

# 基于信息熵的区域人海复合生态系统可持续发展分析

王玉梅, 王 啸, 张 舒, 丁俊新

(鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025)

**摘 要:**从“人—海”复合生态系统整体视角,分析了海洋生态系统的耗散结构特征;依据耗散结构及信息熵理论和方法,从熵流和熵产生两方面构建了“海洋生态系统演化指标体系”,以海洋大省山东省为例,对海洋生态系统的演化趋势进行了熵变分析;采用可持续发展评估模型,以综合协调的观点探索海洋生态系统的可持续发展能力。研究结果显示:(1) 2006—2013 年,山东省海洋生态系统的内部负反馈机制始终占优势,系统向有序方向发展,且 2009 年之后系统的内部活力上升,健康、稳定性趋强;(2) 山东省海洋生态系统的资源承载能力、价值产出能力及综合环境管理能力都不断增强,综合可持续发展能力呈上升趋势;(3) 山东省海洋生态系统的综合发展水平不断提升,2013 年已进入较高级发展状态;海洋社会经济与自然生态系统之间的总体协调发展能力处于波动上升时期。

**关键词:**环境与发展;可持续发展;信息熵;“人—海”复合生态系统;山东省

**中图分类号:**X22

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2018)03-0332-07

## Analysis on the Sustainable Development of Regional Human-Sea Complex Ecosystem Based on Information Entropy

WANG Yumei, WANG Xiao, ZHANG Shu, DING Junxin

(School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

**Abstract:** The evolution and sustainable development of marine ecosystem has become a hotspot of marine research. We analyzes the characteristics of dissipative structure of marine ecosystem from the perspective of human-sea complex ecosystem. Based on the theory and method of dissipative structure and information entropy, we construct the index system of marine ecosystem evolution from entropy flow and entropy generation, and took the coastal province of Shandong as an example to analyze the evolution trend of marine ecosystem with entropy change. Adopting sustainable development evaluation model, we explored the sustainable development ability of marine ecosystem from an integrated and coordinated perspective. The results showed that: (1) from 2006 to 2013, the internal negative feedback mechanism of marine ecosystem had always been dominant in Shandong Province, the system was developing in the direction of orderly, the internal vitality of the system increased after 2009, and the health and stability of the system became stronger; (2) the carrying capacity, the value output capacity and the comprehensive environmental management capacity of the marine ecosystem in Shandong Province were constantly increasing, and the comprehensive sustainable development capacity was on the rise; (3) the comprehensive development level of marine ecosystem in Shandong Province had been improved, and in 2013, it entered a higher development stage; the overall coordinated development capability between marine social economy and natural ecosystem was in the period of fluctuation increase.

**Keywords:** environment and development; sustainable development; information entropy; human-sea complex ecosystem; Shandong Province

海洋自然生态系统在支持人类社会福利和经济发展中发挥着至关重要的作用。据 Costanza 等<sup>[1]</sup>的研究,海洋自然生态系统每年为人类社会提供了大约 49.7 万亿美元的服务,约占全球生态系统服务的 40%。目前,全球大约 40% 的人口居住在 100 km 以内的沿海地区,预计未来一段时间沿海地区的人口和经济仍将保持快速增长<sup>[2]</sup>。在中国,沿海地区以 13% 的国土面积承载了 40% 多的人口,创造了 60% 以上的国民经济生产总值<sup>[3]</sup>。但过度开发利用也使海洋自然环境系统不堪重负,面临着水质下降、富营养化、生物多样性减少、资源耗竭等诸多生态环境问题。人类活动导致的多重压力使海洋自然环境系统的结构改变、功能退化、调节能力降低,威胁到当前和未来几代人的持续服务能力<sup>[4]</sup>,因此,沿海地区社会、经济与环境可持续性日益引人关注。

