

基于 Ecopath 模型的北部湾生态系统结构和功能

陈作志^{1,2,3}, 邱永松¹, 贾晓平¹, 黄梓荣¹, 王跃中¹

(1. 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300; 2. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 山东 青岛 266071; 3. 上海水产大学 海洋学院, 上海 200090)

摘要: 利用 Ecopath with Ecosim (EwE) 5.1 软件构建了北部湾海洋生态系统 1960s (1959~1961) 和 1990s (1997~1999) 2 个时期的 Ecopath 模型, 比较和分析了渔业资源衰退后北部湾生态系统的结构和功能的变化, 并进一步根据 Odum's 生态系统发展理论, 评价了当前北部湾生态系统的健康状况。该模型包含渔业、海洋哺乳动物、海鸟、中上层鱼类、底层鱼类、底栖无脊椎动物以及浮游动物、浮游植物和碎屑等 20 个功能组。结果表明, 20 世纪 60 年代系统中营养级 IV、V 的生物量高于 90 年代, 尤其是营养级 V 的生物量是 90 年代的 32 倍多; 而 90 年代的 I 和 II 的生物量较高, 表明系统中群落结构组成逐步从 k 选择性占优势转向 r 选择性为主。同时生态系统的能量转化效率不断提高, 从 1960s 的 7.0% 上升到 1990s 的 9.8%。从 1960s 到 1990s 间, 系统的净生产力、初级生产力 / 总呼吸不断增加, 而连接指数 (CI)、杂食指数 (OI)、总生物量 / 总流量、Finn's 循环指数则显著下降, 综合表明目前该生态系统总体特征在人类活动和自然环境的扰动下由“成熟态”向“幼态”发展, 生态系统发育的过程中产生了逆行演替。[中国水产科学, 2008, 15 (3): 460~468]

关键词: 结构和功能; 北部湾; 生态通道模型 (Ecopath); 生态系统特征

中图分类号: S931.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2008)03-0460-09

海洋生态系统的结构和功能及其对人类活动的响应机制是近年来生态学和全球变化研究的热点, 也是全球海洋生态系统动力学 (GLOBEC) 研究的主要内容之一^[1-5]。生态通道模型 (Ecopath) 是特定生态系统在某一时期的快照 (Snapshot), 可以快速反映该水域生态系统实时的状态、特征及营养关系等, 被誉为新一代水域生态系统研究的核心工具, 并在全球包括海洋、湖泊、水库、池塘等 100 多个水生生态系统中得到广泛应用^[6-10]。在中国的台湾^[11-12]、香港^[13]等地也较早地开始该模型的研究, 而大陆地区的研究则尚不多见^[14-17]。

北部湾是南中国海区生产力最高的区域, 历来是中、越两国渔民传统作业渔场, 北部湾的渔业经济在南海三省区的经济、社会生活中占有举足轻重的地位^[18]。随着环北部湾经济圈开发力度的不断加大, 北部湾的生态系统的结构和功能也发生了很大的变化, 最明显体现在生物多样性减少, 传统优质鱼类资源量大幅下降甚至灭绝, 小型中上层鱼类明显增加, 种间更替明显, 渔获物质量明显下降, 出

现小型化、低值化趋势^[19], 直接影响了生态系统的食物产出机能。

本研究在已建立的 1990s 北部湾生态系统模型的基础上^[17], 进一步收集了 20 世纪 60 年代 (1959~1961) 各生态功能组的生物量、捕捞量、食性组成、 P/B (生产量 / 生物量) 及 Q/B (消费量 / 生物量) 等参数, 分别构建了北部湾渔业资源衰退前后 2 个不同时期的 Ecopath 模型, 比较和分析了这 2 个时期系统的总体特征、能流效率和物质循环特征、营养流分布等方面的差异, 探讨了 40 多年来北部湾生态系统在生态环境和捕捞胁迫下的结构和功能的变化, 并诊断和评价了北部湾生态系统的现状, 旨在为北部湾生态系统的健康发展和生态系统水平渔业管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北部湾位于南海西北部 (105°40'~110°10' E、17°00'~21°45' N), 为天然的半封闭浅水海湾, 西面

收稿日期: 2007-07-20; 修订日期: 2007-11-22.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助 (2007YD02); 农业部渔业生态环境重点开放实验室开放基金资助 (2006-3); 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室资助 (实开 2005-04).

