

基于 Ecopath 模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析

刘恩生¹, 李云凯^{2*}, 臧日伟¹, 王辉¹

(1. 安徽农业大学动物科技学院, 安徽 合肥 230036;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为分析和掌握巢湖生态系统结构与功能的特征参数, 结合 2007—2010 年巢湖渔业资源调查数据, 应用 Ecopath with Ecosim 6.1 软件构建了巢湖生态系统的食物网模型。模型由 16 个功能组组成, 包括初级生产者、主要鱼类、无脊椎动物和有机碎屑等。结果显示, 巢湖生态系统食物网主要由 4 个整合营养级构成, 系统规模总流量、总生产量和总消耗量都较大, 分别为 41 003.08、17 937.42 和 4 486.67 t/(km²·a); 能量流动主要发生在 II、III 营养级间; 参照 Odum 的生态系统成熟程度判定指标发现, 巢湖生态系统高的生产量和呼吸比值 (TPP/TR) 和净初级生产量 (NPP), 以及较低的系统连接指数 (CI)、系统杂食指数 (SOI)、Finn's 循环指数 (FCI) 和 Finn's 平均路径长度 (FMPL) 都表明: 巢湖生态系统结构与功能的特征参数远没有达到成熟生态系统的标准, 且劣于富营养化的太湖生态系统。从生态系统结构分析发现, 导致巢湖生态系统退化的关键原因是浮游植物生物量、生产量过高, 被生态系统利用的效率极低, 从而导致生物多样性下降、食物网趋于简单、能量流动不畅。

关键词: 巢湖; 生态系统; Ecopath 模型; 结构与功能

中图分类号: S 917

文献标志码: A

巢湖是大型浅水湖泊, 曾景色秀美、物产丰富。20 世纪 70 年代以来, 巢湖出现了明显的富营养化, 从 80 年代开始, 水污染逐步加重, 湖泊富营养化状况严重。近年来巢湖蓝藻水华频繁暴发、水质不断恶化, 巢湖的生态系统结构与功能已经遭到严重破坏。但有关巢湖生态系统的基础研究工作开展较少, 巢湖生态系统的结构与变化特征不明确^[1]。

生态系统的特征参数是反映生态系统结构与功能变化的重要指标。Odum^[2] 针对生态系统的发育情况提出了 24 项指标描述生态系统特征。而 Ecopath with Ecosim (EwE) 模型可以对生态系统的很多指标进行量化, 被国际上许多生态学家认为将成为新一代研究水域生态系统的核心工具^[3]。国外学者应用这一方法研究水域生态系统的报道很多^[4-7]。我国学者也已对不同类型水域生态系

统开展了类似研究^[8]。但应用这一方法研究巢湖生态系统的报道尚未见。为此, 根据历史资料, 结合近几年的生态调查数据, 以及作者近几年的初步研究结果, 运用 Ecopath with Ecosim 软件对巢湖生态系统的特征参数进行了初步分析。

1 材料与方法

1.1 Ecopath 模型原理

Ecopath 模型定义生态系统是由一系列生态关联的功能组 (box 或 functional group) 组成, 所有功能组成分要覆盖生态系统能量流动全过程, 这些功能组成分的相互联系体现了整个系统的能量循环过程^[5]。模型用一组线性方程联立来定义一个生态系统, 其中每一个线性方程代表生态系统中的一个功能组^[9]:

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

收稿日期: 2013-10-28

修回日期: 2013-12-12

资助项目: 水体污染控制与治理科技重大专项经费资助 (2011ZX07103-002); 上海市教委晨光计划 (10CG52); 上海市教委创新项目 (11YZ155)

通信作者: 李云凯, E-mail: ykli@shou.edu.cn

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)。模型需输入 6 个基本参数: 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。一般 EE_i 参数较难获得, 可由模型通过其他参数计算出来^[8]。

