

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220502001

http://www.yykxjz.cn/

冯瑞玉, 郭禹, 李金明, 孙金辉, 于刚, 吴一桂, 秦传新. 基于 EnhanceFish 模型的鱼类增殖放流策略研究: 以中山市南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流为例. 渔业科学进展, 2023, 44(5): 01-10  
FENG R Y, GUO Y, LI J M, SUN J H, YU G, WU Y G, QIN C X. Strategy of stock enhancement using EnhanceFish model: A case of *Acanthopagrus latus* enhancement in Nanlang water area, Zhongshan City. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(5): 01-10

# 基于 EnhanceFish 模型的鱼类增殖放流策略研究: 以中山市南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流为例\*

冯瑞玉<sup>1,2,3,5</sup> 郭禹<sup>1,5,6</sup> 李金明<sup>4</sup> 孙金辉<sup>2</sup>  
于刚<sup>1,6</sup> 吴一桂<sup>7</sup> 秦传新<sup>1,3,5,6①</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 农业农村部海洋牧场重点实验室 广东 广州 510300;  
2. 天津农学院 天津市水产生态及养殖重点实验室 天津 300384; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室  
广东 广州 511458; 4. 中山市农业科技推广中心 广东 中山 528400; 5. 国家渔业资源环境大鹏试验站  
广东 深圳 518120; 6. 海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室 海南 三亚 572025;  
7. 防城港市渔业技术推广站 广西 防城港 538001)

**摘要** 增殖放流是增殖受损生物资源和维持渔业可持续发展的重要途径,效果评估是增殖放流工作的重要环节。本研究引入 EnhanceFish 模型,从生态容量、种群结构、经济效益等方面对广东省中山市南朗水域黄鳍棘鲷(*Acanthopagrus latus*)增殖放流效果进行评估,探讨了 EnhanceFish 模型在我国渔业资源增殖放流效果评估中的应用潜力。结果显示,中山市南朗水域黄鳍棘鲷最大的放流数量为 160 万尾,最佳放流规格为全长 6 cm,可获最大净现值 6.2 万元,可适当提高捕捞努力量,增加渔民人均收入; EnhanceFish 模型能弥补其他评估方式功能单一的劣势,在生态容量评估中结果更精确,在种群结构评估中考虑更全面,在经济效益评估中更节约成本。因此, EnhanceFish 模型在我国渔业资源增殖活动中有一定的应用价值。

**关键词** EnhanceFish 模型; 生态容量评估; 种群结构; 经济效益

**中图分类号** S932.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)05-0001-10

渔业在拉动农业经济、调整产业结构、改善食品结构、提高就业率和渔民收入、改善人民生活水平等方面发挥了重大作用(程家骅等, 2010),但是,伴随人口的急剧增长和经济的高速发展,对鱼类产品需求量增加,致使海洋生物多样性减少和优势经济鱼类种群演替更新,渔业资源呈现低龄化、小型化和低质化

(蔡研聪等, 2018),许多渔业种群已经面临枯竭,无法再支持捕捞业的继续发展,造成渔业生物危机、生态危机、经济危机以及社会危机(唐启升等, 2014)。为改变这一局面,增殖放流成为各个国家普遍采取的方式。发达国家开展渔业增殖放流资源养护工作较早,在 20 世纪上半叶,美国、英国、加拿大、俄国、

\* 蓝色粮仓科技创新”专项(2018YFD0900905)、南方海洋科学与工程广东省实验室(GML2019ZD0402)、中国水产科学研究院南海水产研究所基本科研业务费(2020SY01)、防城港市重点研发计划项目(防科 AB21014021)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2020TS03)共同资助。冯瑞玉, E-mail: 1193502757@qq.com

① 通讯作者: 秦传新, 特聘研究员, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

收稿日期: 2022-05-02, 收修改稿日期: 2022-05-23

日本、挪威、澳大利亚等国先后开展了增殖放流活动(Waples *et al.*, 2016), 20世纪80年代后, 增殖放流成为我国增加资源量的重要手段, 放流苗种包括草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲫(*Carassius auratus*)、黄尾鲮(*Xenocypris davidi*)、鮠(*Culterinae*)、鲂(*Megalobrama skolkovii*)、鲷(*Pagrus major*)、对虾(*Penaeus orientalis*)等90多种(罗刚等, 2016)。

在增殖放流过程中, 放流前的生态容量评估, 如放流苗种的数量、规格是增殖放流策略的基础, 是指导科学放流的关键因素(鲁玲, 2020)。目前, 放流前的生态容量评估方法主要有: 产量回推法, 即根据某一水域物种的平均产量和死亡系数等参数推算增殖的生态容纳量; 模型法, 如生态动力学模型(Ecopath II)可以在研究水域生态系统结构和功能的基础上, 确定单一物种的环境容纳量(Haddon, 2011; 唐启升, 2019)。除此以外, 增殖放流效果的评估也是增殖放流工作中的重要一环, 包括生态效益、经济效益和社会效益, 能为今后改进增殖放流策略、开展科学性管理提供重要的理论依据(Chen *et al.*, 2015)。目前, 效果评估的方式主要有标记法(王硕等, 2022)、生物遥测法、经验评估法、放流效果统计量评估法(陈丕茂, 2006)等。

EnhanceFish 模型是一款由 Lorenzen (2005a)和 Medley 等(2005)研发的决策定制工具, 可以用于评估孵化鱼的放流是否能达到预期的生物量、评估增殖放流对目标物种的野生种群的影响、估计种群参数、确定最佳放流方案和捕捞努力量等。在国外, 北海鲷鱼(*Solea solea*) (Lorenzen, 2005b)、美国佛罗里达大口黑鲈(*Micropterus floridanus*) (Garlock *et al.*, 2014、2019)、眼斑拟石首鱼(*Sciaenops ocellatus*) (Camp *et al.*, 2013)以及美国加利福尼亚白鲈鱼(*Atractoscion nobilis*) (Hervas *et al.*, 2010)的增殖放流活动前后的评估中都应用了 EnhanceFish 模型。国内放流评估普遍采用 Ecopath 模型, 尚未见有关 EnhanceFish 模型报道。