作者简介: 陈作志, (1978-), 博士研究生, 主要从事海洋渔业资源管理和资源生态研究. E-mail: zzchen2000@163.com

为越南北部,北面为中国广西,东北面为中国广东省,东面为海南岛(图1)。东西宽不超过200海里,最大水深为106 m,平均水深38 m,水域面积为 $12.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北部湾的沿岸水主要受广西和越南沿岸江河入海径流形成,以夏、秋季势力最强,冬、春季为弱。冬半年呈低温性质,主体部分水温低于 22°C ;夏半年呈高温性质,主体部分水温超过 28°C 。北部湾为属热带、亚热带季风气候,10月至次年3月盛行东北季风,4月至9月中旬盛行西南季风^[20]。这些季节特征的变化为不同的海洋生物创造了良好的栖息环境,使北部湾海域成为多种鱼、虾的良好繁育场。

1.2 数据来源

南海水产研究所曾于1959~1961年(每月)、1992~1993年(5月和9月)、1997~1999年(四季)进行过较系统的大面积拖网调查。20世纪60年代和90年代末期间的渔业资源和环境调查数据比较系统,并在后期的数据处理和分析中,进行了初级生产力、食性组成、渔业资源量、主要种类生物学参数以及上岸量的估算工作,基本满足生态通道模型的数据需求;1992~1993年的调查数据较少且缺乏渔获量较少种类的详细分析和食性鉴定,仅将其用作资源结构变化的讨论。

1.3 生态通道模型

Ecopath 假设建模对象的生态系统中全部生物功能组是稳定的,这表示生态系统的总输入与总输出始终相等。用公式可以表示为: $Q=P+R+U$,这里 Q 是消耗量, P 是生产量, R 是呼吸量, U 为未消化的食物量。Ecopath 模型定义生态系统是由一系列生态关联的功能成分(box或group)组成,所有功能组成分必须覆盖生态系统能量流动全过程,这些成分的相互联系充分体现了整个系统的能量循环过程^[8-9]。系统中功能组可以包括有机碎屑、浮游生物、一组鱼类、规格、年龄组或生态特性相同的鱼种。根据热力学原理, Ecopath 模型定义系统中每一个功能组(i)的能量输出和输入保持平衡:生产量-捕食死亡-其他自然死亡-产出量=0。模型用一组联立线性方程定义一个生态系统,其中每一个线性方程代表系统中的一个功能组:

$$B_i \cdot (P/B)_i \cdot EE_i - \sum_{j=1}^k B_j \cdot (Q/B)_j \cdot DC_{ij} - EX_i = 0 \quad (1)$$

式中, $(P/B)_i$ 为第 i 组的生产量与生物量比值, $(Q/B)_i$ 为消费量与生物量的比值, DC_{ij} 为被捕食组 i 占捕食组 j 的总捕食量的比例, EX_i 为第 i 组的产出(包括捕捞量和迁移量)。建立 Ecopath 模型需要输入的基本参数有生物量 B_i 、生产与生物量比值 $(P/B)_i$ 、消化与生物量比值 $(Q/B)_i$ 、生态营养转换效率 EE_i 、食物组成矩阵 DC_{ij} 和产出量 EX_i 。前4个参数可以有任意一个是未知的,由模型通过其他参数计算出来,后2个参数,即食物组成矩阵 DC_{ij} 和产出 EX_i 要求必须输入。

生态营养转换效率(EE)是一个较难获得的参数,在 Ecopath 模型的输入参数中,通常设大部分功能组的 EE 为未知数,在模型调试过程中将所有 EE 值调整到小于1,使能量在整个系统中的流动保持平衡。

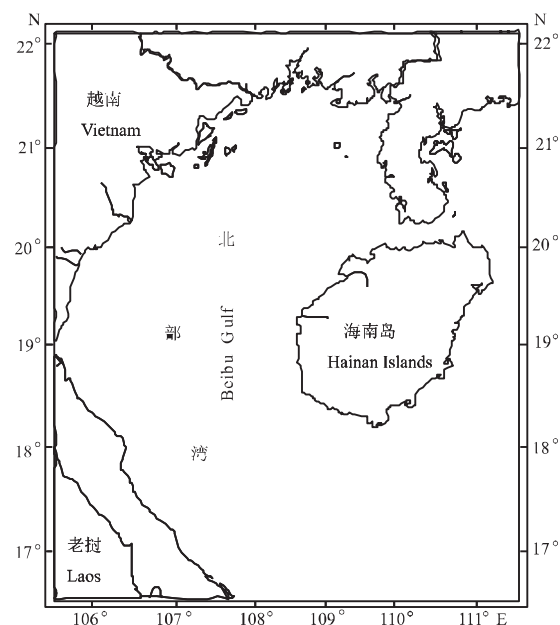


图1 北部湾海洋生态系统研究区域

Fig.1 Map showing the Beibu Gulf ecosystem area

1.3.1 功能组划分 为了保证2个年代模型的可比性,在已构建的20世纪90年代末期北部湾生态通道模型(16个功能组)^[17]的基础上,根据个体规格、生物学特性(生长和死亡率)以及食性特点,将渔业功能组进一步细分为大型($L_{\infty} > 60 \text{ cm}$)、中型($60 \text{ cm} > L_{\infty} > 30 \text{ cm}$)和小型($L_{\infty} < 30 \text{ cm}$),并增加了珊瑚、缸和鰕及鲨鱼等功能组,使得北部湾海洋生态系统生态通道模型由20个功能组构成,基本覆盖了

