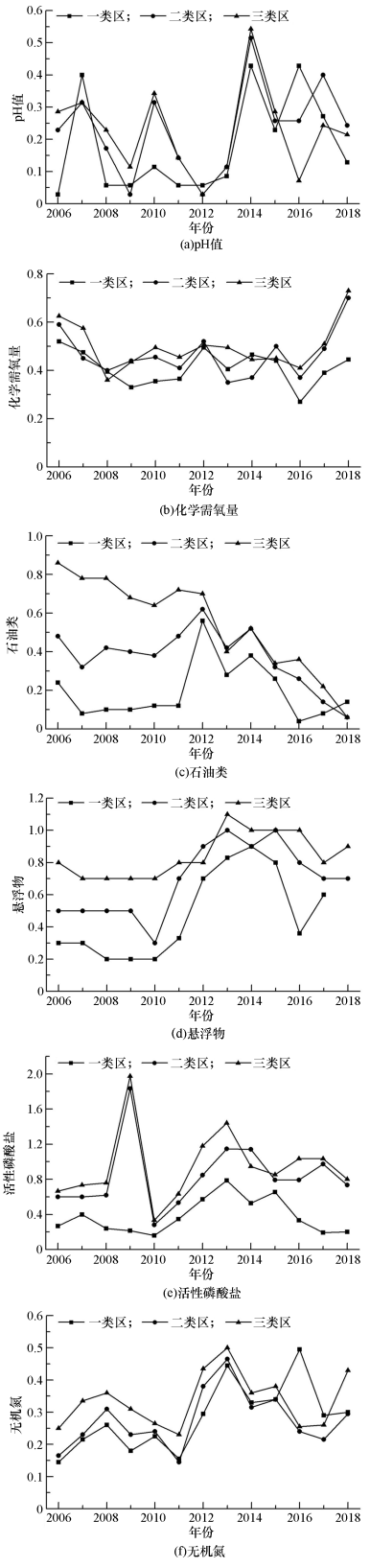

图 2 2006—2018 年长山群岛海域各污染物单因子污染指数变化

其中，pH 值和化学需氧量处于波动变化状态，变化幅度不大，多年来基本处于平衡状态；石油类、悬浮物、活性磷酸盐、无机氮存在明显变化趋势。除三类区，一类区和二类区石油类污染物指数在 2006—2012 年有一定幅度上升，2013 年以后一类区、二类区和三类区均出现明显下降。悬浮物、活性磷酸盐、无机氮在 2011—2013 年出现明显上升趋势。“十二五”期间，近岸养殖业快速发展，养殖户投放饵料、药物等造成海水悬浮物、无机盐和无机氮等物质含量增加。2013 年以后，长海县开展了海水养殖业的集中清理和整顿，海域水质环境开始好转，悬浮物、活性磷酸盐和无机氮等污染指数下降。总体来看，长山群岛海域水质整体较清洁，区域生态环境质量未发生根本变化（表 5）。一类海域除 2013—2015 年外，其余年份均为清洁；二类海域在 2012—2014 年，水质出现轻度污染；三类海域内梅罗污染指数平均数在 2006—2013 年波动变化特征明显，其中，2011—2013 年出现了明显的上升趋势，2014 年以后三类海域内梅罗污染指数均呈下降趋势，说明近年来海域生态环境质量好转。