本文以广东省中山市南朗水域为研究区域, 基于2020年的此海域放流数据, 运用 EnhanceFish 模型评估增殖放流黄鳍棘鲷(*Acanthopagrus latus*)亲体量与放流数量的关系、鱼类密度依赖度及遗传力对种群结构的影响、最佳放流方案和捕捞对经济效益的影响, 探讨 EnhanceFish 模型在我国增殖放流效果评估中的适用性, 为我国科学评估增殖放流效果提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查水域与数据来源

本研究于2020年6月在中山市南朗水域开展黄鳍棘鲷增殖放流活动(图1), 在锦绣海湾城(113°33'24.648"E, 22°25'11.215"N)共放流全长为(5.5±0.3) cm 的黄鳍棘鲷 120.9 万尾, 评估水域为中山市南朗水域(113°33'0"~113°36'56"E, 22°23'23"~22°30'0"N), 位于广东省珠江河口东北处, 面积约为75 km<sup>2</sup>, 调查水域年平均温度为23℃, 平均盐度为7.41, 平均pH值为8.19, 平均溶解氧为8.17 mg/L, 为浅海区半咸淡水域, 海岸线长约30 km, 有多个港口, 拥有丰富的渔业、旅游业和诸多自然保护区等多种资源(党二莎等, 2019)。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 模型原理** EnhanceFish 模型的核心是一个数学种群模型, 模拟动态水域渔业资源增殖, 由一系列生态相互关联的参数构成, 主要包括生命周期、生长系数、死亡率、性成熟、遗传力、补充量、经济成本以及捕捞努力量等, 能够基本涵盖整个生产属性。在 EnhanceFish 模型中输入参数后会自动构建研究水域当前的渔业资源增殖模型, 基于初始模型再进行变量调控, 即通过不断调试增殖放流方案(包括放流密度、放流规格), 直到达到最优的增殖放流效果。运用该模型可以预测和分析增殖放流水域的生态

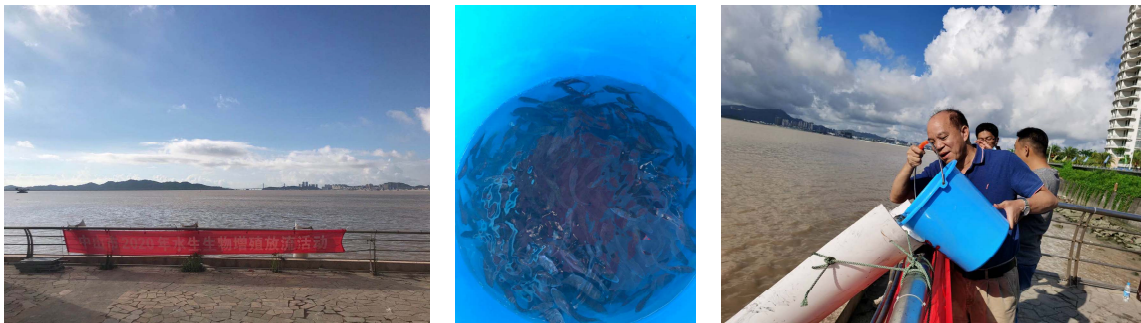


图1 南朗水域黄鳍棘鲷放流现场

Fig.1 *Acanthopagrus latus* releasing site in Nanlang water area

容量、种群结构以及经济效益, 适用于不同的管理调控, 如制定放流方案、调控捕捞努力量、计算经济效益、分析种群结构等。

**1.2.2 基础参数设定** 设置参数是 EnhanceFish 模型分析最重要的一步, 所需参数共 7 个部分(表 1)。生命周期: 根据黄鳍棘鲷苗种的培育记录及 2020 年 10 月放流跟踪调查数据; 生长系数: 黄鳍棘鲷体长与体重的关系为  $W=7.831 \times 10^{-5} L^{2.830}$  应用 von Bertalanffy 的生长方程, 黄鳍棘鲷生长方程为(张邦杰等, 1998):  $L_t=248.176[1-e^{-1.031 \cdot 4(t+0.148)}]$ ,  $W_t=469.293[1-$

$e^{-1.031(t+0.148)}]^{2.830}$ ; 死亡率: 自然死亡率与体重的关系  $M=3W^{-0.29}$ , 孵化鱼放流后的自然死亡率与野生鱼类相似(Lorenzen, 1996); 繁殖: 目前未查阅到研究黄鳍棘鲷性成熟的文献, 黑鲷(*Acanthopagrus schlegeli*)与黄鳍棘鲷同属鲷科暖水性浅海底层鱼类(施晓峰等, 2012), 本研究参考大亚湾黑鲷的性成熟系数(陈得仿, 2019); 遗传力( $h^2$ )是指相对于在当前和最优性状值之间的选择差异在下一代体内产生的性状变化, 形态性状变化的遗传力一般在 0.2 左右, 适应度性状遗传力一般较低, 在 0.01~0.10 之间(Moussau *et al*, 1987);

