

DOI: 10.12264/JFSC2021-0178

基于 Ecopath 模型的洩水水库生态系统特征及鲢、鳙生态容量分析

范泽宇¹, 白雪兰¹, 徐聚臣¹, 王晓宁¹, 吕亚兵¹, 侯杰^{1,2}, 何绪刚^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070;

2. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430070

摘要: 为分析洩水水库生态系统结构和能流特征, 探讨鲢、鳙生态容量, 根据 2020—2021 年的渔业资源调查数据, 构建了洩水水库 Ecopath 模型。洩水水库 Ecopath 模型由 15 个功能组组成, 有效营养级范围为 1.000~3.336, 关键种为鳊、鲃类, 生态位重叠图表明鳊条与主要经济物种鲢、鳙生态位重叠度较高。洩水水库循环指数(FCI)、系统连接指数(CI)、系统杂食指数(SOI)分别为 11.35、0.351、0.099, 说明洩水水库有着较高的物质再循环比例, 其功能组之间具有较为密切且复杂的联结关系。洩水水库生态系统总流量(TST)为 44254.860 t/(km²·a), 总初级生产量与总呼吸量的比值(TPP/TR)为 1.394, 表明系统总体规模适宜且趋于成熟。洩水水库鲢、鳙的生物量分别为 2.117 t/(km²·a) 和 16.577 t/(km²·a), 通过模型推算其生态容纳量分别为 30.169 t/(km²·a)和 236.217 t/(km²·a)。

关键词: Ecopath 模型; 鲢; 鳙; 生态系统; 生态容量; 水库

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)06-0773-12

EwE (Ecopath with Ecosim)模型是根据营养动力学原理及能量守恒方程, 在生态系统食物网的基础上, 对生态系统功能结构和能流特征展开研究的静态模型。1984 年 Plovina 为研究夏威夷群岛浅水湾生态系统的能流特征, 创造性开发出一个基于生物量生产和消耗平衡的生态系统模型, 研究能量向食物网传递及在各营养层次的分布情况, 被称为 Ecopath 模型, 即生态通道模型^[1]。后来, 该模型与 Odum 的理论生态学研究成果^[2]相结合, 增加了分析生态系统的稳定性和成熟度等功能。美国学者 Christensen 和 Pauly 对 Ecopath 模型中 P/B 系数、Q/B 系数等重要参数的估算方法进行了研究, 并在开发出的 Ecopath 初代软件中增加了关键种分析、生态位重叠度分析、混合营养级效应分析等诸多分析功能, 将 Ecopath 模型的功能多样化^[3-4]。在 Ecopath 模型基础上, 通过加入时间因素(Ecosin)和空间因素(Ecospace),

组成 EwE 模型, 来分析在时空维度下生态系统各组成成分的变化特征^[5-6], 将 Ecopath 模型的使用范围多维化。在国内, 近几年这方面的研究在迅速增加, 在大亚湾^[7]、海州湾^[8]、荣成俚岛^[9]等海洋生态系统, 以及淀山湖^[10]、千岛湖^[11]、大同湖^[12]、巢湖^[13]、五里湖^[14]等湖泊生态系统, 以及水布娅、隔河岩、高坝洲^[15]、金沙河水库^[16]等大型水库, 都利用 EwE 模型研究了各种生态系统的功能、结构以及能量流动和物质循环等特征。值得特别说明的是, 众多学者在大亚湾^[7]、海州湾^[8]、莱州湾^[17]、珠江口^[18]等海洋生态系统中依据这项原理来确定增殖放流物种的生态系统环境容纳量, 但运用 Ecopath 模型构建内陆大水面渔业增殖放流目标种类的生态容纳量的研究则较为少见。本研究运用 EwE 软件构建了洩水水库生态通道模型, 在研究洩水水库生态系统结构、能量流动和物质循环等特征的同时探求洩水水库鲢、鳙增殖放流种群

收稿日期: 2021-04-18; 修订日期: 2021-05-14.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项项目(2019YFD0900601-02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2662020SCP001).

作者简介: 范泽宇(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业水域环境保护与修复. E-mail: 96fzy@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 何绪刚, 教授, 研究方向为鱼类健康养殖、渔业水域环境保护与修复. E-mail: xgh@mail.hzau.edu.cn

的生态容纳量, 以期为内陆大水面生态渔业的绿色发展模式提供指导性意见。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究于 2020 年 7 月(夏季)和 9 月(秋季)、2021 年 1 月(冬季)对洹水水库展开渔业资源调查, 样品采集、保存、处理和分析方法参照《水库渔业资源调查规范》(SL 167-2014)^[19], 根据洹水水库的地理形态特征共设置 10 个站点(图 1), 对浮

游植物、浮游动物、底栖生物、渔获物等数据进行采集。

1.2 研究方法

1.2.1 模型建立 在 EwE 模型中, 功能组通常为生态功能地位或分类学地位相似物种的集合, 同时模型也允许将一些具有重要经济价值或生态功能的单一物种设定为功能组^[8]。本研究在以上定义的基础上结合洹水水库渔业资源调查中得到的渔获物构成数据, 将洹水水库生态通道模型划分为 15 个功能组(表 1), 基本包含了洹水水库生态

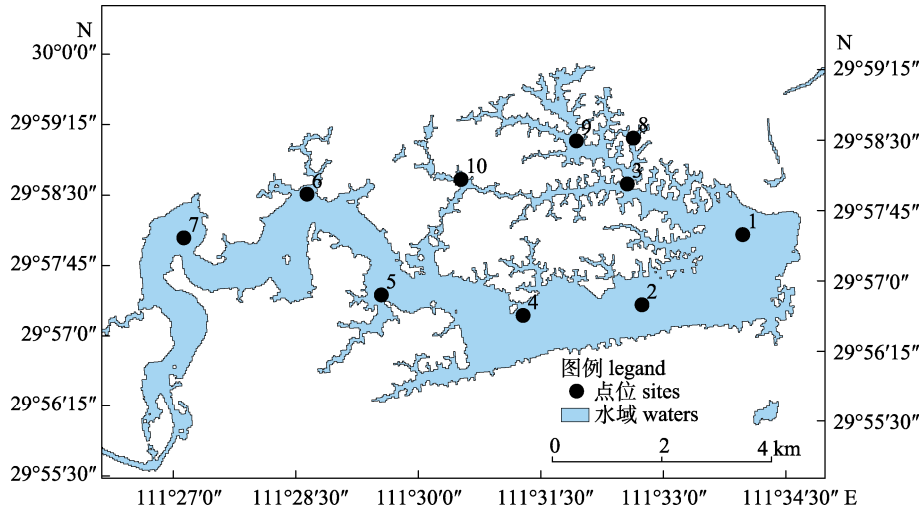


图 1 洹水水库采样站位图
Fig. 1 Sample sites of the Weishui Reservoir

表 1 洹水水库生态系统 Ecopath 模型功能组
Tab. 1 Functional groups of Ecopath model of the Weishui Reservoir