表 5　长山群岛海域内梅罗指数评价结果

年份	一类区			二类区			三类区			区域平均值		
	指数	结果	等级	指数	结果	等级	指数	结果	等级	指数	结果	等级
2006	0.332	清洁	Ⅰ	0.575	清洁	Ⅰ	0.778	较清洁	Ⅱ	0.562	清洁	Ⅰ
2007	0.384	清洁	Ⅰ	0.561	清洁	Ⅰ	0.751	较清洁	Ⅱ	0.565	清洁	Ⅰ
2008	0.270	清洁	Ⅰ	0.590	清洁	Ⅰ	0.760	较清洁	Ⅱ	0.540	清洁	Ⅰ
2009	0.233	清洁	Ⅰ	1.642	轻度污染	Ⅲ	1.793	轻度污染	Ⅲ	1.223	轻度污染	Ⅲ
2010	0.213	清洁	Ⅰ	0.386	清洁	Ⅰ	0.569	清洁	Ⅰ	0.389	清洁	Ⅰ
2011	0.323	清洁	Ⅰ	0.608	较清洁	Ⅱ	0.720	较清洁	Ⅱ	0.550	清洁	Ⅰ
2012	0.597	清洁	Ⅰ	0.837	较清洁	Ⅱ	1.108	轻度污染	Ⅲ	0.847	较清洁	Ⅱ
2013	0.736	较清洁	Ⅱ	1.051	轻度污染	Ⅲ	1.306	轻度污染	Ⅲ	1.031	轻度污染	Ⅲ
2014	0.610	较清洁	Ⅱ	1.052	轻度污染	Ⅲ	0.914	较清洁	Ⅱ	0.859	较清洁	Ⅱ
2015	0.644	较清洁	Ⅱ	0.849	较清洁	Ⅱ	0.869	较清洁	Ⅱ	0.787	较清洁	Ⅱ
2016	0.353	清洁	Ⅰ	0.727	较清洁	Ⅱ	0.942	较清洁	Ⅱ	0.674	较清洁	Ⅱ
2017	0.307	清洁	Ⅰ	0.868	较清洁	Ⅱ	0.929	较清洁	Ⅱ	0.701	较清洁	Ⅱ
2018	0.266	清洁	Ⅰ	0.654	较清洁	Ⅱ	0.772	较清洁	Ⅱ	0.564	清洁	Ⅰ

2.3　海水养殖业与海域生态环境耦合协调关系评价

耦合协调关系评价结果表明，长山群岛海水养殖业与海洋生态环境的耦合度和耦合协调度呈两阶段变化趋势（图 3）。2006—2011 年，耦合度和协调度均快速上升。其中，耦合度经历了从拮抗阶段到磨合阶段再到高度耦合阶段的变化过程，表明海水养殖业与生态环境质量之间的关系日趋紧密，二者相互影响程度日益增加；协调度虽然呈现增长趋势，多数年份处于中度和基本协调阶段，协调发展水平不高。从海水养殖业发展效率和海域水环境质量两个指标变化可以看出，这一时期，随着发展效率的增长，海域环境质量有下降趋势。2011 年以后，耦合度和协调度维持在较高水平，海水养殖业与生态环境处于高度耦合阶段，表明二者密切相关，协调度均处于中级协调以上。本阶段，海域污染指数降低，海水养殖业效率较高，两系统表现出良好的协调发展水平。

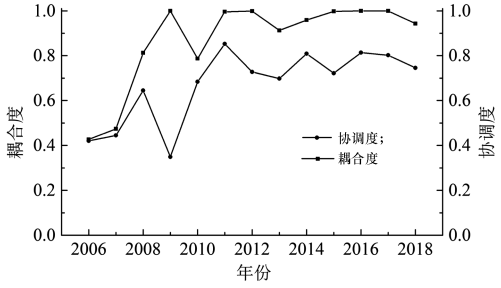

图 3　2006—2018 年长山群岛海水养殖与生态环境耦合协调度

3　结论

（1）长山群岛海水养殖活动与海域生态环境矛

盾主要集中在 2006—2011 年。片面地、过度地追求经济效益，忽视经济活动与生态环境的协调发展，最终也给人类自身带来损失。

(2)政府主管部门通过加强海域范围海水养殖活动管理，对海域养殖环境集中整治，压缩、清退不合理养殖区域，推广生态养殖技术，使海域水质环境有所好转。但是，耦合协调关系在 2011 年以后出现的波动变化也应引起重视。

(3)长期的高密度海水养殖活动影响海域生态环境质量，进而给养殖活动带来严重的经济损失，迫使各利益相关主体采取一定措施，开展海水养殖的环境整治，待海域生态环境质量有所改善，养殖活动又会进一步加强。协调度的波动变化反映了人类与生态环境的博弈关系，即：人类活动加强→生态环境质量下降→经济损失→反思和治理→生态环境质量转好→人类活动加强。

参考文献

[1] 李博，韩增林，孙才志，等.环渤海地区人海资源环境系统脆弱性的时空分析[J].资源科学，2012，34(11)：2214－2221.

