

范泽宇,白雪兰,徐聚臣,等.运用Ecopath模型构建大水面增殖放流方案——以洩水水库为例[J].华中农业大学学报,2023,42(1):82-91.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.011

运用Ecopath模型构建大水面增殖放流方案 ——以洩水水库为例

范泽宇^{1,2},白雪兰¹,徐聚臣¹,黄路全¹,
王晓宁¹,吕亚兵¹,侯杰^{1,3},何绪刚^{1,3}

1. 华中农业大学水产学院,武汉430070;
2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司,长沙410014;
3. 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,武汉430070

摘要 为科学制定大水面增殖放流技术方案、促进生态渔业可持续健康发展,以洩水水库为例,在运用EwE软件研究水库生态容纳量基础之上,采用Ecopath模型,构建4套增殖放流方案,通过各方案生态、社会和经济效益的综合比较,遴选出最佳方案。结果显示:(1)若以经济效益和氮、磷移除等社会环境效益为首选因子,则方案1最优,即增殖放流鲢、鳙,年放流数量分别为13.5万、49.1万尾,年最大可持续产量达486.6、1 766.8 t,总产值、总利润值、单位产值分别为8 040.2万、7 003.7万和350.2万元/km²,总氮、总磷年净移除量可达130.41、36.98 t以上,生态系统的总初级生产力/总呼吸(TPP/TR)值、连接指数(CI)值、系统杂食指数(SOI)值、香农多样性指数数值分别为4.030、0.304、0.114、1.557;(2)若综合考虑生态系统健康和渔业经济效益,则方案3最优,即增殖放流鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙,年放流数量分别为0.08万、1.9万、0.9万、1.1万、4.1万、14.8万尾,年最大可持续产量分别达1.2、3.8、18.8、5.6、162.8、591.2 t,总产值、总利润值、单位产值分别为3 041.8万、2 562.2万、128.1万元/km²,总氮、总磷年净移除量可分别达46.73、13.21 t以上,生态系统的总初级生产力/总呼吸(TPP/TR)值、连接指数(CI)值、系统杂食指数(SOI)值、香农多样性指数数值分别为4.616、0.302、0.117、1.597。以上研究结果表明,灵活运用Ecopath模型,可根据相应的渔业管理目标科学制定大水面生态渔业方案。

关键词 洩水水库; Ecopath模型; 生态容纳量; 生态渔业; 多营养级增殖放流方案

中图分类号 S931.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0082-10

我国湖泊、水库生态资源极为丰富,2020年内陆湖泊、水库淡水养殖面积分别为7 206.50和14 208.70 km²,湖泊养殖面积下降6.42%、水库养殖面积增加0.30%;内陆大水面渔业捕捞产量为145.75×10⁴ t,同比下降20.84%^[1]。目前,国家大力推进生态文明建设,大水面(湖泊、水库)网箱、网栏、网围等集约化养殖模式逐渐被淘汰,明令禁止施肥、投饵等精养方式,对大水面渔业技术提出了更高要求。而以生态效益为导向的保水渔业^[2-3],从一开始就以湖泊水环境保护为主要目的^[4],在兼顾环境效益与渔业效益方面还有待进一步完善。

2020年9月生态环境部等有关部门联合印发《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》,拉开了

生态经济综合规划发展的序幕。水域生态作为生态经济综合体系的重要一环,在生态文明建设浪潮中如何发展就成了不可忽视的问题^[5]。我国大水面渔业正处于生态保护优先、环境效益和渔业效益并重的关键发展期,且大水面渔业关键发展与水域生态经济建设的共同解决方案是大力发展生态渔业^[6]。实现生态渔业可持续发展的重要途径是渔业资源增殖放流,而渔业资源增殖放流可持续发展的前提是科学确定水域中的适宜放流对象及其生态容纳量^[7]。但目前国内关于构建渔业资源增殖放流方案中的一些关键参数缺乏系统研究,如在千岛湖^[2-4]、崂山湾^[8]、珠江口^[9]、太湖^[10]、东湖^[11]等渔业增殖放流方案构建中,相关研究都聚焦于保水渔业、适宜放流对

收稿日期:2022-06-09

基金项目:“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900601-02);中央高校基本科研业务费专项(2662020SCP001)

范泽宇, E-mail:96fzy@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:何绪刚, E-mail:xgh@mail.hzau.edu.cn

象、放流种类的生态容纳量等某一方面的研究上,导致放流方案的实际可操作性较小、生态与渔业的可协调性较差。

洩水水库位于湖北省松滋市西南部,总面积为 37 km²,属于长江中下游典型丘陵山谷型水库,作为一座鲢鳙天然放养-生态渔业典型湖库,洩水水库每年均会爆发不同程度的蓝藻水华,其生态渔业管理措施亟待转型。因此,笔者在洩水水库进行生态容纳量的评估及应用研究,探讨增殖放流方案中适宜放流种类及其放流数量,并进行生态、社会和经济效益的综合比较,遴选出最佳方案,旨在为生态渔业转型及可持续发展提供新思路。

1 研究方法

1.1 生态容纳量

洩水水库 Ecopath 模型构建及生态容纳量推算方法参照文献[12-15]进行。

1.2 人工增殖放流方案

1)种群结构。在对洩水水库鱼类种群结构、食性及 Ecopath 模型中功能组间分析^[12]基础上,确定了 4 种渔业增殖放流技术方案(图 1),并采用如下方法计算 4 种渔业增殖放流技术方案中各功能组的生态容纳量:首先运用 Ecopath with Ecosim 6.6.5 软件建立洩水水库 Ecopath 稳态模型;其次,保持模型其他