编号 number	功能组 group	物种组成 species composition	编号 number	功能组 group	物种组成 species composition
1	鳊 <i>Siniperca</i>	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	12	浮游动物 zooplankton	原生动物 Protozoan
2	鲢类 <i>Culter</i>	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> 蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i>			轮虫 Rotifer
3	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>			枝角类 Cladocera
4	鳊条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	鳊条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	13	浮游植物 phytoplankton	桡足类 Copepoda
5	鲢 <i>Xenocypris</i>	黄尾鲢 <i>Xenocypris davidi</i>			蓝藻 Cyanophyta
6	鲤 common carp	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>			绿藻 Chiorophyta
7	鲫 crucian carp	鲫 <i>Carassius auratus</i>			硅藻 Bacillariophyta
8	鳙 bighead carp	鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>			裸藻 Euglenophyta
9	鲢 sliver carp	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>			甲藻 Pyrrophyta
10	草食性鱼类 herbivorous fishes	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>			金藻 Chrysophyta
11	底栖动物 meiobenthos	寡毛类 Oligochaeta 摇蚊幼虫 <i>Chironomidae larvae</i>			隐藻 Cryptophyta
			14	异养细菌 heterotrophic bacteria	异养细菌 heterotrophic bacteria
			15	碎屑 ditritus	有机碎屑 organic ditritus

系统功能结构和能量流动全过程。

1.2.2 参数确定 构建一个完整生态通道模型, 必须包含 3 项基本参数, 分别为生物量(B)、年生产量/年生物量(P/B)、年消耗量/年生物量(Q/B)。

本模型中浮游植物、浮游动物、底栖动物、有机碎屑功能组生物量(B)数据通过渔业资源调查数据计算得出^[19], 各鱼类功能组生物量数据(B)由洩水水库库管单位提供, 异养细菌生物量(B)以浮游植物的 17.5%估算^[16]。

浮游植物、浮游动物、底栖动物功能组的 P/B 系数主要参考和洩水水库纬度与生态系统功能特征基本相同的千岛湖生态通道模型^[11]、金沙河水库生态通道模型^[16]中的功能组参数值, 这在模型的构建中是允许的。各鱼类功能组的 P/B 系数则在渔业资源调查渔获物等数据的基础上, 参照 Pauly 提出的 P/B 系数(等同于瞬时死亡率 Z)的经

验估算公式^[20]计算得到。

浮游动物、底栖动物功能组的 Q/B 系数主要参考和洩水水库纬度与生态系统功能特征基本相同的千岛湖生态通道模型^[11]、金沙河水库生态通道模型^[16]中的功能组参数值, 各鱼类功能组的 Q/B 系数则在渔业资源调查渔获物等数据的基础上, 参照 Palomares 等的经验公式^[21]计算得出。

1.2.3 模型食物矩阵组成 洩水水库的食物矩阵组成数据主要来源于相关参考文献^[16]。通过在洩水水库进行稳定同位素分析(未发表数据)得到的各功能组营养级, 调整模型的食物矩阵, 使得模型输出的功能组营养级与稳定同位素分析所得到的功能组营养级较为接近^[8]。本研究各物种之间食物关系主要参考纬度与生态系统结构基本与洩水水库一致的千岛湖生态系统^[11](表 2)。

表 2 洩水水库生态系统 Ecopath 模型食物组成矩阵
Tab. 2 Diet composition matrix for the Weishui Reservoir Ecopath model

功能组 group	捕食者 predator											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
鳊 <i>Siniperca</i>	0.018											
鲃类 <i>Culter</i>	0.077											
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	0.012											
鳊条 <i>Hemiculter leucisculus</i>		0.048										
鲢 <i>Xenocypris</i>	0.091											
鲤 common carp	0.052	0.016										
鲫 crucian carp	0.043	0.010	0.038									
鳙 bighead carp	0.396	0.517										
鲢 sliver carp	0.261	0.409										
草食性鱼类 herbivorous fishes												
底栖动物 meiobenthos			0.359	0.087		0.120	0.050				0.005	
浮游动物 zooplankton			0.061	0.146	0.016	0.161	0.191	0.426	0.213	0.1	0.060	0.01
浮游植物 phytoplankton			0.119	0.318	0.553	0.275	0.314	0.196	0.625	0.3	0.250	0.75
异养细菌 heterotrophic bacteria			0.107	0.017	0.093	0.050	0.042	0.027	0.014		0.100	
碎屑 detritus	0.050		0.316	0.432	0.338	0.394	0.403	0.351	0.148	0.6	0.585	0.24

1.2.4 模型调试 模型的调试包括系统平衡调节和功能组敏感度分析。将所收集到的 B 、 P/B 、 Q/B 等参数值与食物矩阵输入 EwE6.6.5 后, 第一次所得到的模型会有一些功能组的 $EE>1$, 表明各功能组之间不平衡, 生态系统崩溃。本研究模型的平衡调节从食物矩阵参数值的细微调整着手, 通过对模型输入食物矩阵参数值的微调^[9-11], 达到所有功能组的 $EE\leq 1$, 则得到平衡 Ecopath 模型。

模型输入参数的不确定性对模型输出的影响可以通过敏感度分析法估计。具体做法为: 以 50% 的上下基准幅度变化来改变模型中各功能组生物量参数值, 测试从 -50% 到 50% 的生物量参数值变动对洩水水库生态系统模型输出的影响。

