

基于 Ecopath 模型的棋盘山水库生态系统结构和功能分析

韩丽娟¹, 李淑婷², 张鹏¹, 程前^{1*}, 郭丽娜¹, 信朝忠¹, 刘崇煥², 祝鑫龙³, 刘永虎²

(1. 大连市现代海洋牧场研究院, 辽宁大连 116087; 2. 大连市现代海洋牧场集团有限公司, 辽宁大连 116087; 3. 沈阳棋盘山国际风景旅游开发区管理委员会, 辽宁沈阳 110164)

摘要 [目的]为促进棋盘山水库生态系统健康稳定提供参考依据。[方法]基于2021年棋盘山水库生态环境和渔业资源的调查数据,采用Ecopath with Ecosim软件构建了棋盘山水库生态系统的物质平衡Ecopath模型,对生态系统的食物网结构、传递效率、营养交互关系和系统总体特征等进行分析。[结果]棋盘山水库食物网中22个功能组的有效营养级数值为1.000~3.419,营养级较高的功能组为肉食性鱼类。能量流动主要有5级,其中来自初级生产者的平均传递效率为3.13%,来自碎屑的平均传递效率为3.39%。系统总生产量为36 268.078 t/(km²·a),总流量为86 057.620 t/(km²·a),联结指数和系统杂食系数分别为0.205、0.142;总初级生产量/总呼吸量、总生物量/总周转量分别为2.106和0.003。[结论]该研究解析了该水库营养结构和系统发育状况,可为棋盘山水库生态环境的可持续利用和科学管理提供理论依据。

关键词 棋盘山水库; Ecopath模型; 生态系统

中图分类号 Q146 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0191-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.043



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Ecosystem Structure and Functioning of Mount Qipan Reservoir Based on Ecopath Model

HAN Li-juan¹, LI Shu-ting², ZHANG Peng¹ et al (1. Dalian Modern Marine Ranching Research Institute, Dalian, Liaoning 116087; 2. Dalian Modern Marine Ranching Group, Dalian, Liaoning 116087)

Abstract [Objective] To provide reference for promoting the health and stability of Mount Qipan Reservoir ecosystem. [Method] Based on the survey data of the ecological environment and fishery resources of Mount Qipan Reservoir in 2021, a material balance Ecopath model of Mount Qipan Reservoir ecological system was constructed by Ecopath with Ecosim software. The food web structure, transfer efficiency, nutrient interaction relationship and overall system characteristics of the ecosystem were analyzed. [Result] The results showed that the effective nutrient levels of 22 functional groups in the food web of Chipanshan Reservoir ranged from 1.000 to 3.419, and the functional group with higher nutritional level is carnivorous fish. There are mainly 5 levels of energy flow, in which the average transfer efficiency from primary producers is 3.13% and the average transfer efficiency from debris is 3.39%. The total production of the system is 36 268.078 t/(km²·a), and the total flow is 86 057.620 t/(km²·a), the connection index and systematic omnivorous coefficient are 0.205 and 0.142, respectively. Total primary production/total respiration and total biomass/total turnover are 2.106 and 0.003, respectively. [Conclusion] The nutritional structure and system development of the reservoir are analyzed in this paper, it will provide theoretical basis for the sustainable utilization and scientific management of the ecological environment of the reservoir.

Key words Mount Qipan Reservoir; Ecopath model; Ecosystem

棋盘山水库始建于1975年12月,其东西长3.63 km,南北宽1.5 km,面积为5.04 km²,坝顶正常水位达94.5 m,平均水深约6 m,蓄水量约为3 000万m³。水库属辽河水系。流域面积133 km²,主要拦截的是蒲河水,水库实际可用面积400 hm²,总库容8 016万m³,属于中型水库,同时具有显著的调洪防洪作用。但近年来,农业生产和旅游业对水库水质的负面影响日益突现,局部污染加剧,水质状况明显下降。针对当前水库生态系统存在的问题,对水库生态系统的结构和功能进行深入研究,为水库水生态保护提供理论依据非常必要。

