

东海南部海区生态系统结构与功能的模型分析

李云凯^{1, 2, 3} 禹 娜¹ 陈立侨^{1*} CHEN Yong³ 冯德祥¹

(¹华东师范大学生命科学学院, 上海 200062)

(²上海海洋大学大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室, 201603)

(³School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04469, USA)

摘 要 根据 1999~2002 年间对东海南部海区的渔业资源和生态环境进行调查后所获得的数据和资料,应用 Ecopath with Ecosim 5.1 软件构建了该海区生态系统的生态通道模型,基于该模型对生态系统结构特征进行了量化分析。生态通道模型由 20 个功能组构成,基本覆盖了东海南部海区生态系统能量流动的主要过程。分析结果表明,东海南部海区生态系统各功能组的营养级为 1.00~4.23,能量流动主要由 6 个整合营养级构成,营养级 I 的利用效率颇为低下,大量初级生产力未进入更高层次的营养流动,造成生态系统下层营养流动的“阻塞”。鲭科鱼类、沙丁鱼、鲉科鱼类和其他小型鱼类的生产量较高,占鱼类总生产量的 85.6%,而其他大中型肉食性鱼类的生产量都较低。混合营养分析表明,在能量从低级向高层次转化的食物网中,底层功能组起关键作用。反映系统成熟度的指标,包括较高的净初级生产力(NPP)和净初级生产力/呼吸(NPP/R),以及较低的连接指数(CI)、系统杂食指数(SOI)和 Finn's 循环指数(FCI)等,均表明该海区处在一个“幼态化”的生态系统。

关键词 生态通道模型 东海南部海区 生态网络分析 生态系统成熟度

中图分类号 Q891 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)02-0030-10

Ecological modeling on structure and functioning of southern East China Sea ecosystem

LI Yun-kai^{1, 2, 3} YU Na¹ CHEN Li-qiao^{1*} CHEN Yong³ FENG De-xiang¹

(¹College of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200062)

(²Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, 201306)

(³School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME 04469, USA)

ABSTRACT An exploited ecosystem of the southern East China Sea in 1999~2002 was described by means of an ecopath mass-balance model with the aim of characterizing its function and structure. This application included some complexities added to the general modeling methodology due to the high biodiversity of the East China Sea and the multispecies nature of the fishery, and the difficulties of working with fishing data which are usually irregularly or imprecisely collected. The model comprised 20 functional groups including primary producers, the

上海市优秀青年教师启动基金(B-8101-09-235)、上海市科委重大专项(08DJ1203101、08DJ1203102 和 09DJ120010A)和浙江省重大科技专项(优先主题)农业项目(2008C12009)共同资助

* 通讯作者。E-mail: lqchen@bio.ecnu.edu.cn, Tel: (021)62233637

收稿日期: 2009-03-13; 接受日期: 2009-05-11

作者简介: 李云凯(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事生态系统模型学研究。E-mail: liyunkai811030@yahoo.com.cn, Tel: (021)62233579

main species of benthic, demersal and pelagic invertebrates, fishes and non-fish vertebrates and detritus. Results showed that the functional groups were organized into six trophic levels with the highest levels corresponding to the top predators, shark and rays. The system was dominated by the pelagic fraction, where sardines and anchovy prevailed in terms of fish production, biomass and catches. Detritus and detritivorous groups also played key roles in the ecosystem. Considering Odum's theory of ecosystem development, the ecosystem was placed on a low developmental stage with high net primary production (NPP), net primary production/total respiration (NPP/R) and lower connectance index (CI), system omnivory index (SOI) and Finn's cycling index (FCI).

KEY WORDS Ecopath with Ecosim Southern East China Sea
Network analysis Ecosystem maturity

近 30 年来,全球海洋生态系统不断受到人类活动所带来的威胁,因过度开发海洋资源导致自然生产的渔获物质量不断下降,渔业资源匮乏以及海洋生态系统逆向发展,严重危害了海洋生态系统的健康和可持续发展(刘玉等 2007)。为了更好地分析自然扰动和人类活动对水生生态系统的影响及建立科学的管理机制,有学者开发出了研究生物种群结构和动态变化的模型软件,并提出了相应的建模方法(宋兵等 2007)。其中,既包括单种群模型,又包括将种群的动态变化与其所处的生态系统物质能量流动网络变化状况进行合并分析的生态系统模型,如:多物种实际种群分析模型(Multispecies virtual population analysis, MSVPA)和数量平衡动态模型(Ecopath with Ecosim, EwE)(Christensen *et al.* 2005)。

单种群模型往往假定种群的生长、补充和自然死亡是一个恒值,或者是种群大小的固定函数(宋兵等 2007)。而自然条件下,种群所处的生态系统总是处于不停的变动中,种群作为捕食者其获得饵料的可能性及其作为被捕食者其被捕食的风险常取决于生态系统中的其他物种数量,而不是种群自身。因此,单种群模型无法全面地反映整个生态系统的结构和功能,对预测渔业和环境变迁在生态系统水平上的作用具有一定的局限性,从而难以实现宏观的决策和科学的管理(宋兵等 2007)。MSVPA 的局限性在于其所需参数过于复杂,一般情况下不易获得分析所需的数据资料。相比之下,EwE 通过 Ecopath,先建立描述生态系统食物网关系的静态模型,然后将由 Ecopath 获得的结果用于驱动 Ecosim,进而分析在生态系统背景下种群数量和生物量间的动态变化,该过程使参数估计的步骤得以简化(Waters *et al.* 2000)。