1948 年,Shannon<sup>[5]</sup> 创立信息论,提出了“信息熵”(Information Entropy)的概念,用来表征系统的无序和混乱程度,判断系统的演化方向。信息熵基于概率和数理统计的方法能使多维度的信息被量化和综合,因此在分析复杂系统和不确定性问题方面具有优势<sup>[6-8]</sup>。将耗散结构理论与信息熵方法相结合判定城市生态系统的演化方向与可持续发展成果较丰富<sup>[6-9]</sup>,但在海洋生态系统可持续发展研究中还较为鲜见。狄乾斌等<sup>[10]</sup>采用信息熵方法对国家层面的海洋生态系统可持续发展能力进行了判定,但未对各子系统之间的协调水平与综合发展水平进行具体分析。随着生产力的发展,人类与海洋的相互作用不断增强,人类的社会经济活动已成为影响海洋自然环境系统演变的重要因素,逐渐形成了“海洋社会经济与自然环境”共同构成的复合生态系统,且各子系统之间的关系日益紧密与复杂。故此,本文将“人”由生态系统的外在因素转化为内在因素,海洋生态系统是指人与海洋相互作用共同构成的“人—海”复合生态系统,各子系统之间内在的协调性和综合发展水平体现了海洋生态系统可持续发展能力的本质特征。因此,本文以山东省为例,从“人—海”复合生态系统整体视角,采用耗散结构及信息熵的理论和方法,以综合协调的观点去探索海洋生态系统的演化方向及可持续发展能力,以期为推进沿海地区海洋生态文明建设,促进海洋生态系统健康发展提供一定的科学依据。

## 1 研究区概况

山东省是我国重要的沿海省份,包括青岛、东营、

烟台、潍坊、威海、日照和滨州 7 个沿海城市。全省海岸线长 3 345 km,海域面积约 15.95 万 km<sup>2</sup>,海洋资源丰富,海洋经济发展潜力巨大。从 1990 年提出“海上山东”发展战略以来,海洋经济处于长期快速发展态势。“十一五”期间,海洋生产总值年均增长 24%,进入“十二五”之后才有所放缓。高强度的开发,使海洋资源承载压力不断增大<sup>[11]</sup>,海洋环境污染严重,近岸海域生态系统健康受到严重威胁<sup>[12-13]</sup>。2011 年,国务院正式批复了《山东半岛蓝色经济区发展规划》,人与自然和谐的蓝色经济区成为新的发展目标,从而使山东省海洋开发进入了一个新时期。在新时期内,如何判定海洋社会经济与自然环境之间的和谐关系,明确海洋生态系统演化方向与可持续性显得尤为必要和迫切。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 海洋生态系统的耗散结构与熵变

生态系统是一个具有耗散结构和远离平衡的非线性开放系统,是具有一系列分级层次的开放有序系统,因此,熵可作为测度生态系统有序度的一个状态参量,熵值越高系统越无序,反之系统越有序<sup>[14]</sup>。海洋是一个开放的、复杂的、巨大的生态系统,在人类活动的强烈干扰下,海洋生态系统已成为由“海洋自然生态系统”和“海洋社会经济子系统”共同构成的开放的复合生态系统,其中,海洋自然生态系统是海洋社会经济活动的基础和载体,为海洋社会经济系统的生存和发展提供必要的资源和环境服务需求;而“海洋社会经济系统”中的“人”是整个海洋生态系统的主体,决定着从“海洋自然生态系统”获取物质和能量的速度和数量,并通过政策制度、发展规划和技术进步等主动约束人口与经济的发展规模和速度,协调各子系统之间的关系。由此可见,海洋生态系统的诸要素和各子系统之间相互制约、相互联系形成了复杂的远离平衡态的非线性关系,而非诸要素简单叠加的线性关系;各子系统之间通过物质流、能量流和信息流的交换,使系统在时空、功能上保持相对的稳定和有序;而系统内外因素的变化、耦合,可能使影响系统的微小因素被放大,从而触发系统形成新的结构,推动系统的演变发展。所以,海洋生态系统符合耗散结构的特点,其变化过程可以用耗散结构系统熵变来表征<sup>[10]</sup>。

依据耗散结构系统的熵变公式,海洋生态系统的熵变可分为熵流和熵产生两部分。海洋自然生态系统不断的向海洋社会经济系统输入物质和能量,以维

持其系统的稳定有序或结构升级;同时,海洋社会经济系统发展过程中造成的资源环境压力使自然生态系统向无序化发展;二者进行物质、能量、信息交换时产生的熵变,称为熵流”,其值可正、可负或为零”<sup>[15-16]</sup>。熵流主要反映海洋自然生态系统的承载能力与来自社会经济系统的发展压力,可用来衡量海洋生态系统中社会、经济和环境各子系统的综合协调性。来自海洋社会经济系统的大量污染输出使海洋环境质量下降、生态系统健康状况恶化,熵不断增加,系统向无序化发展;同时,海洋社会经济系统通过环保资金、技术和人力、物力的投入,生产技术的革新、加强管制等手段抑制自然生态系统的熵过快增长,消除短期或局部积累的过多的熵,最终避免自然生态系统走向崩溃;二者相互作用产生的熵变,称为“熵产生”,由于“负熵”(生态环境保护建设等的投入)的输入,其值可正、可负或为零”,从而呈现出违背热力学第二定律的有序化发展<sup>[16]</sup>。熵产生主要反映了海洋自然生态系统的还原更新能力(即自我调节能力)和海洋社会经济系统的环境管理与建设能力,可用来衡量海洋生态系统的活力。熵流和熵产生之和即为海洋生态系统的“总熵变”,可衡量系统的健康有序程度及系统演化方向。