Ecopath模型是基于营养动力学原理,以食物网为主线,通过建模量化生态系统的特征参数,描述平衡生态系统中各功能组的生物生产和能量流动,在物质平衡的基础上建立生态系统模型,反映出生态系统结构和功能的特点和变化趋势^[1-3],该模型已被广泛应用于水域生态系统生态学和渔业管理研究^[4]。模型最先由全龄^[5]引入我国,目前已在多地应用,如白洋淀^[6]、巢湖^[7]、密云水库^[8]、太湖^[9]、滹沱水库^[10]、分水江水库^[11]等,为实现基于生态系统的渔业管理提供了

必要的支撑和理论依据。

该研究通过文献查询和现场采样,建立Ecopath模型,分析棋盘山水库生态系统结构和物质流动现状,评价系统的总体特征,探讨该生态系统能量流动规律,分析其成熟度和稳定性,以为促进棋盘山水库生态系统健康稳定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源 笔者于2021年5月(春季)对棋盘山水库进行了渔业资源和生态环境调查。样品采集、保存、处理和分析方法依据《水库渔业资源调查规范》(SL 167—2014)^[12];渔业资源调查网具以笼壶类和单层刺网为主,分别对水域生态环境、浮游生物、底栖生物、渔业资源等样品进行采集;依据棋盘山水库的地理形态分别在上、中、下游设置生态环境和渔业资源调查站点(图1)。

1.2 Ecopath模型 利用Ecopath模型可以方便建立生态系统的能量平衡模型,其基本方程可表示为:

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

式中: B_i 为功能组*i*的生物量; $(P/B)_i$ 为功能组*i*的生产量与生物量的比值; EE_i 为功能组*i*的生态营养效率; B_j 为捕食者*j*的生物量; $(Q/B)_j$ 为捕食者*j*的消耗量与生物量的比值; DC_{ji} 为被捕食者*i*在捕食者*j*的食物组成中所占的比例; EX_i

作者简介 韩丽娟(1984—),女,山西运城人,工程师,硕士,从事生态环境研究。*通信作者,工程师,硕士,从事海洋渔业研究。

收稿日期 2022-11-30; **修回日期** 2023-01-18

为功能组 i 的输出量。

其中,捕食者的食物矩阵(DC)根据各功能组的食物组成确定。

1.3 功能组划分 Ecopath 模型设定的生态系统是由一系列生态关联的功能组组成的,这些功能组能基本涵盖生态系统的能量流动路径。该研究根据生物的生态位和食性特征,将棋盘山水库生态系统划分为 22 个功能组(表 1)。

1.4 数据收集及参数估算 构建 Ecopath 模型需要输入的基本参数,包括各功能组的生物量 B 、 P/B 系数(碎屑不具备此参数)、 Q/B 系数(碎屑和生产者不具备此参数)、生态营养转化效率 EE 、食物矩阵 DC 。其来源以实地调查为主,同时整合了其他多种途径的数据来源,主要有:生物量(B),包括底栖动物、小型浮游动物、枝角类、桡足类和浮游植物 5 个