功能组参数不变,以适宜幅度同步增加上述 4 套不同组合方案中功能组的生物量,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≥1 时,模型将变得不平衡,此时各功能组生物量值即为其生态容纳量。

2)关键参数。本研究通过生态容纳量推算得出增殖放流方案的主要关键参数,包括最大产量、最大可持续产量、投放数量、投放尾数等。

最大产量为洩水水库实施增殖放流方案之后各目标种类的最大理论增产值,其计算公式如下:

$$M=(B-B_1) \times S$$

式中, M 为最大产量; B 为 Ecopath 模型推算所得生态容纳量; B_1 为洩水水库中各鱼类种群现存生物量; S 为洩水水库总面积。

根据 Mace^[16]提出的最大可持续产量(MSY)理论,当目标鱼类种群规模为生态容纳量的一半时鱼类种群增殖生长率最高,此时目标鱼类生物量即为其最大可持续产量。洩水水库总面积为 37 km²,适宜产量的计算公式如下所示:

$$N=\frac{B}{2} \times S$$

式中 N 为各增殖放流方案中的最大可持续产量; B 为 Ecopath 模型推算所得生态容纳量; S 为洩水水库总面积。

各增殖放流方案中的投放数量计算公式^[11]如下

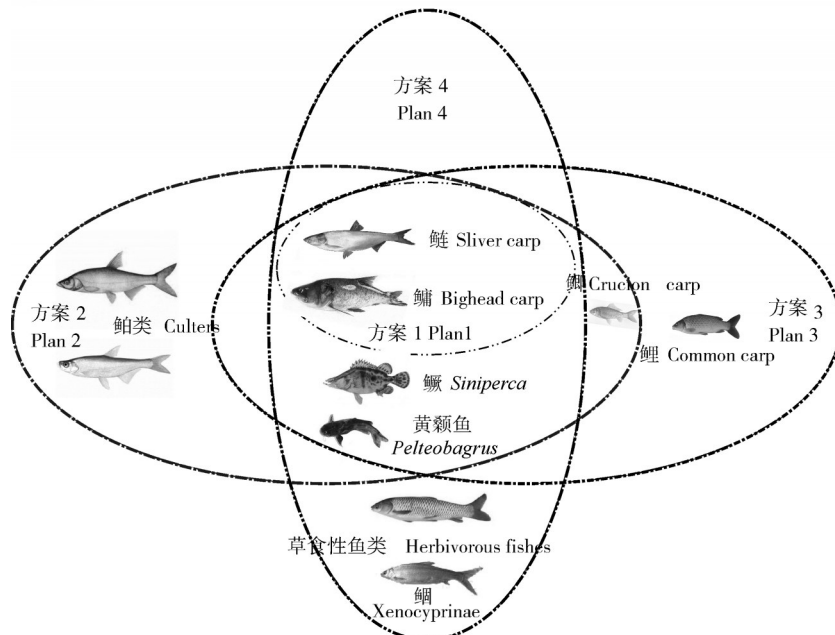


图 1 洩水水库各多营养级增殖放流方案韦恩图

Fig.1 Veen diagram of various multi-trophic level proliferation and release schemes in Weishui Reservoir

所示:

$$A_n = \frac{N_n}{m_n} \times \frac{1}{R_n}$$

式中 A_n 为4套方案中鲢、鳙或其他鱼类的投放尾数; N_n 为4套方案中鲢、鳙或其他鱼类的最大可持续产量; m_n 为鲢、鳙或其他鱼类的起捕规格, 根据洩水水库相关库管单位所提供数据, 鲢、鳙起捕质量为4.0 kg, 鳊、鲃类、黄颡鱼、鲮、鲤、鲫、草食性鱼类起捕质量分别为1.5^[17]、1.0、0.2、0.3、2.0、0.5、4.0 kg; R_n 为洩水水库各鱼类的回捕率, 根据洩水水库目前捕捞团队的捕捞水平, 鲢、鳙的回捕率可达到90%, 鳊、鲃类、黄颡鱼、鲮、鲤、鲫、草食性鱼类的回捕率为20%^[17]。投放尾数与投放规格相乘则为投放数量。

1.3 主要评价指标

选择总初级生产力/总呼吸(TPP/TR)值、连接指数(CI)值、系统杂食指数(SOI)、香农多样性指数4

个指标来表征生态系统健康状况。

选择总产值、总利润值、单位产值等分析各方案的渔业经济效益。

按照鱼类氮、磷含量(表1), 查询可得洩水水库鲢总氮、总磷含量区间范围分别为2.11%~15.08%、0.49%~4.26%; 鳙总氮、总磷含量区间范围分别为1.88%~15.08%、0.57%~4.26%; 洩水水库其余鱼类总氮、总磷含量区间范围分别为2.50%~15.45%、0.06%~0.81%; 本研究取氮、磷含量区间范围中位数参与氮、磷移除计算, 即该水库鲢总氮、总磷含量分别为8.59%、2.38%; 鳙总氮、总磷含量分别为8.48%、2.42%; 肉食性鱼类总氮、总磷含量分别为11.65%、4.57%; 杂食性鱼类总氮、总磷含量分别为11.08%、2.92%; 草食性鱼类总氮、总磷含量分别为11.88%、2.54%, 从而计算渔获量从水库中净输出的总氮、总磷数量, 以评价各方案的社会环境效益。