1.2 功能组划分

把生物学和生态学特征接近的生物划分为一个功能组。本研究根据不同生物种类的食性、个体大小和生长特性把巢湖生态系统分成 16 个功能组 (表 1)。

表 1 巢湖生态系统功能组
Tab.1 Group definition of Lake Chaohu ecosystem model

编号 number	名称 functional group	组成成份 species
1	食鱼性鱼类	piscivorous 翘嘴鲌 (<i>Erythroculter ilishaeformis</i>) 蒙古鲌 (<i>Erythroculter mongolicus</i>) 红鳍原鲌 (<i>Cultrichthys erythropterus</i>) 乌鳢 (<i>Channa argus</i>) 鳊 (<i>Siniperca chuatsi</i> , <i>Siniperca kneri</i>)
2	大银鱼	large icefish 大银鱼 (<i>Protosalanx chinensis</i>)
3	银鱼	icefish 太湖新银鱼 (<i>Neosalanx taihuensis</i>) 寡齿银鱼 (<i>Neosalanx ologodontis</i>) 雷氏银鱼 (<i>Reganisalanx branchystralis</i>) 等
4	鲚	anchovy 鲚 (<i>Coilia ectenes taihuensis</i>) 似鲚 (<i>Toxabramis swinhonis</i>) 间鳊 (<i>Hemirhamphus kurumeus</i>) 麦穗鱼 (<i>Pseudorasbora parva</i>) 等
5	青鱼	black carp 青鱼 (<i>Mylopharyngodon piceus</i>)
6	鲤	common carp 鲤 (<i>Cyprinus carpio</i>)
7	鲫	golden carp 鲫 (<i>Carassius auratus</i>)
8	鲢、鳙	silver and bighead carp 鲢 (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>) 鳙 (<i>Aristichthys nobilis</i>)
9	虾类	shrimps 秀丽白虾 (<i>Palaemon modestus</i>) 日本沼虾 (<i>Macrobrachium nipponens</i>)
10	蟹类	crabs 中华绒螯蟹 (<i>Eriocheir sinensis</i>) 等
11	贝类	molluscs 三角帆蚌 (<i>Hyriopsis cumingii</i>) 河蚬 (<i>Corbicula fluminea</i>) 等
12	其它底栖动物	other benthos 铜锈环棱螺 (<i>Ballamya purificata</i>) 水生昆虫等
13	浮游动物	zooplanktons 角突网纹溇 (<i>Ceriodaphnia cornuta</i>) 长刺溇 (<i>Daphnia longispina</i>) 多刺秀体溇 (<i>Diaphanosoma sarsi</i>) 等
14	浮游植物	phytoplanktons 蓝藻 (Cyanophyta), 硅藻 (Bacillariophyta), 隐藻 (Cryptophyta), 绿藻 (Chlorophyta), 裸藻 (Euglenophyta), 金藻 (Chrysophyta) 等
15	水生植物	submerged macrophytes 微齿眼子菜 (<i>Potamogeton maackianus</i>), 苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>), 马来眼子菜 (<i>Potamogeton malaianus</i>), 聚草 (<i>Myriophyllum spicatum</i>) 等
16	有机碎屑	detritus 有机碎屑

1.3 数据来源

模型输入的 6 个基本参数 B_i 、 $(P/B)_i$ 、 $(Q/B)_i$

和 EX_i 的来源: B_i : 鱼类生物量根据巢湖渔业管理局所提供的巢湖 2000—2007 年渔

获量统计数据,结合调查和估计的捕捞死亡率推算而来:捕捞前的单位面积生物量(t/km^2) = 渔获量(t) ÷ 捕捞死亡率% ÷ 760 km^2 (巢湖水面面积)。巢湖1989—2007年渔获量统计数据是按银鱼、毛鱼(鲚)、虾类、面鱼(大银鱼)、杂大鱼、蟹类、贝类等7个类型进行统计的。根据巢湖渔业统计习惯,杂大鱼包括白鱼20%,鲤30%,鲫20%,鲢、鳙合占15%,其余15%主要是青鱼等。其中,白鱼包括翘嘴鲌、蒙古鲌、红鳍原鲌和少量乌鳢、鳊等,定义为鱼食性鱼类。鲚占总渔获量54.26%,包含了野杂鱼等,但在历年渔获量统计中没有单独分开,定义为鲚。由此可计算出8组鱼类和虾类、蟹类、贝类的历年渔获量,然后根据调查的捕捞死亡率推算出生物量(表2)。模型中鱼类生物量是按照2000—2007年的平均渔获量推算,因此,也是相应年份的平均生物量。这一分组基本能说明不同食性、生态习性鱼类的生物量情况,也是唯一可得的长期连续监测数据。

浮游动物、底栖动物生物量根据过龙根^[10]调查数据。浮游植物生物量根据姜霞等^[11]3月份

Chl. *a* 6.9 mg/m^3 ,夏季8月底 Chl. *a* 146.37 mg/m^3 ,全年平均为 Chl. *a* 76.635 mg/m^3 ,按照平均水深3.12 m计算,巢湖单位面积水面 Chl. *a* 折算为239.101 mg/m^2 。按照1 mg Chl. *a* 相当于400 mg 浮游植物生物量折算^[12],巢湖单位面积水面浮游植物生物量相当于95.64 t/km^2 。

沉水植物生物量根据任艳芹等^[13]调查数据。

碎屑量、 $(P/B)_i$ 和 $(Q/B)_i$:为了与国内相近富营养化湖泊的有关研究进行对比,参考宋兵^[14]在太湖的研究。

EE_i : EE_i 参数较难获得,由模型通过其它参数计算出来。 DC_{ij} :鱼类的食物组成(表3)参考刘恩生等^[15-16]。巢湖鱼类的食物组成和太湖非常接近,参照刘恩生等^[17]。进行模型平衡调试时,对食物组成数据进行了微调。

EX_i :根据渔获量数据输入。

基本参数输入模型后,通过调试 P/B 、 Q/B 、 EE 和 DC_{ij} 等参数,使模型中每一功能组的输入和输出全部相等,并使各功能组生态营养转换效率 $EE_i < 1$ 。