北部湾海洋生态系统能量流动的全过程。20 个功能组分别为:碎屑、底层生产者、浮游植物、珊瑚、浮游动物、水母、底栖动物、底栖甲壳类、虾类、头足类、

小型中上层鱼类、中型中层鱼类、大型中层鱼类、小型底层鱼类、中型底层鱼类、顶级底层鱼类、缸和鳐、鲨鱼、海鸟和哺乳动物等功能组(表 1)。

表 1 北部湾 Ecopath 模型的功能组及主要种类

Tab.1 Functional groups and main species checklist based on Eopath model in Beibu Gulf

编号 No.	功能组 Functional group	组成 Composition
1	底栖生产者 Bent.producers	大型海藻和海草类。
2	浮游植物 Phytoplankton	硅藻、甲藻、蓝藻和金藻等,以硅藻最多。
3	珊瑚 Coral	所有的造礁石珊瑚。
4	浮游动物 Zooplankton	桡足类、毛颚类、糠虾、鱼卵、有尾类、海樽类等。
5	水母 Jellyfish	水螅水母(最多)、钵水母、管水母和栉水母类。
6	底栖动物 Zoobenthos	鸟蛤、贻贝、风螺、扇贝、海胆、海蚕、蛤。
7	底栖甲壳类 Bent. crustacean	关公蟹、蜘蛛蟹、梭子蟹、鼓虾、管鞭虾科。
8	虾类 Penaeid prawns	刀额新对虾、哈氏仿对虾、日本对虾、鹰爪虾、虾蛄科、须赤虾。
9	头足类 Cephalopods	中国枪乌贼、剑尖枪乌贼、金乌贼、短蛸。
10	小型底层鱼类 Small demersal fish	$L_{\infty} < 30$ cm, 鲷科、双边鱼科、天竺鲷科、发光鲷科、鲹科、鲱科、鰕鳃鱼科、银鲈、羊鱼科、金线鱼科、石首鱼科、鲈科、舌鲷科、鲷科、蓝子鱼科鱼类等。
11	中型底层鱼类 Mediant demersal fish	$30 \text{ cm} < L_{\infty} < 60$ cm, 仿石鲈属、鰕鲷科、羊角鲷科、鸡笼鲷科、鲷科等。
12	大型底层鱼类 Large demersal fish	$L_{\infty} > 60$ cm, 鲷科、鸡笼鲷科、仿鲈科、裸颊鲷科、笛鲷科、羊角鲷科、海鳗科、金线鱼科、鲷科、鲱科、鲂科、鲷科、带鱼科、狗母鱼科等。
13	小型中上层鱼类 Small pelagic fish	$L_{\infty} < 30$ cm, 银汉鱼科、犀鲷科、鲷科、鲱亚目、长鲷科、鲱科、鲱科、狗母鱼科、鲷科、鲱科鱼类等。
14	中型中上层鱼类 Mediant pelagic fish	$30 \text{ cm} < L_{\infty} < 60$ cm, 鲷科、乳香鱼科、鲱科、鲱科、鲱科等。
15	大型中上层鱼类 Large pelagic fish	$L_{\infty} > 60$ cm, 鲷科、鲱科、乳香鱼科、鲱科、鲱科、鲱科鱼类等。
16	缸和鳐 Rays and skates	何氏鳐、缸科、燕缸科。
17	真鲨类 Elasmobranchs	须鲨科、真鲨科、长尾须鲨科。
18	海鸟 Fish-eating birds	鸬科、潜鸟科、雨燕科、雉鸬科、鸬科、鸬科等。
19	海洋哺乳动物 Marine mammals	中华白海豚、江豚等。
20	碎屑 Detritus	颗粒和溶解有机碳、动植物尸体等。

1.3.2 功能组参数来源 功能组的生物量 (Biomass) 来自于现场的调查评估数据。渔业资源功能组的生产量 / 生物量 (P/B) 和消费量 / 生产量 (Q/B) 可以根据渔业生态学数据获得。在生态系统平衡情况下,鱼类的 P/B 等于渔业生物学家经常使用的瞬时总死亡率 (Z), Gulland^[21] 和 Pauly^[22] 提出多种估算鱼类和其他水生动物 P/B 的方法。 Q/B 则根据 Pauly 和 Palomares^[23] 提出的用游泳动物尾部形状和表面积的比率来计算^[23]。生态营养转换效率 (EE) 是生产量对生态系统能量贡献的比例,很难直接被观测和得到,通过模型设其为未知参数,通过平衡 Ecopath 模型来求取。食物组成矩阵 (DC) 一般来自生物的胃含物分析所得。研究中模型主要参考了陈作志构建的 20 世纪 90 年代北部湾生态通道模型