表 1 模型参数及数值  
Tab.1 Model parameters and their values

参数 Parameter	定义 Definition	南朗水域黄鳍棘鲷 <i>A. latus</i> in the Nanlang waters
生命周期 Life cycle		
$L_0$	幼体转变时的体长 Length at larval/juvenile transition (settlement)	2 cm
$L_r$	补充时的体长 Length at recruitment	5.5 cm
$a_r$	补充时的年龄 Age at recruitment	0.244 year
生长 Growth		
$L_{\infty L}$	$B>0$ 的渐进长度 Asymptotic length at $B > 0$	24.82 cm
$K$	生长系数 Growth rate	1.03 year <sup>-1</sup>
$g$	竞争系数 Competition coefficient	10 <sup>-5</sup> cm/t
$\alpha$	体长-重量关系系数 Coefficient of length-weight relationship	73×10 <sup>-5</sup>
$\beta$	体长-重量关系指数 Exponent of length-weight relationship	23
自然死亡率 Natural mortality		
$M_{1,W}$	$L=1$ cm 时野生苗种的死亡率 Mortality of wild phenotype at $L=1$	17.38 year <sup>-1</sup>
$M_{1,S}$	$L=1$ cm 时孵化苗种的死亡率 Mortality of hatchery phenotype at $L=1$ cm	17.38 year <sup>-1</sup>
繁殖 Reproduction		
$L_m$	成熟长度 Length at maturity	15 cm
$p$	成熟度曲线的斜率 Steepness of maturity curve	-0.4
补充 Recruitment		
$a^*$	单位 SSB 的最大产卵量 Maximum recruits per unit SSB	21.72 kg
$b^*$	最高补充量 Maximum average recruitment	1 600 000
进化 Evolution		
$h^2$	生活史性状的遗传力 Heritability of life history traits	
经济 Economics		
$Y_1$	孵化鱼苗单位成本 Unit cost of hatchery fish	0.6 CNY (empirical model)
$Y_2$	捕捞努力成本 Effort costs	2 000 000 CNY
$K_2$	管控成本 Control cost	0 CNY
$\eta$	船上交易价格 Ex-vessel price of fish	6 (empirical model)

补充量:确定放流-补充关系的初始斜率( $a^*$ )和补充量的最大值( $b^*$ )(Myers, 2001);经济:2020年惠农网上广东省黄鳍棘鲷的单价(catch prices)为60元/kg。捕捞成本(effort costs)是与渔具选择中建立的捕捞死亡率模型相关的捕鱼总成本,主要包括与捕捞的所有投入有关的固定成本和变动成本,如船只折旧、购买渔具、燃料和劳动力。管理费用(control costs)指为了将海域控制在特定合理水平上投入的管理费用,包括渔业监测或研究的费用,净现值(net present value)指未来资金流入现值与未来资金流出现值的差额,是评估项目经济效益的基本指标。

## 2 结果

### 2.1 增殖放流容量评估

放流前中山市南朗水域黄鳍棘鲷的捕捞努力量与经济利益关系如图2所示,假设当前的捕捞努力量 $E=1$ ,当 $E>2$ 时,投入的捕捞成本过高,所获利润过低,无研究参考价值,因此, $E$ 的界限为0~2。自然补充量由水域原有亲体量(SSB)和密度依赖程度决定,公式为:

$$\text{单卵量: } a^* = fa_1a_2$$

$$\text{补充量: } b^* = fb_1 + fa_1b_2$$

式中, $f$ 是每条雌鱼的产卵量, $a_1$ 为鱼苗在培育阶段的成活率, $a_2$ 为从放流到捕捞阶段的成活率, $b_1$ 为培育阶段的密度依赖性, $b_2$ 为从放流到捕捞阶段密度依赖性(Wiff *et al.*, 2018)。EnhanceFish模型基于生命历史参数、放流前捕捞量的调查数据和Myers标准化斜率建模(图3),换算后,亲体补充曲线原点处的斜率可以解释为最大繁殖率,即在低丰度和无捕捞的情况下每个亲体每年的平均产卵量(Myers, 2001)。从图3可知,当SSB=0时,自然补充量为0,最大放流黄鳍棘鲷数量为160万尾;当SSB=200万尾时,自然补充量达到渐近值,无需放流,因此,放流密度的界限为0~160万尾。

### 2.2 增殖放流对种群结构的影响

在种群动态建模中,解释野生鱼类和孵化鱼之间生态差异最简单且直接的方法是将种群分解成具有不同生命特征的3部分:野生(在自然环境中生长、繁殖后代,不需要人工喂养的种群)、放流后代(增殖放流的鱼苗在天然环境下自然繁育的后代)、放流(直接向天然水域投放人工孵化的渔业生物卵子、幼体或成体的种群),从而分析放流密度与种群捕捞量之间的关系。图4为南朗水域黄鳍棘鲷种群结构 EnhanceFish

模型基本输出情况。从图4可以看出,随着放流密度的增加,放流群体的捕获量呈现上升的趋势;放流后代种群的捕获量首先呈现上升趋势(斜率大于放流群体的斜率),然后缓慢下降。当放流密度在80~150万尾,3种群体的结构较平衡,捕获量差小于1万尾;当放流密度大于150万尾,放流种群的捕获量开始超过野生和放流后代种群,说明增加放流密度会增加总产量,使捕捞量增多,但任意大规模放流可能会使生物量组成结构受到影响,甚至改变种群的遗传结构。