1.2.5 增殖生态容纳量的计算与分析 保持模型其他功能组的参数不变, 以适宜幅度同步增加鲢、鳙功能组的生物量观察系统中各功能组能量

转换效益值(EE)变化,当模型中任意一个功能组的 $EE \geq 1$ 时,模型将变得不平衡^[7-9],此时的鲢、鳙生物量值即为生态容纳量。

2 结果与分析

2.1 澧水水库生态系统 Ecopath 模型结构和能流特征

2.1.1 营养级能流特征 在 Ecopath with Ecosim6.6.5 软件中,经过 B 、 P/B 、 Q/B 等参数值的微调,对模型进行平衡调试,将所有 EE 调至小于 1 后,则得到澧水水库生态系统 Ecopath 模型(表 3)。

澧水水库各功能组营养级的范围从 1.000 到 3.336,最大营养级对应功能组为鳙(3.336),其次为鲢类(3.329),主要经济鱼类鲢、鳙的营养级别分别为 2.215 和 2.430。Morissette 等^[22]对全球 150 个 Ecopath 模型的质量进行评价,指数范围在 0.16~0.68,本研究构建的模型经过置信分析得到 Pedigree 指数为 0.632,表明模型输入参数的可靠性十分良好,模型的可信度较高。

在澧水水库 Ecopath 模型中,各营养级的能量传递如图 2 所示,图中连线颜色的深浅表示各营养级间能量传递的多寡,由此可以得知澧水水

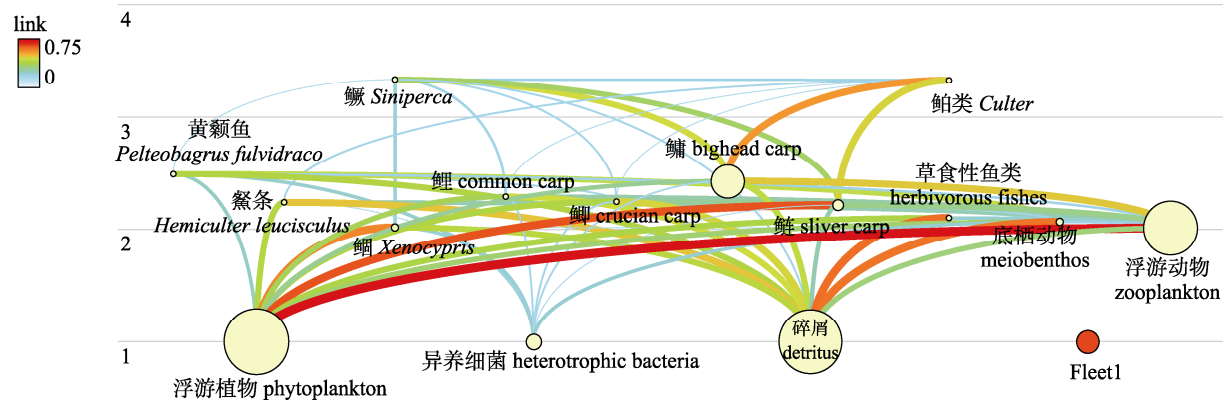


图 2 澧水水库生态路径流程图
Fig. 2 Ecopath flow diagram in the Weishui Reservoir

表 3 澧水水库生态系统 Ecopath 模型功能组参数

Tab. 3 Input and output (bold) parameters of the Ecopath model of the Weishui Reservoir						
功能组 Group	营养级 trophic level	生物量/(t/km ²) <i>B</i>	生产量/生物量 <i>P/B</i>	消费量/生物量 <i>Q/B</i>	生态能量转换 效率 <i>EE</i>	生产量/消费量 <i>P/Q</i>
鳙 <i>Siniperca</i>	3.336	0.036	1.390	9.770	0.127	0.142
鲢类 <i>Culter</i>	3.329	0.250	1.300	7.620	0.083	0.171
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	2.492	0.118	1.130	9.250	0.032	0.122
鳊条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	2.240	0.154	0.989	10.134	0.600	0.098
鲢 <i>Xenocypris</i>	2.016	0.677	2.140	15.845	0.022	0.135
鲤 common carp	2.291	0.090	1.099	6.835	0.493	0.161
鲫 crucian carp	2.246	0.076	2.773	9.135	0.359	0.304
鳙 bighead carp	2.430	16.577	1.228	6.150	0.055	0.200
鲢 sliver carp	2.215	2.117	0.935	7.225	0.440	0.129
草食性鱼类 herbivorous fishes	2.101	0.056	1.470	11.464	0.000	0.128
底栖动物 meiobenthos	2.066	0.622	4.050 ^{[11,16]*}	195.850 ^{[11,16]*}	0.494	0.021
浮游动物 zooplankton	2.010	44.874	18.840 ^{[11,16]*}	376.835 ^{[11,16]*}	0.265	0.050
浮游植物 phytoplankton	1.000	73.731	242.100 ^{[11,16]*}	—	0.714	—
异养细菌 heterotrophic bacteria	1.000	4.153 ^{[16]*}	—	—	—	—
碎屑 detritus	1.000	67.027	—	—	0.247	—

注: 黑体为模型输出参数, *表示数据来源于参考文献。
Note: Bold represent the output parameters of the model. * represent the data were collected from references.

库主要经济物种鲢的主要饵料功能组为浮游植物, 鳙的主要饵料功能组为浮游动物。

整个洩水水库生态系统中初级生产者净生产量为 17850 t/(km²·a), 被初级消费者摄食 12740 t/(km²·a), 其余未被消费的初级生产者生物量则流入碎屑功能组进行物质再循环过程, 整个食物链营养级向上传递过程中 II、III、IV、V 营养级在系统总流量中的占比分别为 55.29%、0.684%、0.00848%、0.000044% (图 3)。在洩水水库生态通道模型中, 浮游植物的生态能量转换效率最高, 达到 0.714, 而异养细菌和有机碎屑的生态能量转换效率则较低(0.247, 表 3), 表明在洩水水库生

态系统中, “牧食链”较“碎屑链”在系统中占比更大, 是洩水水库生态系统的主要食物链, 这也是鲢、鳙养殖型水库生态系统的一大特征。

2.1.2 敏感性分析 运用 Ecopath with Ecosim 6.6.5 软件对洩水水库生态通道模型进行敏感性分析, 结果表明, 以 50%的幅度改变除异养细菌、有机碎屑外的 13 个功能组生物量 *B* 参数值, 模型输出的能流传递效率 *EE* 值敏感度变化区间为 -0.36~0.71 (表 4)。各项功能组生物量参数值增加 50%时, 其能量传递效率 *EE* 值敏感度平均下降 33%; 各项功能组生物量减少 50%时, 各功能组 *EE* 值敏感度平均增加 1 倍。