表1 国内常见鱼类总氮、总磷含量表

Table 1 Total nitrogen and total phosphorus content of common fish in China

来源文献 Source literature	地点 Site	种类 Species	总氮含量/% TN	总磷含量/% TP
[18]	东湖 East Lake	鲢 <i>H. molitrix</i>	2.63	0.57
		鳙 <i>A. nobilis</i>	2.64	0.57
		鲢 <i>H. molitrix</i>	2.42	0.49
[19]	道观河水库 Daoguanhe Reservoir	鳙 <i>A. nobilis</i>	2.70	0.73
		其余鱼类 Other fishes	3.01	0.27
[20]	-	鱼类 Fishes	2.50~3.50	0.30~0.90
[21]	隔湖 Ge Lake	鲢 <i>H. molitrix</i>	10.41	3.96
		鳙 <i>A. nobilis</i>	9.99	3.61
[22]	呼伦湖 Hulun Lake	鱼类 Fishes	15.10	0.06
[23]	三峡水库 Three Gorges Reservoir	鲢 <i>H. molitrix</i>	8.81~10.35	3.27~3.71
		鳙 <i>A. nobilis</i>	8.85~10.15	2.86~4.06
		鲢 <i>H. molitrix</i>	5.04	2.73
[24]	大宁水库 Daning Reservoir	鳙 <i>A. nobilis</i>	5.35	2.82
		草鱼 <i>C. idellus</i>	5.92	3.74
		鲢 <i>H. molitrix</i>	2.11	0.81
[25]	长寿湖 Changshou Lake	鳙 <i>A. nobilis</i>	1.88	0.73
		草食性鱼类 Herbivorous fish	8.46~15.29	0.90~4.17
[26]	三峡水库 Three Gorges Reservoir	滤食性鱼类 Planktivorous fish	10.50~15.08	1.06~4.26
		肉食性鱼类 Carnivorous fish	7.85~15.45	0.93~8.21
		杂食性鱼类 Omnivorous fish	7.00~15.16	0.89~4.95

洩水水库各增殖放流方案中鱼类氮、磷净移除量计算公式如下:

$$T_1 = (N - N_1) \times T_N$$

$$T_2 = (N - N_1) \times T_P$$

式中 T_1 、 T_2 分别为各增殖放流方案中总氮、总磷净移除量, N 为各增殖放流方案中的最大可持续产

量, N_1 为各增殖放流方案中的投放量, T_N 、 T_P 分别为各增殖放流方案中各鱼类的总氮、总磷含量。

2 结果与分析

2.1 生态容纳量的推算

应用所建立洩水水库生态通道模型推算生态容

纳量,结果显示,4套方案下洩水水库目标鱼类鳊、鲃类、黄颡鱼、鲮、鲤、鲫、鲢、鳙、草食性鱼类的生态容纳量分别为0.036、0.250、0.118、0.667、0.590、0.176、5.117、18.577和0.056 t/(km²·a)。

在各方案相应的 Ecopath 模型中以适宜的幅度区间改变各方案中目标鱼类的生物量,根据现有的洩水水库食物矩阵关系,加大洩水水库目标鱼类放养量,作为目标鱼类主要饵料生物将会面临一定的被捕食压力,通过敏感性分析试验得知这种影响有限不会造成生态通道模型的崩溃。

方案 1 中当鲢、鳙的生物量分别超过 26.301、95.501 t/(km²·a),浮游动物功能组 EE>1,模型失去平衡(表 2)。故可以据此确定洩水水库鲢、鳙的生态容纳量分别为 26.301、95.501 t/(km²·a)。

方案 2 中当鳊、鲃类、黄颡鱼、鲫、鲢、鳙的生物量分别超过 0.042、0.290、0.139、0.207、21.869、6.023 t/(km²·a)时,鲤功能组 EE>1,模型失去平衡,此时各物种的生物量即为其生态容纳量(表 2)。

方案 3 中当鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙的生物量分别超过 0.062、0.203、1.015、0.303、31.958、8.801 t/(km²·a)时,鳊条功能组 EE>1,模型失去平衡,此时各物种的生物量即为其生态容纳量(表 2)。

方案 4 中当鳊、黄颡鱼、鲮、草食性鱼类、鲢、鳙的生物量分别超过 0.039、0.129、0.727、20.438、5.578、0.061 t/(km²·a)时,鲫功能组 EE>1,模型失去平衡,此时各物种的生物量即为其生态容纳量(表 2)。

表 2 洩水水库各多营养级增殖放流方案的生态容纳量

功能组 Group	生物量/(t/(km ² ·a)) Biomass				
	现状 Status	方案 1 Plan 1	方案 2 Plan 2	方案 3 Plan 3	方案 4 Plan 4
	鳊 <i>Siniperca</i>	0.036	—	0.041	0.062
鲃类 <i>Culters</i>	0.250	—	0.288	—	—
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus</i>	0.118	—	0.136	0.203	0.129
鲮 <i>Xenocyprinae</i>	0.667	—	—	—	0.727
鲤 <i>Common carp</i>	0.590	—	—	1.015	—
鲫 <i>Crucian carp</i>	0.176	—	0.202	0.303	—
鳙 <i>Bighead carp</i>	18.58	95.501	21.367	31.958	20.252
鲢 <i>Sliver carp</i>	5.117	26.301	5.885	8.801	5.578
草食性鱼类 <i>Herbivorous fishes</i>	0.056	—	—	—	0.061

2.2 增殖放流关键技术参数

1)最大产量。由最大产量计算公式计算可得:方案 1 中鲢、鳙的最大产量分别为 825.14、3 385.41 t;方案 2 中鳊、鲃类、黄颡鱼、鲫、鲢、鳙的最大产量分别

