

## 死亡因素对放流明对虾群体资源变动及生物学参考点影响的量化评估

徐海龙<sup>1,2</sup>, 陈新军<sup>1\*</sup>, 陈勇<sup>3</sup>, 谷德贤<sup>4</sup>, 乔秀亭<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 天津农学院水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300384;

3. 美国缅因大学海洋科学学院, 缅因 04469;

4. 天津市水产研究所, 天津 300171)

**摘要:** 为评估环境突变、被捕食、纳潮、非法捕捞和交尾死亡对资源量和渔获量的影响, 及5种死亡因素和与生长有关的参数引入不确定性对估算生物学参考点( $F_{\max}$ 和 $F_{0.1}$ )的影响, 基于发展的可应用于研究放流增殖渔业的YPR(yield per recruitment)模型, 模拟5种死亡因素不同水平下放流中国明对虾的资源变动规律。结果显示, 环境突变、被捕食、纳潮、非法捕捞和交尾死亡水平越高, 单位放流资源量和渔获量越少, 交尾死亡尤其对累计单位放流渔获量的影响明显; 在未引入不确定性时, 作用于开捕前的环境突变、被捕食、纳潮和非法捕捞死亡的不同水平对生物学参考点无影响, 与生长有关的参数及5种死亡因素引入不确定性可能存在低估 $F_{0.1}$ 和 $F_{\max}$ 的现象。研究表明, 减小与放流技术有关的环境突变、被捕食、纳潮和非法捕捞死亡水平对提高放流中国明对虾渔业效果有明显的作用, 交尾死亡发生的时间及死亡水平对放流中国明对虾渔获有直接的影响, 当参数引入不确定性时进行放流中国明对虾资源评估, 生物学参考点的中位数较均值抗不确定性干扰能力更强。

**关键词:** 中国明对虾; 死亡因素; 不确定性; 生物学参考点; 增殖渔业

**中图分类号:** S 932

**文献标志码:** A

中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*), 是一年生的游泳种类, 隶属于节肢动物门(Arthropoda), 软甲纲(Malacostraca), 十足目(Decapoda), 对虾科(Penaeidae), 明对虾属(*Fenneropenaeus*), 是我国分布最广的对虾类, 野生群体主要分布于我国黄、渤海和朝鲜西部沿海, 具有个体大、集群性强、经济价值高的特点, 曾是我国辽宁、河北、天津及山东沿海渔业的主要捕捞对象和支柱种类。自20世纪80年代以来, 随着捕捞努力量的不断增加和人工养殖的快速发展, 中国明对虾资源数量迅速下降。20世纪70年代中后期, 我国实行“鱼虾放流、对虾先行”的渔业资源

增殖放流方针, 基于20世纪80年代初工厂化育苗技术的突破, 1984年开始中国明对虾增殖放流试验<sup>[1]</sup>, 最终形成黄海中部、黄海北部、渤海、福建省东吾洋和浙江省象山港5个海域的增殖放流渔业<sup>[2-4]</sup>。

关于中国明对虾增殖放流渔业, 学者们对放流阶段的技术和捕捞阶段的渔业效果开展了大量研究工作<sup>[2-3, 5-8]</sup>, 并建立了放流渔业效果评价模型<sup>[3, 9-11]</sup>, 但增殖放流过程一直未被完全研究<sup>[12]</sup>。叶昌臣等<sup>[7]</sup>认为放流苗种成为渔业补充群体前的阶段是判断增殖放流成功与否的重要时期, 只有理解放流初期群体受机械死亡、环境变化造

收稿日期: 2015-06-10 修回日期: 2015-10-04

资助项目: 上海地方高校大文科学术新人培育计划(B5201120003); 农业部北方海水增养殖重点实验室基金(2014MSENCKF09)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

成的突然死亡、敌害生物造成的被捕食死亡、人为损害死亡(纳潮及非法捕捞)等因素的影响规律,才有可能科学、准确地评估放流效果。本实验以传统的YPR (yield per recruitment)模型为基础,发展可用于研究放流增殖渔业的YPR模型,就影响放流中国明对虾渔业资源群体生物量的因素进行量化研究,分析各种死亡因素的不同水平及不确定性对资源量和渔获量的影响,有助于对放流增殖渔业资源变动规律和评估过程中数据不确定性的认识和理解,为评估放流渔业效果和改善放流技术提供新的理论指导。