## 2.2 海洋生态系统演化指标体系

指标体系是评价内容的具体反映,因此每项指标的选取均应具有明确的理论与实际意义。本文首先根据耗散结构理论对熵的分类,确定 2 个准则层指标,即熵流和熵产生;其次,考虑“人—海”复合生态系统中各子系统之间的相互关系,借鉴“驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)”指标框架<sup>[17]</sup>,并参考城市生态系统与海洋生态系统信息熵已有研究成果<sup>[6-8,10]</sup>,确定 4 个次准则层指标:支持型输入熵指标(a)、压力型输出熵指标(b)和氧化型代谢熵指标(c)、还原型代谢熵指标(d);遵循科学性、系统性、层次性、代表性和可操作性等指标选取原则,基于海洋生态系统的结构组成、功能过程和状态特征,初步构建海洋生态系统演化分析的评价指标体系。每个次准则层由 8 个四级指标来表征,采用熵权法确定初选指标的客观权重,因信息熵权近似为 0 的指标提供的有效信息极少,因此,对其进行剔除代换,最终筛选出 32 个具体指标(见表 1)。

## 2.3 基于“信息熵”的海洋生态系统演化评估模型

Shannon<sup>[5]</sup>借鉴统计力学中“熵”的概念,把信息中排除了冗余后的平均信息量称为“信息熵”,并给出了其数学表达式,即假设  $X$  是一个离散随机变量, $X$  的取值范围  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为有限集合,设各种

取值出现的概率分布为  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  ( $0 \leq p_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n$ ),且  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ ,则  $X$  的信息熵为:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

式中: $H$  为随机变量  $X$  的信息熵; $p_i$  为  $X$  的概率分布, $X$  的不确定性越大, $H$  值越大。从系统的角度来说,一个系统的要素和结构组成越有序,信息熵就越低;反之,一个系统的要素和结构组成越混乱,信息熵就越高,因此,信息熵可作为系统有序度和稳定度的度量。

变量  $X$  的信息熵与其最大熵的比值称为相对熵<sup>[5]</sup>。为了有效地比较不同系统的信息熵,可采用相对熵对信息熵进行标准化,相对熵的计算公式为:

$$S = H/H_{\max} = \frac{(- \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i)}{\ln n}$$

式中: $S$  为随机变量  $X$  的相对熵,根据其定义, $0 \leq S \leq 1$ 。相对熵使熵值归一化为标准范围 0~1,使不同系统的熵值易于比较; $H_{\max}$  为随机变量  $X$  的最大信息熵, $H_{\max} = \ln n$ 。

根据 Shannon 对信息熵的定义,如果对于有  $n$  个评价指标, $m$  个评价对象(本文指年份)的海洋生态系统进行评价,可获得年份和指标两类信息熵。

(1) 熵变模型 海洋生态系统的熵变采用年份信息熵计算,其时间序列的变化趋势反映了系统的演化方向与有序性。4 种类型熵,即支持型输入熵  $\Delta_{eS1}$ ,压力型输出熵  $\Delta_{eS2}$ ,氧化型代谢熵  $\Delta_{eS2}$  和还原型代谢熵  $\Delta_{eS1}$  的计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$\Delta S = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ij}}{q_j} \ln \frac{q_{ij}}{q_j}$$

式中: $q_{ij}$  为各指标的标准化值; $q_j = \sum_{i=1}^n q_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ );熵流、熵产生和总熵变的计算公式见表 3。

(2) 熵权模型 海洋生态系统评价指标的客观权重采用指标信息熵计算,指标信息熵  $E_i$  可表示为<sup>[19]</sup>:

$$E_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i}$$

式中: $E_i$  为  $i$  指标的信息熵; $q_i = \sum_{j=1}^m q_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ),并假定当  $q_{ij} = 0$  时,  $\frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i} = 0$ 。