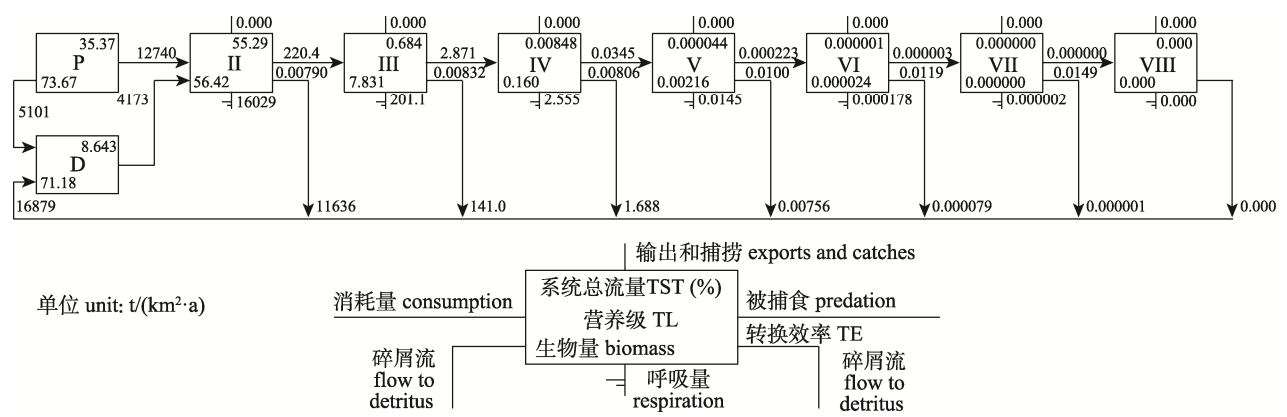


图 3 洩水水库生态系统各营养级间的物质流动

Fig. 3 Materials flows between trophic levels in the Weishui Reservoir ecosystem

表 4 输入参数的变动对输出参数的敏感度分析

Tab. 4 Sensitivity of the estimated parameters when input parameters value were varied

功能组 group	变动 change	功能组敏感度 sensitivity of group												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
鲢 <i>Siniperca</i>	增加 50%		0.04	0.02		0.01	0.09	0.04		0.01	0.34			
	减少 50%		-0.04	0.02		-0.01	-0.09	-0.04		-0.01	-0.34			
鲃类 <i>Culter</i>	增加 50%		-0.03		0.30		0.15	0.05	0.02	0.20				
	减少 50%		0.08		-0.30		-0.15	-0.05	-0.02	-0.20				
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	增加 50%			-0.01				0.10				0.08		
	减少 50%			0.03				-0.10				-0.08		
鳊条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	增加 50%				-0.20							0.03		
	减少 50%				0.60							-0.03		
鳊 <i>Xenocypris</i>	增加 50%					-0.01								
	减少 50%					0.02								
鲤 common carp	增加 50%						-0.16					0.01		
	减少 50%						0.49					-0.01		
鲫 crucian carp	增加 50%							-0.12				0.01		
	减少 50%							0.36				-0.01		

(待续 to be continued)

(续表 4 Tab. 4 continued)

功能组 group	变动 change	功能组敏感度 sensitivity of group												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
鳙 bighead carp	增加 50%								-0.02				0.03	
	减少 50%								0.05				-0.03	
鲢 sliver carp	增加 50%									-0.14				
	减少 50%									0.42				
草食性鱼类 herbivorous fishes	增加 50%										-0.22			
	减少 50%										0.67			
底栖动物 meiobenthos	增加 50%											-0.08	0.00	
	减少 50%											0.25	0.00	
浮游动物 zooplankton	增加 50%												-0.02	0.36
	减少 50%												0.06	-0.36
浮游植物 phytoplankton	增加 50%													-0.24
	减少 50%													0.71

2.1.3 混合营养效应分析

洩水水库 Ecopath 模型的混合营养效应分析如图 4 所示, 图中蓝色矩形为功能组间具协同促进作用的正相关效应, 红色矩形为功能组间具竞争抑制作用的负相关效应, 颜色的深浅程度对应表示效应强度大小, 颜色越深表示强度越大。从图中可以看出各功能组生物量的增加均会对其自身产生不同程度的负相关效应, 所有的功能组生物量增加对浮游动物功能组会起到不同程度的负相关效应, 对有机碎屑功能组则会起到不同程度的正相关效应。洩水水库主要经济物种鲢、鳙生物量的增加, 对浮游动物功能组会起到一定程度上的负相关效应, 对浮游植