## 1 模型、参数及模拟方法

### 1.1 模型选择

YPR模型作为确定渔业管理参数的基本手段,对于单一种类而言,因不需要补充量的信息而被广泛使用<sup>[13]</sup>。YPR模型主要包括年龄结构模型和长度结构模型,其中年龄结构YPR模型进行渔业管理参数 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 估算时,较长度结构YPR模型得到的结果更精确,更保守,更适于资源保护<sup>[14]</sup>。因此本研究中以年龄结构YPR模型为基础,发展可用于研究放流增殖渔业的YPR模型,进行放流中国明对虾群体资源变动规律的模拟。

年龄结构YPR模型<sup>[14]</sup>:

$$\frac{Y}{R} = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{W_j S_j F}{S_j F + M} \right] \left( 1 - e^{-(S_j F + M) \Delta T_j} \right) e^{-\sum_{k=1}^{j-1} (S_k F + M) \Delta T_k} (1 - D_j)$$

$$\Delta T_j = (t_\lambda - t_r) / n$$

式中,  $Y$ 为得到的产量;  $R$ 为放流量;  $t_r$ 为放流时间;  $t_\lambda$ 为资源对渔业有贡献的最大时间;  $n$ 为放流至渔业结束时间段被分成的时间份数;  $\Delta T_j$ 为每一间隔的时长;  $W_j$ 为 $t$ 龄时个体的平均体质量;  $S_j$ 为捕捞对第 $j$ 龄组个体的选择系数;  $F$ 为捕捞死亡系数;  $M$ 为除合法的捕捞死亡以外的各种死亡系数;  $D_j$ 为捕捞 $j$ 龄组个体中被抛弃的比例。

为使模型能够适用于放流增殖渔业研究,更好地展现影响放流群体数量因素对模拟效果的影响,模型中除常规的、合法的渔业捕捞外,将其他与死亡有关的因素分为传统的自然死亡

( $M_N$ )、环境变化造成的突然死亡( $M_A$ )、被捕食死亡( $M_P$ )、纳潮死亡( $M_{IN}$ )、非法捕捞死亡( $M_{IL}$ )和交尾死亡( $M_C$ ),模型中 $M$ 为上述几项的和(即: $M=M_N+M_A+M_P+M_{IN}+M_{IL}+M_C$ )。

### 1.2 参数的初始值及模拟方法

**参数初始值** 关于中国明对虾生长参数的研究已有多篇报道<sup>[15-20]</sup>,不同学者的研究因取样的时间和海域不同而存在差异,但研究对象均属同一种群,因此本研究中体长与体质量关系式参数 $a$ 、 $b$ 值和VBGF (von Bertalanffy Growth Function)中 $K$ 值,分性别取各文献的均值<sup>[15-20]</sup>, $L_\infty$ 分性别取已报道的最大值<sup>[20]</sup>,雌雄个体出生时间理论上是一致的,故 $t_0$ 不分性别,基于对自然海区对虾幼体变态期(从卵到仔虾)时间的实际观察<sup>[15]</sup>,取值为 $t_0=25$  d。

中国明对虾隶属十足目, Conides等<sup>[21]</sup>研究 *Upogebia pusilla*资源的自然死亡特征时指出,基于长度资料估算死亡系数的方法被认为是唯一适用于十足目的,本研究中采用Gislason等<sup>[22]</sup>提出的经验公式(不包含栖息水温因子)进行中国明对虾自然死亡系数估算。

根据渤海放流中国明对虾鱼业的实际管理策略,模拟放流对虾群体变动规律时,以2014年5月25日放流平均体长1 cm中国明对虾苗种,0.03/d的捕捞死亡系数,9月1日开捕,捕捞结束时间为10月31日,为简化模拟过程,假设放流体长、放流时间、捕捞起始和结束时间均为刀刃型。

以往的放流跟踪调查和实际生产资料显示,开捕时放流对虾个体已完全达到商业捕捞规格<sup>[17]</sup>,且在放流后至雄性交尾死亡前性比约为1:1<sup>[23-24]</sup>,因此本研究中进行YPR模拟时,选择系数 $S$ 取值为1,抛弃率 $D$ 取值为0,均与性别无关,且假设仅在自然死亡系数影响下,任一时刻雌雄对虾性比均服从均值为1,方差为0.01的正态分布。数据采取等时间间隔的形式处理, $n$ 取值100。