在信息熵的基础上,第  $i$  个评价指标的熵权可定义为:

$$Q_i = \frac{(1 - E_i)}{(n - \sum_{i=1}^n E_i)}$$

式中: $Q_i$  为  $i$  指标的熵权(客观权重),代表了一个指标提供的有用信息的多少,随评价对象的取值不同而变化。

表 1 山东省海洋生态系统演化指标体系及权重

目标层	准则层	次准则层	要素层	熵权 ( $Q_i$ )	AHP ( $\theta_i$ )	综合权重 ( $W_i$ )
山东省 海洋生 态系统 可持续 发展	熵流	支持型 输入熵 指标( $a$ )	$a_1$ 海洋捕捞产量(万 t)	0.002	0.101	0.052
			$a_2$ 海水养殖产量(万 t)	0.031	0.065	0.048
			$a_3$ 海盐产量(万 t)	0.019	0.040	0.030
			$a_4$ 海洋原油产量(万 t)	0.030	0.040	0.035
			$a_5$ 海洋天然气产量(万 m <sup>3</sup> )	0.046	0.040	0.043
			$a_6$ 海洋化工产品产量(万 t)	0.231	0.154	0.193
			$a_7$ 海洋第三产业产值(亿元)	0.331	0.331	0.331
			$a_8$ 海洋生产总值(亿元)	0.311	0.229	0.270
	熵产生	压力型 输出熵 指标( $b$ )	$b_1$ 河流水质断面Ⅴ类、劣Ⅴ类比例(%)	0.122	0.049	0.086
			$b_2$ 水资源承载指数	0.051	0.190	0.121
			$b_3$ 盐田资源承载指数	0.0065	0.061	0.034
			$b_4$ 海水养殖资源承载指数	0.026	0.061	0.044
			$b_5$ 海岸线经济密度(万元/km <sup>2</sup> )	0.134	0.068	0.101
			$b_6$ 赤潮灾害发生次数(次)	0.468	0.190	0.329
			$b_7$ 典型海洋生态系统健康指数	0.020	0.190	0.105
			$b_8$ 劣于Ⅳ类水质海域比例(%)	0.171	0.190	0.181
		氧化型 代谢熵 指标( $c$ )	$c_1$ 沿海地区工业废水排放总量(万 t)	0.026	0.228	0.127
			$c_2$ 沿海城市工业 COD 排放量(万 t)	0.310	0.131	0.221
			$c_3$ 沿海城市工业氨氮排放量(t)	0.035	0.131	0.083
			$c_4$ 沿海城市工业废气排放量(亿 m <sup>3</sup> )	0.171	0.070	0.121
			$c_5$ 沿海城市工业二氧化硫排放量(万 t)	0.024	0.070	0.047
			$c_6$ 沿海城市工业烟(粉)尘排放量(t)	0.050	0.070	0.060
			$c_7$ 直排海污染源污染物入海量(t)	0.269	0.228	0.248
			$c_8$ 沿海城市工业固废产生量(万 t)	0.116	0.070	0.093
		还原型 代谢熵 指标( $d$ )	$d_1$ 沿海城市工业 COD 去除率(%)	0.012	0.166	0.089
			$d_2$ 沿海城市工业氨氮去除率(%)	0.021	0.166	0.093
			$d_3$ 沿海城市工业 SO <sub>2</sub> 去除率(%)	0.169	0.090	0.129
			$d_4$ 垃圾无害化处理率(%)	0.071	0.090	0.080
			$d_5$ 环境污染治理投资占 GDP 比重(%)	0.046	0.220	0.133
			$d_6$ 海洋类自然保护区面积(km <sup>2</sup> )	0.330	0.090	0.210
			$d_7$ 沿海城市工业固废综合利用率(%)	0.005	0.090	0.048
			$d_8$ 海洋科研机构科技课题数(项)	0.345	0.090	0.217