表2 根据巢湖渔获量和捕捞死亡率折算的生物量分类数据
Tab.2 Fishery landings and biomass estimated from fishing mortality

年份 year	大银鱼											合计 sum
	鲚 anchovy	银鱼 icefish	large ice fish	虾类 shrimps	蟹类 crabs	鲤 common carp	鲫 golden carp	鲢、鳙 silver and bighead carp	食鱼性 鱼类 piscivorous	青鱼 black carp	贝类 molluscs	
2000/t	5 031	433	30	1 654	8	402.3	268.2	201.2	268.2	201.2	450	8 947
2001/t	5 430	484	32	1 682	8	435	290	217.5	290	217.5	700	9 786
2002/t	5 998	380	20	2 131	11	673.8	449.2	336.9	449.2	336.9	700	11 486
2003/t	6 298	418	20	2 262	14	762.3	508.2	381.2	508.2	381.2	700	12 253
2004/t	6 613	420	20	2 375.4	19	811.2	540.8	405.6	540.8	405.6	800	12 951.4
2005/t	6 679.2	420	18	2 425.5	16	810.6	540.4	405.3	540.4	405.3	850	13 112.6
2006/t	8 992	400	18	2 500	16	813	542	406.5	542	406.5	1 000	15 636
2007/t	9 540	360	10	2 650	30	867	578	433.5	578	433.5	950	16 430
平均数/t mean	6 822.7	414.4	21.0	2 210.0	15.3	696.9	464.6	348.5	464.6	348.5	768.8	12 575.3
比例/% proportion	54.26	3.3	0.17	17.57	0.12	5.54	3.69	2.77	3.69	2.77	6.11	100
捕捞死亡率/% fishing mortality	95.60*	95**	95**	80**	95**	77.24***	77.24*	90**	90**	80**	50**	84.098
折算总生物量/t total biomass	7 136.72	436.21	22.11	2762.50	16.11	902.25	601.50	387.22	516.22	435.63	1 537.60	14 754.07
单位面积生物量/ (t/km^2) biomass	9.39	0.57	0.03	3.63	0.02	1.19	0.79	0.51	0.68	0.57	2.02	19.41

注: * 根据年龄组成计算的捕捞死亡率; ** 为根据总体调查的估计死亡率; *** 为参照鲫的估计死亡率

Notes: * estimated from age structure; ** estimated from the mortality in the survey; *** estimated from the mortality of *Carassius auratus*

表 3 输入模型的食物组成数据
Tab. 3 Diet composition of the balanced model of Lake Chaohu ecosystem

被食者\捕食者 prey\predator	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 食鱼性鱼类 piscivorous													
2 大银鱼 large icefish													
3 银鱼 icefish	0.01	0.02											
4 鲚 anchovy	0.79	0.02											
5 青鱼 black carp													
6 鲤 common carp	0.01												
7 鲫 golden carp	0.04												
8 鲢、鳙 silver and bighead carp													
9 虾类 shrimps	0.15	0.01		0.04	0.25	0.05							
10 蟹类 crabs													
11 贝类 molluscs	0	0	0	0	0.5	0.1	0.01			0.15			
12 其它底栖动物 other benthos					0.15	0.15	0.05			0.15			
13 浮游动物 zooplanktons		0.95	0.95	0.96				0.114	0.35	0.05	0.1	0.1	
14 浮游植物 phytoplanktons			0.05				0.65	0.886	0.15	0	0.15	0.15	0.65
15 水生植物 submerged macrophytes						0.35	0.04			0.2			
16 有机碎屑 detritus					0.1	0.35	0.25		0.5	0.45	0.75	0.75	0.35
17 合计 sum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2 结果与分析

的巢湖生态系统模型基本输入参数和模型计算结果(表 4)。

模型基本参数输入后,通过调试,得到平衡后

表 4 巢湖生态系统模型基本输入和参数
Tab. 4 Basic input and estimated parameters for Lake Chaohu ecosystem model

编号 number	功能组 functional groups	营养级 trophic level	生物量/(t/km ²) biomass	EX_i	P/B	Q/B	EE_i	P/Q
1	食鱼性鱼类 piscivorous	3.87	0.68	0.405	0.974	3.20	0.611	0.304
2	大银鱼 large icefish	3.04	0.03	0.0285	1.862	16.65	0.800	0.112
3	银鱼 icefish	2.95	0.57	0.405	2.373	27.20	0.323	0.0872
4	鲚 anchovy	3.01	9.39	6.735	1.283	11.35	0.703	0.113
5	青鱼 black carp	3.05	0.57	0.300	0.912	11.54	0.577	0.079 0
6	鲤 common carp	2.34	1.19	0.600	0.960	10.69	0.544	0.089 8
7	鲫 golden carp	2.07	0.79	0.402	1.130	12.30	0.548	0.091 8
8	鲢、鳙 silver and bighead carp	2.11	0.51	0.300	0.990	6.90	0.594	0.143
9	虾类 shrimps	2.35	3.63	0.2025	3.092	40.00	0.631	0.077 3
10	蟹类 crabs	2.38	0.02	0.015	1.150	15.00	0.652	0.076 7
11	贝类 molluscs	2.10	2.02	0.6225	1.326	10.00	0.811	0.133
12	其它底栖动物 other benthos	2.10	0.91		4.130	200.00	0.921	0.020 7
13	浮游动物 zooplanktons	2.00	7.97		25.000	500.00	0.942	0.050 0
14	浮游植物 phytoplanktons	1.00	95.64		185.000		0.150	
15	水生植物 submerged macrophytes	1.00	4.457		2.250		0.489	
16	有机碎屑 detritus	1.00	311.60				0.088	