的数据,以及鱼类生态学数据库 (see www.fishibase.org) 和邻近水域模型的数据^[24-26]。1960s 的渔业资源功能组的 P/B (总死亡率) 主要根据体长频率法估算得到¹⁾,并假设其他功能组保持不变; Q/B 则主要参考 1990s 模型的数据,并考虑到 1960~1997 年间死亡率发生的显著变化,种群基础的消费量也发生了变化,在构建 1960s 的模型时对参数进行了相应地调整。食物组成矩阵则根据对 1960s 和 1990s 间采样鱼类的胃含物分析^{[27, 2)}。1960s 和 1990s 年间的北部湾生态通道模型的输入输出结果见表 2。

1.3.3 营养级概念 Ecopath 模型中的营养级概念,已经不再局限于 Lindeman (1942)^[28] 提出的整数营养级的概念,而是采用了 Odum 和 Heald (1975) 的分数营养级 (Fractional trophic level) 的概念,即

1) 南海水产研究所,南海北部主要经济鱼虾类的生长死亡,开发率和补充形 [R]. 南海水产研究所档案室,1993.

2) 水产部南海水产研究所,中越北部湾渔业资源联合调查报告,食性鉴定 [R]. 南海水产研究所档案室,1965.

将每一种生物根据其饵料所处营养级（通常假定生产者和碎屑的营养级为 1）及其在食物中组成的比例进行加权计算。这个营养级的概念又被称为有效营养级 (Effective Trophic level, ETL)^[29]，它能更详

细地反映每一功能组在生态系统的营养地位，使食物网得以简化，便于分析营养级的能量流动和转化效率，后者在 Ecopath 模型的分析中应用最为普遍，本研究也是采用这种方法。

表 2 1960s 和 1990s 北部湾 Ecopath 模型功能组估算参数, 斜体为模型计算的参数
Tab. 2 Input and output (in italic) parameters of Ecopath model in Beibu Gulf during 1960s and 1990s

功能组 Functional group	1960s				1990s			
	生物量 / t·km ⁻² <i>B</i>	<i>P/B</i> (y ⁻¹)	<i>Q/B</i> (y ⁻¹)	EE	生物量 / t·km ⁻² <i>B</i>	<i>P/B</i> (y ⁻¹)	<i>Q/B</i> (y ⁻¹)	EE
1	18.000	11.860	—	<i>0.047</i>	10.000	11.860	—	0.101
2	13.000	230.00	—	<i>0.938</i>	22.000	230.000	—	0.414
3	1.120	1.090	9.000	<i>0.539</i>	0.749	1.090	9.000	0.648
4	20.000	32.000	186.00	<i>0.145</i>	15.000	36.000	186.00	0.204
5	0.890	5.011	25.050	<i>0.244</i>	1.350	5.654	25.050	0.148
6	48.000	6.570	27.400	<i>0.417</i>	38.600	7.570	27.400	0.463
7	1.450	5.650	25.310	<i>0.814</i>	1.550	5.950	26.900	0.661
8	0.650	5.978	28.000	<i>0.735</i>	0.840	6.680	41.537	0.612
9	0.550	2.089	11.970	<i>0.762</i>	0.740	3.010	12.570	0.758
10	1.680	3.250	10.564	<i>0.90</i>	1.580	3.320	14.700	0.913
11	0.850	2.100	7.590	<i>0.637</i>	0.660	2.500	7.590	0.976
12	0.330	0.700	6.350	<i>0.800</i>	0.0950	0.840	6.350	0.730
13	2.120	3.000	10.470	<i>0.506</i>	2.150	3.150	13.500	0.604
14	1.220	2.200	7.790	<i>0.497</i>	0.670	2.400	8.630	0.826
15	0.550	0.600	5.110	<i>0.879</i>	0.0860	0.750	5.110	0.994
16	0.260	0.500	6.350	<i>0.112</i>	0.0160	0.650	6.350	0.854
17	0.0850	0.300	4.120	<i>0.175</i>	0.00350	0.450	4.120	0.875
18	0.00165	0.060	61.280	<i>0.000</i>	0.000350	0.090	61.280	0.000
19	0.0360	0.060	14.500	<i>0.000</i>	0.0000220	0.080	14.500	0.000
20	163.800	—	—	<i>0.45</i>	200.000	—	—	0.371

注: 功能组编号与表 1 同. EE-生态营养转换率; P-生产量; Q-消费量.

Note: The codes of functional groups are correspondent with those in Tal.1. EE-Ecotrophic efficiency; P-Production; Q-Consumption.