为 1.35、5.78、0.77、1.39、74.84、660.41 t;方案 3 中鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙的最大产量分别为 2.07、3.14、15.79、4.92、177.65、1 034.30 t;方案 4 中鳊、黄颡鱼、黄尾鲮、草食性鱼类、鲢、鳙的最大产量分别为 1.23、0.39、21.50、58.37、601.20、0.19 t(图 2)。

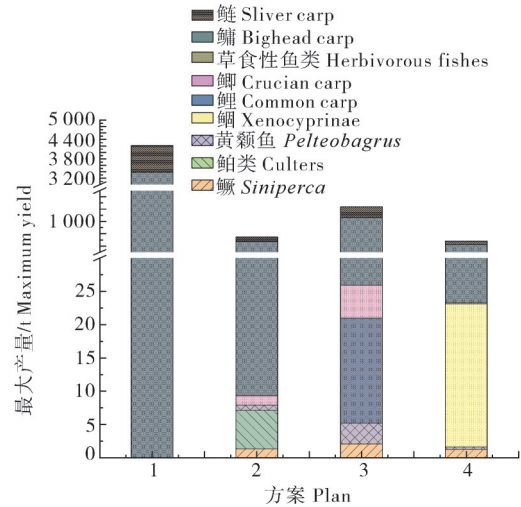


图 2 洩水水库各多营养级增殖放流方案最大产量比对

Fig.2 Comparison of released biomass of various multi-trophic level proliferation and release schemes in Weishui Reservoir

2)最大可持续产量。根据洩水水库最大可持续产量计算公式计算可得方案 1 中鲢、鳙的最大可持续产量分别为 486.57、1 766.77 t;方案 2 中鳊、鲃类、黄颡鱼、鲫、鲢、鳙的最大可持续产量分别为 0.78、5.44、2.57、3.83、111.42、404.57 t;方案 3 中鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙的最大可持续产量分别为 1.15、3.75、18.77、5.60、162.82、591.22 t;方案 4 中鳊、黄颡鱼、黄尾鲮、草食性鱼类、鲢、鳙的最大可持续产量分别为 0.73、2.38、13.45、1.13、103.18、374.67 t(图 3)。4 套方案的最大可持续产量大小排序为方案 1>方案 3>方案 2>方案 4。

3)投放数量。根据投放尾数计算公式计算,洩水水库增殖放流方案 1 的鲢、鳙投放数量分别为 13.5 万、49.1 万尾;方案 2 鳊、鲃类、黄颡鱼、鲫、鲢、鳙的投放数量分别为 0.05 万、0.5 万、1.3 万、0.8 万、2.8 万、10.1 万尾;方案 3 鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙投放数量分别为 0.08 万、1.9 万、0.9 万、1.1 万、4.1 万、14.8 万尾;方案 4 鳊、黄颡鱼、黄尾鲮、草食性鱼类、鲢、鳙投放数量分别为 0.05 万、1.2 万、3.8 万、2.6 万、9.4 万、0.03 万尾(图 4)。

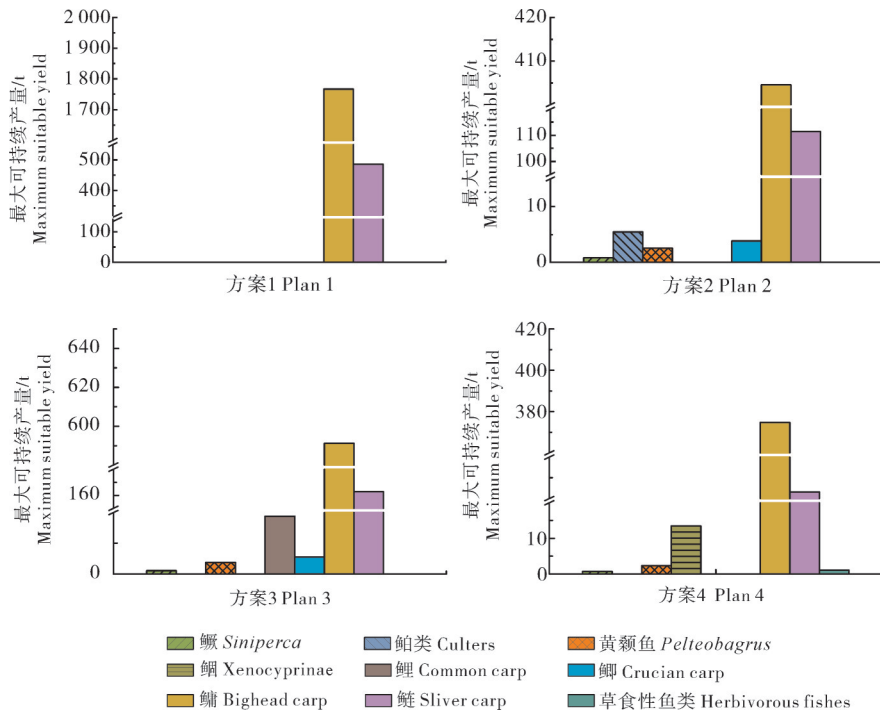


图3 洩水水库各多营养级增殖放流方案最大可持续产量比对

Fig.3 Comparison of maximum suitable yield of various multi-trophic-level proliferation and release schemes in Weishui Reservoir