注:斜体加粗为模型自动计算数据

Notes: values in italic are estimated by the model

2.1 生态系统的总体特征

Ecopath 模型平衡后,得到评价巢湖生态系统特征的 19 项指标(表 5)。

巢湖生态系统规模的指标总流量、总生产量和总消耗量都很大,分别为 41 003.08、17 937.42 和 4 486.67 t/(km²·a)。表征巢湖生态系统成熟程度的关键指标 TPP/TR (total primary production/total respiration)、系统连接指数

(connectance index) 和系统杂食指数 (system omnivory index) 分别为 13.53、0.20 和 0.092。Finn's 循环指数 (Finn's cycling index) 是系统中循环流量与总流量的比值, Finn's 平均路径长度 (Finn's mean path length) 是每个循环流经食物链的平均长度。巢湖生态系统的 Finn's 循环指数仅为 3.32%, Finn's 平均路径长度为 2.27 (表 5)。

表 5 巢湖生态系统的总体特征
Tab.5 The total system properties of the ecosystem in Lake Chaohu

指标 parameter	巢湖 Lake Chaohu	太湖 1990s ^[18] Lake Taihu for 1990s
系统总消耗量/[t/(km ² ·a)] sum of all consumption	4 486.67	3 629.80
系统总输出/[t/(km ² ·a)] sum of all exports	16 796.60	3 616.77
系统总呼吸量/[t/(km ² ·a)] sum of all respiratory flows	1 308.45	1 130.61
系统流入碎屑量/[t/(km ² ·a)] sum of all flows into detritus	18 411.37	5 208.73
系统总流量/[t/(km ² ·a)] total system throughput	41 003.08	13 586.00
系统总生产量/[t/(km ² ·a)] sum of all production	17 937.42	4 561
渔获物平均营养级 mean trophic level of the catch	2.87	2.92
净效率 gross efficiency (catch/net p. p.)	0.000 57	0.068
净初级生产量/[t/(km ² ·a)] calculated total net primary production (NPP)	17 703.42	4 350.15
系统初级生产量/系统总呼吸量 total primary production/total respiration (TPP/TR)	13.53	3.85
系统净生产量/[t/(km ² ·a)] net system production	16 394.97	3 219.54
系统初级生产量/系统总生物量 total primary production/total biomass	137.92	11.66
系统总生物量/系统总流量 total biomass/total throughput	0.003	0.03
系统总生物量(除去碎屑部分)/[t/(km ² ·a)] total biomass(excluding detritus)	128.36 **	373.03
系统连接指数 connectance index (CI)	0.20	0.21
系统杂食指数 system omnivory index (SOI)	0.092	0.04
Finn's 循环指数/% Finn's cycling index (FCI)	3.32	11.58
Finn's 平均路径长度 Finn's mean path length (FMPL)	2.27	2.87

注:** 代表不包含碎屑 311.6 t/(km²·a)

Notes: ** means excluding detritus 311.6 t/(km²·a)

2.2 生态系统的营养级结构

模型计算分析发现,整个巢湖生态系统不同功能组的营养流可以合并为 5 个整合营养级 (aggregated trophic level)。巢湖生态系统的总流量、生物量主要分布在 4 个营养级:流营养级 I 的流量 36 512 t/km²、占总流量的 89.05%;营养级 I (不包括碎屑)的生物量 100.1 t/km²、占总生物量(不包括碎屑)的 77.98%;捕捞量主要发生在营养级 II 和营养级 III,分别占总捕捞量的 18.13% 和 76.71%,合计占总捕捞量的 94.84% (表 6)。

表 6 巢湖生态系统各整合营养级的总流量、生物量和捕捞量的分布

Tab.6 Distribution of throughput, biomass and catches through aggregated trophic levels in Lake Chaohu ecosystem

营养级 trophic level	总流量/ (t/km ²) throughout	生物量/ (t/km ²) biomass	捕捞量/ (t/km ²) catch
V	0.025 6	0.007 98	0.004 76
IV	4.964	0.851	0.512
III	201	12.33	7.683
II	4 285	15.08	1.816
I	36 512	100.1	0
合计 total	41 003	128.369	10.015 76