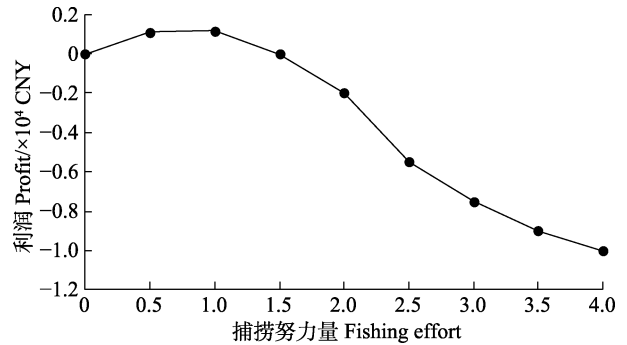


图2 捕捞努力量对经济效益的影响

Fig.2 Impact of fishing effort on economic benefit

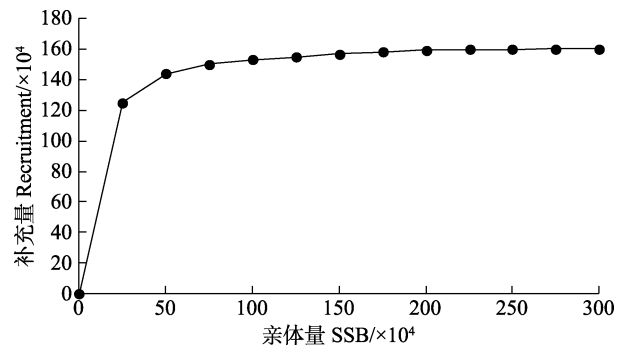


图3 亲体量与补充量的关系

Fig.3 Relationship between SSB and recruitment

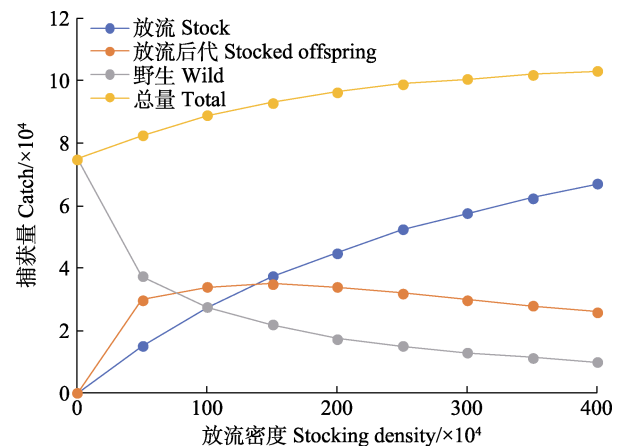


图4 捕获量随放流密度的变化情况

Fig.4 The change of catch with stocking density

### 2.3 放流密度与捕捞努力量对经济效益的影响

运用 EnhanceFish 模型构建关于经济效益随放流密度和捕捞努力量的变化情况三维示意图(图 5)。从图 5 可见, 当  $0 < E < 0.7$  时, 捕捞收益小于放流成本, 此时经济效益随放流密度的增加而下降; 当  $0.7 < E < 2$  时, 捕捞收益超过成本, 放流密度与经济效益成正比。当放流密度达到约 160 万尾时, 经济效益最高, 结合图 5b 可以看出, 当  $E=1$  时,  $NPV \approx 54\ 000$  元; 当  $E=1.5$  时, 经济效益曲线达到最高点,  $NPV \approx 6\ 200$  元。2020 年 6 月在南朗水域放流(5.5±0.3) cm 黄鳍棘鲷鱼苗 120.9 万尾, 捕捞努力量  $E=1$ , 根据图 5 可得出, 2020 年南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流的经济效益为 54 500 元。

### 2.4 放流规格与捕捞努力量对经济效益的影响

放流规格直接决定增殖放流的投入成本, 是影响经济效益的关键因素。为探究经济效益随放流规格与

捕捞努力量的变化情况, 本研究以 2020 年南朗水域实际放流数量为前提, 构建三者的关系图(图 6), 形似一个正方拱形, 每个点对应 3 个不同的指标, 可以在放流密度确定的情况下, 根据经济效益预估结果进一步确定放流规格、调控捕捞努力。结果显示, 在南朗水域放流黄鳍棘鲷 120.9 万尾的情况下, 最佳放流规格为 6 cm。如图 6b 所示, 在大多数放流规格下, 捕捞努力量  $E$  和经济效益的关系是增长的渐进曲线, 当  $E \approx 0.9$  或  $E \approx 1$ , 经济效益达到渐进值, 开始增长缓慢, 例如, 放流规格为 5.5 cm 时, 当  $E=1$ ,  $NPV \approx 54\ 500$  元; 当  $E=1.3$ ,  $NPV \approx 58\ 000$  元; 当  $E=1.6$ ,  $NPV \approx 60\ 000$  元; 当  $E=2$ ,  $NPV \approx 61\ 000$  元, 可见经济效益的增长率逐渐降低, 这表明在放流规格一定的情况下, 捕捞努力量到达临界值后, 仅靠提高捕捞努力量来增加经济效益不可行, 管理者需根据实际情况酌情调控捕捞努力量, 以此有效提高渔民人均收入。

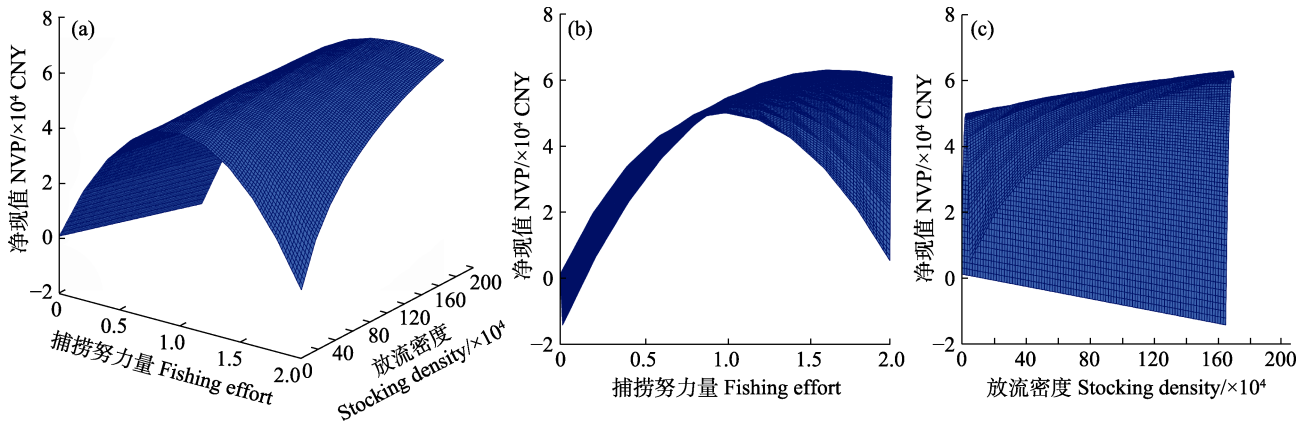


图 5 不同放流密度和捕捞努力量对净现值的影响  
Fig.5 Effects of different stocking densities and fishing efforts on net present value