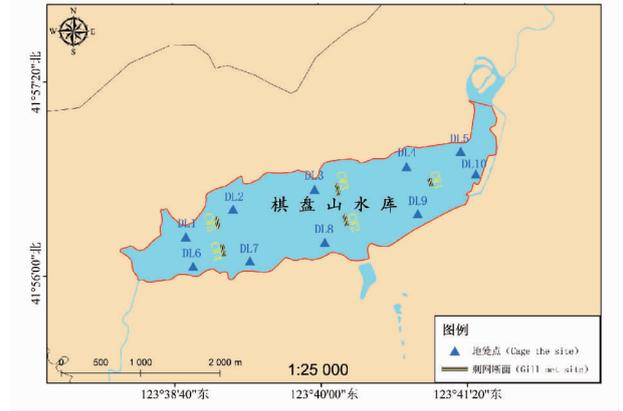


图 1 采样点布置图

Fig.1 Sampling point layout

表 1 棋盘山水库生态系统功能组

Table 1 Definition on model of ecosystem function group in Mount Qipan Reservoir

序号 No.	功能组 Function group	物种组成 Species composition
1	翘嘴鲌(<i>Culter alburnus</i>)	翘嘴鲌
2	鲇(<i>Silurus asotus</i>)	鲇
3	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	泥鳅
4	中华鳖(<i>Trionyx Sinensis</i>)	中华鳖
5	鲢(<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	鲢
6	鳙(<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>)	鳙
7	鲤(<i>Cyprinus carpio</i>)	鲤
8	鲫(<i>Carassius auratus</i>)	鲫
9	黄尾(<i>Xenocypris davidi</i>)	黄尾鲴
10	青鱼(<i>Mylopharyngodon piceus</i>)	青鱼
11	草鱼(<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	草鱼
12	野杂鱼(Other fishes)	鳊鱼、棒花鱼、麦穗鱼、鲮等
13	黄颡鱼(<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>)	黄颡鱼
14	虾蟹类(<i>Macrocostraceall</i>)	秀丽白虾、日本沼虾、中华绒螯蟹等
15	软体动物(Molluscs)	河蚌、螺等
16	底栖动物(Other benthos)	环节动物:渐变长跗摇蚊、台湾长跗摇蚊、克拉泊水丝蚓、正颤蚓、奥特开水丝蚓
17	小型浮游动物(<i>Microzooplankton</i>)	原生动物、轮虫、浮游幼虫等
18	枝角类(<i>Cladocera</i>)	直额裸腹蚤等
19	桡足类(<i>Copepoda</i>)	中华哲水蚤、台湾温剑水蚤、透明温剑水蚤、棘尾刺剑水蚤等
20	沉水植物(<i>Submergedmacrophyte</i>)	苦草、马来眼子菜等
21	浮游植物(Phytoplankton)	硅藻、绿藻、蓝藻、甲藻、隐藻、裸藻、金藻等
22	碎屑(Detritus)	动植物的尸体、粪便以及水库输入的有机物等

功能组;通过对收集的样品进行分析,得到各功能组的物种组成和数量,然后进行生物量估算。生产量与生物量的比值(P/B 系数)包括底栖动物、浮游植物、浮游动物和水生植物,主要参考同纬度水库或河流的文献研究结果。消耗量与生物量的比值(Q/B 系数),鱼类 Q/B 系数采用经验公式;浮游动物、虾蟹类和底栖动物的 Q/B 系数根据国际通用法,浮游动物功能组 Q/B 系数均为 0.05。

生态营养效率(EE),主要受捕捞压力和捕食压力的影响;其中,浮游动物根据国际通用法取值为 0.95;其他功能组 EE 的取值可通过模型计算获得。

食物矩阵(DC),该研究中鱼类和底栖动物食性主要来源于对水库鱼类胃含物的分析结果,其余参考相关文献数

据。研究各功能组食物矩阵见表 2。

1.5 模型调试 系统平衡调节和功能组敏感度分析是模型调试必不可少的环节。

将参数输入模型后,会有一些功能组的 $EE > 1$,说明模型参数之间不平衡。在该研究中,模型的平衡调节从食物矩阵参数值的微调开始,通过对输入食物矩阵值的微调^[13-14],保证所有功能组的 $EE \leq 1$,即可得到平衡 Ecopath 模型的各项参数估算值。

2 结果与分析

通过调试模型基本参数后,得到平衡后棋盘山水库生态系统模型基本输入参数和模型计算结果(表 3)。

2.1 食物网结构 该研究中食物网结构如图 2 所示,图中圆

圈大小代表各功能组的生物量。根据食物网结构,鲢鱼、鳙鱼等滤食性经济鱼类的生物量在消费者中较高,分别为 28.660 和 23.240 t/km²。次级消费者中分别达 5.720、0.895 和 1.524 t/km²,它们是能量流向顶级消费者的重要途径。顶级

消费者中翘嘴鲌生物量为 0.270 t/km²,鲇生物量为 0.030 t/km²,中华鳖生物量为 0.090 t/km²,黄颡生物量为 0.118 t/km²。