2.3 营养级的能量传递和转换效率

巢湖生态系统的初级生产者生产量为 $17\,703\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 被摄食量为 $2\,656\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 仅占初级生产者生产量的 15.00%, 其余流至碎屑进入再循环。从各个营养级流入碎屑的营养流合计为 $33\,061\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 被摄食的碎屑量为 $1\,625\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 仅占碎屑总量的 4.92%, 其余因矿化沉积脱离系统。整个营养级 I 流入到营养级 II 的营养流为 $4\,281\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 占系统总流量 ($41\,003\text{ t}/\text{km}^2$) 的 10.45%。流入到营养级 III、IV、V 的能量占系统总流量的比例分别为 0.49%、0.012% 和 0.00063% (图 1)。

巢湖生态系统的能量流动在牧食食物链和碎屑食物链各占 50%。能量流动主要发生在 3 个营养级。来自初级生产者的能量传输到营养级 II 的转换效率仅为 4.7%, 营养级 II 和营养级 III 间的转换效率为 6.3%; 营养级 III 和营养级 IV 的转换效率最高, 为 10.8%。来自碎屑的能量传输到营养级 II 的转换效率为 4.7%, 营养级 II 和营养级 III 间的转换效率为 6.2%, 营养级 III 和营养级 IV 的转换效率为 10.9%。来自初级生产者和碎屑的平均能量转换效率分别为 6.9% 和 6.8%, 系统的总转换效率为 6.9% (表 7)。

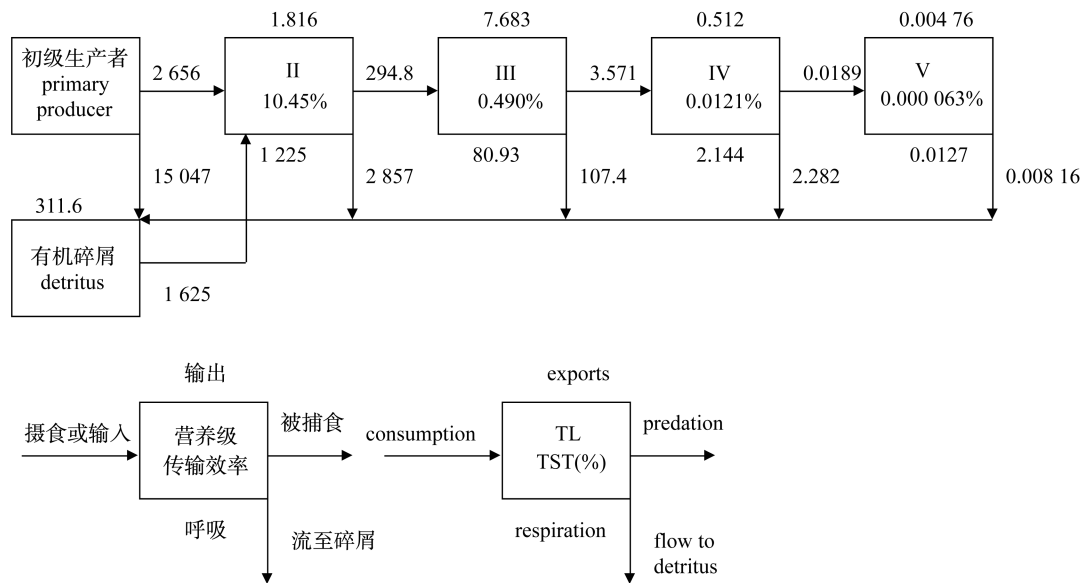


图 1 巢湖生态系统各营养级间的营养流动

Fig. 1 The trophic flows transmitted through aggregated trophic levels in Lake Chaohu ecosystem

表 7 巢湖生态系统转换效率

Tab. 7 Transfer efficiency between trophic levels in Lake Chaohu ecosystem model

来源 source	营养级 trophic level		
	II	III	IV
初级生产者 primary producer	4.7%	6.3%	10.8%
碎屑 detritus	4.7%	6.2%	10.9%
总能流 all flows	4.7%	6.3%	10.8%
来自碎屑的能量比 proportion of total flow originating from detritus	50%		
初级生产者转换效率 from primary producers	6.9%		
碎屑转换效率 from detritus	6.8%		
总转换效率 total	6.9%		

3 讨论

3.1 巢湖生态系统的总体特征

Odum 评价生态系统的 24 项指标是基于能

量学、营养物质循环、种群与群落结构、生态系统稳定性和总体策略 5 个方面^[2]。本研究得到的 19 项量化指标说明, 巢湖生态系统的主要特征远没有达到成熟生态系统标准, 且劣于富营养化湖

泊太湖生态系统^[18-19]。

模型结果显示,巢湖生态系统总流量高达 41 003 t/(km²·a),是太湖 13 586 t/(km²·a)的 301.8%;总生产量为 17 937 t/(km²·a),是太湖的 393.3%;总消耗量为 4 487 t/(km²·a),是太湖的 123.6%(表 5)。