EwE 能够对水生以及陆地生态系统进行有效的建模、参数估计及预测,目前已在全世界不同纬度地区和不同类型生态系统的研究中得到了验证。截至 2009 年 3 月,该软件已经在全球 160 多个国家拥有超过 6 700 个注册用户,且有 200 多篇与 EwE 模型有关的文献已被公开发表(Christensen *et al.* 2005)。

目前,东海南部海区渔业资源面临的一个突出问题是,该海区渔业的捕捞能力大大超出其渔业资源的再生能力,并伴随着渔业诱导性逆向进化(Fishery-induced evolution)(Manickchand-Heileman *et al.* 2007),捕捞业正从“质增长”向“量增长”转变。在高强度捕捞压力下,该海区渔业资源的结构几近解体,沿岸与近海资源在充分或过度利用下仍处在衰退之中;底层和近底层资源,尤其是传统经济渔业资源充分或过度利用后,有的甚至衰竭;上层鱼类、头足类和小中型经济鱼类的潜力已经不大;小型鱼、小虾和杂蟹资源数量虽多,但利用价值不高,东海渔业正处在低质鱼和小型鱼渔获量居高不下的高产假象之中(程家骅 2006)。不同历史时期渔获物平均营养级计算评估表明,东海区渔获物的平均营养级已从 1965 年的 3.5 下降到 1990 年的 2.8(晁敏等 2005),高营养级鱼类资源大量减少,而低营养级的鱼类和虾蟹类资源所占比例则大幅增长,这种现状支撑着近 20 年来海洋捕捞产量的持续增长(戴天元 2004)。海洋捕捞产量的持续增长是由于采用张网和拖网等作业方式,并以超高捕捞努力量的投入和损害渔业资源为代价而换得的。根据 2005 年的统计资料显示,东海南部海区产量超过 10 万 t 的优质渔业品种仅有带鱼 *Trichiurus haumela* 和蓝园鲈 *Decapterus maruadsi* 两种,历史上的优质品种大黄鱼 *Pseudosciaena crocea*、鲷鱼 *Ilisha elongata* 和鲨鱼等已形不成渔汛(张壮丽等 2006)。

为保护海洋渔业资源,实现海洋生态系统最佳的社会、生态和经济价值综合目标,本研究以东海南部海区为研究对象,应用 Ecopath with Ecosim 5.1 软件建立生态系统 Ecopath 模型,量化和系统地分析其结构、功能、渔业资源和海洋生态状况,解释东海南部海区渔业资源及生态系统退化机制,以为渔业资源和海洋生态系统的科学管理提供必要的参考。

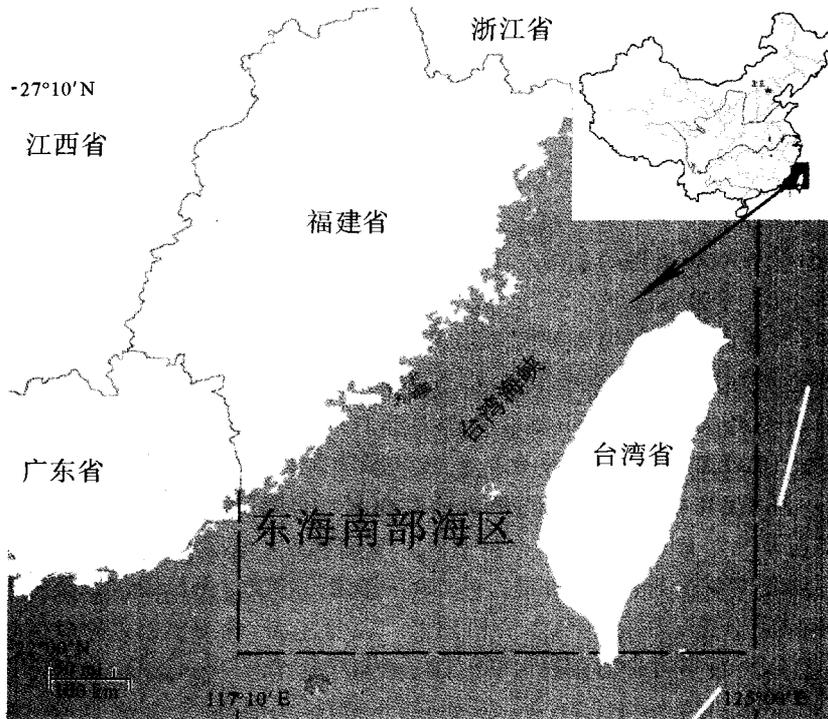


图1 东海南部海区

Fig.1 Map of the southern East China Sea ecosystem

1 材料与方法

1.1 研究海区

东海南部海区系指福建渔船生产的海区,范围涉及台湾海峡及其南北两翼,位于 $22^{\circ}00' \sim 27^{\circ}10' N$, $117^{\circ}10' \sim 125^{\circ}00' E$ (图1);包括闽东、闽中、台北、闽南和台湾浅滩渔场,海区面积 $213\,237\text{ km}^2$ 。海区地处亚热带中低纬度区,紧靠北回归线北侧,海洋生物资源种类繁多,组成复杂。根据1999~2002年对该海区多次调查发现,该海区常见的游泳动物约有497种。其中,鱼类最多,达367种,占总渔获种类的73.8%。甲壳类102种,头足类28种(戴天元 2004)。