表 2 功能组食物组成
Table 2 Diet composition of the functional groups

编号 No.	功能组 Functional group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	翘嘴鲌																			
2	鲇																			
3	泥鳅	0.265	0.280		0.310						0.112			0.580						
4	中华鳖																			
5	鲢																			
6	鳙																			
7	鲤		0.012																	
8	鲫	0.050	0.351																	
9	黄尾鲮																			
10	青鱼																			
11	草鱼																			
12	野杂鱼	0.674	0.202								0.318									
13	黄颡鱼	0.010	0.085																	
14	虾蟹类	0.001	0.070	0.012	0.230			0.007	0.020		0.115			0.015						
15	软体动物				0.360								0.132							
16	底栖动物			0.330				0.220	0.170		0.400	0.010		0.333	0.200		0.050			
17	浮游动物					0.025	0.115			0.215			0.002	0.005		0.050		0.016	0.156	
18	枝角类			0.050		0.122	0.060			0.150			0.008	0.250		0.026				
19	桡足类			0.050		0.028	0.095			0.100			0.009	0.180		0.030				
20	沉水植物			0.252	0.100			0.320	0.425			0.880	0.380	0.080		0.180				
21	浮游植物			0.120		0.795	0.580	0.010	0.125	0.080		0.010	0.249	0.100		0.050	0.480	0.504	0.464	
22	碎屑			0.186		0.030	0.150	0.443	0.260	0.455	0.055	0.100	0.220	0.072	0.185	1.000	0.614	0.520	0.480	0.380

表 3 模型功能组输入与估算参数
Table 3 Input and estimated parameters of the model

序号 No.	功能组 Functional group	营养级 Trophic level	生物量 t/km ² B	生产量/生 物量 P/B	消耗量/ 生物量 Q/B	生态效率 EE	生产量/ 消耗量 P/Q
1	翘嘴鲌	3.265	0.270	0.960	3.980	0.772	0.241
2	鲇	3.419	0.030	0.580	3.460	0.575	0.168
3	泥鳅	2.515	0.500	3.000	12.510	0.849	0.240
4	中华鳖	3.221	0.090	0.560	10.830	0.595	0.052
5	鲢	2.181	5.940	1.210	38.900	0.346	0.031
6	鳙	2.286	4.450	0.430	33.110	0.400	0.013
7	鲤	2.269	1.812	0.290	10.790	0.954	0.027
8	鲫	2.233	2.476	1.860	16.650	0.332	0.112
9	黄尾鲮	2.483	1.446	3.800	19.500	0.175	0.195
10	青鱼	3.200	0.020	0.190	11.540	0.263	0.016
11	草鱼	2.012	0.140	1.650	12.410	0.087	0.133
12	野杂鱼	2.153	0.895	2.155	11.000	0.497	0.196
13	黄颡鱼	3.294	0.118	1.420	8.050	0.714	0.176
14	虾蟹类	2.701	0.928	3.092	41.223	0.495	0.075
15	软体动物	2.000	1.524	1.326	26.520	0.817	0.050
16	底栖动物	2.170	5.720	5.862	6.000	0.691	0.977
17	浮游动物	2.000	5.958	110.905	2 218.101	0.900	0.050
18	枝角类	2.016	6.160	35.580	711.603	0.900	0.050
19	桡足类	2.156	12.000	10.690	213.791	0.900	0.050
20	沉水植物	1.000	72.290	2.253		0.245	
21	浮游植物	1.000	73.980	350.000		0.428	
22	碎屑	1.000	211.600			0.523	

注:表中加粗的数据表示模型估算值。
Note: Bold data in the table represent model estimates.

2.2 传递效率 模型输出的营养级包含 8 级。但由于 VI~VIII 的能量传递较少,所以在分析中只考虑了前 5 个营养级(图 3)。由图 3 可知,水库生态系统的初级生产者生产量为 35 163 t/(km²·a),被摄食量为 11 123 t/(km²·a),占初级生产者生产量的 31.6%,剩余部分流入碎屑。从各个营养级流入碎屑的营养流合计为 28 641 t/(km²·a),其中,被摄食的碎屑量为 10 195 t/(km²·a),其余因沉积脱离系统。整个营养级 I 流入营养级 II 的营养流为 21 318 t/(km²·a),流入营养级 III、IV、V 的能量分别为 908.1、24.80、0.254 t/(km²·a)。