**死亡因素初始值及模拟情形设定** 为量化评估各种死亡因素不同水平对放流中国明对虾群体资源变动的影响规律,设定13种情形(表2),情形1中作为“基础”情形,各参数取值根据已有的生态学模拟实验结果和实际调查结果<sup>[3, 7-8, 23-26]</sup>设定,情形2~13中各参数基于已报道<sup>[3, 7, 8-23-26]</sup>的范

围设定高值和低值, 其中情形2和3为突然死亡、情形4和5为纳潮死亡、情形6为被捕食死亡、情形7和8为非法捕捞死亡、情形9和10为雄性的交尾死亡、情形11为交尾死亡的起始时间、以及两种较“极端条件”情况(情形12和13); 突然死亡<sup>[27]</sup>和被捕食死亡<sup>[28]</sup>影响时间为放流后5 d内, 纳潮死亡在放流后30天内产生影响<sup>[7, 9, 29]</sup>, 非法捕捞死亡自7月1日开始发生影响, 持续时间30 d<sup>[7]</sup>, 交尾死亡持续影响8d<sup>[23]</sup>。模拟过程中, 各种死亡因素引入水平为0.05的不确定性<sup>[30]</sup>。

### 1.3 模拟方法

**参数的模拟方法** 为提高研究结果的可信度, 以及评估不确定性对生物学参考点估算的影响, 模拟过程中对上述部分参数引入不确定性<sup>[31]</sup>, 根据参数间的相互关系, 使用两种方法进行模拟。

第1种方法的模拟对象是相互间有较高相关性的参数, 包括与生长有关的体长—体质量关系(W-L)中的参数*a*和*b*, 以及VBGF参数*L<sub>∞</sub>*、*K*和*t<sub>0</sub>*。

模拟方法<sup>[30]</sup>:

①根据VBGF和体长体质量关系, 利用选定的值(*L<sub>∞</sub>*、*K*、*t<sub>0</sub>*、*a*、*b*)计算给定日龄的*L<sub>t</sub>*和*W<sub>t</sub>*;

②引入随机误差,  $L'_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}] e^{\varepsilon_t}$ ,  $\varepsilon_t \in N(0, \sigma_L^2)$ ;  $W'_t = aL_t^b e^{\varepsilon_\delta}$ ,  $\varepsilon_\delta \in N(0, \sigma_W^2)$ ,  $\sigma_L$ 和 $\sigma_W$ 见表1, 产生模拟数据;

③估算体长体质量关系参数*a*、*b*和VBGF参数*L<sub>∞</sub>*、*K*、*t<sub>0</sub>*;

④重复②和③1000次, 模拟过程由Ri386

3.0.2软件完成。

从VBGF参数和W-L参数各自模拟的1000组数据中随机取样100组用于YPR模拟, 平均值用于进一步分析。为确保模拟参数具有生物学意义, 在模拟过程中, 模拟参数的波动范围被限制在其均值的±40%范围内<sup>[30]</sup>。

第2种方法的模拟独立参数对象, 包括自然死亡系数、突然死亡、纳潮死亡、被捕食死亡、非法捕捞死亡以及交尾死亡。

模拟方法:

$$P_i = x e^{u_x Z_i} \quad (x \neq 0)^{[30]}$$

$$P_i = |e^{u_x Z_i} - 1| \quad (x = 0)$$

式中, *x*是定义的参数值(表2), *P<sub>i</sub>*是第*i*次模拟时参数的模拟值, *u<sub>x</sub>*是*x*的对数误差的标准偏差, *Z<sub>i</sub>*服从标准正态分布*N*(0, 0.05<sup>2</sup>)。

死亡因素对放流群体资源及生物学参考点的影响 基于与生长有关参数第1种不确定水平, 运用发展的YPR模型, 进行100次模拟, 评估各因素水平对放流资源群体BPR (biomass per released) 和累积YPR (accumulated yield per released)的动态规律影响。通过估算每一种模拟情形*F<sub>BRP</sub>*(*F<sub>0.1</sub>*和*F<sub>max</sub>*)的均值, 并与第1种情形的*F<sub>BRP</sub>*均值进行对比, 计算差异系数*DI*(difference index), *DI*值的大小可以反映出各因素不同水平的影响程度<sup>[30]</sup>。

$$DI(k) = \frac{F_{BRP}(k) - F_{BRP}(1)}{F_{BRP}(1)} \times 100$$

式中, *DI*(*k*)表示第*k*种情形下估算*F<sub>BRP</sub>*与第1种情形下估算的*F<sub>BRP</sub>*的差异系数; *F<sub>BRP</sub>*(*k*)和*F<sub>BRP</sub>*(1)分