注:水资源承载指数=供水总量/水资源总量;盐田资源承载指数=盐田生产面积/盐田总面积;海水养殖资源承载指数=海水养殖面积/浅海滩涂海水可养殖面积。

2.4 “综合赋权”的海洋生态系统可持续发展评价模型

海洋生态系统可持续发展能力评价采用“综合赋权”的加权指数模型<sup>[8]</sup>,计算公式为:

$$G=\frac{1}{4}\sum_{f=a}^dG_f \quad (f=a,b,c,d)$$

式中:G为海洋生态系统可持续发展能力综合得分;G<sub>f</sub>为4类信息熵指标的可持续发展得分;G的得分越高,表明海洋生态系统的可持续发展能力越强。

$$G_f=\sum_{i=1}^8W_iq_{ij} \quad (j=1,2,\cdots,m)$$

式中:W<sub>i</sub>为*i*指标要素层的综合权重;q<sub>ij</sub>为*i*指标第*j*年的标准化值。

由于利用信息熵获得的熵权并不代表指标在客观实际意义上的重要性系数,而是仅反映了各指标在

竞争上的激烈程度系数,因此,有必要另外考虑各指标的重要性权重,将主客观权重相结合,主客观权重的结合方法为<sup>[19]</sup>:

$$W_i=\frac{(Q_i+\theta_i)}{2}$$

式中:Q<sub>i</sub>是熵权法确定的*i*指标要素层对次准则层的主观权重;θ<sub>i</sub>是AHP法确定的*i*指标要素层对次准则层的主观权重。

G反映了海洋生态系统的相对优异性可持续发展能力,但体现不出海洋经济与海洋生态环境之间的协调发展关系。因此,引入“协调发展度模型”来度量海洋经济与生态环境之间的协调发展水平。协调发展度模型定义为<sup>[8-9,20]</sup>:

$$D=\sqrt{\left\{\frac{G_a \cdot G_b \cdot G_c \cdot G_d}{[(G_a+G_b+G_c+G_d)/4]^4}\right\}^k \cdot T}$$

式中:  $D$  为协调发展度指数;  $G_a, G_b, G_c, G_d$  分别为 4 类信息熵指标的可持续发展得分;  $k$  为调节系数,  $k \geq 2$ , 本文取  $k=8$ 。

$T$  为综合发展度指数, 是环境与经济效益(或发展水平)的综合评价指数, 它反映环境与经济的整体

效益或水平。模型定义为:

$$T=\sum_{f=a}^d \omega_f G_f \quad f=a, b, c, d; \omega_f=\sum_{i=1}^8 \omega_{fi}$$

式中:  $\omega_f$  为熵权法确定的次准则层指标的偏重系数;  $\omega_{fi}$  为熵权法确定的要素层指标对目标层的权重,  $\sum \omega_f=1$ 。

综合发展度  $T$  与协调发展度  $D$  的等级划分标准见表 2<sup>[20]</sup>。

表 2 海洋环境与经济的“综合发展度”、“协调发展度”分级判定标准

可持续发展指标	[0, 0.5)	[0.5~0.6)	[0.6~0.7)	[0.7~0.8)	[0.8~0.9)	[0.9~0.1]
$T$	低级发展	勉强发展	初级发展	中级发展	较高级发展	高级发展
$D$	不协调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调

### 2.5 数据来源与处理

依据指标数据的准确性、科学性、连续性和可获得性等原则, 本研究中的支持型输入熵指标、压力型输出熵指标(河流水质断面Ⅴ类、劣Ⅴ类比例除外)及氧化型代谢熵指标和还原型代谢熵指标中的海洋生态环境与科技指标原始数据主要来源于《中国海洋统计年鉴》(2007—2014)和《山东省海洋环境状况公报》(2006—2013 年), 其他指标原始数据主要来源于《山东统计年鉴》(2007—2014)和《山东省环境状况公报》(2006—2013 年)。

在海洋生态系统熵变演化分析中, 因熵变分析模型为矢量模型, 因此将所有指标数据作为正向指标进行标准化处理。在海洋生态系统可持续发展能力分析中, 根据各指标对海洋生态系统可持续发展能力的作用属性, 将支持型输入熵指标和还原型代谢熵指标定义为正向指标; 压力型输出熵指标和氧化型代谢熵指标定义为负向指标<sup>[7]</sup>。正负指标的标准化方法如下:

$$q_{ij}=\begin{cases} x_{ij}/\max(x_{ij}) & \text{正向指标} \\ \min(x_{ij})/x_{ij} & \text{负向指标} \end{cases}$$

式中:  $q_{ij}$  为  $i$  指标各年份的标准化值;  $x_{ij}$  为  $i$  指标各年份的原始数据。

## 3 结果与分析

### 3.1 山东省海洋生态系统演化的熵变时序分析

(1) 支持型输入熵( $\Delta_{s1}$ ) 山东省海洋生态系统支持型输入熵在研究期间内呈波动上升并逐渐放缓的趋势(表 3)。其波动因素主要是由海洋化工产品产量在 2008 年和 2011 年出现大幅下滑造成的; 放缓因素主要是由海洋捕捞产量、海盐产量和海洋天然气产量大体在 2011 年之后逐渐下降引起的, 与此同时, 海洋生产总值和第三产业产值依然表现出了快速增长势头。这表明山东省海洋经济在快速增长的同时, 一些海洋资源的输出量并未同步上升, 而是表现出了一定的脱钩趋势。总体来看, 短时间内山东省海洋自

