

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

徐姗姗¹, 陈作志^{2,3}, 何培民^{1,*}

(1. 上海水产大学 农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 200090; 2. 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300; 3. 上海水产大学 海洋学院, 上海 200090)

摘要:根据 2006 年在杭州湾北岸大型围隔海域进行的生态调查数据,利用 *EwE* 软件构建围隔海域人工生态系统的能量流动模型。模型由 13 个功能组构成,分别是肉食性鱼类、底栖捕食鱼类、浮游动物性鱼类、草食性鱼类、蟹类、虾类、软体动物、底栖动物、肉食性浮游动物、植食性浮游动物、大型藻类、浮游植物和有机碎屑,每一组都代表在生态系统中具有相似地位的有机体,基本覆盖了该人工生态系统能量流动的主要过程。能量流动分析表明,围隔海域人工生态系统中能量流动主要以碎屑食物链途径为主,其中植食性浮游动物在能量从低级向高层次转换中起关键作用。人工生态系统的营养级范围为 1.00 ~ 3.90 级,系统的能量流动主要有 6 级,来自初级生产者的能流效率为 9.4%,来自碎屑的转换效率为 9.8%,平均能量转换效率为 9.6%。经生态网络分析,直接来源于碎屑的比例占总流量的 57%,而直接来源于初级生产者的比例为 43%,生态系统特征参数:总初级生产计算量/总呼吸量(TPP/TR)、系统物质和能量循环率(FCI)和系统聚合度(A)值分别为 2.672、0.25、0.315,表明围隔海域人工生态系统目前正处于发育时期。该研究为首次利用 Ecopath 模型分析大型围隔海域人工生态系统的结构和能量流动,旨在为富营养化近岸海域的生态修复提供理论依据。

关键词:大型围隔海域;人工生态系统;生态通道模型;生态网络分析

文章编号:1000-0933(2008)05-2065-08 中图分类号:Q148,S965.3,S967 文献标识码:A

Energy flux and network analysis for an artificial ecosystem of a large enclosed sea area in North Hangzhou Bay

XU Shan-Nan¹, CHEN Zuo-Zhi^{2,3}, HE Pei-Min^{1,*}

1 Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology of the Ministry of Agriculture, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China

2 Key Laboratory of Fishery Ecology Environment, Ministry of Agriculture, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Guangzhou 510300, China

3 College of Marine Science & Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2065 ~ 2072.

基金项目:上海市浦江人才计划资助项目(05PJ14086);上海市教委优势(重点)学科资助项目(Y1101);上海市 908 专项资助项目(PJ6);国家农业部渔业生态环境重点开放实验室开放基金(2006-03)

收稿日期:2007-05-18; **修订日期:**2008-01-22

作者简介:徐姗姗(1979~),女,浙江杭州人,博士生,主要从事海洋生物技术和生态修复研究。E-mail: creacy_2000@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pmhe@shfu.edu.cn

致谢:感谢美国 Connecticut 大学海洋科学系教授 Senjie Lin 博士对本文写作给予的帮助。

Foundation item: The project was financially supported by Pujiang Talents Program of Shanghai (No. 05PJ14086), the Key Disciplinary Program of Shanghai Municipal Education Commission (No. Y1101), the 908 Special Program of Shanghai (No. PJ6) and the Key Lab of Fishery Ecology Environment, Ministry of Agriculture of China (No. 2006-06)

Received date: 2007-05-18; **Accepted date:** 2008-01-22

Biography: XU Shan-Nan, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine biotechnology and bioremediation. E-mail: creacy_2000@yahoo.com.cn

Abstract: Using the Ecopath with Ecosim software, we constructed a trophic structure model of a large enclosed sea area in north Hangzhou Bay to analyze the main biomass flows in the artificial ecosystem. The structure model is based mostly on the 2006 survey data and it provides a snapshot of how the artificial ecosystem operates. The model consists of 13 functional groups, which are piscivorous fish, benthic-feeding fish, zooplanktivorous fish, herbivorous fish, crabs, shrimp, mollusca, infauna, carnivorous zooplankton, herbivorous zooplankton, periphyton, phytoplankton and detritus. Each group represents organisms with a similar role in the food web, and the 13 functional groups cover the main trophic flow in the artificial ecosystem. The results show that the food web in a large enclosed sea area is dominated by the detrital path, and herbivorous zooplankton plays a significant role in transferring energy from detritus to higher trophic levels. Trophic levels of the compartments vary from 1.00 for the primary producers and detritus to 3.90 for the piscivorous fish. Through network analysis, the system network is mapped into a linear food chain and six discrete trophic levels are found with a mean transfer efficiency of 9.8% from detritus and 9.4% from the primary producers within the ecosystem. The geometric mean of the trophic transfer efficiencies is 9.6%. In the course of energy flow, the proportion of total flow originating from detritus is 57%, and that from the primary producers is 43%. Three indexes of ecosystem maturity, TPP/TR, FCI and Ascendancy, are 2.672, 0.25 and 0.315 respectively, indicating that the artificial ecosystem of a large enclosed sea area in north Hangzhou Bay is in the state of development. This is the first reported trophic model of a large artificially enclosed sea area; it may serve as the basis for future bioremediation and ecosystem management in eutrophic coastal sea areas.