表 1 与生长有关的参数值及其不确定水平

Tab. 1 the value and uncertainty of growth parameters used in simulation study

参数 parameter	参数初始值 initial value	不确定水平 uncertainty		
		A	B	C
<i>a</i> ♀	0.000 011 4			
<i>b</i> ♀	3.0042			
<i>a</i> ♂	0.000 011 6	0.05	0.1	0.2
<i>b</i> ♂	3.0154			
<i>L<sub>∞</sub></i> ♀	216.4(mm)	0.10	0.15	0.2
<i>L<sub>∞</sub></i> ♂	186.6(mm)			
<i>K</i> ♀	0.015(d <sup>-1</sup> )			
<i>K</i> ♂	0.018(d <sup>-1</sup> )			

表 2 影响放流群体的主要因素的设定情形

Tab. 2 Simulation scenarios for testing the impact of lethal factors and copulation time on stocking Chinese shrimp

情形 scenario	突然死亡/d <sup>-1</sup> $M_A$	纳潮死亡/d <sup>-1</sup> $M_{IN}$	被捕食/d <sup>-1</sup> $M_P$	非法捕捞/d <sup>-1</sup> $M_{IL}$	交尾死亡/d <sup>-1</sup> $M_C$	交尾时间/d $M_{Ct}$
1	0.0397	0.0024	0	0.0035	0.05	5 Oct
2	0.0211	0.0017	0	0.0028	0.03	5 Oct
3	0.0575	0.0035	0.000 02	0.0043	0.07	15 Oct
4	0.0211	0.0024	0	0.0035	0.05	5 Oct
5	0.0575	0.0024	0	0.0035	0.05	5 Oct
6	0.0397	0.0017	0	0.0035	0.05	5 Oct
7	0.0397	0.0035	0	0.0035	0.05	5 Oct
8	0.0397	0.0024	0.000 02	0.0035	0.05	5 Oct
9	0.0397	0.0024	0	0.0028	0.05	5 Oct
10	0.0397	0.0024	0	0.0043	0.05	5 Oct
11	0.0397	0.0024	0	0.0035	0.03	5 Oct
12	0.0397	0.0024	0	0.0035	0.07	5 Oct
13	0.0397	0.0024	0	0.0035	0.05	15 Oct

别表示第  $k$  种和“基础”情形下估算的  $F_{BRP}$  的均值。

计算设定的第 1 种情形在 3 种与生长有关参数的不确定性水平下的  $F_{BRP}$  的统计量特征, 分析不确定性水平对生物学参考点的影响。

## 2 结果

### 2.1 死亡因素对放流群体 BPR 及 YPR 的影响

第 1 种设定情形下, 开捕前单位放流资源残存量、捕捞结束时单位放流资源残存量和累计单位放流渔获量分别为 10.195、1.018 和 7.672 (表 3), 与“基础”情形比, 在突变死亡低水平时均增加了 9.75%, 高水平时均减少了 8.52%, 在纳潮死亡低水平时均增加了 2.12%, 高水平时均减

少了 3.25%, 在被捕食死亡高水平时均减少了 0.01%, 在非法捕捞死亡低水平时均增加了 2.05%, 高水平时均减少了 2.30%。而雄性交尾死亡的程度和发生时间对开捕前单位放流资源残存量无影响, 捕捞结束时, 单位放流资源残存量和累计单位放流渔获量在雄性交尾死亡低水平时分别增加了 6.38% 和 1.15%, 高水平时分别减少 5.36% 和 0.98%, 在交尾死亡开始时间延后 10 d 的水平时分别增加 4.01% 和 2.13%, 当各种死亡水平均处于低水平, 且交尾死亡开始时间较晚的情形, 开捕前的单位放流资源残存量、捕捞结束时的单位放流资源残存量和累计单位放流渔获量分别增加 14.38%、24.88% 和 17.28%, 当各种死亡水平均处于高水平, 且交尾死亡发生时间较早的情形, 开捕前的单位放流资源残存