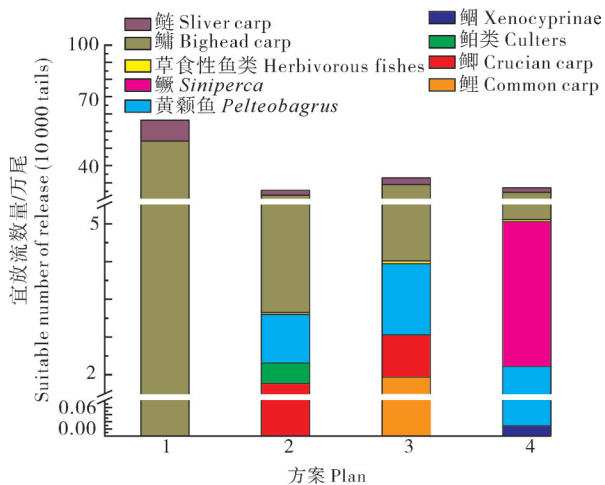


图4 洩水水库各多营养级增殖放流方案放流尾数比对

Fig.4 Comparison of release numbers of multi-trophic-level proliferation and release schemes in Weishui Reservoir

2.3 效益分析

1) 氮磷移除效益。4套增殖放流方案中,方案1的总氮、总磷年度净移除量分别可达130.41、36.98 t;方案2的总氮、总磷年度净移除量分别可达31.23、8.92 t;方案3的总氮、总磷年度净移除量分别为46.73、13.21 t;方案4的总氮、总磷年度净移除量分别为29.53、8.34 t(表3)。从氮、磷移除效益来说,方

案1>方案3>方案2>方案4,若将氮、磷的移除效益作为增殖放流方案的主要考量指标,则方案1为最合适的增殖放流方案,其次为方案3。

2) 生态系统健康效益。本研究主要选择Eco-path模型分析中的总初级生产力/总呼吸(TPP/TR)值、连接指数(CI)值、系统杂食指数(SOI)、香农多样性指数4个指标来表征生态系统健康效益。

分析结果(表4)表明总初级生产力/总呼吸(TPP/TR)值为方案1(4.030)最小,方案4(4.616)最大,说明方案1下的洩水水库生态系统具有更优的生态系统成熟度,方案4的生态系统成熟度较低;连接指数(CI)值为方案2(0.304)、方案4(0.304)高于方案1(0.302)、方案3(0.302),说明方案2、方案4增殖放流状态下的洩水水库生态系统各功能组之间存在更为紧密的联结关系;4套方案的连接指数(CI)均大于洩水水库原始生态系统的连接指数(CI)(0.30),表明增殖放流活动的开展对于洩水水库各功能组之间的紧密连接起到一定的正向作用;4套方案的系统杂食指数(SOI)同连接指数(CI)一样,亦大于洩水水库原始生态系统的系统杂食指数(SOI)(0.11),说明增殖放流活动的开展有利于加强生态系统复杂度,其中方案1、方案3的系统杂食指数(SOI)较高,分别为

表 3 洩水水库各方案氮、磷净输出量
Table 3 Net output of nitrogen and phosphorus in each scheme of Wushui Reservoir t/a

方案 Plan	种类 Species	产量 Production	投放量 Release numbers	净产量 Net production	年度净移除量 Annual net output	
					TN	TP
方案 1 Plan1	鲢 Sliver carp	486.57	155.43	331.14	28.44	7.88
	鳙 Bighead carp	1 766.77	564.38	1 202.38	101.96	29.10
	草食性鱼类 Herbivorous fish	0	0	0	0	0
	肉食性鱼类 Carnivorous fish	0	0	0	0	0
	杂食性鱼类 Omnivorous fish	0	0	0	0	0
	总计 Total	2 253.34	719.82	1 533.52	130.41	36.98
方案 2 Plan2	鲢 Sliver carp	111.42	35.59	75.83	6.51	1.80
	鳙 Bighead carp	404.57	129.24	275.33	23.35	6.66
	草食性鱼类 Herbivorous fish	0	0	0	0	0
	肉食性鱼类 Carnivorous fish	6.23	0.10	6.13	0.71	0.28
	杂食性鱼类 Omnivorous fish	6.40	0.50	5.90	0.65	0.17
	总计 Total	528.62	165.43	363.19	31.23	8.92
方案 3 Plan3	鲢 Sliver carp	162.82	52.01	110.81	9.52	2.64
	鳙 Bighead carp	591.22	188.86	402.36	34.12	9.74
	草食性鱼类 Herbivorous fish	0	0	0	0	0
	肉食性鱼类 Carnivorous fish	1.15	0.10	1.05	0.12	0.05
	杂食性鱼类 Omnivorous fish	28.13	1.29	26.84	2.97	0.78
	总计 Total	783.32	242.27	541.05	46.73	13.21
方案 4 Plan4	鲢 Sliver carp	103.18	32.96	70.22	6.03	1.67
	鳙 Bighead carp	374.67	119.68	254.98	21.62	6.17
	草食性鱼类 Herbivorous fish	1.13	0.30	0.83	0.10	0.02
	肉食性鱼类 Carnivorous fish	0.73	0.10	0.63	0.07	0.03
	杂食性鱼类 Omnivorous fish	15.83	0.44	15.39	1.71	0.45
	总计 Total	495.54	153.49	342.05	29.53	8.34

0.120、0.117; 香农多样性指数是反映物种多样性的度量值, 方案 3 的香农多样性指数最高, 为 1.597, 表

明在方案 3 指导下进行的洩水水库增殖放流活动能最大限度的提高洩水水库的物种多样性指数。

表 4 洩水水库 4 套方案的生态系统总体特征参数
Table 4 Summary statistics of the ecosystem attributes of the four schemes in the Weishui Reservoir