Key Words: enclosed sea area; artificial ecosystem; Ecopath model; network analysis

杭州湾北岸金山区的东北面为上海化学工业区,西面为上海石化总厂;陆源排污口常年大量排污,严重污染了沿岸局部海域,水体富营养化严重^[1],对海洋资源已造成不良影响和损害,使生态系统长期处于不健康状态^[2]。2006年3月,为改善近岸水质和修复海洋生态环境,上海金山区海岸线开发管理委员会通过圈海围堤,在杭州湾北岸建立了一个总面积为1.72 km²的大型示范围隔海域(图1),并在该围隔海域实施截断点源污染,物理沉降泥沙等工程。在此基础上,我们进一步采取大型海藻栽培和人工生态系统构建等生态修复技术,使整个围隔海域水质由超IV类转变为II类水质,绝大部分化学污染物的含量显著降低,水体透明度提高至5.5~6.0 m^①,生态修复成效初显,并初步实现了生态建设与旅游经济发展互动双赢的建设目标。但我们对现阶段该人工生态系统的能量转化效率、有机体间的营养交互关系、大型海藻的生态效应等还缺乏足够的认识。因此,有必要进一步研究该水域生态系统的结构、功能及能量流动,并评价其当前生态系统状态。

Ecopath生态通道模型根据营养动力学原理,用一组联立方程平衡系统中各功能组成成分生物生产和消耗的能量流动,直接构造简单的生态系统模型。这种方法最早由Polovina^[3,4]提出,用来评估稳定状态水域生态系统组成(生物种类或种类组)的生物量和食物消耗,经过与Ulanowicz^[5]的能量分析生态学理论结合,逐步发展成为一种生态系统营养成分流动分析方法。目前,在全球海洋生态系统中已经建立了近百个Ecopath模型,国内学者也利用该模型描述渤海^[6,7]、北部湾^[8,9]和大亚湾^[10]等不同海域的能量流动效率。但对于人工构建的大型围隔海域生态系统,国内外未见研究报道。为了评价该水域生态系统的状态和物质能量循环途径,本文利用EwE软件构建围隔海域人工生态系统的能量流动模型,旨在摸清该人工生态系统的营养结构和能量流动,以评价该生态系统的稳定性和合理性,从而为富营养化近岸海域的生态修复提供理论依据。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

大型围隔海域位于上海金山区杭州湾北岸,钱塘江入海口,属侵蚀型海岸,海滩主要为淤泥质潮滩;位于东南沿海北亚热带季风区,雨量充沛,四季分明,年均气温15.7~15.9℃,年均降水量988.1~1197.2 mm^[11]。

① 陈亚瞿等. 金山城市沙滩水域水生生态环境监测及生态修复工程项目专题报告, 2007

东起金山卫车客渡码头引桥前沿,西至金山石化卫二路新大堤,海岸线全长 3.16 km,围海堤坝全长 3625 m,距海岸线平均 500 m,围海面积共 1.72 km² (图 1),平均水深 5 m。建成后,围隔海域内放养鱼、虾、蟹、贝、藻类等。其中大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*) 6 万尾,体长 15cm、黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 2000 尾,体长 7cm、鲻鱼 (*Mugil cephalus*) 和 鲰鱼 (*Liza haematocheila*) 各 1 万尾,体长 8cm、脊尾白虾 (*Exopalaemon carinicauda*) 700kg,体长 0.5 ~ 5cm、刀额新对虾 (*Metapenaeus ensis*) 240 万尾,体长 0.6 ~ 0.8cm、三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 100kg、太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 4000kg、四角蛤蜊 (*Macra veneriformis*) 1000kg,体长 1 ~ 2cm、菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 50 万粒,体长 1cm、泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 2000kg,体长 1cm、疣荔枝螺 (*Thais clavigera*) 1000kg,体长 5mm、多毛类 (Polychaete) 100kg、江蓠 (*Gracilaria verrucosa*) 9700kg、浒苔 (*Enteromorpha clathrata*) 500kg 等构建人工生态系统。