表 3 开捕前单位放流资源残存量及捕捞结束时的单位放流资源残存量和累计单位放流渔获量

Tab. 3 BPR at the beginning and end of fishing and accumulated YPR at the end of fishing

	情形 scenario												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
开捕前单位放流资源残存量 $BPR_{ic}$	10.195	11.189	9.327	10.412	9.864	10.194	10.405	9.961	10.195	10.195	10.195	11.661	8.816
捕捞结束时单位放流资源残存量 $BPR_{ie}$	1.018	1.117	0.931	1.04	0.985	1.018	1.039	0.995	1.083	0.964	1.059	1.272	0.833
累计单位放流渔获量 $Acc YPR_{ie}$	7.672	8.42	7.019	7.835	7.423	7.671	7.83	7.496	7.76	7.597	7.835	8.998	6.569

量、捕捞结束时的单位放流资源残存量和累计单位放流渔获量分别减少13.53%、18.16%和14.38%。

### 2.2 死亡因素水平及不确定性对生物学参考点估算的影响

对各种死亡因素不同水平组合的13种渔业情况运用年龄结构YPR模型进行 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 的估算, 在引入同水平不确定性的情况下, 各种死亡因素的不同程度对 $F_{max}$ 和 $F_{0.1}$ 的估算没有明显规律性的影响(表4), 13种情形下估算的 $F_{0.1}$ 值介于0.058~0.555,  $F_{max}$ 值介于2.876~3.240。与第1种情形生物学参考点均值比较, 经计算得到的DI值均为负值, 且 $F_{max}$ 和 $F_{0.1}$ 间DI值的差异较大,  $F_{max}$ 的差异系数均值为6.60%,  $F_{0.1}$ 的差异系数均值则达到了53.70%。与生长有关参数引入3种水平不确定对生物学参考点均值、中位数等影响程度不一(表5), 其中 $F_{0.1}$ 的均值在不同不确定性水平间差异较大, 第1种不确定水平下 $F_{0.1}$ 的均值是第2种不确定水平的3.52倍,  $F_{max}$ 的均值、及 $F_{max}$ 和 $F_{0.1}$ 的中位数均相对稳定, 同一不确定水平下及不同不确定性水平间,  $F_{max}$ 和 $F_{0.1}$ 间的变异系数差异均较大,  $F_{max}$ 的变异系数介于24.99%~48.48%, 而 $F_{0.1}$ 的变异系数介于392.15%~630.28%。

### 3 讨论

YPR模型作为渔业生物学者进行渔业研究的常用手段之一, 其适用性是开展模型预测结果判别和进一步分析的前提。YPR模型通常是用来研究多年龄组渔业资源种群变动规律的模型, 一般以自然年为时间单位, 通过假定单一世代在一生中可提供的产量作为一年中各个年龄组所能提供的产量相等为前提<sup>[27]</sup>。中国明对虾为一年生种类, 本研究基于模型开展多年龄组渔业资源研究的前提, 运用发展的YPR模型模拟放流中国明对虾群体资源变动规律, 同时由于在中国明对虾生命周期内, 其自然死亡及个体生长等参数随时间变化的差异很大, 且是否以年为时间单位并不是运用年龄结构YPR模型的必要条件。因此, 为减小使用年龄初始部分参数估算该年龄时间范围内的相关结果产生的误差影响, 本研究对模拟时间范围进行 $n$  ( $n=100$ )等分, 通过减小时间单位, 不仅有助于更细致、准确地掌握放流中国明对虾群体资源变动规律, 同时还有利于减少时间单位范围内非恒定参数起始点值对估算结果或高估或低估的影响。

除常规的自然死亡和捕捞死亡外, 影响放流中国明对虾群体数量的主要因素有突然死亡、

表 4 基于13种模拟情形估算的生物学参考点及差异性统计

Tab. 4 Difference index for  $F_{0.1}$  and  $F_{max}$  estimated for set simulation data