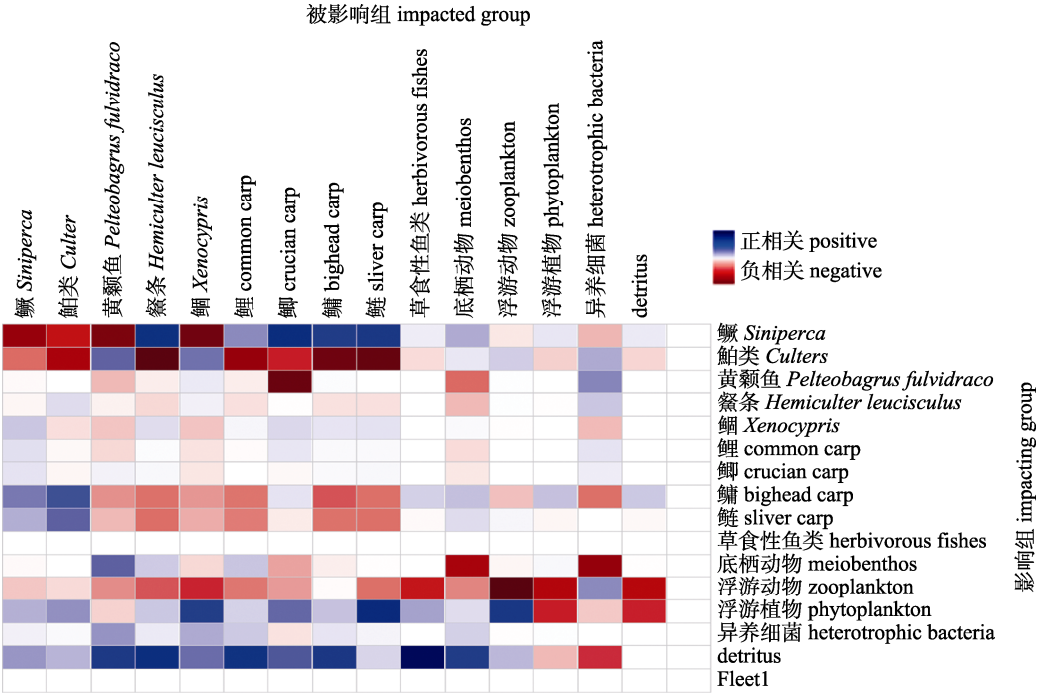


图 4 洩水水库生态系统各功能组间的混合营养效应分析

图中蓝、红色分别表示正、负相关效应, 颜色越深表示相关效应越强.

Fig. 4 Mixed trophic impact analysis of groups in the Weishui Reservoir ecosystem

Blue and red colors in the graph indicate positive and negative correlation effects, respectively, and deeper color indicates stronger correlation effect.

物功能组会起到一定程度的正相关效应。

2.1.4 功能组生态位重叠指数 Ecopath6.6.5 软件在模型构建完成后, 提供了 Niche overlap (生态位重叠图)分析功能, 图 5 为澧水水库生态通道模型中各鱼类功能组生态位重叠度分布图。结果表明, 鳊和鲃类(点 1, 2)、黄颡鱼和鲮(点 3, 5)等功能组具有完全相同的生态位(生态位重叠度为 1); 鳊条和鲢(点 4, 8)、鳊条和鳊(点 4, 9)等功能组具有较高的重叠度, 生态位重叠度分别为 0.990、0.996。

2.1.5 关键功能组分析 关键功能组(keystone)是指在食物链或生态系统中生物量较低但同时不可或缺的结构性功能组, 在 Ecopath 软件中其提供了 3 种分析关键指数(keystoneness index)的方法^[23-24], 本研究采用 Libralato 等^[24]提出的关键功

能组阈值判别法, 即 $KS_i>0$, 来进行分析。关键指数分析结果表明, 澧水水库生态系统中鳊($KS_i=0.0125$)、鲃类($KS_i=0.0220$)为关键种, 鲫($KS_i=-1.363$)、鲤($KS_i=-1.194$)、草鱼($KS_i=-1.229$)等关键指数最低(图 6)。说明在澧水水库生态系统中鳊、鲃类是不可或缺的生态系统结构组成板块, 而鲫、鲤、草鱼则对整体的生态系统具有较低的影响作用。

2.1.6 生态系统特征参数分析 澧水水库生态系统的总体特征参数值(表 5)表明, 澧水水库生态渔业水域系统总碎屑流入量为 $9237.850\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 系统的净生产量为 $5048.106\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。系统的总净初级生产力与总呼吸量间的比值为 1.394。澧水水库鲢、鳊增殖水域生态系统连接指数和系统杂食指数分别为 0.351 和 0.099, 循环指数为 11.35。