1.2 模型构造

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^[12, 13]。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-其它自然死亡-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:

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

式中, $(P/B)_i$ 为第 i 组的生产量与生物量比值, $(Q/B)_i$ 为消化量与生物量的比值, DC_{ji} 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)。

根据方程,一个包含 n 个生物功能组的生态系统的 Ecopath 模型,可以用如下 n 个联立线性方程表示:

$$B_1 \times (P/B)_1 \times EE_1 - B_1 \times (Q/B)_1 \times DC_{11} - B_2 \times (Q/B)_2 \times DC_{21} - \cdots - B_n \times (Q/B)_n \times DC_{n1} - EX_1 = 0$$

$$B_2 \times (P/B)_2 \times EE_2 - B_1 \times (Q/B)_1 \times DC_{12} - B_2 \times (Q/B)_2 \times DC_{22} - \cdots - B_n \times (Q/B)_n \times DC_{n2} - EX_2 = 0$$

...

$$B_n \times (P/B)_n \times EE_n - B_1 \times (Q/B)_1 \times DC_{1n} - B_2 \times (Q/B)_2 \times DC_{2n} - \cdots - B_n \times (Q/B)_n \times DC_{nn} - EX_n = 0$$

通过对上述线性方程求解, Ecopath 模型保证方程表示的能量在生态系统中每一个功能组之间的流动保持平衡,定量地描述生态系统中各个成分的生物学参数。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。

1.3 功能组划分

根据规格、生物学特性 (生长和死亡率) 及食性特点,围隔海域人工生态系统的营养通道模型由 13 个功能组构成,根据调查数据的实际情况并为更好地在模型中应用,功能组的定义与分类学略有不同,但基本覆盖

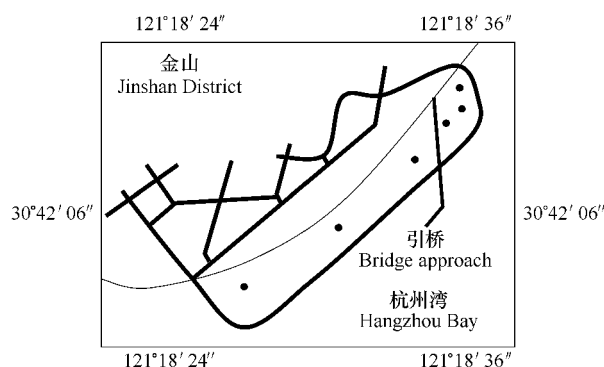


图 1 杭州湾北岸大型围隔海域人工生态系统研究区域及采样示意图

Fig. 1 Map showing the artificial ecosystem of a large enclosed sea area in north Hangzhou Bay and sampling sites

了该人工生态系统能量流动的全过程。13 个功能组分别为肉食性鱼类、底栖捕食鱼类、浮游动物性鱼类、草食性鱼类、蟹类、虾类、软体动物、底栖动物、肉食性浮游动物、植食性浮游动物、大型藻类、浮游植物和有机碎屑。

1.4 功能组生物学参数来源

在 Ecopath 模型中,能量在系统中的流动可以用能量形式(例如碳 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 或生物湿重 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)来表示,时间一般限定为 1a 或 1 个月等。小型无脊椎动物的生物量很难估算,本文通过 EwE 模型软件计算得到,而大型无脊椎动物和鱼类的生物量主要来自调查数据(按《海洋调查规范》GB12763.6-91 执行)。对于包含不同种类的功能组,由于很难确定其 P/B 比值和 Q/B 值,本文参考纬度和生态系统特征与杭州湾大体相同的台湾北部 KuoSheng 湾^[14]和台湾西南部 Chiku 泻湖^[15]模型中的类似功能组,并结合渔业数据库^[16]来确定本模型中的 P/B 和 Q/B 参数。围隔海域有机碎屑的数量用有机碎屑与初级生产碳的经验公式估算^[17];功能组的食物组成矩阵来自于采样鱼类的胃含物分析。

1.5 Ecopath 模型调试

Ecopath 模型的调试过程是使生态系统的输入和输出保持平衡,即反复调整 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。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,从而获得生态系统其他生态学参数的合理值。最后,模型的输出结果可以和同一区域不同时间的 Ecopath 模型结果或别的评估方法比较,也可以与其他类似区域的 Ecopath 模型结果比较,得出更加合理的输出数据^[18]。本文所构建的大型围隔海域生态通道模型调试过程主要参考了台湾水域的模型输出数据。