然生态系统的资源承载压力依然会缓慢上升, 但随着海洋经济结构调整的成效逐步显现, 增加速率趋向减弱。

(2) 压力型输出熵( $\Delta_{s2}$ ) 研究期内压力型输出熵呈现“先上升后下降”的变化趋势。以 2009 年为拐点, 2009 年之前逐年上升, 2009 年之后波动下降, 表明海洋自然生态系统承受的总压力在 2009 年之后出现降低趋势。

(3) 氧化型代谢熵( $\Delta_{s2}$ ) 氧化型代谢熵在研究期内呈现“先上升后下降, 再略微反弹”的变化过程。2006—2008 年,  $\Delta_{s2}$  逐年上升; 2009—2011 年,  $\Delta_{s2}$  快速下降, 之后两年略有反弹。总体上,  $\Delta_{s2}$  呈波动下降趋势, 反映了沿海城市工业三废排放总量不断下降的良好态势。

(4) 还原型代谢熵( $\Delta_{s1}$ ) 研究期内, 还原型代谢熵的变幅较小, 表现出以 2010 年为节点阶段上升的趋势, 且 2013 年  $\Delta_{s1}$  已接近最大值。这主要得益于环保投资的逐年增加及三废治理率的不断提升。反映出了“十一五”以来山东省海洋生态保护和点源污染治理力度的不断加强。资金、技术、海洋科技人才等不同形式负熵流的持续输入, 推动系统向着有序方向发展。

(5) 熵流、熵产生和总熵变 熵流在研究期内呈波动变化趋势, 但变化幅度不大, 反映出山东省海洋自然生态系统与社会经济系统之间的协调性尚不稳定, 但 2011 年之后, 生态系统的整体运行状态呈优化趋势; 熵产生以 2008 年为拐点, 呈现出先微弱上升后波动下降的变化趋势, 反映出 2008 年后山东省海洋生态系统的内部活力逐渐增强, 系统的结构和功能逐步改善, 自我调控能力不断增强; 山东省海洋生态系统总熵变均为负值, 并以 2009 年为拐点, 呈现出先升后降的变化趋势, 反映出研究期内海洋生态系统内部负反馈机制占优势, 系统处于有序发展状态, 且 2009 年之后系统的健康、稳定性逐渐增强。

表 3 基于信息熵的山东省海洋生态系统熵值与熵变

评价指标	符号与公式	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
支持型输入熵	$\Delta_{s1}$	0.977	0.985	0.984	0.990	0.995	0.988	0.998	0.998
压力型输出熵	$\Delta_{s2}$	0.957	0.981	0.982	0.994	0.992	0.988	0.989	0.983
氧化型代谢熵	$\Delta_{s2}$	0.921	0.923	0.927	0.926	0.913	0.899	0.907	0.901
还原型代谢熵	$\Delta_{s1}$	0.990	0.990	0.993	0.994	0.994	0.998	1.000	1.000
商流	$\Delta_{s2} - \Delta_{s1}$	-0.02	-0.004	-0.002	0.004	-0.003	0	-0.009	-0.015
熵产生	$\Delta_{s2} - \Delta_{s1}$	-0.069	-0.067	-0.066	-0.068	-0.081	-0.099	-0.093	-0.099
总熵变	$(\Delta_{s2} - \Delta_{s1}) + (\Delta_{s2} - \Delta_{s1})$	-0.090	-0.071	-0.068	-0.064	-0.085	-0.099	-0.102	-0.114