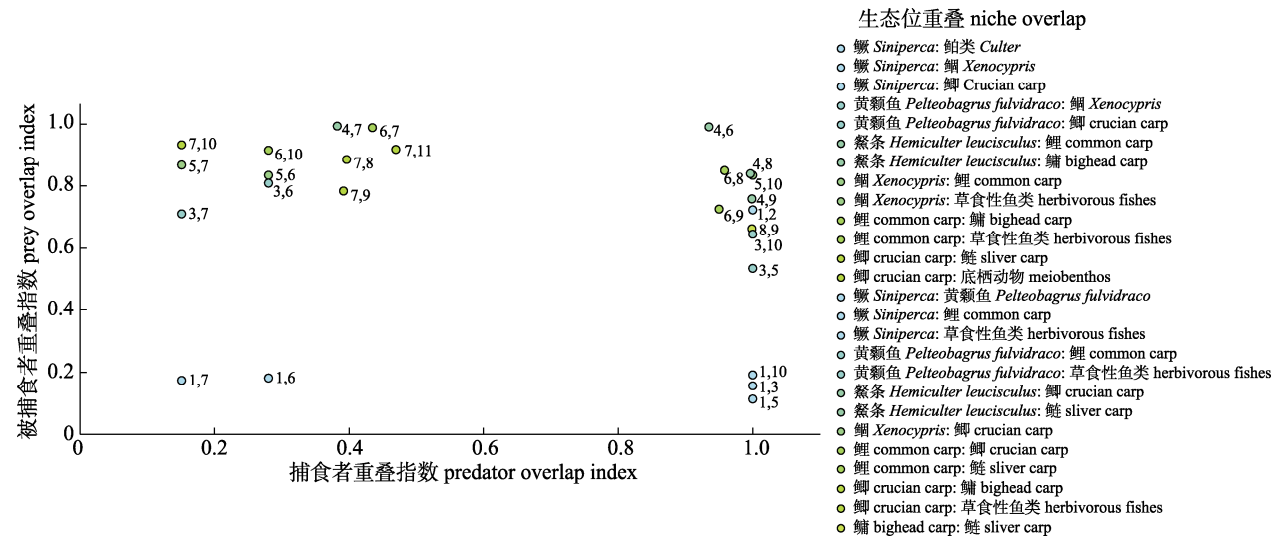


图 5 澧水水库各鱼类功能组生态位重叠图

Fig. 5 Overlapping niche maps of fish functional groups in the Weishui Reservoir

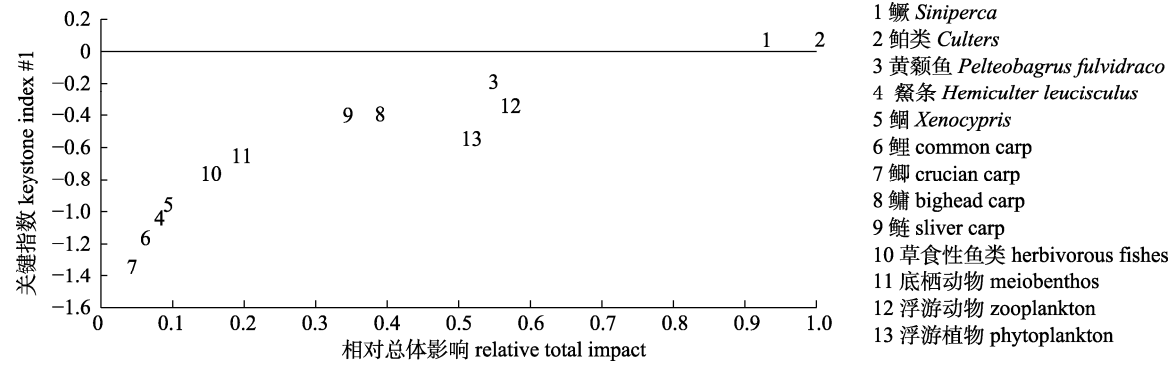


图 6 澧水水库 Ecopath 模型总体影响评价和关键指数^[24]

Fig. 6 Overall impact and keystoneness index (KS_i) values^[24] in Ecopath model of the Weishui Reservoir

表 5 滄水水库生态系统总体特征参数

Tab. 5 Summary statistics of the ecosystem attributes of the Weishui Reservoir

参数 parameter	系统状态 state of the ecosystem	
	1	2
总消耗量/[t/(km ² ·a)] sum of all consumption	17166.770	18720.200
总输出/[t/(km ² ·a)] sum of all exports	5048.143	11742.700
总呼吸量/[t/(km ² ·a)] sum of all respiratory flows	12802.100	6107.610
总碎屑流入量/[t/(km ² ·a)] sum of all flows into detritus	9237.850	16475.770
系统总流量/[t/(km ² ·a)] total system throughput	44254.860	53046.270
总生产量/[t/(km ² ·a)] sum of all production	18722.980	19019.000
净初级生产总值/[t/(km ² ·a)] calculated total net primary production	17850.200	17850.280
总初级生产力/总呼吸 total primary production/total respiration (TPP/TR)	1.394	2.923
系统净生产量/[t/(km ² ·a)] net system production	5048.106	11742.670
初级生产总量/总生物量 total primary production/total biomass (TPP/TB)	128.072	46.116
总生物量/总生产量 total biomass/total throughput (TB/TP)	0.003	0.007
总生物量(碎屑除外) total biomass (excluding detritus)	139.376	387.069
连接指数 connectance index (CI)	0.351	0.343
系统杂食性指数 system omnivory index (SOI)	0.099	0.113
Finn's 循环指数 Finn's cycling index	11.35	11.38
模型可信度 Ecopath pedigree	0.740	0.000
拟合度 t^* measure of fit, t^*	3.649	0.000
香农多样性指数 Shannon diversity index	1.108	1.103

注: 1 表示现在滄水水库生态系统状态, 2 表示鲢、鳙放流达到其生态容量时的滄水水库生态系统状态。
Note: 1 represents the current state of the Weishui Reservoir ecosystem; 2 represents the state of the ecosystem of the Weishui Reservoir when the silver carp and bighead carp discharges reach their ecological capacity.

2.2 滄水水库鲢、鳙的生态容量

在 2020 年 7 月到 2021 年 1 月滄水水库渔业资源调查数据基础上建立滄水水库生态通道模型, 结果表明目前滄水水库鲢、鳙的生物量分别为 2.117 t/(km²·a)和 16.577 t/(km²·a), 根据现有的滄水水库食物矩阵关系, 加大滄水水库鲢、鳙的放

养量, 作为鲢、鳙主要饵料生物来源的浮游植物、浮游动物、底栖生物将会面临一定的被捕食压力, 通过敏感性分析实验得知这种影响有限, 不会造成生态通道模型的崩溃。当鲢、鳙的生物量分别超过 30.169 t/(km²·a)、236.217 t/(km²·a), 浮游动物功能组 EE>1, 模型失去平衡(表 6)。故可

表 6 鲢、鳙生态容纳量推算过程

Tab. 6 The calculation process of the ecological capacity of silver carp and bighead carp

倍数 multiplier	功能组 group	生物量/[t/(km ² ·a)] biomass	模型平衡情况 mass-balance change	倍数 multiplier	功能组 group	生物量/[t/(km ² ·a)] biomass	模型平衡情况 mass-balance change
0.050	鳙 bighead carp	17.405	平衡 balance	14.000	鳙 bighead carp	232.072	平衡 balance
	鲢 sliver carp	2.223			鲢 sliver carp	29.639	
0.100	鳙 bighead carp	18.234	平衡 balance	14.250	鳙 bighead carp	236.217	平衡 balance
	鲢 sliver carp	2.329			鲢 sliver carp	30.169	
0.500	鳙 bighead carp	24.865	平衡 balance	14.375	鳙 bighead carp	238.289	浮游动物功能组 EE 值=1.0034
	鲢 sliver carp	3.176			鲢 sliver carp	30.433	
10.000	鳙 bighead carp	165.766	平衡 balance	14.500	鳙 bighead carp	240.361	浮游动物功能组 EE 值=1.0103
	鲢 sliver carp	21.171			鲢 sliver carp	30.698	

注: 黑体数字表示推算出的鲢、鳙生态容纳量。
Note: Figures in bold indicate the calculated ecological capacity of silver carp and bighead carp.