	情形 scenario												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
阈值参考点 $F_{max}$	3.240	2.925	3.045	3.034	3.100	3.007	2.967	2.960	3.113	2.876	3.091	3.028	3.172
目标参考点 $F_{0.1}$	0.555	0.154	0.260	0.257	0.357	0.257	0.158	0.158	0.357	0.058	0.353	0.260	0.456
阈值参考点的差异系数 $DI-F_{max}$	0	-9.72	-6.03	-6.38	-4.33	-7.19	-8.44	-8.65	-3.93	-11.26	-4.6	-6.56	-2.10
目标参考点的差异系数 $DI-F_{0.1}$	0	-72.25	-53.18	-53.67	-35.8	-53.75	-71.56	-71.58	-35.75	-89.51	-36.39	-53.14	-17.91

表 5 基于不同不确定性水平的 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 统计量特征

Tab. 5 Key statistics for summarizing 100 set of  $F_{0.1}$  and  $F_{max}$  estimated

不确定水平 uncertainty	$F_{0.1}$					$F_{max}$				
	均值 mean	中位数 median	5%分位数 5% quartile	95%分位数 95% quartile	变异系数% CV	均值 mean	中位数 median	5%分位数 5% quartile	95%分位数 95% quartile	变异系数% CV
A	0.555	0.0582	0.055	0.560	392.15	3.240	2.896	2.588	3.735	48.48
B	0.158	0.0584	0.0553	0.062	630.28	2.963	2.900	2.547	3.244	24.99
C	0.357	0.0583	0.0552	0.064	477.76	3.118	2.897	2.568	3.450	39.62

被捕食死亡、纳潮死亡、非法捕捞死亡和交尾死亡等<sup>[7, 23]</sup>，其中突然死亡主要与放流苗种大小、计数方法、运输方法和时间、放流方法，以及放流前后的环境变化有关；纳潮死亡是指近海养殖池及盐场在纳潮用水时，将部分放流对虾个体一并纳入，从而对放流对虾资源群体产生影响，与放流地点和放流时间的选择有关；被捕食死亡是由于大量苗种放流后，短时间内迅速改变放流区域生物群落结构，为区域内及周边敌害生物提供了良好的饵料基础<sup>[28]</sup>，其死亡程度一方面与敌害生物的数量<sup>[26-27]</sup>有关，另一方面与放流个体大小的选择<sup>[28]</sup>有关，放流个体小，防御能力差，在有敌害生物存在的情况下，被捕食的几率大增；非法捕捞是指对虾自放流入海至开捕前被各种渔具捕捞的部分，涉及的渔具有手推网、小鱼网等，与放流地点的选择及放流后的渔业管理有关；另外中国明对虾雌性个体存在交尾死亡的现象，邓景耀等<sup>[23]</sup>认为在探讨中国明对虾渔业的管理策略时，应考虑交尾死亡对资源和渔获的影响。本研究显示，各种死亡对增殖放流渔业资源的影响趋势是一致的，表现为死亡系数水平越高，或作用时间越早，累计单位放流渔获量越小(图1)。在两种较极端放流情况下，若仅考虑放流技术致死因素(突然死亡、被捕食死亡、纳潮死亡和非法捕捞死亡)，则“较好的”放流技术情况与“较差的”放流技术情况比，在捕捞结束时，单位放流资源残存量和累积单位放流渔获量均可增加

32.27%，说明提高放流中国明对虾渔业效果的措施中改善放流技术具有非常重要的作用<sup>[32]</sup>。当同时考虑生物因素时，情形12较情形13，单位放流资源残存量和累积单位放流渔获量在捕捞结束时分别可增加52.60%和32.97%，说明交尾死亡程度和发生时间对资源量和渔获量同样有着重要影响，交尾死亡发生的起始时间不同，与“基础”情形比，虽然交尾死亡作用时间范围外的资源规律并无差异，但交尾死亡对累计单位放流渔获量的影响却是持续的，交尾死亡发生时间早较之发生时间晚，累计单位放流渔获量存在减少的现象，并一直延续这种减少的程度。已有的研究证实交尾死亡与对虾的生长时间有关<sup>[33]</sup>，近年调查结果显示随着苗种繁育技术的不断发展和完善，黄渤海区中国明对虾放流时间逐渐被提前<sup>[32]</sup>，直接导致交尾死亡发生的起始时间提前，从而对累计单位放流渔获量的影响加大，因此在制定中国明对虾放流渔业的开发策略时，必须考虑交尾死亡的影响<sup>[23]</sup>。