1.2 东海南部海区生态系统 Ecopath 模型的构建

Ecopath 模型定义生态系统由一系列生态关联的功能成分组成,这些功能成分称为功能组(Functional group),所有功能组基本覆盖生态系统中能量流动的基本过程(Christensen *et al.* 2005)。根据热力学原理,模型定义生态系统中每个功能组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1组线性方程联立来定义1个生态系统。其中,每一个线性方程代表生态系统中的1个功能组:

$$B_i \cdot (P/B)_i \cdot EE_i = \sum_{j=1}^n B_j \cdot (Q/B)_j \cdot DC_{ji} + EX_i$$

式中, B_i 为功能组 i 生物量, P_i 为功能组 i 生产量, P/B_i 为功能组 i 生产量与生物量的比值, EE_i 为功能组 i 的生态营养转换效率, Q/B_i 为消化量与生物量的比值, DC_{ji} 为被捕食者 j 占捕食者 i 的总捕食量比例, EX_i 为

产出(包括捕捞量和迁移量)。模型需要输入的基本参数有 B_i 、 $(P/B)_i$ 、 $(Q/B)_i$ 、 EE_i 、 DC_{ij} 和 EX_i , 前 4 个参数中可出现任意一个未知数, 它能由模型通过其他参数计算出来, 后两个参数, 即食物组成矩阵参数 DC_{ij} 和产出参数 EX_i 为必须输入参数 (Christensen *et al.* 2005)。

1.3 功能组的划分

根据 Ecopath with Ecosim 的系统要求以及相关生态学理论, 将生态位(食物组成、摄食方式、个体大小、年龄组成以及渔获物统计分类方法)中重叠度高的种类进行合并以简化食物网, 其实质是把一些功能地位相似的等值种归为 1 个功能组 (Christensen *et al.* 2005)。东海南部海区海洋生态系统模型由 20 个功能组构成, 但基本覆盖东海南部海区生态系统的能量流动全过程, 并达到点(重点研究对象)、面相结合的效果。东海南部生态系统模型功能组划分见表 1。

表 1 东海南部海洋生态系统生物功能组划分
Table 1 Functional groups of southern East China Sea ecosystem model

功能组 Functional group	ID	物种组成 Species
浮游植物	Phytoplankton	硅藻 Diatom
		甲藻 Dinoflagellate
		桡足类 Copepod
浮游动物	Zooplankton	枝角类 Cladocera
		毛颚动物 Chaetognatha
		樱花虾 Sergestids
		樽海鞘 Salps
底栖动物	Benthos	软体动物 Mollusk
		多毛动物 Polychaete
海蜇	Jellyfish	海蜇 <i>Rhopilema esculentum</i>
虾类	Shrimp	角突仿对虾 <i>Parapenaeopsis cornuta</i>
		中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>
		哈氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>
		须赤虾 <i>Metapenaeopsis barbata</i>
		锚形鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>
		周氏新对虾 <i>Metapenaeopsis joyneri</i>
蟹类	Crab	银光梭子蟹 <i>Portuns argentatus</i>
		红星梭子蟹 <i>Portunus sanguinolentus</i>
		锈斑鲟 <i>Charybdis feriatus</i>
头足类	Cephalopods	中国枪乌贼 <i>Loligo chinensis</i>
		杜氏枪乌贼 <i>Loligo duvaucelii</i>
		目乌贼 <i>Sepia aculeata</i>
		短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>
其他鱼类	Other fishes	龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>
		七星鱼 <i>Myctophum pterotum</i>
		白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>
鲈鱼	Mackerel	日本鲷 <i>Scomber japonicus</i>
沙丁鱼	Sardines	金色小沙丁鱼 <i>Sardinella aurita</i>
鳀科类	Anchovy	黄鲫 <i>Setipinna taty</i>
		鳀鱼 <i>Engraulis japonicus</i>
鲹科类	Horse mackerel	竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>
蓝点马鲛	Japanese Spanish mackerel	蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>
绿鳍马面鲀	Bluefin leatherjacket	蓝点马鲛 <i>Scomberomor niphonius</i>
小型底层鱼类	Small demersal fish	绿鳍马面鲀 <i>Navodon tessellates Günther</i>
		大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i>
大型底层鱼类	Large demersal fish	发光鲷 <i>Acropoma japonicum</i>
		海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>
		牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>
大黄鱼	Large yellow croaker	大黄鱼 <i>Pseudosciaena crocea</i>
带鱼	Hairtail	带鱼 <i>Trichiurus haumela</i>
鲨鳐类	Shark and ray	沙拉真鲨 <i>Carcharhinus sorrah</i>
		何氏鳐 <i>Raja hollandi</i>
有机碎屑	Detritus	