1.3.4 敏感度分析 正如其他模型一样, EwE 模型建立的置信度的高低取决于参数来源的可靠性和准确性。因此, 在数据提交和处理过程中, 可以运用模型自带的 Ecowrite 记录数据的来源及引用情况, 并用 Pedigree 来评价数据和模型的整体质量。对于某些无法确定的参数, 可以先给出其合理的范围和分布函数, 再用 Ecoranger 进行参数估计, 然后在系统的平衡过程中进行微调, 使输入的参数在设定的标准下得到最优化组合^[8]。本研究中也进行了敏感度的分析, 2 个模型的敏感度均在 ±20% 范围内, 数据调整范围较小的生态系统。

2 结果与分析

2.1 系统总流量及营养流分布

从表 3 可看出, 2 个年代的生物量、生产量和

流量基本上均呈金字塔型分布, 即底层营养级的生物量和流量大, 越到顶级越小, 基本符合能量和生物量金子塔规律。20 世纪 60 年代的生物量高于 90 年代, 尤其是营养级 V 的生物量是 60 年代的 32 倍, 表明系统中顶级捕食者的生物量大幅度下降, 这与近年来北部湾调查的结果是一致的。然而, 1960s 的总生产量却低于 1990s 年代, 尤其是营养级 II, 90 年代的生产量是 60 年代的 158.6%, 其主要原因在于渔业过度开发, 导致顶级捕食者衰退, 从而降低了浮游动物和无脊椎动物的捕食压力, 生物种类出现小型化现象, 从而导致 90 年代的生产量大幅提高 (小型种类的 P/B 系数较高)。

表3 1960s和1990s间北部湾生态系统的总流量、生物量及生产量在营养级间的分布
Tab.3 Comparison between distribution of throughput, biomass and production at effective trophic levels in Beibu Gulf ecosystem in the early 1960s and late 1990s

营养级 Trophic level	总流量 / (t·km ⁻² ·a ⁻¹) Throughput		生物量 / (t·km ⁻² ·a ⁻¹) Biomass		生产量 / (t·km ⁻² ·a ⁻¹) Production	
	1960 s	1990s	1960 s	1990s	1960 s	1990s
I	3650.144	5921.855	294.81	232.00	2145.32	2321.547
II	2256.516	3977.402	67.23	55.134	228.77	362.849
III	121.404	48.32	8.320	7.746	14.97	10.054
IV	12.008	2.489	1.537	0.786	1.12	0.652
V	1.011	0.04	0.151	0.047	0.04	0.0094

2.2 整合营养级间能量转换效率的变动

北部湾海洋生态系统存在牧食食物链和碎屑食物链两条经典食物链^[17],能量流动主要在6个营养级间发生。从表4可看出,20世纪60年代的能量转换效率较低,主要发生在营养级III和IV间,分别为10.5%和12.4%;营养级I的转换效率偏低,仅为3.5%,导致总体转换效率为7.1%。系统中能流主要通过碎屑链传递,达到52%;而来自牧食链为48%。90代的平均转换效率达到9.4%,虽然略低于10%的生态系统平均转换效率,但大大

高于60年代的水平,能量流动主要在营养级II和III间发生,且能流传递以牧食链为主,达到57%,而碎屑链的重要性略有降低,仅为43%,碎屑链功能的降低值得引起注意。北部湾的作业结构是拖网54.2%、刺网23.7%、钓业5.9%、围网5.7%、其他类型10.5%¹⁾。底拖网作业独特的扫海功能,会导致系统底泥中有机质不断增加。由于北部湾碎屑链的重要性下降,会导致系统未利用碎屑量增加,造成系统的能流阻滞,成为系统内源性污染的潜在威胁。

表4 1960s和1990s间北部湾生态系统各营养级的转化效率
Tab.4 Comparison of transfer efficiency of discrete trophic levels in the Beibu Gulf ecosystem between early 1960s and late 1990s

营养级 Trophic level	1960s Ecopath		1990s Ecopath		%
	初级生产者 Primary producer	碎屑 Detritus	初级生产者 Primary producer	碎屑 Detritus	
II	3.5	2.5	9.8	11.8	
III	10.5	10.2	16.2	16.0	
IV	12.4	12.5	14.5	14.5	
V	9.4	9.2	9.7	9.4	
VI	7.4	6.9	7.8	8.2	

2.3 系统的总体特征

系统总流量是表征系统的总体规模的指标,从表5可看出,北部湾生态系统的总体规模在不断增加,从20世纪60年代到90年代间系统的总流量增加了64.7%。目前,北部湾的渔业资源结构虽然发生较大的变化,但2个年代间生物量基本相同,这是由于90年代虽然大规格、长寿命生物衰退,然而周转率迅速的小型鱼类迅速增加,虽然渔获物营养级有所下降,但仍然可以维持系统高的生物量,

这也可以从系统的净效率看出,60年代的系统的净效率为0.09%,而90年代达到0.25%,这与目前在北部湾调查的结果相吻合的。与20世纪60年代相比,90年代系统的杂食指数(SOI)和连接指数(CI),平均能流路径(MPL)等都有下降的趋势,而流向碎屑总量却呈上升趋势,90年代的流向碎屑流量是60年代的2倍多。说明营养流在系统中的流经食物链的路径减少,能量以碎屑形式在系统中的沉积增多。

1) 袁蔚文,邱永松,郭金富. 北部湾底拖网渔业资源评估[J]. 南海水产研究,1995,11: 10-21.