生物学参考点是捕捞控制规则(harvest control rule, HCR)的重要组成部分<sup>[34-35]</sup>，是渔业资源管理的主要依据之一，本研究在评估各种死亡因素对放流中国明对虾渔业影响时采用渔业管理中经常被用到的目标参考点 $F_{0.1}$ 和阈值参考点 $F_{max}$ 为指标<sup>[30]</sup>。结果显示，生物学参考点在不同死亡因素间无明显变化规律，即使同一种死亡因素的不同水平间，规律亦不明显，究其原因突然死亡、纳潮死亡、被捕食死亡、非法捕捞死

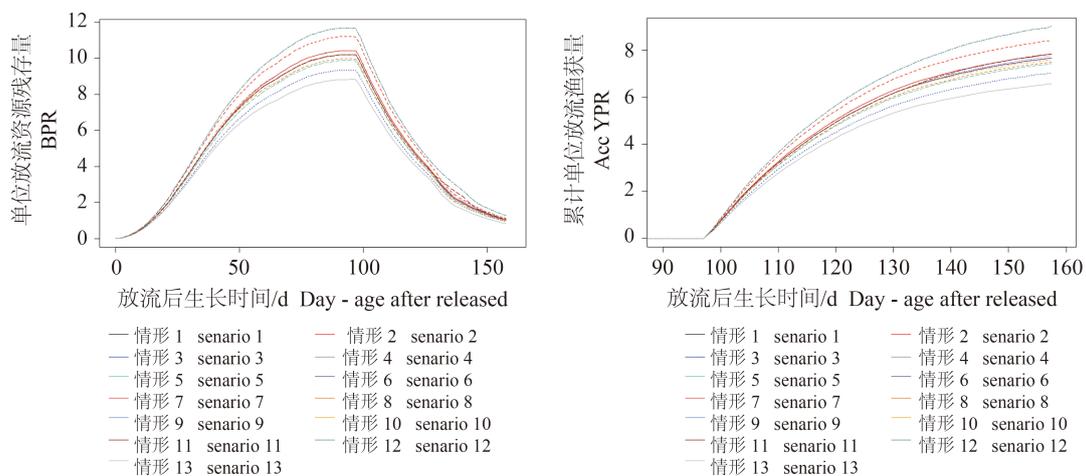


图1 各种死亡因素不同水平下BPR和YPR的变动规律

Fig. 1 BPR and acc. YPR at the different levels of mortality factors

亡的影响时间发生在开捕前,与“基础情形”比,并不改变开捕后资源群体动态规律特征和趋势特性,研究中发现未引入不确定性时,估算情形4~10得到的 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 与估算情形1的值相同也证实了这点。

引入不确定性之后,对“基础”情形以及情形4~10的8种情形进行 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 估算,得到的 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 值均存在差异,说明与生长有关的参数不确定性及各种死亡因素的不确定性影响生物学参考点的估计值<sup>[30]</sup>,结合 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 的DI值均为负的结果,表明不确定性的引入存在低估 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 的现象。对于情形2~3和情形11~13,在未引入不确定性时,估算的 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 均与情形1的估计值存在明显差异,这是因为这5种情形中均涉及了交尾死亡,而交尾死亡发生于开捕之后,随着交尾死亡系数的增加以及交尾死亡开始时间的提前,开捕后单位放流资源残存量的减少均呈加快趋势。对比不确定性水平对 $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 统计量的影响,在第一种不确定水平下 $F_{0.1}$ 的95%分位数是另两种不确定水平下估计值的约9倍,这与 $F_{0.1}$ 的5%分位数以及 $F_{max}$ 的5%和95%分位数在3种不确定水平下的趋势差异明显,产生这种现象的原因可能与参数引入不确定性有关。另外, $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 的统计量特征还说明生物学参考点均值较中位数更易受到参数的不确定性影响,因此建议在参数引入不确定性的情况下进行资源评估时,中位数较均值是更好的选择。

#### 4 结论

突然死亡、被捕食死亡、纳潮死亡、非法捕捞死亡和交尾死亡对放流中国明对虾种群数量变动规律有明显影响,改善中国明对虾放流技术,减小与放流技术有关的致死因素(突然死亡、被捕食死亡、纳潮死亡和非法捕捞死亡)水平,单位放流资源残存量和累积单位放流渔获量均可增加32.27%,在制定中国明对虾放流渔业的发展策略时,应考虑交尾死亡的影响。5种死亡因素和与生长有关的参数引入不确定性,可能存在低估生物学参考点的现象,当运用YPR模型进行分析时, $F_{0.1}$ 和 $F_{max}$ 的中位数抗不确定性干扰能力优于均值。