3.2 山东省海洋生态系统可持续发展能力分析

3.2.1 海洋生态系统可持续发展能力得分 山东省海洋生态系统支持型输入熵指标可持续发展得分  $G_a$  在研究期内呈快速上升趋势(图 1),一方面反映出山东省海洋自然生态系统对社会经济系统发展的资源供给能力依然有一定的上升空间;另一面也反映出海洋社会经济系统的资源加工能力与产品生产能力的快速上升;总体来看,海洋生态系统的价值产出能力呈持续增长趋势。压力型输出熵指标可持续发展得分  $G_b$  在研究期内总体上低于其他指标,且呈震荡变化趋势,但已表现出轻微的上升势头,说明人类社会活动给海洋自然生态系统带来的资源环境压力依然较大,但未出现恶化趋势。氧化型代谢熵指标可持续发展得分  $G_c$  在研究期内呈波浪式上升趋势,说明沿海城市点源污染治理能力不断提高,工业污染物排放总量逐渐减少。还原型代谢熵指标可持续发展得分  $G_d$  总体呈逐年上升趋势,反映出海洋社会经济系统的综合环境管理能力不断提升,物质循环代谢功能稳定增强。

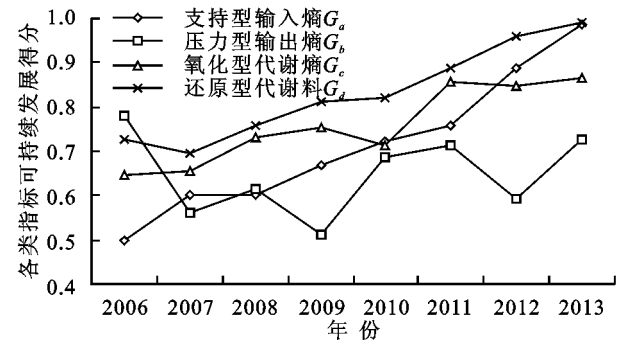


图 1 山东省海洋生态系统演化指标可持续发展得分变化趋势

山东省海洋生态系统可持续发展总得分( $G$ ) 2007 年之后呈逐年上升趋势(图 2),这主要得益于海洋社会经济系统的价值产出能力不断增强,海洋科技研发及环保资金投入逐年增加,系统的还原代谢能力增强,从而使海洋生态系统不断向健康稳定方向发展,系统的可持续发展水平不断提高。

3.2.2 海洋生态系统发展度分析 由图 2 可知,山东省海洋生态系统“综合发展度  $T$ ”2007 年之后总体上呈逐年增长趋势,这与可持续发展总得分  $G$  的变化趋势基本一致;从具体分值来看,2006—2009 年,  $0.6 \leq T < 0.7$ ,处于初级发展状态;2010—2012 年,  $0.7 \leq T < 0.8$ ,处于中级发展状态;2013 年,  $0.8 \leq T < 0.9$ ,处于较高级发展状态,表明山东省海洋生态系统的整体综合发展水平不断提升,已进入较高级发展状态。

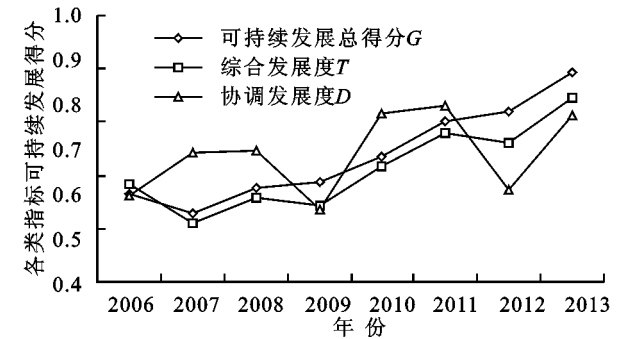


图 2 山东省海洋生态系统可持续发展综合指数得分变化趋势

山东省海洋生态系统“协调发展度  $D$ ”呈震荡上升趋势,2006—2008 年协调发展等级在“初级—中级协调发展类”之间、2009—2013 年协调发展等级在“初级—良好协调发展类”之间波动变化,2007—2008 年、2010—2011 年表现为经济发展滞后型,2012—2013 表现为环境滞后型,说明海洋社会经济系统与自然生态系统之间的协调关系尚不稳定,易受国内外经济发展形势及国内经济发展政策与环保政策的影响,但总体协调发展能力处于波动上升时期。

从各类可持续发展指标的得分可以看出,压力型输出熵指标的得分最低,且不稳定,是影响海洋生态系统协调发展能力与整体可持续发展能力的关键因素。所以在海洋社会经济系统发展的同时给海洋自然生态系统减压是提高系统活力、维持系统有序稳定发展的重要途径。这就需要在继续加强点源污染控制,提高工业环境效率的同时,从源头加强农业污染及海水养殖污染等面源污染的控制力度,实施海陆联