2 结果与分析

本文构建的杭州湾大型围隔海域 Ecopath 模型功能组参数的输入和模型调试的结果见表 1,该系统的统计学特征见表 2,能量流动和营养关系分别见图 2 和图 3。

表 1 大型围隔海域 Ecopath 模型功能组估算参数(黑体为模型计算的参数)

Table 1 Input and output (in black) parameters of the Ecopath of a large enclosed sea area

功能组 Group	生物量 Biomass ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)	P/B (a^{-1})	Q/B (a^{-1})	EE	P/Q	营养级 Trophic level	渔获量 Catch ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
浮游植物 Phytoplankton	14.0	476	—	0.192	—	1.00	—
大型藻类 Periphyton	10.6	1.4	—	0.625	—	1.00	6.80
植食性浮游动物 Herbivorous zooplankton	14.8	86	280	0.340	0.307	2.00	—
肉食性浮游动物 Carnivorous zooplankton	6.00	25	89	0.585	0.281	2.84	—
底栖动物 Infauna	8.00	4.0	20	0.902	0.200	2.44	—
软体动物 Mollusca	6.82	1.75	7.5	0.376	0.233	3.05	—
虾类 Shrimp	3.15	1.84	13	0.266	0.142	2.96	—
蟹类 Crabs	1.50	1.22	7.0	0.492	0.174	3.63	—
草食性鱼类 Herb. fish	1.21	1.32	12	0.553	0.110	2.09	0.05
浮游动物性鱼类 Zooplanktivorous fish	1.25	1.28	7.5	0.779	0.171	3.14	0.05
底栖捕食鱼类 Benthic-feeding fish	1.21	1.22	5.89	0.501	0.207	3.22	0.002
肉食性鱼类 Piscivorous fish	0.41	0.90	6.0	0.407	0.150	3.90	0.15
有机碎屑 Detritus	1000	—	—	0.429	—	1.00	—

2.1 人工生态系统中各功能组营养交互关系

从模型给出的大型围隔海域人工生态系统营养关系(图 2)可以看出,一般而言,被捕食者对其他功能组会产生积极效应,而捕食者则会对其他功能组产生直接或间接的负面效应。浮游植物和有机碎屑作为系统的