参数 Parameter	方案 1 Plan 1	方案 2 Plan 2	方案 3 Plan 3	方案 4 Plan 4
总消耗量/(t/(km ² ·a)) Sum of all consumption	9 250.537	8 652.060	8 738.412	8 637.507
总输出/(t/(km ² ·a)) Sum of all exports	9 028.059	9 397.636	9 344.316	9 406.566
总呼吸量/(t/(km ² ·a)) Sum of all respiratory flows	2 979.818	2 610.241	2 663.560	2 601.310
系统总流量/(t/(km ² ·a)) Total system throughput	32 636.450	32 212.760	32 273.600	32 202.640
总生产量/(t/(km ² ·a)) Sum of all production	12 571.220	12 462.020	12 477.780	12 459.300
总初级生产力/总呼吸 TPP/TR	4.030	4.600	4.508	4.616
初级生产总量/总生物量 TPP/TB	57.759	105.250	94.167	107.447
连接指数 CI	0.302	0.304	0.302	0.304
系统杂食性指数 SOI	0.120	0.114	0.117	0.113
香农多样性指数 Shannon diversity index	1.460	1.557	1.597	1.547

综上所述,从生态系统健康角度出发方案3是最适宜于洩水水库的增殖放流方案,其次是方案2。

3) 经济效益。4套方案的成本效益分析如表5所示,经济效益指标中总产值为方案1(8 040.21万元) > 方案3(3 041.80万元) > 方案2(1 992.67万元) > 方案4(1 917.25万元);总利润值为方

案1(7 003.70万元) > 方案3(2 562.24万元) > 方案2(1 606.14万元) > 方案4(1 545.17万元);每平方千米产值为方案1(350.18万元/km²) > 方案3(128.11万元/km²) > 方案2(80.31万元/km²) > 方案4(77.26万元/km²)。从各方案的经济效益指标来说,方案1的经济效益最高,其次是方案3。

表5 洩水水库4套方案的成本效益分析

Table 5 Cost-benefit analysis of the ecosystem attributes of the four schemes in the Weishui Reservoir

方案 Plan	种类 Species	年产量/t Production	售价/ (元/kg) Sells	产值/ (万元) Output	苗种费/ (万元) Seed fees	人工费/ (万元) Labor costs	总成本/ (万元) Total cost	总利润/ (万元) Total profit	单位产值/ (万元/km ²) Output value per square kilometer
方案1 Plan 1	鲢 Sliver carp	486.57	20.00	973.14	589.69	446.82	1 036.51	7 003.70	350.18
	鳙 Bighead carp	1 766.77	40.00	7 067.07					
	其余鱼类 Other fishes	0.00	120.00	0.00					
	总计 Total	2 253.34	—	8 040.21					
方案2 Plan 2	鲢 Sliver carp	111.42	20.00	222.84	219.90	166.63	386.53	1 606.14	80.31
	鳙 Bighead carp	404.57	40.00	1 618.28					
	其余鱼类 Other fishes	12.63	120.00	151.55					
	总计 Total	528.62	—	1 992.67					
方案3 Plan 3	鲢 Sliver carp	162.82	20.00	325.65	272.83	206.73	479.56	2 562.24	128.11
	鳙 Bighead carp	591.22	40.00	2 364.86					
	其余鱼类 Other fishes	29.27	120.00	351.29					
	总计 Total	783.31	—	3 041.80					
方案4 Plan 4	鲢 Sliver carp	103.18	20.00	206.37	211.68	160.40	372.08	1 545.17	77.26
	鳙 Bighead carp	374.67	40.00	1 498.66					
	其余鱼类 Other fishes	17.68	120.00	212.22					
	总计 Total	495.53	—	1 917.25					

3 讨论

本研究于2020年夏、秋、冬季及2021年春季对洩水水库展开野外渔业资源调查,在周年渔业资源调查数据基础之上,结合相关历史资料与文献,构建了洩水水库Ecopath模型。应用洩水水库Ecopath模型与鱼类资源调查食性数据确定了适宜在洩水水库开展增殖放流的鱼类组成方案,并最终运用Ecopath模型对适宜放流的鱼类生态容纳量展开了评估及应用研究,确定了各增殖放流方案的最大产量、最大可持续产量、投放尾数、投放数量等关键参数。若以经济效益与氮、磷移除效益为主要考虑因素则洩水水库适宜增殖方案为方案1,放流种类为鲢、鳙,最大可持续产量分别为486.57、1 766.77 t;若综合考量生态效益与经济效益则洩水水库多营养级增殖放流

方案鱼类组成为鳊、黄颡鱼、鲤、鲫、鲢、鳙,最大可持续产量分别为1.15、3.75、18.77、5.60、162.82、591.22 t。

相关研究表明长寿湖2017年的氮、磷净移除量为60.61、23.31 t^[25],与洩水水库多营养级增殖放流方案2、3、4相比氮、磷净移除量相比较,造成这种现状的原因是生境面积大小导致的生态容纳量不同,洩水水库总面积为37 km²,而长寿湖总面积为65 km²;若与洩水水库放流方案1相比(表3),则氮、磷净移除量则较小,表明洩水水库水体鲢、鳙天然饵料资源较为丰富,若能实施长期的轮捕轮放措施,定期将水体中的氮、磷移除,则可缓解洩水水库富营养化压力,实现生态渔业的可持续发展。