棋盘山水库有 2 条食物链:碎屑食物链和牧食食物链。碎屑食物链中传递往第 II 营养级的能量约为 10 195 t/(km²·a),而牧食食物链为 11 123 t/(km²·a)。能量流动主要发生在前 3 个营养级。棋盘山水库食物网牧食食物链中,各营养级间物质与能量传递效率分别为 4.11%、3.12%、2.15%,平均传递效率为 3.13%;碎屑食物链中,各营养级间物质与能量传递效率分别为 4.57%、3.25%、2.35%,平均传递效率为 3.39%。从中可以看出,牧食食物链传递效率与碎屑食物链传递效率大小

相当。

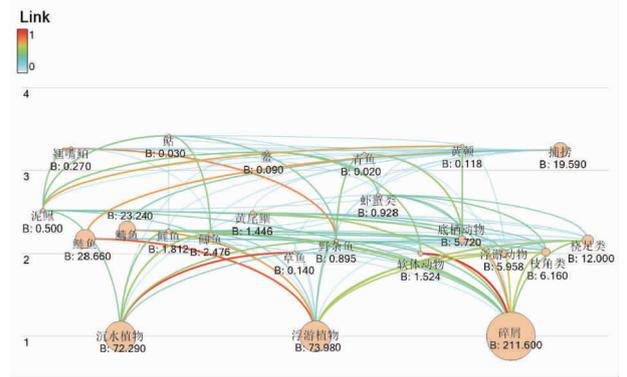


图 2 棋盘山水库食物网结构

Fig.2 Food web structure of the Mount Qipan Reservoir

2.3 交互营养关系 通过混合营养效应模型,求出各功能组的相互作用。其取值范围为-1~1,正面影响取正,负面影响取负。从图 4 可以看出,在棋盘山水库中,鲢鱼和鳙鱼是主要的鱼类养殖品种,生物量相对较大,其生长过程中会消耗

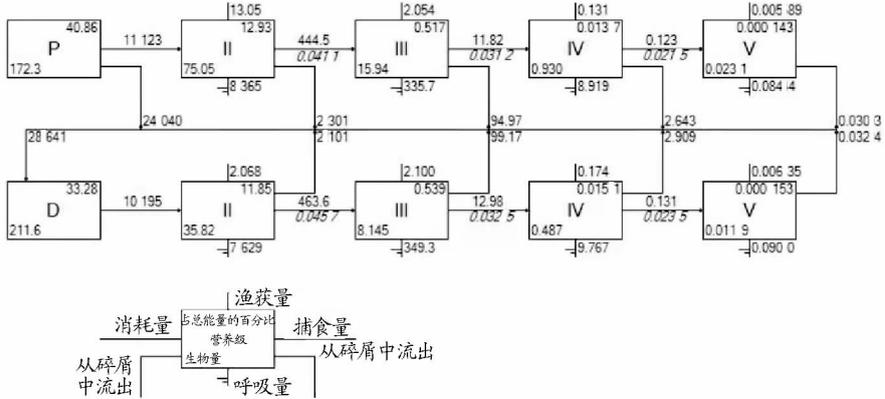
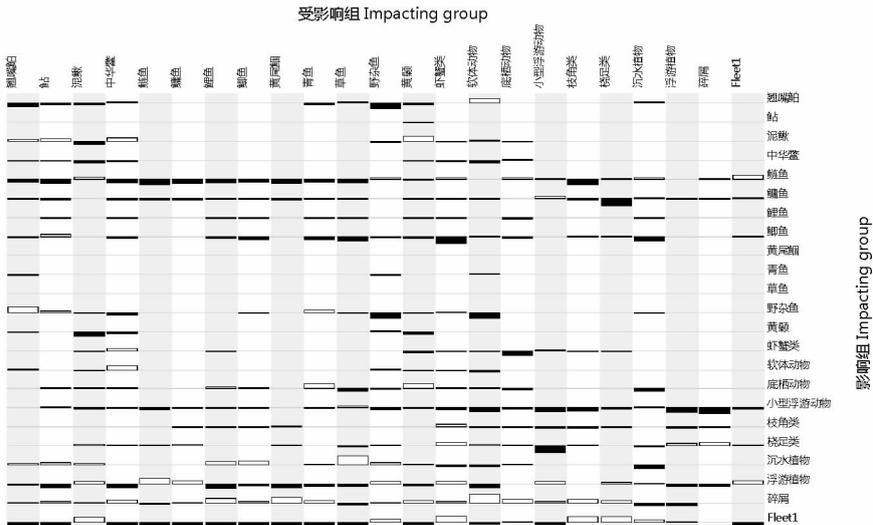