[2] WOODWELL J C.A Simulation Model to Illustrate Feedbacks Among Resource Consumption, Production, and Factors of Production in Ecological-economic Systems [J]. Ecological Modelling，1998，112(2)：227－248.

[3] WIER M，HASLER B，ANDERSEN J M.Evaluating Consequences of Agricultural Policy Measures in an Integrated Economic and Environmental Model System[J].Ecosystems and Sustainable Development，1999，27：113－122.

[4] 于谨凯，张同亮.我国海洋渔业生态经济系统的协调度[J].河北渔业，2018(4)：7－14.

[5] XU S S，SONG J M，YUAN H M，et al.Petroleum Hydrocarbons and Their Effects on Fishery Species in the Bohai Sea，North China[J].Journal of Environmental Sciences，2011，23(4)：553－559.

[6] 张耀光，张岩，王宁.长山群岛海洋农牧化海域环境分区研究[J].地理科学，2007，27(6)：768－773.

[7] 长海县统计局.长海县 2018 年国民经济和社会发展统计公报[R].大连：长海县统计局，2019.

[8] 黄备，魏娜，孟伟杰，等.基于压力-状态-响应模型的辽宁省长海海域海洋生物多样性评价[J].生物多样性，2016，24(1)：48－54.

[9] 孙怡，包特力根白乙.长海县海岛渔业发展问题及其对策[J].现代渔业信息，2009，24(9)：5－8.

[10] 陈东景，郑伟，郭惠丽，等.基于物质流分析方法的生态海岛建设研究：以长海县为例[J].生态学报，2014，34(1)：154－162.

[11] 肖姗，孙才志.基于 DEA 方法的沿海省市海洋渔业经济发展水平评价[J].海洋开发与管理，2008，114(4)：90－94.

[12] IDDA L，MADAU F A，PULINA P.Capacity and Economic Efficiency in Small-scale Fisheries：Evidence From the Mediterranean Sea[J].Marine Policy，2009，33(5)：860－867.

[13] 孙康，季建文，李丽丹，等.基于非期望产出的中国海洋渔业经济效率评价与时空分异[J].资源科学，2017，39(11)：2040－2051.

[14] 韩术鑫，王利红，赵长盛.内梅罗指数法在环境质量评价中的适用性与修正原则[J].农业环境科学学报，2017，36(10)：2153－2160.

[15] 王恒.国家海洋公园选址研究：以大连长山群岛为例[J].自然资源学报，2013，28(3)：492－503.

[16] 康小兵，刘庆贺，李科，等.修正内梅罗指数法在小型污染场地中的应用[J].环境保护科学，2019，45(1)：111－115.

[17] 章鑫慧，刘好真，李进京，等.基于改进内梅罗指数的东海中鹿岛生态养殖区水质评价[J].应用海洋学学报，2019，38(2)：225－231.

[18] 马丽，金凤君，刘毅.中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J].地理学报，2012，67(10)：1299－1307.

[19] 李雪铭，郭玉洁，田深圳，等.辽宁省城市人居环境系统耦合协调度时空格局演变及驱动力研究[J].地理科学，2019，39(8)：1208－1218.

[20] 韩增林，赵启行，赵东霞，等.2000—2015 年东北地区县域人口与经济耦合协调演变及空间差异：以辽宁省为例[J].地理研究，2019，38(12)：3025－3037.