每平方千米产值在一定程度上反映了渔业产值效益好坏,相关学者估算漏湖生态放养鲢、鳙的每平

方千米产值为211.32万元^[21],低于洩水水库方案1中每方千米产值(350.18万元),但高于方案3中每方千米产值(128.11万元),说明制定合理的增殖放流方案,能够提高湖库的渔业产值效益。总体来说,与洩水水库目前渔业产值对比按照如上4套方案实施生态渔业,可实现生态效益与经济效益并重的可持续发展模式。

对所制定的渔业增殖放流方案展开评估的方法主要有2种,本研究主要从各增殖放流方案的现实效益出发,也可在Ecopath模型的基础上,运用Ecosim模型来模拟增殖放流方案实施以后其余生态系统组成功能组的动态变化过程,如模拟浮游植物功能组生物量的变化过程来表达增殖放流方案等保水措施实施以后对水库富营养化水平的控制效果^[27],这也是以后渔业管理措施制定的重要研究方向之一。

基于EwE模型所估算的生态容纳量来确定洩水水库多营养级增殖放流方案兼顾了生态效益与经济效益,相关管理者可以根据不同的渔业管理目标采取不同的渔业管理措施。今后可在其他湖库开展验证性研究,以确定多营养级增殖放流技术标准。

参考文献References

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2021中国水生动物卫生状况报告[M].北京:中国农业出版社,2021.Fisheries and Fisheries Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Promotion Station, China Fisheries Society.2021 Aquatic animal health in China [M].Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 刘其根,王钰博,陈立侨,等.保水渔业对千岛湖生态系统特征影响的分析[J].长江流域资源与环境,2010(6):659-665.LIU Q G, WANG Y B, CHEN L Q, et al. Analysis on the effects of aquatic environment protection oriented (AEPO) fishery on the characteristics of Lake Qiandaohu ecosystem [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2010 (6) : 659-665 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘其根,王钰博,陈立侨,等.保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J].生态学报,2010,30(10):2774-2783.LIU Q G, WANG Y B, CHEN L Q, et al. Impacts of aquatic environment protection oriented fishery on the structure of food web in Lake Qiandaohu [J]. Acta ecologica sinica, 2010, 30(10) : 2774-2783 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘其根.千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响[D].上海:华东师范大学,2005.LIU Q G. Aquatic environmental protection oriented fishery in lake Qiandaohu and its influences on Lake ecosystem [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [5] TSUI S, WONG E, CHI L K, et al. Toward delinking: an alternative Chinese path amid the new cold war [J]. Monthly review, 2020, 72(5) : 15-31.
- [6] 刘家寿,王齐东,解绶启,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. LIU J S, WANG Q D, XIE S Q, et al. Ranching management in lakes and reservoirs of China: community biomani-pulation, restoration of biodiversity and resources utilization [J]. Science & technology for development, 2020, 16(2) : 237-242 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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. 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 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李忠义,袁伟,王新良,等.基于渔业资源群落结构稳定性对崂山湾增殖放流种类甄选的设想[J].中国水产科学,2020,27(7):739-747. LI Z Y, YUAN W, WANG X L, et al. Assuming released-species selection based on the stability of the fisheries resource community structure in Laoshan Bay [J]. Journal of fishery sciences of China, 2020, 27(7) : 739-747 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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. 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] 何俊,谷孝鸿,王小林,等.太湖鱼类放流增殖的有效数量和合理结构[J].湖泊科学,2012,24(1):104-110. HE J, GU X H, WANG X L, et al. Fish stocking quantities and structures of the fishery resources enhancement in Lake Taihu [J]. Journal of lake sciences, 2012, 24(1) : 104-110 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王骥,梁彦龄.用浮游植物的生产量估算武昌东湖鲢鳙生产潜力与鱼种放养量的探讨[J].水产学报,1981(4):343-350. WANG J, LIANG Y L. An estimation of the potential productivity and stocking rate of fingerlings of silver and *A. nobiliss* in Donghu by means of phytoplankton production [J]. Journal of fisheries of China, 1981(4) : 343-350 (in Chinese with English abstract).
- [12] 范泽宇,白雪兰,徐聚臣,等.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[J].中国水产科学,2021,28(6):773-784. FAN Z Y, BAI X L, XU J C, et al. Analysis of ecological system characteristics and ecological capacity of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in the Weishui