系统初级生产力和系统总呼吸量比值(TPP/TR)、系统连接指数和系统杂食指数是表明生态系统成熟程度的关键指标。巢湖生态系统的成熟程度远低于成熟生态系统标准^[2]。

TPP/TR 值是说明生态系统成熟程度的主要指标。在生态系统发育初期 TPP/TR ≥ 1 或 ≤ 1,在成熟的生态系统中,TPP/TR ≈ 1,而巢湖的 TPP/TR 为 13.530,劣于太湖的 3.85^[18]。这说明巢湖生态系统中有过多的营养物质没有被利用。其主要原因是巢湖蓝藻经常暴发,初级生产者数量巨大^[10-11],生态系统利用率却很低,大量未被利用的浮游植物转化为有机碎屑。在巢湖系统流入有机碎屑的量是 18 411.37 t/(km²·a),是太湖 5 208.73 t/(km²·a)的 353.47%。而转化为有机碎屑后的利用率则更低。巢湖浮游植物和有机碎屑的营养生态效率(EE_i)仅为 0.150 和 0.088(表 4)。

系统连接指数和系统杂食指数是反应系统内部联系复杂程度的指标。越是成熟的生态系统各功能组间联系越强,系统越稳定,成熟生态系统的系统连接指数和系统杂食指数接近于 1^[21]。巢湖的系统连接指数和系统杂食指数分别为 0.20 和 0.092,表明生态系统的内部联系复杂程度很低。

Finn's 循环指数是系统中循环流量与总流量的比值,Finn's 平均路径长度是每个循环流经食物链的平均长度。成熟生态系统的特征之一是物质再循环的比例高,且营养流所经过的食物链长。巢湖生态系统的 Finn's 循环指数仅为 3.32%,远低于太湖的 11.58%;Finn's 平均路径长度为 2.27,甚至低于太湖的 2.87(表 5)。

总体来看,巢湖生态系统的主要指标与 Odum^[2]提出的成熟生态系统相比差别很大,属于发展中的“幼态”生态系统。巢湖生态系统主要指标反映的是——能量学特征表现为系统总生产量很大,远远超过系统总呼吸量(TPP/TR = 13.53);营养物质循环特征表现为再循环比率很低,营养物质停留与保存时间很短;物种与群落结

构特征表现为种类组成简单,物种多样性很低,以生命周期短、个体较小、生长较快的 r 选择种类为主;稳定性和总体策略特征表现为抗干扰能力很差,能量和营养物质利用效率很低。

3.2 巢湖生态系统的营养级结构

巢湖生态系统的总流量、生物量和捕捞量主要分布在 4 个营养级。各个营养级的总流量、生物量分布呈典型的金字塔型。

营养级 I 主要由浮游植物、有机碎屑和水生植物构成,流经营养级 I 的流量为 36 512 t/(km²·a)、占总流量的 89.05%;营养级 I (不包括碎屑)的生物量 100.1 t/(km²·a)、占总生物量(不包括碎屑)的 77.98%。营养级 II 主要由浮游动物、鲢、鳙和鲤、鲫、虾、蟹类及贝类等底栖动物构成,是巢湖能够利用初级生产者的主要生物成员。流经营养级 II 的流量为 4 285 t/(km²·a)、占总流量 10.45%,占营养级 I 流量的 11.74%;营养级 II 的生物量为 15.08 t/(km²·a)、占总生物量(不包括碎屑)的 11.75%,是营养级 I 生物量的 15.06%。营养级 III 主要是浮游动物食性的鲚、大银鱼、银鱼和底栖动物食性的青鱼。流经营养级 III 的流量仅 201 t/(km²·a)、占总流量的 0.49%,占营养级 II 流量的 4.69%;营养级 III 的生物量为 12.33 t/(km²·a)、占总生物量的 9.61%,是营养级 II 生物量的 81.76%。营养级 IV 主要是食鱼性鱼类。流经营养级 IV 的流量仅 4.964 t/(km²·a)、占总流量的 0.012%,占营养级 III 流量的 2.47%;营养级 IV 的生物量为 0.851 t/(km²·a)、占总生物量的 0.66%,是营养级 III 生物量的 0.690%。巢湖捕捞量主要发生在营养级 II 和营养级 III,合计占总捕捞量的 94.84%,其中营养级 III 占总捕捞量的 76.71%(表 6)。

巢湖生态系统的营养级结构特点是:由浮游植物、有机碎屑和水生植物等初级生产者构成的营养级 I 的数量巨大,其主要成分是蓝藻为主的浮游植物;而能够利用初级生产者的主要生物成员是由浮游动物、鲢、鳙和鲤、鲫、虾、蟹类及贝类等底栖动物构成的营养级 II,其中能够直接利用浮游植物的浮游动物、鲢、鳙数量不大;主要由浮游动物食性的鲚、大银鱼、银鱼和底栖动物食性的青鱼构成的营养级 III,其主要成分是浮游动物食性、近年来快速增加的绝对优势种鲚;主要由食鱼性鱼类构成的营养级 IV 数量很小,其主要成分是