表 5 1960s 和 1990s 北部湾生态系统总体统计学比较

Tab.5 Comparison of system statistics between the early 1960s and late 1990s

项目 Item	模型估算值 Estimated by Ecopath	
	1960s	1990s
系统总流量 / ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$) Total system throughput	6041.083	9950.106
总生物量 / ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$) Total biomass	372.048	295.713
流向碎屑总量 / ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$) Sum of all flows into detritus	2175.535	4490.589
净效率 Gross efficiency (catch/net p.p.)	0.000911	0.002524
渔获物平均营养级 Mean trophic level of catch	3.16	2.92
净生产力 (PLS) / ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$) Net system production	1686.961	2831.393
植食性 / 碎屑食性 (D : H) Detritivory / Herbivory	0.75 : 1	0.46 : 1
循环指数 (FCI) Finn Cycling Index	1.86	0.84
平均能流路径 (MPL) Finn's mean path length	1.755	1.206
连接指数 (CI) Connectance Index	0.316	0.31
系统杂食指数 (SOI) System Omnivory Index	0.186	0.171

2.4 北部湾生态系统发育特征的评价

生态系统演替过程往往结构趋于复杂、物种多样性增加、功能更完善和稳定更强。Odum 从系统能量学、群落结构、生活史、物质循环及稳态等 5 个方面选取了 24 个指标全面归纳生态系统发育过程中结构与功能特征的变化趋势^[30]。Ecopath 模型参考了 Odum 的生态系统发育理论后,在模型中将大部分参数量化(表 6)。本研究选择其中 11 个指标来说明生态系统的发展状况。在生物群落结构方面,在 20 世纪 60 年代,生物种类多表现出 k 选

择生活史类型的特征,随着人类活动的扰动和自然环境的变化,逐步转向以 r 选择生活史为主,渔获物的平均营养级也从 20 世纪 60 年代的 3.12 下降到 90 年代的 2.78。在功能方面,随着演替的进行,最重要的指标是生产量与呼吸量比率从接近于 1 到大于 1 (1990s 为 2.837)。相应地,群落净生产量则明显增高,能流渠道虽仍呈网状,但系统连接指数已明显降低,整个系统物流循环经过的路径总数和平均路径长度也明显减少,营养物质循环从相对封闭性转向开放性

表 6 1960s 和 1990s 北部湾生态系统特征和状态的 Ecopath 估算

Tab. 6 Odum's ecosystem attributes ecopath estimates and status for the selected attributes in Beibu Gulf in the early 1960s and late 1990s

生态系统属性 Ecosystem attribute	发展期 Developing stage	成熟期 Mature stage	Ecopath 参数 Estimated by Ecopath	Ecopath	
				1960s	1990s
1 总生产量 / 总呼吸 Total primary production / total respiration	» 1 或 «1	≈ 1	TPP/TR	1.013	2.184
2 总生产量 / 现存生物量 Total Primary Production/ Total biomass	高	低	TPP/TB	28.92	54.355
3 生物量 / 单位能流量 Total Biomass/Total throughput	低	高	TB/T	0.007	0.01
4 净生产力 Net production	高	低	PLS	1686.961	2831.393
6 总有机质 Organic matter	较少	≈ 1	TB/TDET	0.571	0.066
12 生态位宽度 Niche specilization	广泛	狭窄	SOI	0.186	0.171
15 矿质营养循环 Mineral cycles	开放	封闭	IF	1.86	0.84
17 能流中碎屑的作用 Role of detritus in nutrient regeneration	不重要	重要	TDC/CT	0.52	0.43
18 增长型 Growth form	r 对策	k 对策	TB/T	k 对策	r 对策
22 稳定性 Stability	不良	良好	O	20.5%	36.2%
24 信息 Information	低	高	A	59.7%	47.6%

3 讨论

北部湾得天独厚的气候和环境,使其成为南海渔业资源最丰富的海域之一。20世纪50年代以前,由于生产力低下,生产作业工具落后,北部湾的渔业以传统的风帆船为主,其作业渔场仅为近岸渔场,因此,可以认为这一时期为系统的稳定期。自20世纪60年代以来,北部湾开始进入快速发展时期。有资料显示,北部湾的渔业资源在20世纪80年代已经充分利用,90年代初的渔业资源仅为60年代的1/4,渔业资源衰退严重^[31],生态系统的产出机能受到严重影响。根据20世纪60年代和90年代的详细观测资料,通过Ecopath模型分析和探讨了近40年来北部湾生态系统结构和功能的特征和变化。模型结果表明,与60年代相比,由于过度捕捞、大型工程设施的建设(主要为石油开发)、陆源营养物质大量输入以及水产养殖等人类活动的胁迫,造成目前北部湾生态系统稳定性减少,生物资源种类更替频繁,使系统朝异养演替方向发展,呈现出“幼态”特征。系统的规模不断增大,系统的初级生产力/呼吸量比是60年代的2倍多,说明系统中有较多的剩余能量尚未消耗,这也可从系统净生产力量看出,但是碎屑流在系统中的重要性逐渐降低,造成大部分剩余的能量在系统中沉积,增大系统内源性污染的风险。从营养关系来看,目前北部湾生态系统食物链较为简单,能流平均路径长度下降,说明系统的营养交互关系减弱,生物种类多以 r 对策种类为主,使系统的不稳定性增大,必将会对生物资源的结构和数量变动产生影响。近年来,北部湾局部养殖区富营养化加重,水质恶化,渔业资源衰退,且小型化、低值化明显,已对周边的地区的生产和生活造成了极大的影响。