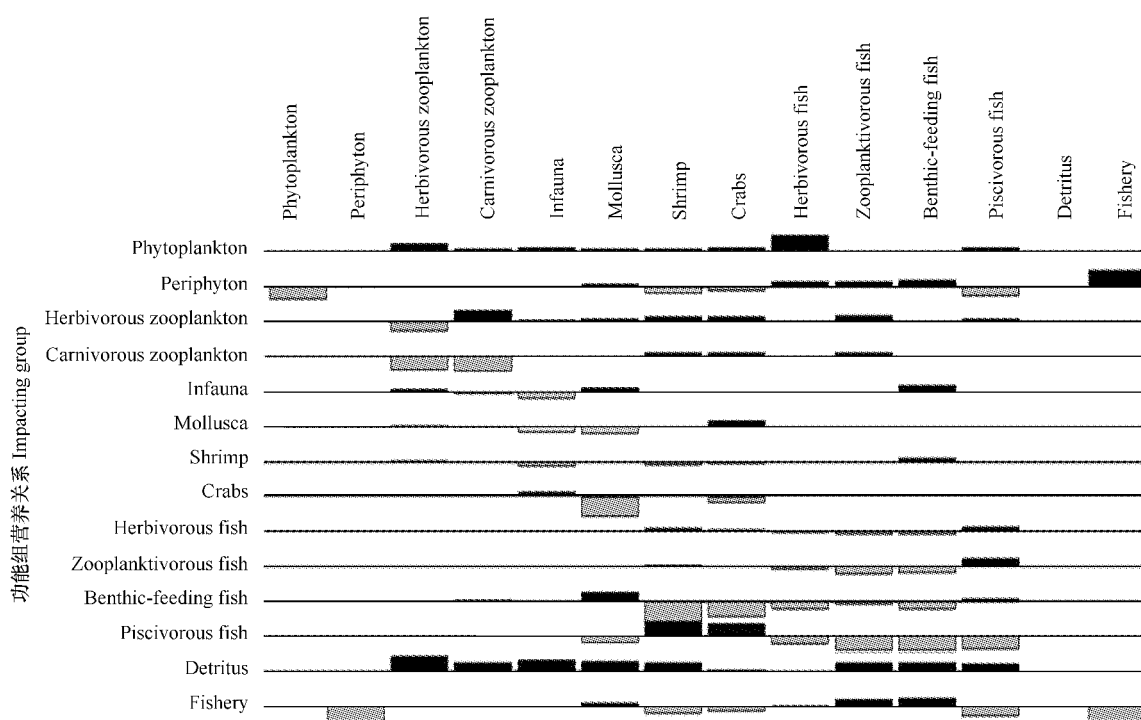


图2 人工生态系统营养关系图

Fig. 2 Flow chart of trophic interaction in the artificial ecosystem

黑块为积极影响、灰块为消极影响 Species on the Y-axis has positive (black bar), negative (grey bar) or no effect on species listed on the X-axis. Phytoplankton 浮游植物; Periphyton 大型藻类; Herbivorous zooplankton 植食性浮游动物; Carnivorous zooplankton 肉食性浮游动物; Infauna 底栖动物; Mollusca 软体动物; Shrimp 虾类; Crabs 蟹类; Herbivorous fish 草食性鱼类; Zooplanktivorous fish 浮游动物性鱼类; Benthic-feeding fish 底栖捕食鱼类; Piscivorous fish 肉食性鱼类; Detritus 有机碎屑; Fishery 渔业;下同 the same below

生产者,对其它大部分功能组有积极效应。大型藻类由于吸收水体营养盐或通过藻类间相生相克作用^[19],对浮游植物产生竞争效应。植食性浮游动物在能量的有效传递上起着关键作用,同时也受到初级生产者和上层捕食者的双重作用,它们对系统的影响比较强烈。由于底栖性鱼类和甲壳类均捕食底栖动物,它们之间存在着激烈的食物来源竞争关系,因此底栖性鱼类对甲壳类具有明显负作用。而肉食性鱼类捕食其他鱼类的同时释放了甲壳类的捕食压力,故肉食性鱼类对虾蟹类有明显的正效应。由于该人工生态系统构建时间较短,主要通过收获大型藻类生物质的途径向外界输出水体过剩营养盐来减轻富营养化,目前并未开发大规模游钓活动,因此人为收割对大型藻类影响较大,而对鱼类功能组的影响较小。

2.2 营养级间转换效率

从图3可以看出,该围隔海域人工生态系统的能量流动途径主要包括两条:一是牧食食物链,浮游植物—浮游动物(桡足类)—食浮游动物鱼类(鲢、鳊、大黄鱼);另一条是碎屑食物链,再循环有机物—碎屑—碎屑取食者(沙蚕、菲律宾蛤仔、泥蚶、牡蛎等)—小型鱼虾(脊尾白虾、刀额新对虾、三疣梭子蟹)—大型食肉动物(游钓鱼类)。生态系统的能量流动主要在6个营养级间发生,各营养级间的转换效率见表2。人工生态系统转换总体效率在II→III最高,达到10.7%,总体能量转换效率为9.6%,略低于水域生态系统10%的平均转换效率^[20],也低于同一纬度地区的台湾七股泻湖12%^[15]和相似海域类型的Sundays Beach 12%^[21]的能量转换效率。其主要原因在于该系统构建时间较短,系统中各组分连接松散,能量流动主要依靠碎屑(57%),能量转换主要发生在浮游生物级,人为收获除了大型海藻外,尚未对其它生物组分进行收割。因此,系统中上层生物对能量转换的贡献较小,从而也影响了系统中能量的流转和分配,能量更多地回流和积蓄在底层碎屑中,因而造成了能量流动中的“阻滞”。