以据此确定洩水水库鲢、鳙的生态容纳量分别为 $30.169 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $236.217 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

3 讨论

湖泊、水库等内陆淡水水域不同于海湾等海洋水域, 其生态系统结构较为简单, 生态系统内各营养级生态学参数较海洋生态系统更易于获取, 这种优势对于运用现有或待开发的生态模型来实现内陆淡水生态渔业的可持续发展具有重要的意义^[25-26]。

生态位重叠指数一定程度上表明了在水生态系统中各鱼类组成的种间关系, 两者生态位重叠指数越高, 则表明这两者的竞争关系越强^[27]。就洩水水库主要经济物种鲢、鳙来说, 与二者生态位重叠指数最高的都是鳊条, 这就表明鲢、鳙与鳊条具有强竞争关系, 若追求鲢、鳙的经济效益最大化, 则应在洩水水库加大对鳊条的捕捞强度或牧食压力。从关键种指数角度出发展开分析发现, 鲢、鳙都不是关键种, 这是可以在洩水水库生态通道模型中对鲢、鳙展开生态容量估算的前提条件, 保障了后续分析工作的进行。对模型的敏感度分析表明, 关键种鳊的生物量变动对草食性鱼类功能组 EE 值影响最大, 鲈类生物量变动对鳊条功能组 EE 值影响最大; 主要经济物种鳙的生物量变化时, 浮游动物的 EE 值变化最大。饵料生物功能组浮游动物生物量变化时对浮游植物的影响最大, 浮游植物和底栖动物生物量变化时对其自身的 EE 影响最大。敏感性分析和混合营养效应分析在阐明洩水水库生态系统中各功能组之间影响的同时, 也为后续鲢、鳙生态容量的推算奠定了基础。

从生态系统特征值展开分析, 总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR)、循环指数(FCI)、连接指数(CI)、系统杂食指数等特征参数(SOI)均是 Ecopath 模型中能够较好反映生态系统状况的模块值^[2,14]。通过建立洩水水库生态通道模型, 发现洩水水库 FCI 循环指数、CI 指数、SOI 指数分别为 11.35、0.351、0.099。FCI 循环指数大于 2016 年千岛湖 Ecopath 模型(5.27)^[11]与 2013 年金沙河水库

Ecopath 模型(6.73)^[16], 这说明洩水水库相较于千岛湖和金沙河水库生态系统有着更高的物质再循环比例; CI 指数亦大于 2016 年千岛湖 Ecopath 模型(0.263)^[11]与 2013 年金沙河水库 Ecopath 模型(0.277)^[16], 这表明相较于千岛湖及金沙河水库, 洩水水库 15 个功能组之间具有着更为密切的联结关系; 不同于 FCI 循环指数、CI 指数, 洩水水库 SOI 指数略高于 2013 年金沙河水库 Ecopath 模型(0.087)^[16], 略低于 2016 年千岛湖 Ecopath 模型(0.131)^[11], 说明洩水水库生态系统复杂度较金沙河水库生态系统更高, 较千岛湖生态系统略低。以上 3 个数值表明洩水水库生态系统成熟度较高, 更能够说明影响系统成熟度的是总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR), TPP/TR 从大于 1 越接近 1, 则生态系统越成熟^[2]。洩水水库的 TPP/TR 值为 1.394, 相较于千岛湖生态系统(6.509)^[11]以及金沙河水库生态系统(6.735)^[16]更接近 1, 说明洩水水库相较于千岛湖生态系统以及金沙河水库生态系统更为成熟, 处于发育接近成熟的阶段。

本研究主要基于 EwE 模型来探究湖泊和水库等生态系统中鲢、鳙的生态容纳量, 通过调整所建洩水水库生态通道模型中鲢、鳙功能组的生物量参数值, 最终确定在洩水水库鲢、鳙的生态容纳量为分别为 $30.169 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $236.217 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。模型得出的鲢、鳙的最大环境容纳量可作为增殖放流和生态利用等渔业生产活动的重要依据。Mace^[28]提出可以将生态容纳量的一半设为最大可持续产量(MSY), 此时目标鱼类的增殖生长率最高。洩水水库总面积为 37 km^2 , 按最大可持续产量(MSY)理论, 得到洩水水库鲢、鳙的适宜产量为 563.127 t、4370.015 t。因此, 目前洩水水库鲢、鳙现存量是不足的, 未充分发挥水库生态利用效率。EwE 模型属于众多生态模型中的静态模型, 其能够对特定时空内数据做出较好的反馈整理, 但也存在一定的不足, 如时间赋予生态系统内各组成功能组的动态变化就超出其处理范畴。总的来说, 这种基于对湖库生态系统能量流动调查数据所获得目标物种的生态容纳量是比较准确和客观的。

在湖库退出精养、内陆大水面向生态渔业转型的当下,如何科学确定湖库养殖容量、合理制订生态渔业技术方案,已成湖库生态渔业技术中的重点和难点^[29]。本研究以淦水水库为例,以 Ecopath 模型为抓手,在分析淦水水库生态系统结构、能量流动和物质循环等特征基础上,估算水库主要养殖对象的生态容量。这一方法可为全国其他湖库等大水面生态养殖容量的确定提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] Polovina J J. Model of a coral-reef ecosystem. 1. The Ecopath model and its application to French frigate shoals[J]. Coral Reefs, 1984, 3(1): 1-11.
- [2] Odum E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969, 164(3877): 262-270.
- [3] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II—a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics[J]. Ecological Modelling, 1992, 61(3-4): 169-185.
- [4] Christensen V, Pauly D. Changes in models of aquatic ecosystems approaching carrying capacity[J]. Ecological Applications, 1998, 8(sp1): S104-S109.
- [5] Walters C, Christensen V, Pauly D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1997, 7(2): 139-172.
- [6] Walters C, Pauly D, Christensen V. Ecospace: Prediction of mesoscale spatial patterns in trophic relationships of exploited ecosystems, with emphasis on the impacts of marine protected areas[J]. Ecosystems, 1999, 2(6): 539-554.
- [7] Huang M Y, Xu S N, Liu Y, et al. Assessment of ecological carrying capacity of *Sparus macrocephalus* in Daya Bay based on an Ecopath model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 1-13. [黄梦仪, 徐姗姗, 刘永, 等. 基于 Ecopath 模型的大亚湾黑鲷生态容量评估[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 1-13.]
- [8] Wang T, Zhang H, Zhang H, et al. Ecological carrying capacity of Chinese shrimp stock enhancement in Haizhou Bay of East China based on Ecopath model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 965-975. [王腾, 张贺, 张虎, 等. 基于营养通道模型的海州湾中国明对虾生态容纳量[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 965-975.]
- [9] Wu Z X, Zhang X M, Zhang L, et al. Predicting the ecological carrying capacity of the Lidao artificial reef zone of Shandong Province for the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, (Selenck) and the abalone, *Haliotis discus hannai*, using a linear food web model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(2): 327-337. [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.]
- [10] Feng D X. Structure and energy flow of Dianshan Lake ecosystem based on Ecopath model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011. [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.]
- [11] Yu J, Liu J R, Wang L, et al. Analysis on the ecosystem structure and function of lake Qiandao based on Ecopath model[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(2): 308-317. [于佳, 刘佳睿, 王利, 等. 基于 Ecopath 模型的千岛湖生态系统结构和功能分析[J]. 水生生物学报, 2021, 45(2): 308-317.]
- [12] Zhu K H, Wu Y, Li C H, et al. Ecosystem-based restoration to mitigate eutrophication: A case study in a shallow lake[J]. Water, 2020, 12(8): 2141.
- [13] Liu E S, Li Y K, Zang R W, et al. A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on Ecopath model[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(3): 417-425. [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.]
- [14] Huang X F. Construction and evaluation of ECOPATH model of the ecosystem of Lake Wuli[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. [黄孝锋. 五里湖生态系统 ECOPATH 模型的构建与评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.]
- [15] Huang G, Wang Q D, Du X, et al. Modeling trophic interactions and impacts of introduced icefish (*Neosalanx taihuensis* Chen) in three large reservoirs in the Yangtze River basin, China[J]. Hydrobiologia, 2020, 847(17): 3637-3657.
- [16] Zhang Y. The study of fishery resources and Ecopath model in Jinshahe Reservoir ecosystem, Hubei Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [张云. 湖北金沙河水库渔业资源状况及生态系统模型研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [17] Yang C J, Wu Z X, Liu H Y, et al. The fishing strategy of *Charybdis japonica* and *Rapana venosa* and the carrying capacity of *Apostichopus japonicus* in Zhuwang, Laizhou artificial reef ecosystem based on Ecopath model[J]. Periodical