a: 立体图; b: 正视图; c: 右视图  
a: Stereogram; b: Front view; c: Right view

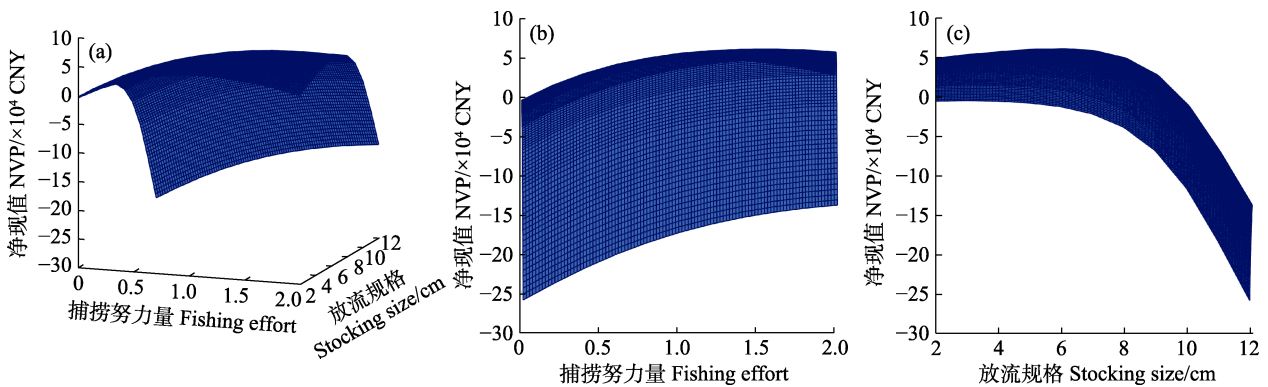


图 6 不同放流规格和捕捞努力量对净现值的影响  
Fig.6 Effects of different stocking sizes and fishing efforts on net present value

a: 立体图; b: 正视图; c: 右视图  
a: Stereogram; b: Front view; c: Right view

## 2.5 增殖放流方案

本研究在放流数量的界限内,不断调整放流密度,从而确定最佳放流规格和捕捞努力量,对比不同放流策略下的经济效益,具体预测见表2。分析可知:一方面,放流鱼苗规格与成本和成活率的关系都是增长指数函数,投入成本和成活率都直接影响增殖放流的经济效益(李陆斌,2011),因此,必须综合考量选定最适合的放流规格,据表2可知,黄鳍棘鲷的最优放流规格在6.0~6.5 cm之间,放流密度越大,最优放流规格越小;另一方面,调控捕捞努力量是保障渔民收入、保护生物多样性的重要手段,表2中的捕捞努力量增减倍数由最大净现值时的 $E$ 值决定,以此分析捕捞努力量对经济效益的贡献率,分析可见,当放流密度为80万尾时,在当前捕捞努力量( $E=1$ )情况下增加0.2倍,净现值增加了1000元,达到最大经济效益,而当放流密度为160万尾时,在捕捞努力量界限内(0~2)每增加0.5倍的捕捞努力量,净现值分别增加约5万元、1万元、2千元、0元(甚至负增长),这说明当捕捞努力量达到一定水平后,再加大捕捞并不会带来明显的经济效益,反而会破坏生态结构、降低渔民的平均收入,管理者需要结合实际情况,反复调试对比,选取最佳方案。

表2 黄鳍棘鲷增殖放流方案效果评估  
Tab.2 Effect evaluation of *Acanthopagrus latus* stock enhancement schemes

放流密度 Stocking density/ $10^4$	最优放流规格 Optimum stocking size/cm	捕获量 Catch/ $10^4$	捕捞努力量 Effort	净现值 Net present value/ $10^4$ CNY
80	6.5	2.10	0.8	5.20
			1.0	5.30
			1.2	5.40
100	6.5	2.75	0.8	5.30
			1.0	5.40
			1.2	5.50
120	6.0	3.30	0.6	4.20
			1.0	5.47
			1.4	5.90
140	6.0	3.70	0.5	4.50
			1.0	5.80
			1.5	6.00
160	6.0	4.05	0.5	5.00
			1.0	6.00
			1.5	6.20

## 3 讨论

增殖放流效果评估是放流工作中重要的环节, EnhanceFish 模型在增殖放流生态容量评估、种群恢复效果评估和经济效果评估等方面有着一定的优势。

### 3.1 增殖放流生态容量评估

我国目前进行增殖放流生态容量评估的方法主要有 Ecopath 模型和经验评估法。Ecopath 模型是基于生态系统的营养动力学原理和能量流动特征,不仅用于估算生态容量,还用于评估生态系统的结构功能(莫宝霖等,2017),虽然 EnhanceFish 模型目前不能利用能量流动及发育状况分析水域生态结构,但在生态容量评估方向上能提供更专业、精准的方案。刘岩等(2019)基于 Ecopath 模型对珠江口6种增殖放流种类生态容纳量估算,其中,黄鳍棘鲷的最大生物容纳量为  $650 \text{ kg/km}^2$ ,此结果为珠江口黄鳍棘鲷的增殖放流规模提供了一定范围,但没有提出精确数量。本研究通过建立黄鳍棘鲷各个参数组,利用种群补充量关系、生长状况及密度依赖度构建 EnhanceFish 模型,探明亲体量与生物补充量间的关系,得出最优放流规格为全长6 cm,最大放流数量为160万尾,即  $190 \text{ kg/km}^2$ 。2020年中国水产科学研究院南海水产研究所根据经验评估法,在南朗水域放流120.9万尾黄鳍棘鲷,约  $145 \text{ kg/km}^2$ ,与研究结果相近,再次证实了 EnhanceFish 模型更精准、更具科学性。

虽然国内目前尚未见有关 EnhanceFish 模型的应用与报道,但在国外该模型已较成熟,基于该模型,柬埔寨 Thmorda 水库放流9 cm的银高体鲃 (*Barbonymus gonionotus*)鱼苗15000尾,获得经济效益1200美元(Lorenzen, 2005a); Hervas 等(2010)在加州开展白鲈增殖实验,建立了一套考虑生长、繁殖和密度依赖的自然和捕捞死亡模式的生存模型,提出在最佳条件下(网圈驯化春季)放流,使存活率相比之前提高了10%。除此以外,北海鲷、加利福尼亚白鲈、佛罗里达黑鲈以及眼斑拟石首鱼的增殖放流中也采用了 EnhanceFish 模型(Hervas *et al.*, 2010; Camp *et al.*, 2013; Garlock *et al.*, 2014、2019; Lorenzen, 2005b),该模型对资源增殖生态容量评估的可行性在诸多应用中已经得到证实。