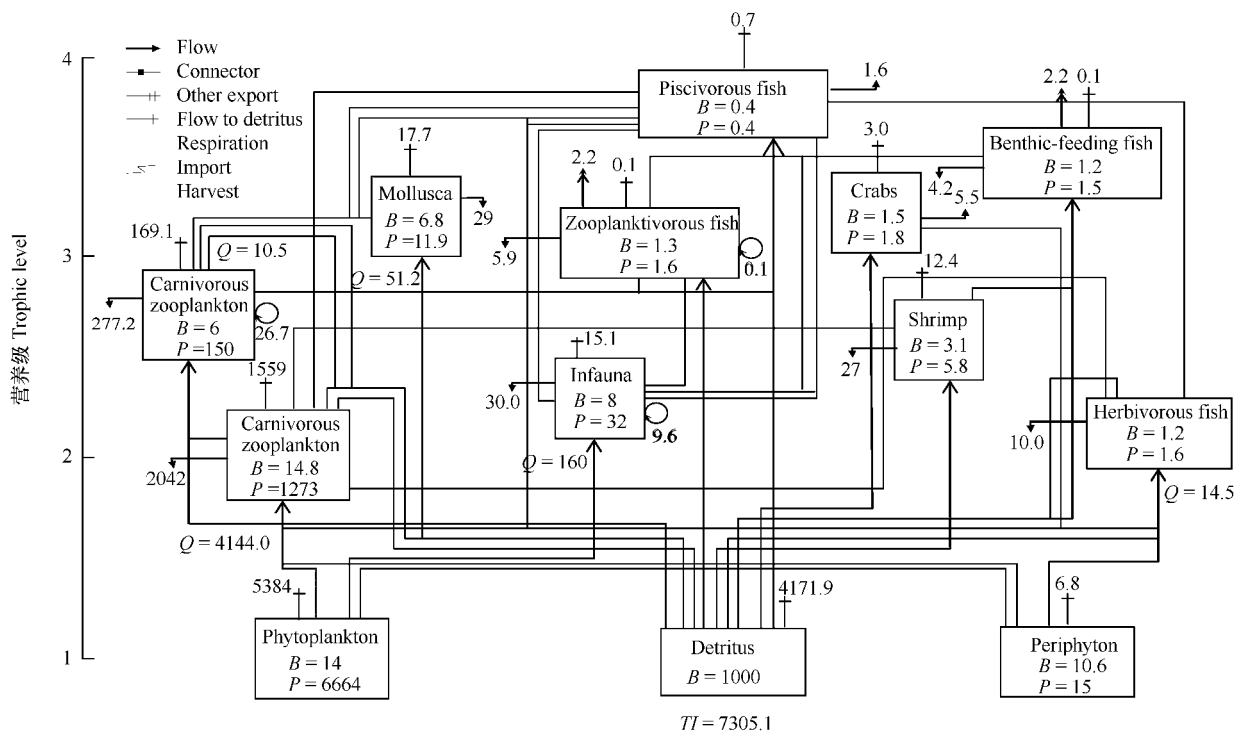


图3 人工生态系统能量流动图

Fig. 3 Flow chart of trophic interaction in the artificial ecosystem ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)

表2 人工生态系统各营养级的转换效率

Table 2 Transfer efficiency of discrete trophic levels in the artificial ecosystem (%)

能量来源\营养级 Sources\TL	I	II	III	IV	V	VI	VII
生产者 Producers	—	9.1	10.8	8.1	7.2	7.2	6.1
碎屑 Detritus	—	9.8	10.6	8.5	7.4	7.6	6.5
总流动 All flows	—	9.5	10.7	8.3	7.3	7.4	6.3
流量中来自碎屑的比例 Proportion of total flow originating from detritus: 0.57							
来自初级生产者 From primary producers: 9.4%							
来自碎屑 From detritus: 9.8%							
总共 Total: 9.6%							

2.3 人工生态系统总体特征

目前,国内外对人工生态系统的结构和功能研究较少。表3为利用 Ecopath 模型的网络分析功能估算的该大型围隔海域人工生态系统的特征参数。系统总流量是表征系统规模的指标,它是总摄食、总输出、总呼吸以及流入碎屑能量的总和,高达 $18958 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,所有生物的总生产量为 $8159 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,系统初级生产力(TPP)为 $6678.84 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,远远大于系统总呼吸量 $2499.863 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,两者之差为系统总输出量 $4178.978 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 。连接指数和系统杂食指数是表征系统内部联系复杂程度的指标,越是成熟的系统,其各功能组间的联系越强,系统越稳定^[13],这里系统的连接指数和系统杂食指数分别为0.306和0.333(表3)。尽管本文未单独讨论微生物食物网的作用,但包括了异养细菌的碎屑食物网在该系统中占主导地位,能量来自碎屑和植食性的比例为4.8:1,这也部分说明了系统中碎屑未能很好得到利用,从而降低了系统的整体转化效率。