生态系统演替过程中,群落的结构和功能同时发生有规律的变化,在“幼态”时期,生物种类多表现出 r 选择生活史特征,随着发育的进程,逐渐增加 k 选择生活史特征的比例。在功能方面,随着演替的进行,最重要的指标是初级生产量与呼吸量的比率从大于1(或小于1)发展到接近于1。相应地,群落净生产量从高到低,能流渠道从线性到网状,碎屑食物链的重要性增加。这一切都表明,目前,北部湾生态系统在人类活动和自然环境因子的影响下系统发生了逆行演替现象,系统特征从“成熟态”向“幼态”转变,造成营养级I生长失控,系

统的规模不断增大,能流利用和循环效率却不断下降,表明系统的成熟度和稳定性下降了,严重地削弱了系统抵抗外力干扰的能力。在自然进化过程中,生态系统的演替是一个缓慢的过程,但是由于自然环境变动和人类活动的胁迫,大大加速了演替的这种进程,如Jackson^[32]发现,对于沿岸生态系统,过度捕捞是引起系统受损的首要原因。近年来,生态系统的脆弱性和易损性已经引起广大生态学者的关注^[33],同时,退化生态系统的恢复和重建已成为当今生态研究的热点^[34]。

因此,如何可持续开发海湾,如何恢复和重建受损(退化)生态系统是目前亟待解决的问题。从北部湾的退化现状和特征来看,对于已受损(退化)的生态系统,应该依照生态学原理,包括生态演替、食物链网、物质循环和转化、生物间的交互营养关系等原则,从受损生态系统结构和功能的恢复出发,修复和重建可持续的生态系统结构功能,从而达到保护海洋,实现人与自然和谐发展。

参考文献:

- [1] Sherman K. Large ecosystem as global units for marine resources management-an Ecological perspective[C]. In: Large Marine Ecosystem: stress, mitigation and sustainability. Sherman K, et al., Washington D C: AAAS Press, 1933.
- [2] Anon. GLOBEC Implementation Plan. IGBP Report[R]. Stockholm: IGBP Secretariat, 1999.
- [3] Harris R, Barange M, Werner C. Global Ecosystem Dynamical (GLOBEC)/Science Plan[R]. IGBP report 40. Stockholm: IGBP Secretariat, 1997.
- [4] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究 I. 关键科学问题与研究发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 唐启升, 苏纪兰. 海洋生态系统动力学研究与海洋生物资源可持续利用[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 5-11.
- [6] Polovina J J. An overview of the ECOPATH model[J]. Fishbyte, 1984, 2(2): 5-7.
- [7] Polovina J J. An approach to estimating an ecosystem box model[J]. Fish Bull, 1985, 83(3): 457-460.
- [8] Christensen V. Ecosystem maturity-towards quantification[J]. Ecol Modelling, 1995, 77: 3-32.
- [9] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II - a software for balancing steady-state model and calculating network characteristics[J]. Ecol Modelling, 1992a, 61: 169-185.