防,减轻海洋生态环境压力;另一方面,继续加强海洋科技支持力度,不断提高海洋资源的利用效率,同时拓展海洋资源的开发利用潜力,从而提高自身的资源禀赋,以减轻海洋的资源承载压力。

## 4 结论

(1) 山东省海洋生态系统的熵变分析表明,系统的熵流呈波动变化,2011年之后,系统的整体运行状态呈优化趋势;熵产生与总熵变的变化趋势大体一致,分别以2008年和2009年为拐点,先升后降,且研究期内均为负值。说明海洋生态系统内部负反馈机制始终占优势,系统处于有序发展状态,且2008年世界经济危机之后系统的内部活力呈上升趋势,系统的健康、稳定性逐渐增强。

(2) 研究期内,山东省海洋生态系统的综合可持续发展能力呈不断上升趋势,具体表现为海洋自然生态系统的资源承载能力依然有上升空间,而社会经济系统的价值产出能力及综合环境管理能力不断提升,物质循环代谢功能稳定增强;但人类社会经济活动给海洋自然生态系统带来的资源环境压力依然较大,已成为阻碍海洋生态系统可持续发展能力提升的关键因素。

(3) 海洋生态系统发展度分析表明,研究期内山东省海洋生态系统的整体综合发展水平不断提升,已进入较高级发展状态;而海洋社会经济系统与自然生态系统之间的协调关系尚不稳定,易受国内外经济发展形势及国内经济发展政策与环保政策的影响,但总体协调发展能力处于波动上升时期。

本文明确了采用相对熵的方法对信息熵进行标准化处理,保证了研究结论的科学性和合理性。此外,受海洋相关数据获取、模型参数选择等的制约,该研究在指标体系构建、海域空间差异研究等方面还存在进一步完善的地方。

### 参考文献:

- [1] Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014,26:152-158.
- [2] Martin C L, Momtaz S, Gaston T, et al. A systematic quantitative review of coastal and marine cultural ecosystem services: Current status and future research[J]. *Marine Policy*, 2016,74:25-32.
- [3] 唐启升. 加强多重压力胁迫下近海生态适应性对策研究[N]. *科学时报*, 2011-02-15.
- [4] Groot R D, Brander L, Ploeg S V, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. *Ecosystem Services*, 2012,1(1):50-61.
- [5] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948,27(4):379-423.
- [6] Zhang Y, Yang Z, Li W. Analyses of urban ecosystem based on information entropy[J]. *Ecological Modelling*, 2006,197:1-12.
- [7] 林珍铭,夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析[J]. *地理学报*, 2013,68(1):45-57.
- [8] 王龙,徐刚,刘敏. 基于信息熵和GM(1,1)的上海市城市生态系统演化分析与灰色预测[J]. *环境科学学报*, 2016,36(6):2262-2271.
- [9] 吴宜进,廖乐,袁绪英. 基于信息熵的武汉市城市生态系统演化分析研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2013,22(1):21-26.
- [10] 狄乾斌,韩雨汐. 熵视角下的中国海洋生态系统可持续发展能力分析[J]. *地理科学*, 2014,34(6):664-671.
- [11] 刘佳,万荣,陈晓文. 山东省蓝色经济区海洋资源承载力测评[J]. *海洋环境科学*, 2013,32(4):619-624.
- [12] 牛德强. 山东省海洋经济可持续发展协调机制研究[J]. *中国海洋大学学报:社会科学版*, 2015(1):44-49.
- [13] 李虎,宋秀贤,俞志明,等. 山东半岛近岸海域生态系统健康综合评价[J]. *海洋科学*, 2014,38(10):40-45.
- [14] 马世骏主编. 现代生态学透视[M]. 北京:科学出版社, 1990:263-264.
- [15] Weber B H, Depew D J, Smith J D. Entropy, information, and evolution: new perspectives on physical and biological evolution[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1988,12(4):389-391.
- [16] 张妍,杨志峰,何孟常,等. 基于信息熵的城市生态系统演化分析[J]. *环境科学学报*, 2005,25(8):1127-1134.
- [17] Martins J H, Camanho A S, Gaspar M B. A review of the application of driving forces-Pressure-State-Impact-Response framework to fisheries management[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2012,69(5):273-281.
- [18] Wang X, Su J, Shan S, et al. Urban ecological regulation based on information entropy at the town scale: A case study on Tongzhou district, Beijing City[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012,13:1155-1164.
- [19] 张继国, Vijay P Singh. 信息熵—理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012:21-26.
- [20] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. *热带地理*, 1999,19(2):171-177.