- of Ocean University of China, 2016, 46(11): 168-177. [杨超杰, 吴忠鑫, 刘鸿雁, 等. 基于 Ecopath 模型估算莱州湾朱旺人工鱼礁区日本鳎、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 168-177.]
- [18] Liu Y, Wu Z X, Yang C P, et al. Ecological carrying capacity of six species of stock enhancement in Pearl River estuary based on Ecopath model[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(4): 19-28. [刘岩, 吴忠鑫, 杨长平, 等. 基于 Ecopath 模型的珠江口 6 种增殖放流种类生态容纳量估算[J]. 南方水产科学, 2019, 15(4): 19-28.]
- [19] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for the investigation of reservoir fishery resources (SL 167-2014)[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. [中华人民共和国水利部. SL 167-2014 水库渔业资源调查规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.]
- [20] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. ICES Journal of Marine Science, 1980, 39(2): 175-192.
- [21] Palomares M L D, Pauly D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity[J]. Marine and Freshwater Research, 1998, 49(5): 447-453.
- [22] Valls A, Coll M, Christensen V. Keystone species: Toward an operational concept for marine biodiversity conservation[J]. Ecological Monographs, 2015, 85(1): 29-47.
- [23] Libralato S, Christensen V, Pauly D. A method for identifying keystone species in food web models[J]. Ecological Modelling, 2006, 195(3-4): 153-171.
- [24] Lorenzen K, Garaway C J, Chamsingh B, et al. Effects of access restrictions and stocking on small water body fisheries in Laos[J]. Journal of Fish Biology, 1998, 53: 345-357.
- [25] Lorenzen K, Cowx I G, Entsua-Mensah R E M, et al. Stock assessment in inland fisheries: A foundation for sustainable use and conservation[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2016, 26(3): 405-440.
- [26] Wang G, Zhao S L, Zhang P Y, et al. On the definition of niche and the improved formula for measuring niche overlap[J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(2): 119-127. [王刚, 赵松岭, 张鹏云, 等. 关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究[J]. 生态学报, 1984, 4(2): 119-127.]
- [27] Mace P M. A new role for MSY in single-species and ecosystem approaches to fisheries stock assessment and management[J]. Fish and Fisheries, 2001, 2(1): 2-32.
- [28] Liu J S, Wang Q D, Xie S Q, et al. Ranching management in lakes and reservoirs of China—community biomanipulation, restoration of biodiversity and resources utilization[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(2): 237-242. [刘家寿, 王齐东, 解绥启, 等. 内陆大水面生态牧场化管理——群落调控、生物多样性恢复与资源利用[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 237-242.]

Analysis of ecological system characteristics and ecological capacity of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in the Weishui Reservoir based on Ecopath model

FAN Zeyu¹, BAI Xuelan¹, XU Juchen¹, WANG Xiaoning¹, LYU Yabing¹, HOU Jie^{1,2}, HE Xugang^{1,2}

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan, 430070, China;

2. Engineering Research Center for Green Development of Bulk Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Zone, Ministry of Education, Wuhan, 430070, China

Abstract: To explore the current status of the Weishui Reservoir ecosystem and the ecological capacity of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis*, we used data from the fishery resource survey in July 2020 (summer), September 2020 (autumn), and January 2021 (winter) to establish an Ecopath model. The Ecopath model of the Weishui Reservoir consisted of 15 functional groups, and the fractional trophic levels ranged from 1 to 3.336. The keystones were *Siniperca chuatsi* and *Culters*, and the results indicated that their two niches, which included *Hypophthalmichthys molitrix*, *Aristichthys nobilis*, and *Hemiculter leuciscus* highly overlapped. The Finn cycling index (FCI), system connectance index (CI), and omnivory index (SOI) of the Weishui Reservoir were 11.35, 0.351, and 0.099, respectively, indicating that the Weishui Reservoir had a higher material recycling ratio than other lake and reservoir ecosystems, and that its functional groups had more closely and complexly connected relationships. The total system throughput (TST) of the ecosystem of the Weishui Reservoir was 44254.860 t/(km²·a), and the ratio of the total primary production to the total respiration (TPP/TR) was 1.394, indicating that the overall scale of the system was appropriate and was approaching a mature development stage. The biomasses of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in the Weishui Reservoir were 2.117 t/(km²·a) and 16.577 t/(km²·a), respectively, and their ecological capacities were 30.169 t/(km²·a) and 236.217 t/(km²·a), respectively.

Key words: Ecopath model; *Hypophthalmichthys molitrix*; *Aristichthys nobilis*; ecosystem status; ecological capacity; reservoir

Corresponding author: HE Xugang. E-mail: xgh@mail.hzau.edu.cn