1.4 功能组生物学参数来源和模型调试平衡

本研究所用数据主要源自 1999~2002 年东海南部海区生物资源周年调查报告(参考)、1997~2001 年东海大陆架生物资源周年调查报告(郑元甲等 2004)、环境质量公报(陈冠贤 1987)、论文文献(程家骅等 2000;卢振彬等 2002;孙耀等 2003)及中国水产科学研究院渔业统计数据库(Froese *et al.* 2004)。在 Ecopath 模型中,能量在系统中的流动可以用能量形式(生物湿重 t/km^2)来表示,时间一般限定为 1 年或 1 个月等。主要鱼类、头足类、浮游动物和浮游植物的生物量来自研究海区调查数据(戴天元 2004),对于缺少生物量数据的功能组将其生态营养转换效率设置为 0.95(Christensen *et al.* 2005),然后通过 EwE 模型软件的计算得到相应功能组的生物量。对于单物种组成的功能组的 P/B 和 Q/B 值,根据海区调查数据,分别应用经验公式求得(Pauly 1980;Palomares *et al.* 1998),对于包含不同种类的功能组,由于很难确定其 P/B 值和 Q/B 值,本文参考纬度和生态系统特征与东海南部海区大体相同的大亚湾水域模型、南海北部模型中的类似功能组,并结合渔业数据库网站来确定本模型中的 P/B 和 Q/B 参数(Froese *et al.* 2004)。有机碎屑的数量用有机碎屑与初级生产碳的有关经验公式估算(Christensen *et al.* 2005),浮游植物的 P/B 由研究海区所测叶绿素值推算获得(戴天元 2004),功能组中的食物组成矩阵来自于对鱼类胃含物的分析(薛莹等 2003;戴天元 2004)。模型基本数据输入之后,通过调试 P/B、Q/B、EE 和食物组成等参数,使模型中每一功能组的输入和输出全部相等,并同时使各功能组生态营养转换效率小于 1。最后,模型的输出结果同纬度生态系统的 Ecopath 模型结果或其他方法进行比较,得出更加合理的输出数据(全龄 1999)。本研究所构建的东海南部海区生态系统模型调试过程中主要参考了南海北部和大亚湾生态模型(王雪辉等 2005)的输出结果。

1.5 模型可信度的评价

模型的可信度和灵敏度分别采用 Ecopath 模型中的 Pedigree 和 Sensitivity analysis 进行评价(Christensen *et al.* 2005)。

2 结果与分析

2.1 东海南部海区 Ecopath 模型分析

整个模型经 Pedigree 评价的可信度为 0.513,可信度较高。由灵敏度分析结果可见(图 2),同一功能组内主要生态学参数的相关性很强。以带鱼功能组为例,当生物量减少 50%时,生态营养转换效率变化接近 70%;而在不同功能组间同样存在紧密的联系,当带鱼功能组的生物量或 Q/B 值变化 50%时,相对应的绿鳍马面鲀功能组的生态营养转换效率变化超过 20%。

研究表明,大部分功能组的生态营养转换效率都较高,介于 0.59 和 0.95 之间(表 2)。浮游植物和有机碎屑的 EE 值则较低,分别为 0.152 和 0.284。浮游植物的生产量和被捕食量分别为 1 778.392 和 269.724 $t km^2$,有机碎屑的为 1 667.064 和 472.697 $t km^2$ 。鲈鱼、沙丁鱼、鳀科类和其他小型鱼类的生产量分别为 2.049、4.353、5.576 和 8.326 $t km^2$,占有鱼总生产量的 85.6%。其他大中型和肉食性鱼类的生产量都比较低。

2.2 东海南部海区生态系统营养级结构和能流流动

东海南部海区生态系统可合并为 7 个营养级(表 3),其中营养级 VII 的流量、生产量和生物量都非常低。因此,东海南部海区生态系统实际上主要由 6 个营养级构成,其能流、生物量及生产量的分布呈金字塔型。

东海南部海区生态系统营养级能流关系见图 3。林德曼定律表明,各营养级之间的能量转换效率平均在 10%左右,海洋大陆架生态系统中营养级间能量转换效率略高(Pauly *et al.* 1995)。本研究中东海南部海区生态系统的平均转换效率为 12.0%。

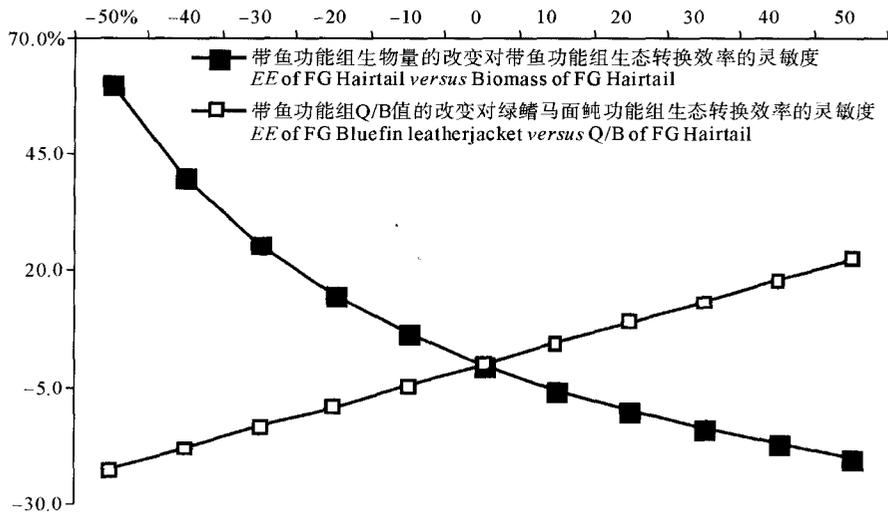


图 2 东海南部海区生态系统 Ecopath 模型灵敏度分析
Fig. 2 Sensitivity analysis of southern East China Sea Ecopath model

表 2 东海南部 Ecopath 模型功能组参数
Table 2 Input and output parameters of the southern East China Sea model