3 讨论

Ecopath 模型可以充分考虑生态系统各功能组分间的相互关系,快速反映和评价生态系统的状态,被誉为

新一代描述水域生态系统的有力工具。目前该模型已在全球 120 多个水域(包括湖泊、水库、海湾、大洋、池塘等)中得到应用,但关于应用该模型描述大型人工构建的生态系统尚未见报道。本文利用 *EwE* 软件构建 *Ecopath* 模型,并应用该模型初步分析了杭州湾大型围隔人工生态系统的能流效率和生态系统状态。该人工生态系统的能量转换效率(9.6%)略低于 10% 的平均转换效率,系统转换效率在 II→III 间最高,植食性浮游动物在能量转换过程中起到关键作用。但从碎屑食物链和植食链的比 4.8:1 来看,系统中碎屑发挥的作用太小,这也导致整个系统的能量流动效率较低。而事实上,包括了微型食物网的碎屑链是该生态系统能量流动的主要来源。模型也未能单独考虑微型食物网的作用,微食物网作为经典牧食链的侧枝,在部分贫营养海域甚至是能流的主渠道,该人工生态系统构建时间较短,能流渠道并不通畅,微型食物网未能得到很好的利用可能也是一个主要原因。

Ecopath 模型中有许多指标可以表示生态系统的规模、稳定性和成熟度等系统特征,人工生态系统的总体特征参数见表 3。在 Odum^[22] 关于生态系统发展状态的表征参数中,大部分参数表达均处于较概括和模糊状态,其中 FCI、A(Ascendancy)、TPP/TR 是反映系统状态的 3 个关键指标。FCI 表示系统生产力中贡献给物质和能量再循环的比例,表明生态系统有机物质流转的速度,在模型中可通过直接计算得到,该指标在成熟系统中接近于 1。A 是聚合度,反映各个功能组间相互作用的程度,是生态系统稳定性的测度,该值越接近于 1,说明系统各功能组间连接越紧密,系统越稳定。TPP/TR 是初级生产力与总呼吸量的比值,也是表征系统成熟度的主要指标,成熟的生态系统中,该比值逐渐接近于 1,说明没有多余的生产量可供系统再利用。杭州湾大型围隔海域人工生态系统的 FCI、A、TPP/TR 的比值分别为 0.25、0.315 和 2.672,表明目前该系统的初级生产力较高而聚合度低,系统各功能组间连接较松散,能量在系统中流动的路径短(MPL = 2.174),加上较低的连接指数 CI(0.306)和系统杂合度指数 SOI(0.333)都表明系统目前处于不稳定的“幼态”时期。该人工生态系统具有以下缺陷:首先,系统的“幼态”决定其抵抗外界的干扰能力较弱,系统状态年内、年际变化较大,这样就容易导致其生态环境和渔业产出动荡不定。其次,营养级 1 的利用率低,造成营养流动障碍,容易形成浮游藻类爆发而导致海水富营养化。未利用的碎屑最后矿化沉积,造成海床抬高,使底泥中有机物增多,不断分解释放营养盐,成为其内源性污染的主要来源。因此,在下一步的系统完善上,一方面需要继续栽培大型海藻,通过海藻的竞生效应抑制浮游植物的生长;另一方面也需要加大对碎屑食性鱼类的放养力度,并适当开展游钓活动,以收割系统的产出,保持能量流动路径的通畅。

表 3 人工生态系统总体统计学参数

Table 3 Summary statistics of net flow in the model of the artificial ecosystem

特征参数 Attribute parameters	
总消耗量(TQ) Sum of all consumption ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	4974.082
总输出量(TEX) Sum of all exports ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	4178.978
总呼吸量(TR) Sum of all respiratory flows ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	2499.863
流向碎屑总量(TDET) Sum of all flows into detritus ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	7305.005
系统总流量(T) Total system throughput ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	18958
总生产量(TP) Sum of all production ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	8159
总初级生产计算量(TPP) Calculated total net primary production ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	6678.84
总生物量 Total biomass ($t \cdot km^{-2}$)	68.95
总初级生产计算量/总呼吸量(TPP/TR) Calculated total net primary production/total respiration	2.672
循环指数(FCI) Finn Cycling Index	0.25
平均能流路径(MPL) Finn's mean path length	2.174
聚合度(A) Ascendancy	0.315
连接系数(CI) Connectance index	0.306
系统杂合度(SOI) System omnivory index	0.333
Detrivory:Herbivory: (D:H)	4.8:1

本文使用了 13 个功能组来描述生态系统的结构,虽然基本覆盖了该系统能量流动的过程,并反映了生态系统的状态,但仍显粗糙,尤其是功能组的 P/B 和 Q/B 的参数值均参考邻近水域,这虽然是该模型构建过程中,在调查资料和研究数据缺乏下的通常做法,但显然会影响到该模型在特定水域的置信度,而且胃含物的分析和鉴定也存在一定困难。因此,未来工作中,不仅要继续完善人工生态系统的构建,同时也应加强对关键参数和食性分析的研究,并注意新方法如 N、C 同位素技术的应用等,以更好地提高模型的可信度。