图 3 棋盘山水库营养传递示意

Fig.3 Schematic diagram of nutrient transfer in Mount Qipan Reservoir



注:白格子代表正效应,黑格子代表负效应。

Note: The white grids represent the positive effect, the black grids represent the negative effect.

图 4 棋盘山水库生态系统混合营养效应

Fig.4 The mixed nutritional effects of Mount Qipan Reservoir ecosystem

大量的初级生产者浮游植物和初级消费者浮游动物,对水库中大部分功能组产生负面影响。而翘嘴鲌、黄颡鱼等对被捕食者,如野杂鱼、泥鳅等具有负面效应。作为初级生产者对大多数功能组均有正面效应,需要说明的是,在棋盘山水库中,鲢、鳙主要以浮游植物为食,因此浮游植物对鲢、鳙的正面效应非常显著。

2.4 生态系统总体特征 Ecopath 模型给出了一系列可以反映生态系统状态的总体特征参数,这些参数可以用来研究系统的规模、稳定性和成熟度等系统特征。棋盘山水库生态系统的总体特征参数概括于表 4,其中:系统总流量(total system throughput, TST)为 86 057.620 t/(km²·a),等于总消耗量、总输出量、总呼吸量和流向碎屑总量之和,是衡量系统规模的一种主要指标。系统的总初级生产力(TPP)与总呼吸量(TR)的比值(TPP/TR)是表征系统成熟度的重要指标。对成熟的系统而言,其 TPP/TR 接近于 1;发育中的系统,其 TPP/TR>1;遭受有机污染的系统,其 TPP/TR<1。棋盘山水库生态系统 TPP/TR=2.106,表明棋盘山目前处于一个正在发育的阶段。连接指数(connectance index, CI)能够反映系

表 4 棋盘山水库生态系统的总体特征

Table 4 The total system properties of the ecosystem in Mount Qipan Reservoir

参数 Parameters	统计值 Statistics
总消耗量 Total consumption // t/(km ² ·a)	22 253.221
总输出量 Total output // t/(km ² ·a)	18 465.600
总呼吸量 Total respiration // t/(km ² ·a)	16 697.369
流向碎屑能量 Flow detrital energy // t/(km ² ·a)	28 641.430
系统总流量 Total system flow // t/(km ² ·a)	86 057.620
总生产量 Total production // t/(km ² ·a)	36 268.078
总净初级生产量 Total net primary production // t/(km ² ·a)	35 162.871
总初级生产量/总呼吸量 Total primary production/total respiration	2.106
净系统生产力 Net system productivity // t/(km ² ·a)	18 465.510
总初级生产力/总生物量 Total primary productivity/total biomass	133.073
总生物量/总周转量 Total biomass/total turnover	0.003
总生物量(除碎屑外) Total biomass (excluding detritus) // t/(km ² ·a)	264.237
连接指数 Connectance index (CI)	0.205
杂食性指数 System omnivory index (SOI)	0.142

统内部食物链联系的复杂程度,其值等于实际链接数与理论最大链接数之比。通常,连接指数越高,意味着系统内各种营养物质能够被重复利用的可能性越大,生态系统也越稳定。棋盘山水库生态系统的连接指数为 0.205,表明该湖的营养网络(食物网)结构较为良好,有利于营养物质的循环和充分利用。杂食性指数(system omnivory index, SOI)被计算为一个消费者猎物群体的营养水平的方差。杂食性指数越高,意味着消费者的猎物营养等级越复杂,反映生态系统越成熟,越稳定。棋盘山水库生态系统杂食性指数为 0.142,表明该生态系统的营养结构较为完善。