功能组名称 Functional group	营养级 Trophic level	生物量(t/km ²) Biomass	P/B (/year)	Q/B (/year)	EE	P/Q
鲨鱼类 Sharks and rays	4.23	0.012	0.820	9.50	0.758	0.086
带鱼 Hairtail	4.05	0.090	1.437	5.00	0.877	0.287
大黄鱼 Large yellow croaker	3.88	0.002	2.057	7.18	0.809	0.286
大型底层鱼类 Large benthic fishes	4.13	0.111	0.600	4.70	0.950	0.128
绿鳍马面鲷 Bluefin leatherjackets	3.16	0.064	0.787	4.98	0.889	0.158
小型底层鱼类 Small benthic fishes	3.21	0.130	1.754	6.40	0.921	0.274
蓝点马鲛 Japanese Spanish mackerels	3.81	0.106	0.430	3.19	0.950	0.135
鲭科类 Horse mackerels	3.00	0.134	0.877	6.13	0.854	0.143
鳀科类 Anchovy	2.83	0.569	1.980	9.80	0.920	0.202
沙丁鱼 Sardines	3.05	0.776	0.902	5.61	0.950	0.161
鲱鱼 Mackerels	3.13	0.436	1.063	4.70	0.938	0.226
其他鱼类 Other fishes	3.23	1.390	1.590	5.99	0.950	0.265
头足类 Cephalopods	3.54	0.230	3.100	11.97	0.950	0.259
蟹类 Crabs	2.73	0.139	2.120	8.48	0.908	0.250
虾类 Shrimps	2.66	0.592	7.570	25.00	0.950	0.303
海蜇 Jellyfish	2.38	1.185	5.011	25.05	0.950	0.200
底栖动物 Benthos	2.00	1.783	6.500	27.40	0.590	0.137
浮游动物 Zooplankton	2.05	3.640	32.000	192.00	0.496	0.167
浮游植物 Phytoplankton	1.00	12.630	140.000	—	0.152	—
有机碎屑 Detritus	1.00	20,000	—	—	0.284	—

注:粗体为模型计算的参数

表 3 东海南部海区生态系统各整合营养级的总能流、生物量、生产量和捕捞量分布(单位: t/km²)
Table 3 Distribution of throughput, biomass, catch and production through aggregated trophic levels
in southern East China Sea (Unit: t/km²)

营养级 Trophic level	总能流 Total throughput	生物量 Biomass	捕捞量 Catch	生产量 Production
VI	0.011	0.022	0.003	0.036
V	0.161	0.158	0.048	0.367
IV	1.682	0.912	0.462	3.056
III	12.089	3.506	1.693	17.288
II	269.724	6.789	0.632	277.145
I	1 778.375	12.630	—	1 791.005
合计	2 062.042	24.017	2.838	2 088.897