- [10] Christensen V, Pauly D. A guide to the ECOPATH II program (version 2.1) ICLARM Software[M]. 1992b. 6: 72.
- [11] Lin H J, Shao K T, Hwang J S, et al. A trophic model for Kuosheng bay in northern Taiwan [J]. J Mar Sci Technol, 2004, 12(5): 424-432.
- [12] Lin H J, Shao K T, Kuo S R, et al. A trophic model of a sandy barrier lagoon at Chiku in southwestern Taiwan [J]. Estuar Coast Shelf Sci, 1999, 48: 575-588.
- [13] Pitcher T J, Buchary E, Asumaila UR, et al. Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: Ecological and economic forecasting of marine protected areas with human-made reefs[R]. Fish Cent Res Rep, 2000, 10(3): 1-168.
- [14] 全龄,唐启升, Pauly D. 渤海生态通道模型的初探 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 435-440.
- [15] 刘玉,姜涛,王晓红,等. 南海北部大陆架海洋生态系统 Ecopath 模型的应用与分析 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 123-127.
- [16] 王雪辉,杜飞雁,邱永松,等. 大亚湾海域生态系统模型研究 I: 能量流动模型初探 [J]. 南方水产, 2005, 1(3): 1-9.
- [17] 陈作志,邱永松,贾晓平. 北部湾生态通道模型的构建 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1107-1111.
- [18] 贾晓平,李纯厚,邱永松,等. 北部湾渔业生态环境与渔业资源 [M]. 科学出版社, 2003: 125-128.
- [19] 袁蔚文. 北部湾底层渔业资源的数量变动和种类更替 [J]. 中国水产科学, 1995, 2(2): 57-65.
- [20] 农牧渔业部水产局,农牧渔业部南海区指挥部. 南海区渔业资源调查和区划 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1989: 25-27.
- [21] Gulland J A. Fish stock assessment: a manual of basic methods [M]. New York: Johan Wiley and Sons, 1983.
- [22] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks [J]. J Cons Int Explor Mer, 1980, 39: 175-192.
- [23] Palomares M L, Pauly D. A multiple regression model for predicting the food consumption of marine fish populations [J]. Aust J Mar Freshwat Res, 1989, 40: 259-273.
- [24] Silvestre G, Selvanathan S, Salleh A H M. Preliminary trophic model of the coastal fishery resources of Brunei Darussalam, South China Sea [C]. In Christensen V, Pauly D (eds.). Trophic models of aquatic ecosystems. ICLARM Conference Proceedings 26, 1993: 300-306.
- [25] Pauly D, V Christensen. Stratified models of large marine ecosystems: a general approach and an application to the South China Sea [C]. In: Sherman K, Alexander L M, Gold B D (eds.). Large marine ecosystems: stress, mitigation and sustainability. Washington D C: AAAS Press, 1993: 148-174..
- [26] Froese R, Pauly D. FishBase. World Wide Web electronic publication [A]. In: www.fishbase.org, 2004.
- [27] 张月平. 南海北部湾食物网的研究 [J]. 中国水产科学, 2005, 12(5): 621-631.
- [28] Lindeman R. The trophic-dynamic aspect of ecology [J]. Ecology, 1942(23): 399-418.
- [29] Odum E P. Fundamentals of Ecology [M]. Philadelphia: W B Saunders Co., 1971: 574.
- [30] Odum E P. The strategy of ecosystem development [J]. Science, 1969, 104: 262-270.
- [31] 李冠军,邱永松,王跃中. 自然环境变动对北部湾渔业资源的影响 [J]. 南方水产, 2007, 3(1): 7-13.
- [32] Jackson B, Michael X, Wolfgang H, et al. Historical over-fishing and the recent collapse of coastal ecosystem [J]. Science, 2001, 293: 629-638.
- [33] Stahl M. Environmental degradation and political constraints in Ethiopia [J]. J Disaster Stud Mgmt, 1990, 14(3): 140-150.
- [34] Aronson J. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands, A review from the south [J]. Restoration Ecology, 1993, 1(1): 8-17.

Structure and function of Beibu Gulf ecosystem based on Ecopath model

CHEN Zuo-zhi^{1,2,3}, QIU Yong-song¹, JIA Xiao-ping¹, HUANG Zi-rong¹, WANG Yue-zong¹

(1. Key Laboratory of Marine Fishery Ecology and Environment, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Marine Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources of Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China; 3 College of Marine Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: The Beibu Gulf, located at 17°00′~21°45′N, 105°40′~110°10′E and surrounded by China and Vietnam, is a natural semi-closed sea area in the South China Sea. In this study, we constructed two period ecosystem models of the Beibu Gulf before and after the collapse of fisheries resources in early 1960s and late 1990s using Ecopath with Ecosim software. Based on two models, we analyzed and compared the differences in ecosystem structure and function. Furthermore, we evaluated the current status of the Beibu Gulf ecosystem based on the E.P. Odum's theory of ecosystem development. The model encompasses fishery, marine mammals, sea-birds, sharks, pelagic fishes, demersal fishes, benthic crustaceans and other ecologically important groups such as zooplankton, phytoplankton, and detritus. Input information for the model was gathered from published and unpublished reports and our own estimates. The results indicated that biomass and catches of high trophic levels of the system have changed drastically between 1960s and 1990s, especially for trophic level V; the biomass of 1990s was 32 times more than that of 1960s, however, the biomass of levels I and II in 1990s was much higher than those in 1960s. This reflects that the community structure has changed from *k*-selected to *r*-selected, and the system energy transfer production increases from 7.0% in 1960s to 9.8% in 1990s also. According to the summary statistics, the parameters of net system production and TPP/TR increased. However, the CI, SOI TB/T, and Finn's indexes decreased from 1960s to 1990s. In conclusion, the Beibu Gulf ecosystem seems to have reversed succession through various anthropogenic and physical changes over the past four decades, and have the trend from maturity stage to immaturity stage. [Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15 (3): 460–468]

Key words: structure and function; Beibu Gulf; mass-balance modelling (Ecopath); ecosystem attributes