3 讨论

近年来,棋盘山水库局部养殖区富营养化加重,水质恶化,渔业资源衰退,对周围地区的生产生活造成了极大影响。而绝大多数水体的富营养化都是由于外界输入的营养物质富集造成的。通过减少外部营养物质输入或放养一些滤食性鱼类来抵消一部分输入带来的影响,即可防止或延缓水库的富营养化。有研究表明^[15],通过放养鲢、鳙等滤食性鱼类,加大库体系统的总输出量,控制水体藻类效果明显。基于此,建议在棋盘山水库也尝试放养一定量的鲢、鳙鱼,以控制水体的富营养化趋势。

棋盘山水库系统总流量为 86 057.620 t/(km²·a),略大于国内其他水库如滹水水库和分水江水库。棋盘山水库 TPP/TR 值为 2.106,说明该生态系统处于发展阶段。棋盘山水库 CI 值为 0.205,小于分水江水库的 0.26 和滹水水库的 0.351,与太湖的 0.206 和保安湖的 0.205 相当,说明棋盘山水库食物网结构相对一般;而棋盘山水库的 SOI 为 0.142,高于滹水水库的 0.099 和分水江水库的 0.062,说明棋盘山水库食物网结构相对较为复杂。

棋盘山水库的生态功能作用决定了水库渔业资源管理的重要性。水库鱼类等水生生物的组成结构、种间比例、水层分布、生物量、生产力、捕捞规格、捕捞时间、捕捞量等对于水库的生态系统都产生直接或间接的影响。为充分、循环、持续、高效利用棋盘山水库渔业资源,今后应继续开展其水库渔业资源跟踪调查评价及相关研究,使其更好地发挥经济作用和生态功能作用。

参考文献

- [1] ODUM E P. The strategy of ecosystem development [J]. Science, 1969, 164 (3877): 262-270.
- [2] FINN J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows [J]. Journal of theoretical biology, 1976, 56 (2): 363-380.
- [3] ULANOWICZ R E. Growth and development: Ecosystems phenomenology [M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [4] 米玮洁, 胡菊香, 赵先富. Ecopath 模型在水生态系统评价与管理中的应用 [J]. 水生态学杂志, 2012, 33 (1): 127-130.
- [5] 全龄. Ecopath——一种生态系统能量平衡评估模式 [J]. 海洋水产研究, 1999, 20 (2): 102-107.
- [6] 郭思雅, 王京刚, 王颖, 等. 基于 Ecopath 模型的白洋淀生态系统近 10 年结构与功能变化分析 [J]. 生态毒理学报, 2020, 15 (5): 169-180.
- [7] 刘恩生, 李云凯, 臧日伟, 等. 基于 Ecopath 模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析 [J]. 水产学报, 2014, 38 (3): 417-425.
- [8] 李昌, 张新, 赵龙, 等. 基于 Ecopath 模型的密云水库生态系统结构与物质流动特征 [J]. 生物资源, 2021, 43 (3): 292-302.
- [9] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 等. 基于 Ecopath 模型的太湖生态系统结构与功能分析 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (7): 2033-2040.
- [10] 范泽宇, 白雪兰, 徐聚臣, 等. 基于 Ecopath 模型的滹水水库生态系统特征及鲢、鳙生态容量分析 [J]. 中国水产科学, 2021, 28 (6): 773-784.
- [11] 武震, 贾佩娟, 胡忠军, 等. 基于 Ecopath 模型分析分水江水库生态系统结构和功能 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (3): 812-818.
- [12] 中华人民共和国水利部. 水库渔业资源调查规范: SL 167—2014 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [13] 吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于线性食物网模型估算荣成俚岛人工鱼礁区刺参和皱纹盘鲍的生态容纳量 [J]. 中国水产科学, 2013, 20 (2): 327-337.
- [14] 冯德祥. 淀山湖生态系统结构与能量流动特征的 ECOPATH 模型研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [15] 杨姣姣, 过龙根, 尹成杰, 等. 富营养化初期湖泊放养鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) 控藻生态效果的初步评估 [J]. 湖泊科学, 2019, 31 (2): 386-396.