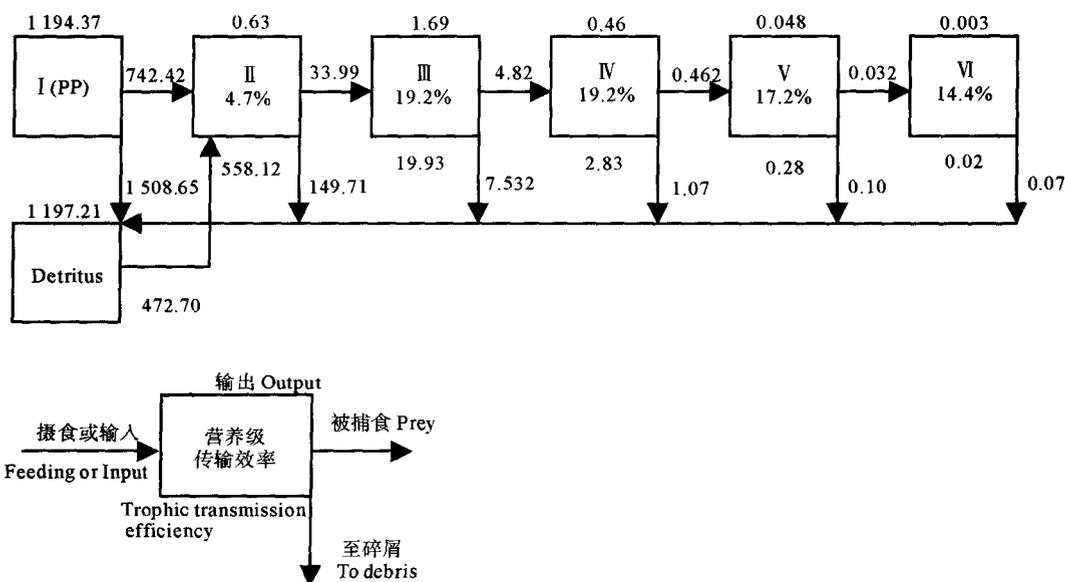


图 3 东海南部海区生态系统各营养级之间的物质流动

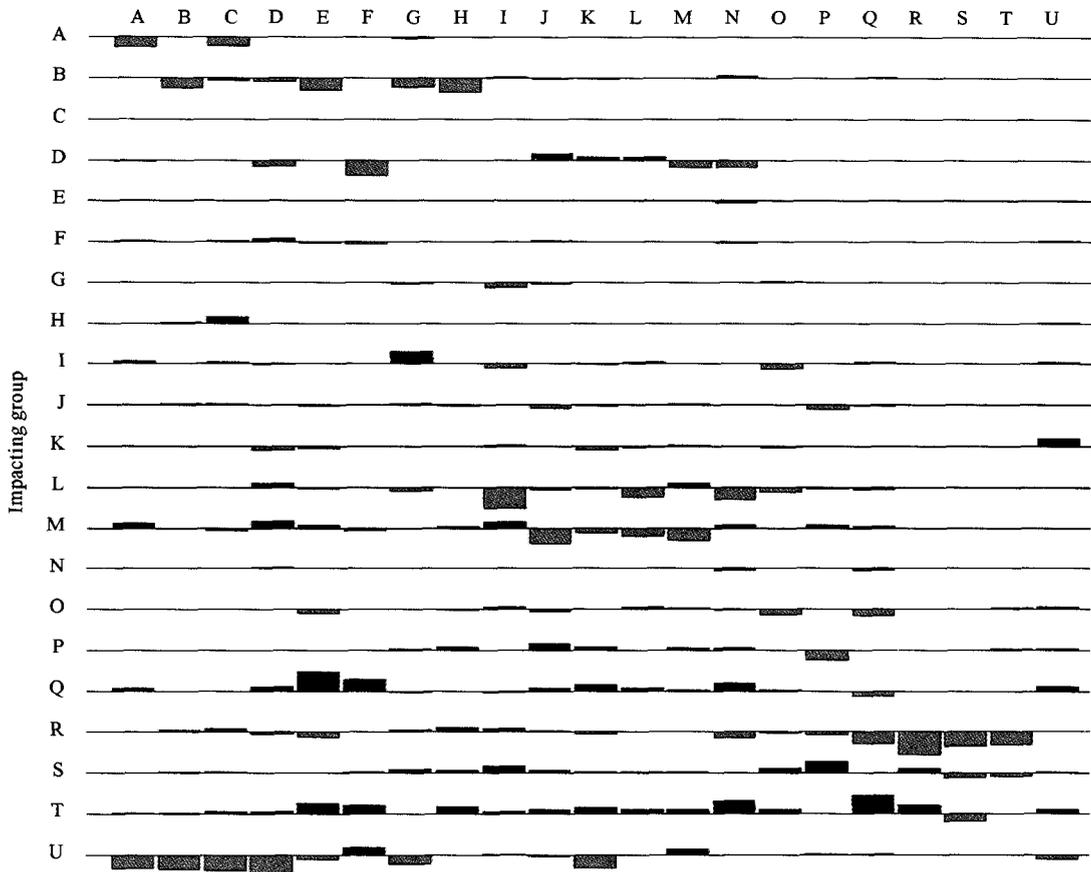
Fig. 3 The trophic flows transmitted through aggregated trophic levels in southern East China Sea ecosystem

2.3 混合营养效应分析

东海南部海区生态系统各功能组间的混合营养效应分析表明(图 4),每个功能组对其自身的混合营养效应一般为负值,捕食者对其饵料、渔业对其渔获物的混合营养效应一般也为负值。顶级捕食者对其饵料的负效应不大,而渔业对各种鱼类的负面效应往往较大,其中对鲨鱼、带鱼和大黄鱼等底层鱼类的负效应较大。处于生物网底层饵料生物对生物网上层的鱼、虾和蟹类的存在具有明显的正效应。

2.4 东海南部生态系统状态评价

Ecopath 模型可同时给出许多指标,这些指标可以分别代表系统的规模、稳定性和成熟度等系统特征(Christensen *et al.* 2005)。东海南部海区生态系统的总体特征参数见表 4。其中系统总流量(Total throughput)为总摄食、总输出、总呼吸及流入碎屑的总量之和,高达 4 265 t/km² · year,所有生物的总生产量为 1 921 t/km² · year,捕捞渔获物平均营养级为 3.05。



注: 横向代表影响者, 竖列代表被影响者。黑色向上的方柱代表正效应, 灰色向下的方柱代表负效应

Note: Bars above the line represent a positive impact, whereas bars underneath the line indicate a negative impact, the height of the bars are proportionate to the degree of the impacts

A. 鲨鳐类; B. 带鱼; C. 大黄鱼; D. 大型底层鱼类; E. 绿鳍马面鲀; F. 小型底层鱼类; G. 马鲛鱼; H. 鲭科类; I. 鲱科类; J. 沙丁鱼;

K. 鲈鱼; L. 其他鱼类; M. 头足类; N. 蟹类; O. 虾类; P. 海蜇; Q. 底栖动物; R. 浮游动物; S. 浮游植物; T. 有机碎屑; U. 渔业

Note: A. Shark and ray; B. Hairtail; C. Large yellow croaker; D. large benthic fishes; E. Bluefin leatherjacket; F. Small benthic fishes; G. Japanese Spanish mackerels; H. Horse mackerels; I. Anchovy; J. Sardines; K. Mackerels; L. Other fishes; M. Cephalopods; N. Crabs; O. Shrimps; P. Jellyfish; Q. Benthos; R. Zooplankton; S. Phytoplankton; T. Detritus; U. Fishery

图 4 东海南部海区生态系统各功能组间的混合营养效应分析

Fig. 4 The mixed trophic impact analysis of groups in southern East China Sea ecosystem