以鲚为食、在不断减少仅维持在较低数量的鮠鱼。

3.3 巢湖生态系统营养级的能量传递特点

营养级的流量 (throughput) 是指单位时间内流经某个营养级的所有营养流的量。每个营养级的总流量由输出、被摄食、呼吸和流至碎屑的量共同组成。初级生产者和碎屑的流量等于其生产量,营养级 II 及其以上营养级的流量等于其摄食量。每个营养级的传输效率 (transfer efficiency) 等于其输出和被摄食的量之和与其营养流总量的比值。巢湖生态系统营养流通的主要途径包括 2 条,一条是牧食食物链:浮游植物→浮游动物→小型鱼虾类→渔业捕捞和食鱼性鱼类。另一条是碎屑食物链:再循环的有机物→碎屑→底栖动物→小型鱼虾类→渔业捕捞和食鱼性鱼类。2 条食物链在生态系统中同等重要。巢湖生态系统的能量效率很低。来自初级生产者的能量传输到营养级 II 的转换效率仅为 4.7%,来自碎屑的能量传输到营养级 II 的转换效率为 4.7%,来自初级生产者和碎屑的平均能量转换效率分别为 6.9% 和 6.8%,系统的总转换效率仅为 6.9%。这是因为,随着近年来富营养化加剧,蓝藻暴发频繁,巢湖生态系统的生物多样性下降、食物网趋于简单、物质循环和能量流动不畅。由于过度捕捞和水体富营养化等导致的大型鱼类的种群结构趋于低龄化,鱼类群落表现为营养级较高的肉食性鱼类数量不断减少,能利用浮游植物的鱼类数量很少,主要以浮游动物为食的鲚成为绝对优势种^[22]。而浮游动物食性鱼类数量的快速增加对浮游动物形成了巨大牧食压力,这更降低了浮游动物对浮游植物和有机碎屑的利用效率。此外,随着巢湖水体富营养化加重,巢湖的底栖动物也在不断减少,能摄食利用浮游植物和有机碎屑的河蚬 (*Corbicula fluminea*)、环棱螺 (*Bellamya* sp.) 种群密度在下降^[23]。

参考文献:

- [1] Ying F C, Zhang Z Y. Survey of Chaohu Lake eutrophication research [J]. Journal of Lake Science, 2003, 15(4): 377 - 384. [殷福才,张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学, 2003, 15(4): 377 - 384.]
- [2] Odum E P. The strategy of ecosystem development [J]. Science, 1969, 164(3877): 262 - 270.
- [3] Tong L. Ecopath model—a mass-balance modeling for ecosystem estimation [J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(2): 103 - 107. [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.]
- [4] Langseth B J, Rogers M, Zhang H Y. Modeling species invasions in Ecopath with Ecosim: An evaluation using Laurentian Great Lakes models [J]. Ecological Modelling, 2012, 247: 251 - 261.
- [5] Ullah M H, Rashed-Un-Nabi M, Al-Mamun M A. Trophic model of the coastal ecosystem of the Bay of Bengal using mass balance Ecopath model [J]. Ecological Modelling, 2012, 225: 82 - 94.
- [6] Nuttall M A, Jordaan A, Cerrato R M, et al. Identifying 120 years of decline in ecosystem structure and maturity of Great South Bay, New York using the Ecopath modelling approach [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(18): 3335 - 3345.
- [7] Tecchio S, Coll M, Christensen V, et al. Food web structure and vulnerability of a deep-sea ecosystem in the NW Mediterranean Sea [J]. Deep Sea Research-Part I: Oceanographic Research Papers, 2013, 75: 1 - 15.
- [8] Huang X F, Bing X W, Zhang X Z. Application of ecopath with ecosim model in fishery ecosystem appraisal [J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(6): 125 - 129. [黄孝锋, 邴旭文, 张宪中. EwE 模型在评价渔业水域生态系统中的应用. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 125 - 129.]
- [9] Christensen V, Walters C J, Pauly D. Ecopath with Ecosim: A User's Guide [C]. Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada and ICLARM, Penang, Malaysia, 2005
- [10] Guo L G. Studies on fisheries ecology in a large eutrophic shallow lake, Lake Chaohu [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. [过龙根. 大型浅水富营养湖泊—巢湖的渔业生态学研究. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2005.]
- [11] Jiang X, Wang S H, Zhong L X, et al. Seasonal Variation Characteristics of Algae Biomass in Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2010, 31(9): 2056 - 2062. [姜霞, 王书航, 钟立香, 金相灿, 孙世. 巢湖藻类生物量季节性变化特征. 环境科学, 2010, 31(9): 2056 - 2062.]
- [12] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. Observation and analysis of Lake Ecological survey [M]. Beijing: Chinese Standards Press, 1999: 75 - 94. [黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北