### 3.2 增殖放流种群结构效果评估

增殖放流会增加生物量和产量,但在补充的种群中,密度依赖性会越来越抑制增长,生物遗传的自然选择也会降低野生种群对渔业的贡献。增殖放流对种

群结构的影响,一方面,受密度依赖性影响,放流数量与野生及放流后代种群的产量成反比,放流数量越多,对原本的种群结构影响越大。Lorenzen 等(2002)研究表明,放流时生境的承载能力由密度依赖的生长因子决定,如果生长因子等于零,则放流生境的承载能力无限高(这是一个理想化的假设),生长因子越大,则放流鱼类的栖息地承载能力越低。在水产养殖和增殖放流中,种群密度直接由放流控制,因此,放流物种的密度依赖性是影响放流数量的关键因素。另一方面,增殖放流群体的产量与依靠自然补充的野生和孵化群体的产量在后期呈现不同的变化,受遗传力影响,放流密度越大时,孵化类群体的产量逐渐降低并趋近于野生群体的产量。Lorenzen (2005)通过北海鲷种群增加的动态研究也证实了这一结论,研究结果表明,野生群体的生境适应力高于人工孵化群体,自然选择会把作用于 3 种群体的平均性能转移到野生群体的性能上,这一过程可以理解为后代从孵化类向野生类的转变,其速率等于遗传力(ICES, 2004)。因此,在放流策略的制定中,考虑密度依赖性和遗传力是非常有必要的,然而,以往的方法在生态效益评估中更加注重渔业资源增殖和生物多样性的维持,没有考虑增殖对目标种群后代结构的影响,而 EnhanceFish 模型在基本参数设定中纳入了密度依赖性和遗传力,可见 EnhanceFish 模型涉及参数多、综合性强、科学性高。

### 3.3 增殖放流经济效果评估

在我国较为普遍的经济效果评估方式主要是标记法和统计量评估法。标记法以直接、易观察的优势在增殖放流中常被采纳,目前,在黄鳍棘鲷(吕少梁等, 2019)、石斑鱼(*Epinephelus awoara*)(韩书煜等, 2010)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)(刘芝亮等, 2013)、半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)(柳学周等, 2013)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)(朱亚华等, 2021)、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)(赵莲等, 2018)、鲮(冯晓婷等, 2019)等放流标记和判别都进行了研究。然而,这种方法对鱼体会造成一定伤害,稳定性较差,且需要大量的物力和人力,并不适合大规模增殖放流。相比之下, EnhanceFish 模型是数学种群模型,由一系列生态相互关联的参数构成,能够基本涵盖整个生产属性,易操作、成本低、受限少。

统计量评估法是根据放流前本底调查和放流后跟踪调查,经验公式分析放流后的生长状况,计算回捕生物量,分析增殖放流对水域资源量及经济效益的影响(陈丕茂, 2006)。该方法在广东沿海水域的鱼类、虾类、蟹类等诸多种类中均有使用(Chen *et al*, 2015)。

虽然 EnhanceFish 模型在我国还未使用过,但本研究运用该模型对 2020 年中山市南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流经济进行评估,评估结果为 54 500 元,与统计量评估法的结果(57 000 元)相近。相比之下, EnhanceFish 模型可以在方案制定阶段就预估增殖放流后的经济效益,且不需要后期跟踪调查,具有前瞻性和预见性、成本较低且结果准确的优势。

## 4 结论

科学、高效地评估增殖放流的潜力和效果,对于下一步高质量开展水生生物资源养护有重要意义。本研究引入 EnhanceFish 模型从生态容量、种群结构和经济效益三方面对 2020 年中山市南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流潜力进行评估,研究结果表明,最大的放流数量为 160 万尾,最佳放流规格为 6 cm,可获最大净现值为 62 000 元,可适当提高捕捞努力量,增加渔民人均收入,总之, EnhanceFish 模型具有准确性、科学性、可行性、综合性、前瞻性、适用性、成本低、易操作等优势,对于我国增殖放流策略研究有一定的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- CAI Y C, XU S N, CHEN Z Z, *et al*. Current status of community structure and diversity of fishery resources in offshore northern South China Sea. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 10–18 [蔡研聪, 徐姗楠, 陈作志, 等. 南海北部近海渔业资源群落结构及其多样性现状. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 10–18]
- CAMP E V, LORENZEN K, AHRENS R N M, *et al*. Potentials and limitations of stock enhancement in marine recreational fisheries systems: An integrative review of Florida's red drum enhancement. *Reviews in Fisheries Science*, 2013, 21(3/4): 388–402
- CHEN D F. General situation of fishery resources in Daya Bay and study on growth and reproduction of *Acanthopagrus schlegelii*. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2019 [陈得仿. 大亚湾渔业资源概况及黑鲷的生长、繁殖研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2019]
- CHEN P M. Study on the method for assessment of enhancement effect of fishery stock. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(1): 1–4 [陈丕茂. 渔业资源增殖放流效果评估方法的研究. *南方水产*, 2006, 2(1): 1–4]
- CHEN P M, QIN C X, YU J, *et al*. Evaluation of the effect of stock enhancement in the coastal waters of Guangdong, China. *Fisheries Management and Ecology*, 2015, 22(2): 172–180
- CHENG J H, JIANG Y Z. Marine stock enhancement: Review