表 4 东海南部海区生态系统的总体特征

Table 4 The total system properties of southern East China Sea ecosystem

指标 Index	值 Value (t/km ² · year)	指标 Index	值 Value (t/km ² · year)
总摄食 Sum of all consumption	819.920	初级生产力/呼吸 Total primary production/total respiration	3.060
总输出 Sum of all exports	1 197.205	净系统生产力 Net system production	1 197.206
总呼吸 Sum of all respiratory flows	518.170	连接指数 Connectance Index	0.330
总碎屑生成量 Sum of all flows into detritus	1 667.064	系统杂食系数 System Omnivory Index	0.213
系统总营养流 Total system throughput	4 265.000	循环流量 Throughput cycled (including detritus)	174.70
系统总生产力 Sum of all production	1 921.000	Finn's 循环指数 Finn's cycling index	4.10
平均捕捞营养级 Mean trophic level of the catch	3.05	Finn's 平均路径长度 Finn's mean path length	2.398
净初级生产力 Net primary production	1 778.375		

系统初级生产力与总呼吸量是描述系统成熟度的重要指标,一般成熟的系统初级生产力与总呼吸量的比值接近1,二者之差值即系统净生产力(Net system production, NSP),接近0(Odum 1969; Christensen *et al.* 2005)。东海南部海区的系统初级生产力(Net Primary production, NPP)为 $1\,778.38\text{ t/km}^2 \cdot \text{year}$,远大于系统总呼吸量,NSP达到 $1\,197.21\text{ t/km}^2 \cdot \text{year}$ 。

连接指数(Connectance Index, CI)和系统杂食指数(System Omnivory Index, SOI)都是反映系统内部联系复杂程度的指标。越成熟的系统,其系统各功能组间的联系(食物网络)越复杂(Odum 1969; Christensen *et al.* 2005)。东海南部海区生态系统的连接指数和系统杂食指数分别为0.330和0.213。

循环流量(Throughput cycled)是指系统中重新进入再循环的营养流总量。相应地,Finn's 循环指数(Finn's cycling index, FCI)指的是系统中循环流量与总流量的比值,而Finn's 平均路径长度(Finn's mean path length, FML)指的是每个循环流经食物链的平均长度。成熟系统的特征之一就是物质再循环的比例较高,且营养流所经过的食物链较长(Finn 1976; Christensen *et al.* 2005)。东海南部海区生态系统的循环流量为 $174.70\text{ t/km}^2 \cdot \text{year}$,Finn's 循环指数为4.10%,Finn's 平均路径长度为2.398。

3 讨论

东海南部海区作为一个复杂的生态系统,不论是初级生产者、浮游动物、底栖动物、小型鱼虾类、重要经济鱼类还是顶级捕食者,其物种组成都十分丰富。本文将整个生态系统尽可能简化,仍然得到20个功能组。通过对东海南部海区生态系统 Ecopath 模型的食物网以及营养级之间营养流动进行分析,可以大致上总结出其营养流通的主要途径。

东海南部海区生态系统的初级生产者主要由浮游植物构成,牧食食物链最开始的一环也主要来自浮游植物。此外,系统牧食食物链和碎屑食物链的比值为1.15,说明两种食物链在生态系统中同时占据极其重要的地位(Dame *et al.* 2008)。生态系统营养流通的主要途径包括两条,一条是牧食食物链:浮游植物→浮游动物→小型鱼虾类→渔业和顶级捕食者。另一条是碎屑食物链:再循环的有机物→碎屑→浮游动物→小型鱼虾类→渔业和顶级捕食者。

在营养级 I 至营养级 II 的营养流中,约有67.0%来自碎屑。然而,生态系统中浮游植物和有机碎屑的利用率极低,其生态营养转换效率(EE)分别为0.152和0.284,表明被利用的量均不到其生产量的三分之一。营养级 I 和 II 之间的能量转换效率仅有4.7%,远低于平均能量转换效率12%,大量初级生产力未被利用而直接沉积形成碎屑,从而无法进入更高层次的营养流动,造成生态系统下层营养流动的“阻塞”。

大部分鱼虾类功能组的生态营养转换效率(EE)较高,表明其被生态系统利用率较大,对各个营养级捕捞量的分析表明(图3),渔业捕捞产量绝大多数来自营养级 III,占总捕捞量的60%,渔业捕捞对大部分鱼虾类,尤其是一些大中型鱼类的混合营养效应都表现出显著的负值,其影响程度大大超过了系统中的顶级捕食者。

Conover 等(2002)、Kuparinen 等(2007)曾指出,过大的渔业捕捞压力以及捕大留小的捕捞政策会导致鱼类群体遗传结构的改变,即个体小、性成熟早的个体更能适应这种人为的选择压力,从而逐渐占据群体的主导地位。在经历了数年高强度捕捞之后,东海南部海区渔获物品质较低,小型化严重,渔获物中个体小、生长快、生命周期短、繁殖力高和竞争力差的物种已占绝对优势(郑元甲 2003;程家骅 2006)。通过模型分析发现,东海南部海区生态系统的捕捞量占各营养级的生产量比例较小,大部分在系统食物网捕食关系中被消耗,说明目前东海南部海区生态系统在维持基本食物网平衡的同时,已无能力提供丰富的渔业资源,和同纬度其他海洋生态系统模型(Coll *et al.* 2006; Manickchand-Heileman *et al.* 2007)比较发现,东海南部海区生态系统具有过高的初级生产力和呼吸比值(NPP/R)、净系统生产力(NSP)、捕捞量以及较低的 SOI 和鱼虾类捕捞营养级。表明该海区是一个典型的处于“幼态”的生态系统,生态系统成熟度低下,该特性决定了其抵抗外力干扰的能力较差,加之不断增加的捕捞强度和生态系统中捕捞种群的低龄化、低质化,将使年内、年际间生态系统状态的变化增大,使整个系统处于极不稳定的状态。