- 京:中国标准出版社,1999:75-94.
- [13] Ren Y Q, Chen K N. Status of submerged macrophytes and its relationship with environmental factors in Lake Chaohu, 2010 [J]. *Journal of Lake Science*, 2011, 23(3):409-416. [任艳芹,陈开宁. 巢湖沉水植物现状(2010年)及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2011, 23(3):409-416.]
- [14] Song B. Ecosystem modeling study on the fishery and environment of Taihu lake [D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. [宋兵. 太湖渔业和环境的生态系统模型研究. 上海:华东师范大学生命学院, 2004.]
- [15] Liu E S, Bao C H, Yang Q C. Analysis on the diet content of hypophthalmichthys molitrix (cuvieretvalenciennes) and aristichthys nobilis (richardson) under eutrophication in Chaohu Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(3):27-31. [刘恩生,鲍传和,杨启超. 巢湖鲢、鳊在富营养化条件下的食物组成分析. *水生态学杂志*, 2009, 2(3):27-31.]
- [16] Liu E S, Bao C H, Wu C J, et al. Investigation on the Parasite of *Neosalanx tangkahkeii taihuensis* Chen in Lake Chaohu [J]. *Freshwater Fisheries*, 2009, 39(1):50-53. [刘恩生,鲍传和,伍昌俊,等. 巢湖太湖新银鱼寄生虫调查和食物组成. *淡水渔业*, 2009, 39(1):50-53.]
- [17] Liu E S. A study on diet composition of dominant fishes in Lake Taihu [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(3):395-401. [刘恩生. 太湖主要鱼类的食物组成. *水产学报*, 2008, 32(3):395-401.]
- [18] Li Y K, Song B, Chen Y, et al. Changes in the trophic interactions and the community of Lake Taihu (China) ecosystem from 1960s to 1990s [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, 44:337-348.
- [19] Li Y K, Song B, Chen Y, et al. Simulation of ecosystem dynamics of Lake Taihu gusing Ecopath with Ecosim model [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(2):257-265. [李云凯,宋兵,陈勇,等. 太湖生态系统发育的 Ecopath with Ecosim 动态模拟. *中国水产科学*, 2009, 16(2):257-265.]
- [20] Bao J P, Xu Z M. Estimation of phytoplankton primary productivity and fish productivity in Taihu lake [J]. *Freshwater Fisheries*, 1984(5):1-5. [鲍建平,许兆明. 太湖浮游植物初级生产力及鱼生产力估算. *淡水渔业*, 1984(5):1-5.]
- [21] Xu S N, Chen Z Z, He P M. Energy flux and network analysis for an artificial ecosystem of a large enclosed sea area in North Hangzhou Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2065-2072. [徐姗楠,陈作志,何培民. 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*, 2008, 28(5):2065-2072.]
- [22] Guo L G, Xie P, Ni L Y, et al. The status of fishery resources of Lake Chaohu and its response to eutrophication [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(5):700-705. [过龙根,谢平,倪乐意,等. 巢湖渔业资源现状及其对水体富营养化的响应研究. *水生生物学报*, 2009, 31(5):700-705.]
- [23] Deng D G, Li H Y, Hu W M, et al. Effects of eutrophication on distribution and population density of *Corbicula fluminea* and *Bellamya* sp. in Chaohu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8):1502-1506. [邓道贵,李洪远,胡万明,等. 巢湖富营养化对河蚬和环棱螺分布及种群密度影响. *应用生态学报*, 2005, 16(8):1502-1506.]

A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on *Ecopath* model

LIU Ensheng¹, LI Yunkai^{2*}, ZANG Riwei¹, WANG Hui¹

(1. College of Animal Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the data of lake survey conducted during 2007—2010, an mass-balanced ecosystem model of Lake Chaohu was constructed using Ecopath with Ecosim 6.1, with the aim of characterizing its ecosystem structure and functioning, which would help making ecosystem-based management. The model comprised 16 functional groups including primary producers, the main species of fishes, non-fish vertebrates, and detritus. Results showed that the functional groups are organized into four trophic levels. The system throughout, production and consumption are relatively large, with the values of 41 003.08, 17 937.42 and 4 486.67 t/(km² · a), respectively. Flows from trophic II and III dominated the ecosystem. Considering Odum's theory of ecosystem development, Lake Chaohu was placed on a low developmental stage with higher net primary production (NPP), total primary production/total respiration (TPP/R) and lower connectance index (CI), system omnivory index (SOI), Finn's cycling index (FCI) and Finn's mean path length (FMPL). The cause of the degeneration of Lake Chaohu ecosystem was considered to be the high biomass and production of primary producer, phytoplankton and its low rate of utilization.

Key words: Lake Chaohu; ecosystem; Ecopath with Ecosim; structure and functioning

Corresponding author: LI Yunkai. E-mail: ykli@shou.edu.cn