References:

- [1] Shen X Q, Yuan Q, Wang Y L, *et al.* Study on assessment of eco-environmental quality in fishery waters near the Changjiang River estuary and Hangzhou Bay. *Journal of Fisheries of China*, 2003, 27(supp.): 76—81.
- [2] State Oceanic Administration People's Republic of China. The China marine environment bulletin in 2006. 2007. Available at <http://www.soa.gov.cn/hygb/2006hyhj>
- [3] Polovina J J. Model of a coral reef ecosystems I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals. *Coral Reefs*, 1984, 3(1): 1—11.
- [4] Polovina J J. An overview of the ECOPATH model. *Fishbyte*, 1984, 2(2): 5—7.
- [5] Ulanowicz R E. Growth and development; Ecosystem phenomenology. New York: Springer Verlag, 1986. 203.
- [6] Tong L, Tang Q S. A preliminary approach on mass-balance ecopath model of the Bohai Sea. *Chin J Appl Ecol*, 2000, 11(3): 435—440.
- [7] Tong L. Ecopath model: A mass-balance modeling for ecosystem estimation. *Mar Fish Res*, 1999, 20(2): 103—107.
- [8] Chen Z Z, Qiu Y S, Jia X P. Mass-balance ecopath model of Beibu Gulf ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1107—1111.
- [9] Chen Z Z, Qiu Y S, Jia X P. Quantitative model of trophic interactions in Beibu Gulf ecosystem in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(3): 116—124.
- [10] Wang X H, Du F Y, Qiu Y S, *et al.* Study on the ecosystem model of Daya Bay I. A preliminary approach on energy flow model. *South China Fisheries Science*, 2005, 1(3): 1—8.
- [11] Ji H H, Ye S F, Wang J H, *et al.* Variation and assessment of nutrients in the sea area of Jinshan three-islands marine ecological natural reserve. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(2): 36—39.
- [12] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II-A software for balancing steady-state model and calculating network characteristics. *Ecol Model*, 1992, 61: 169—185.
- [13] Christensen V, Pauly D. A draft guide to the ECOPATH II program (version 2.1). *ICLARM Software*, 1992, 6: 72.
- [14] Lin H J, Shao K T, Hwang J S, *et al.* A trophic model for Kuosheng bay in northern Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology*, 2004, 12(5): 424—432.
- [15] Lin H J, Shao K T, Kuo S R, *et al.* A trophic model of a sandy barrier lagoon at Chiku in southwestern Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48: 575—588.
- [16] Froese R, Pauly D, eds. FishBase, World Wide Web electronic publication, Available at <http://www.fishbase.org>, version (06/2004).
- [17] Pauly D, Soriano-Bartz M L. Improved construction, parametrization and interpretation of steady-state ecosystem models. In: Christensen V, Pauly D, eds. *Trophic models of aquatic ecosystems*. ICLAM Conf. Proc. 1993. 26.
- [18] Pauly D, Christensen V, Sambilay V. Some features of fish food consumption estimates used by ecosystem modellers. *ICES Counc. Meet.* 1990. 17, 8.
- [19] Xu S N, He P M. Analysis of phenomena for frequent occurrence of red tides and bioremediation by seaweed cultivation. *J. Fish. China*, 2006, 30(4): 554—561.
- [20] Lindeman R L. The trophic-dynamical aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23: 399—418.
- [21] Heymans J J, McLachlan A. Carbon budget and network analysis of a high-energy beach/surf-zone ecosystem. *Estuar. Coast. Shelf.*, 1996, 43: 485—505.
- [22] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164: 262—270.

参考文献:

- [1] 沈新强,袁骐,王云龙,等.长江口、杭州湾附近渔业水域生态环境质量评价研究. *水产学报*, 2003, 27(增刊): 76~81.
- [2] 国家海洋局. 2006 年中国海洋环境质量公报. 2007.
- [7] 全龄. Ecopath——一种生态系统能量平衡评估模式. *海洋水产研究*, 1999, 20(2): 103~107.
- [8] 陈作志,邱永松,贾晓平. 北部湾生态通道模型的构建. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 1107~1111.
- [10] 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. *南方水产*, 2005, 1(3): 1~8.
- [11] 纪焕红,叶属峰,王金辉,等. 金山三岛海洋生态自然保护区海域营养盐变化趋势与评价. *海洋环境科学*, 2004, 23(2): 36~39.
- [19] 徐姗姗,何培民. 我国赤潮频发现象分析与海藻栽培生物修复作用. *水产学报*, 2006, 30(4): 554~561.