- and prospect. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(3): 610–617 [程家骅, 姜亚洲. 海洋生物资源增殖放流回顾与展望. *中国水产科学*, 2010, 17(3): 610–617]
- DANG E S, TANG J Y, ZHOU L N, *et al.* Water quality assessment and eutrophication analysis in coastal waters of Pearl River estuary. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(4): 580–587 [党二莎, 唐俊逸, 周连宁, 等. 珠江口近岸海域水质状况评价及富营养化分析. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(4): 580–587]
- FENG X T, YANG X W, YANG X J, *et al.* Microsatellite method assessment of the effects of restocking enhancement of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) in Jiangsu reaches of the Yangtze River. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(6): 1185–1193 [冯晓婷, 杨习文, 杨雪军, 等. 基于微卫星标记对长江江苏段鳊增殖放流效果评估. *中国水产科学*, 2019, 26(6): 1185–1193]
- GARLOCK T M, CAMP E V, LORENZEN K. Efficacy of largemouth bass stock enhancement in achieving fishery management objectives in Florida. *Fisheries Research*, 2019, 213: 180–189
- GARLOCK T M, MONK C T, LORENZEN K, *et al.* Effects of hatchery rearing on Florida largemouth bass *Micropterus floridanus* resource allocation and performance under semi-natural conditions. *Journal of Fish Biology*, 2014, 85(6): 1830–1842
- HADDON M. Modelling and quantitative methods in fisheries. *Modelling and Quantitative Methods in Fisheries*, 2011
- HAN S Y, ZOU J W, CHEN J F, *et al.* Study on marking technique of *Epinephelus awoara* for artificial stocking. *Modern Fisheries Information*, 2010, 25(3): 12–14, 17 [韩书煜, 邹建伟, 陈剑锋, 等. 人工增殖放流石斑鱼类的标识技术研究. *现代渔业信息*, 2010, 25(3): 12–14, 17]
- HERVAS S, LORENZEN K, SHANE M A, *et al.* Quantitative assessment of a white seabass (*Atractoscion nobilis*) stock enhancement program in California: Post-release dispersal, growth and survival. *Fisheries Research*, 2010, 105(3): 237–243
- ICES. Report of the working group on the assessment of demersal stocks in the North Sea and Skagerrak [9–18 September, 2003, Boulogne-sur-Mer, France]. ICES, 2004
- LI L P. Preliminary study on living aquatic resources enhancement in China. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2011 [李陆嫔. 我国水生生物资源增殖放流的初步研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2011]
- LIU X Z, XU J Y, CHEN X Z, *et al.* Study on tagging of the tongue sole using T-bar tags. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(2): 273–280 [柳学周, 徐永江, 陈学周, 等. 半滑舌鲷苗种体外挂牌标志技术研究. *海洋科学进展*, 2013, 31(2): 273–280]
- LIU Y, WU Z Y, YANG C P, *et al.* Ecological carrying capacity of six species of stock enhancement in Pearl River estuary based on Ecopath model. *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. *南方水产科学*, 2019, 15(4): 19–28]
- LIU Z L, XU Y J, LIU X Z, *et al.* Tagging of Japanese flounder using T-bar tags. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(6): 80–86 [刘芝亮, 徐永江, 柳学周, 等. T 型标志牌标记牙鲆苗种. *渔业科学进展*, 2013, 34(6): 80–86]
- LORENZEN K, ENBERG K. Density-dependent growth as a key mechanism in the regulation of fish populations: Evidence from among-population comparisons. *Proceedings of Biological Science*, 2002, 269(1486): 49–54
- LORENZEN K. EnhanceFish: Fisheries enhancement decision support tool and toolkit. Final Technical Report, 2005a
- LORENZEN K. Population dynamics and potential of fisheries stock enhancement: Practical theory for assessment and policy analysis. *Philosophical Transactions - Royal Society. Biological Sciences*, 2005b, 360(1453): 171–189
- LORENZEN K. The relationship between body weight and natural mortality in juvenile and adult fish: A comparison of natural ecosystems and aquaculture. *Journal of Fish Biology*, 1996, 49: 627–647
- LU L. Enhancement and release of marine fishery resources and their fishery benefits. *Agriculture Development and Equipment*, 2020(11): 132–133 [鲁玲. 海洋渔业资源增殖放流及其渔业效益. *农业技术与装备*, 2020(11): 132–133]
- LÜ S L, WANG X F, LI C H. Optimization of key procedures for fish tagging and releasing with its application to yellowfin seabream (*Acanthopagrus latus*). *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(3): 584–592 [吕少梁, 王学锋, 李纯厚. 鱼类标志放流步骤的优选及其在黄鳍棘鲷中的应用. *水产学报*, 2019, 43(3): 584–592]
- LUO G, ZHUANG P, ZHAO F, *et al.* Development status, existing issues and countermeasure in the selection of suitable species for stock. *Marine Fisheries*, 2016, 38(5): 551–560 [罗刚, 庄平, 赵峰, 等. 我国水生生物增殖放流物种选择发展现状、存在问题及对策. *海洋渔业*, 2016, 38(5): 551–560]
- MEDLEY P, LORENZEN K. EnhanceFish: A decision support tool for aquaculture-based fisheries enhancement. Software package. Version 1.0. 2005
- MO B L, QIN C X, CHEN P M, *et al.* Preliminary analysis of structure and function of Daya Bay ecosystem based on Ecopath model. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(3): 9–19 [莫宝霖, 秦传新, 陈丕茂, 等. 基于 Ecopath 模型的大亚湾海域生态系统结构与功能初步分析. *南方水产科学*, 2017, 13(3): 9–19]
- MOUSSAU M, ROFF D A. Natural selection and the heritability of fitness components. *Heredity*, 1987, 59(2): 181–197
- MYERS R. Stock and recruitment: generalizations about maximum reproductive rate, density dependence, and