4 结论

本研究避免了单种群结构模型和多种群结构模型的弊端,应用基于生态系统构架的 Ecopath 模型构建了

东海南部海区生态系统模型,对东海南部海区生态系统的种群关系、结构功能和能量流动进行了量化分析,揭示了东海南部海区渔业资源衰退机制和生态系统退化机制。然而,尽管绝大多数数据由海区资源环境调查获得,但构建模型过程仍然会存在一定的误差,如何提高数据的准确度和模型的可信度以用于制定确切可行的渔业管理政策,将是下一步研究的重要工作。

参 考 文 献

- 王雪辉,杜飞雁,邱永松,李纯厚,黄洪辉,孙典荣,贾晓平. 2005. 大亚湾海域生态系统模型研究 I: 能量流动模型初探. 南方水产, 1(3): 1~8
- 全 龄. 1999. Ecopath——一种生态系统能量平衡评估模式. 海洋水产研究, 20(2): 102~107
- 卢振彬,戴泉水,颜允明. 2002. 福建省近期捕捞努力和捕捞作业结构的调整. 福建水产, 2: 1~7
- 孙 耀,于 森,刘 勇,张 波,唐启升. 2003. 现场胃含物法测定鲈鱼的摄食与生态转换效率. 水产学报, 27(3): 245~251
- 刘 玉,姜 涛,王晓红,段丽杰,李适宇. 2007. 南海北部大陆架海洋生态系统 Ecopath 模型的应用与分析. 中山大学学报(自然科学版), 46: 123~127
- 张壮丽,叶孙忠,张成茂,方水美. 2006. 福建海区渔业资源利用现状浅析. 江西水产科技, 2: 1~6
- 宋 兵,陈立桥, Chen Yong. 2007. Ecopath with Ecosim 在水生生态系统研究中的应用. 海洋科学, 31(1): 83~86
- 陈冠贤. 1987. 中国海洋渔业环境. 杭州: 浙江科学技术出版社
- 郑元甲. 2003. 东海大陆架渔业资源与环境. 北京: 科学出版社
- 徐姗姗,陈作志,何培民. 2008. 杭州湾北岸大型围隔海域人工生态系统的能量流动和网络分析. 生态学报, 5: 2 065~2 072
- 晁 敏,全为民,李纯厚,程炎宏. 2005. 东海区海洋捕捞渔获物的营养级变化研究. 海洋科学, 29(9): 51~55
- 程家骅,陈雪忠,林龙上,刘宝祥. 2000. 东海区海洋渔业资源及其作业结构特点的分析. 中国水产, 3: 44~45
- 程家骅. 2006. 东黄海渔业资源利用. 上海: 上海科学技术出版社
- 薛 莹,金显仕. 2003. 鱼类食性和食物网研究评述. 海洋水产研究, 24: 76~88
- 戴天元. 2004. 福建海区渔业资源生态容量和海洋捕捞业管理研究. 北京: 科学出版社
- Christensen, V., Walters, C. J., and Pauly, D. 2005. Ecopath with Ecosim: A User's Guide. May 2005 Edition. Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada and ICLARM, Penang, Malaysia
- Coll, M., Palomera, I., Tudela, S., and Sarda, F. 2006. Trophic flows, ecosystem structure and fishing impacts in the South Catalan Sea, North-western Mediterranean. J. Mar. Syst. 59, 63~96
- Conover, D. O., and Munch, S. B. 2002. Sustaining fishing yields over evolutionary time scales. Science, 297: 94~96
- Dame, J. K., and Christian, R. R. 2008. Evaluation of ecological network analysis: Validation of output. Ecol. Model. 210: 327~338
- Finn, J. T. 1976. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. J. Theor. Biol. 56: 363~380
- Froese, R., and Pauly, D. 2004. Fishbase. <http://www.fishbase.org>
- Kuparinen, A., and Merila. 2007. Detecting and managing fisheries-induced evolution. Trends Ecol. Evol. 22: 652~659
- Manickchand-Heileman, S., Mendoza-Hill, J., Kong, A. L., and Arocha, F. 2007. A trophic model for exploring possible ecosystem impacts of fishing in the Gulf of Paria, between Venezuela and Trinidad. Ecol. Model. 172: 307~322
- Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. Science, 104: 262~270
- Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters and mean environmental temperature in 175 fish stock. Journal du Conseil international pour l'Exploration de la Mer. 39: 175~192
- Palomares, M. L. D., and Pauly, D. 1998. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity. Mar. Freshwater Res. 49: 447~453
- Ulanowicz, R. E. 1995. Ecosystem trophic foundations; Lindeman exonerata. In: Patten, B. C., Jorgensen, S. E., (Eds.), Complex Ecology: The past-whole relation in ecosystems. Englewoods Cliffs New Jersey: Prentice-Hall. 549~560
- Walters, C., Pauly, D., and Christensen, V. 2000. Representing density dependent consequences of life history strategies in aquatic ecosystems; EcoSim II. Ecosystems, 3: 70~83