- Reservoir based on Ecopath model [J]. Journal of fishery sciences of China, 2021, 28(6): 773-784 (in Chinese with English abstract).
- [13] 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. YU J, LIU J R, WANG L, et al. The structure and function of lake Qiandao ecosystem based on Ecopath model [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2021, 45(2): 308-317 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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. ZHANG Y. Research on fishery resources status and ecosystem model of Jinshahe Reservoir in Hubei [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李为, 刘家寿, 叶少文, 等. 大水面鳊增殖放流技术及效果评估研究进展 [J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 808-818. LI W, LIU J S, YE S W, et al. Research progress on technique and effect evaluation of mandarin fish stock enhancement in large water bodies [J]. Journal of fishery sciences of China, 2021, 28(6): 808-818 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈少莲, 刘肖芳, 华俐. 鲢、鳊在东湖生态系统的氮、磷循环中的作用 [J]. 水生生物学报, 1991, 15(1): 8-26. CHEN S L, LIU X F, HUA L. The role of silver carp and bighead in the cycling of nitrogen and phosphorus in the East Lake ecosystem [J]. Acta hydrobiologica sinica, 1991, 15(1): 8-26 (in Chinese with English abstract).
- [19] 马徐发, 王明学, 吕敢堂, 等. 道观河水库鱼类养殖与氮磷收支平衡 [J]. 水利渔业, 2005, 26(4): 10-12. MA X F, WANG M X, LÜ G T, et al. Fish culture and balance of nitrogen and phosphorus in Daohe Reservoir [J]. Reservoir fisheries, 2005, 26(4): 10-12 (in Chinese).
- [20] 胡传林, 万成炎, 丁庆秋, 等. 我国水库渔业对水质的影响及其生态控制对策 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 161-168. HU C L, WAN C Y, DING Q Q, et al. Effect of reservoir fisheries on water quality of Chinese reservoirs and bionomic control countermeasures [J]. Journal of lake sciences, 2010, 22(2): 161-168 (in Chinese with English abstract).
- [21] 贾佩娇. 涪湖 Ecopath 模型构建及围网放养鲢鳊的生态效应 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012. JIA P (J/Q). Ecopath model construction and ecological effect of pen culture of silver carp and bighead carp in Gehu Lake [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [22] 缪丽梅, 张笑晨, 张利, 等. 呼伦湖渔业资源调查评估及生态修复技术 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 1-9. MIAO L M, ZHANG X C, ZHANG L, et al. The assessment of investigation of fishery resources and ecological restoration technology in Hulun Lake [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (natural science edition), 2014, 35(4): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [23] 薛洋. 三峡库区水域牧场鲢鳊驱动的氮磷循环研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2015. XUE Y. Nitrogen and phosphorus recycling driven by silver carp and bighead carp in the Three Gorges Reservoir water ranch [D]. Chongqing: Southwest University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [24] 孙昊苏. 增殖放流对大宁调蓄水库氮磷的影响 [J]. 江西水利科技, 2018, 44(4): 297-301. SUN H S. Effect of fishery enhancement and releasing on the N/P in Daning regulating reservoir [J]. Jiangxi hydraulic science & technology, 2018, 44(4): 297-301 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李晓洁. 生态放养鲢鳊在长寿湖水生态系统氮磷循环中的作用 [D]. 重庆: 西南大学, 2018. LI X J. Effects of ecological stocking silver carp and bighead carp on nitrogen and phosphorus cycle of aquatic ecosystem in Changshou Lake [D]. Chongqing: Southwest University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [26] 朱利明, 邹曦, 史方, 等. 三峡水库小江流域常见鱼类肌肉碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. 水生态学杂志, 2022, 43(5): 106-116. ZHU L M, ZOU X, SHI F, et al. The C:N:P ratio in muscle tissue of fish from Xiaojiang River [J]. Journal of hydroecology, 2022, 43(5): 106-116 (in Chinese with English abstract).
- [27] 郑磊. 基于生态模型的筲箕湖生物操纵情景模拟研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018. ZHENG L. Study on the simulation of bio-manipulation in Yundang lagoon using ecological models [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018 (in Chinese with English abstract).

Breeding and releasing scheme construction of large water surface using Ecopath model: with Weishui Reservoir as an example

FAN Zeyu^{1,2}, BAI Xuelan¹, XU Juchen¹, HUANG Luquang¹,
WANG Xiaoning¹, LÜ Yabing¹, HOU Jie^{1,3}, HE Xugang^{1,3}

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

2. Zhongnan Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China,
Changsha 410014, China;

3. Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry
in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China

Abstract In order to scientifically formulate the technical plan for the proliferation and release of large water surface and promote the sustainable and healthy development of ecological fishery, this study took the Weishui Reservoir as an example. On the basis of studying the ecological capacity of the reservoir by using the EwE software, 4 sets of proliferation and release schemes were constructed using the Ecopath model and the best scheme was selected through a comprehensive comparison of the ecological, social and economic benefits of each plan. The research results could provide new ideas and references for the scientific formulation of large-surface ecological fishery programs. The results showed that: (1) If economic benefits and social and environmental benefits such as nitrogen and phosphorus removal were taken as the preferred factors, scheme 1 was optimal, that was, breeding and releasing of silver carp and bighead carp, with the annual release numbers of 135 000 and 491 000, respectively. The annual maximum sustainable output of silver carp and bighead carp was 486.6 t and 1 766.8 t, the total output value, total profit value and unit output value are 80.402 million yuan, 70.037 million yuan and 3.502 million yuan/km², respectively, and the annual net removal of total nitrogen and total phosphorus could reach above 130.41 t and 36.98 t, the total primary productive force/total respiration (TPP/TR) value, connectivity index (CI) value, system omnivorous index (SOI) value and Shannon diversity index value of the ecosystem were 4.030, 0.304, 0.114 and 1.557, respectively. (2) If the health of the ecosystem and the economic benefits of fishery were considered comprehensively, scheme 3 was the best, that was, breeding and releasing of mandarin fish, yellow catfish, common carp, crucian carp, silver carp, and bighead carp with annual discharge numbers of 800, 19 000, 9 000, 11 000, 41 000 and 148 000, respectively. The annual maximum sustainable output could reach 1.2 t, 3.8 t, 18.8 t, 5.6 t, 162.8 t and 591.2 t, respectively. The total output value, total profit value and unit output value were 30.418 million yuan, 25.622 million yuan, and 1.281 million yuan/km², respectively, the annual net removal of total nitrogen and total phosphorus could reach above 46.73 t and 13.21 t, and the TPP/TR, CI, SOI and Shannon diversity index were 4.616, 0.302, 0.117 and 1.597, respectively. The above results show that the Ecopath model can be flexibly used to scientifically formulate large-water ecological fishery schemes according to the corresponding fishery management objectives.

Keywords Weishui Reservoir; Ecopath model; ecological capacity; ecological fishery; multi-trophic enhancement and release plan

(责任编辑:边书京)