- variability using meta-analytic approaches. *ICES Journal of Marine Science*, 2001, 58(5): 937–951
- SHI X F, SHI H L, LOU B, *et al.* Biological characteristics and artificial propagation, culture technique for *Sparus latus* (*Houttuyn*). *Hebei Yuye*, 2012(1): 52–55 [施晓峰, 史会来, 楼宝, 等. 黄鳍鲷生物学特性及人工繁育现状. *河北渔业*, 2012(1): 52–55]
- TANG Q S, DING X M, LIU S L, *et al.* Strategy and task for green and sustainable development of Chinese aquaculture. *Chinese Fisheries Economics*, 2014, 32(1): 6–14 [唐启升, 丁晓明, 刘世禄, 等. 我国水产养殖业绿色、可持续发展战略与任务. *中国渔业经济*, 2014, 32(1): 6–14]
- TANG Q S. Fishery resources enhancement, marine ranch, enhanced fisheries and its development orientation. *China Fisheries*, 2019(5): 28–29 [唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位. *中国水产*, 2019(5): 28–29]
- WANG S, ZHANG B L, GUO B, *et al.* Study of the feasibility of identifying the group of released *Liza haematocheila* by using the strontium marking method in otoliths. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(1): 38–45 [王硕, 张博伦, 郭彪, 等. 耳石锶标记识别放流群体的可行性研究. *渔业科学进展*, 2022, 43(1): 38–45]
- WAPLES R S, HINDER K, KARLSSON S *et al.* Evaluating the Ryman-Laikre effect for marine stock enhancement and aquaculture. *Current Zoology*, 2016, 62(6): 617–627
- WIFF R, FLORES A, NEIRA S, *et al.* Estimating steepness of the stock-recruitment relationship in Chilean fish stocks using meta-analysis. *Fisheries Research*, 2018, 200: 61–67
- ZHANG B J, LIANG R J, MAO D N, *et al.* Growth characteristics of pond-reared *Sparus latus* and its rearing technique. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1998, 7(2): 107–114 [张邦杰, 梁仁杰, 毛大宁, 等. 黄鳍鲷的池养生长特性及其饲养技术. *上海水产大学学报*, 1998, 7(2): 107–114]
- ZHAO L, LI Z H, ZHANG P, *et al.* Identification on stock enhancement pedigrees of the swimming blue crab *Portunus trituberculatus* using mtDNA SNPs. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 156–163 [赵莲, 李志辉, 张培, 等. 三疣梭子蟹线粒体基因组 SNP 在增殖放流家系识别中的应用. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 156–163]
- ZHU Y H, JIANG T, CHEN X B, *et al.* Effect evaluation of alizarin complexone marking for otoliths of juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*). *South China Fisheries Science*, 2021, 17(5): 93–100 [朱亚华, 姜涛, 陈修报, 等. 茜素络合物在青鱼幼鱼耳石上的标记效果评价. *南方水产科学*, 2021, 17(5): 93–100]

(编辑 冯小花)

## Strategy of Stock Enhancement Using EnhanceFish Model: A Case of *Acanthopagrus latus* Enhancement in Nanlang Water Area, Zhongshan City

FENG Ruiyu<sup>1,2,3,5</sup>, GUO Yu<sup>1,5,6</sup>, LI Jinming<sup>4</sup>, SUN Jinhui<sup>2</sup>, YU Gang<sup>1,6</sup>, WU Yigui<sup>7</sup>, QIN Chuanxin<sup>1,3,5,6①</sup>

- (1. *South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China*; 2. *Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China*;  
3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China*;  
4. *Zhongshan Agricultural Technology Extension Center, Zhongshan 528400, China*;  
5. *National Fishery Resources and Environment Dapeng Observation and Experimental Station, Shenzhen 518120, China*;  
6. *Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya 572025, China*; 7. *Fangchenggang Fisheries Technology Extension Station, Fangchenggang 538001, China*)

**Abstract** In recent years, the fishery resources in China's coastal and inland waters have declined seriously, along with a significant decrease in the number of economic fish stocks in many natural waters. Enhancement and release are important measures to conserve fishery resources, protect biodiversity and replenish the fishery environment. Since the 1980s, enhancement and release have gradually become an important way to increase fishery resources in China. With the yearly increase in variety, quantity, and scale of enhancement and release, the problem with the low efficiency of enhancement and release has become increasingly prominent. Therefore, a scientific and reasonable

① Corresponding author: QIN Chuanxin, E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

variant of the enhancement and release technique is the key to ensure its successful role in resource proliferation, including prior scientific planning as well as an accurate evaluation post release. At present, there are many studies on release assessment methods. Ecopath model method and empirical assessment method are often used to carry out pre-release planning research. Ecopath model method determines the release quantity in the water area by calculating the ecological capacity of the release water area. However, this method, like the empirical assessment method has the disadvantage of an extensive assessment of the capacity limiting its accuracy in planning the release quantity. The commonly used methods for evaluating the effect of post-release include external tagging method and statistical evaluation method. The external tagging method causes certain damage to fish and has poor stability, making it unsuitable for large-scale enhancement and releasing. The statistical evaluation method needs regular follow-up post release, making it manpower-, resources- as well as cost-intensive. In order to formulate scientific enhancement and release strategies and improve the effect of breed enhancement and release, the EnhanceFish model was introduced in this study using *Acanthopagrus latus* as the research object, Nanlang water area as the research area, and considering the life cycle, growth rate, mortality, sexual maturity, heritability, recruitment, economic cost and effort as the study parameters. The enhancement and release model of *A. latus* in Nanlang water was constructed, and the optimal release size, ecological capacity, population structure, and economic benefits of *A. latus* were scientifically evaluated in order to provide scientific guidance for the rational and standardized formulation of enhancement and release strategies.

In this study, the effects of spawning stock biomass, profit, and fishing effort on the ecological structure of *A. latus* were comprehensively considered, and an intuitive data model was constructed to determine the range of release quantity and fishing effort. The results showed that the natural recruitment amount increased with the increase in releasing quantity. When the release quantity was 2 million, the natural recruitment amount reached the progressive value of 1.6 million. Therefore, the number of *A. latus* released in Nanlang water area was 0–1.6 million. While evaluating the relationship between fishing effort and economic benefit before release, the profit was 1 000 CNY assuming the current fishing effort  $E=1$ . When the fishing effort was  $E<1$ , the profit increased with the increase in fishing effort. When it was  $E>1$ , the profit decreased with the increase in fishing effort. When it was  $E>2$ , the profit was 2 000 CNY, which has no research value. Therefore, the limit of fishing effort  $E$  is 0–2.

**Key words** EnhanceFish model; Ecological capacity assessment; Stock structure; Economic benefit