#### 参考文献:

- [1] Wang Q Y, Zhuang Z M, Deng J Y, *et al.* Stock enhancement and translocation of the shrimp *Penaeus chinensis* in China[J]. Fisheries Research, 2006, 80(1): 67-79.
- [2] 倪正泉,张澄茂.东吾洋中国对虾的移植放流[J].海洋水产研究,1994(15): 47-53.  
Ni Z Q, Zhang C M. Enhancement of *Penaeus orientalis* seedling in Dongwuyang Bay[J]. Marine Fisheries Research, 1994(15): 47-53 (in Chinese).
- [3] 叶泉土.东吾洋中国对虾移植放流效果的研究[J].海洋渔业,1999,21(2): 61-65.  
Ye Q T. Study on the effect of transplanting and releasing of chinese shrimp *Penaeus Chinensis* in Dongwu ocean[J]. Marine Fisheries, 1999, 21(2): 61-65 (in Chinese).
- [4] 邓景耀.我国渔业资源增殖业的发展和存在问题[J].海洋科学,1995(4): 21-24.  
Deng J Y. The development and problem of marine stock enhancement in China[J]. Marine Sciences, 1995(4): 21-24 (in Chinese).
- [5] Leber K M. Advances in marine stock enhancement: Shifting emphasis to theory and accountability[C]// Stickney R R, McVey J P. Responsible marine aquaculture. CABI Publishing, 2002: 79-90.
- [6] McEachron L W, Colura R L, Bumguardner B W, *et al.* Survival of stocked red drum in texas[J]. Bulletin of Marine Science, 1998, 62(2): 359-368.
- [7] 叶昌臣,孙德山,郑宝太,等.黄海北部放流虾的死亡特征和去向的研究[J].海洋水产研究,1994,15(1): 31-39.  
Ye C C, Sun D S, Zheng B T, *et al.* The direction of released shrimp (*Penaeus orientalis*) and their death characteristics in the northern Yellow Sea[J]. Marine Fisheries Research, 1994, 15(1): 31-39 (in Chinese).
- [8] 张澄茂,叶泉土.东吾洋中国对虾小规格仔虾种苗放流技术及其增殖效果[J].水产学报,2000,24(2): 134-139.  
Zhang C M, Ye Q T. The releasing technique and the enhancement effect on the small post larvae of *Penaeus orientalis* in Dongwuyang Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(2): 134-139 (in Chinese).
- [9] 薛洪法,吕桂荣,孙迪杰.辽东湾中国对虾标志放流及其增殖效果的研究[J].水产学报,1988,12(4): 333-

- 338.
- Xue H F, Lv G R, Sun D J. Experiments on tagging of Chinese prawn *Penaeus orientalis* and its rate of recovery in Liaodong Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 1988, 12(4): 333-338 (in Chinese).
- [10] 沈新强, 周永东. 长江口、杭州湾海域渔业资源增殖放流与效果评估[J]. 渔业现代化, 2007, 34(4): 54-57.
- Shen X Q, Zhou Y D. Enhancing release and effect assessment of fisheries resource in the Yangze River estuary and Hangzhou Bay[J]. Fishery Modernization, 2007, 34(4): 54-57 (in Chinese).
- [11] 李伟亚. 利用分子标记评估中国对虾放流效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- Li W Y. Evaluation of releasing studies in Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) using molecular[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [12] Cowx I G. An appraisal of stocking strategies in the light of developing country constraints[J]. Fisheries Management and Ecology, 1999, 6(1): 21-34.
- [13] Sibert J. Yield per recruit analysis of the hawaiian yellowfin tuna fishery[C]//Scientific and Statistical Committee, Western Pacific Regional Fishery Management Council. Honolulu, 2015.
- [14] Chen Y. A comparison study of age- and length-structured yield-per-recruit models[J]. Aquatic Living Resources, 1997, 10(5): 271-280.
- [15] 张乃禹. 中国对虾生长的数理分析[J]. 海洋科学, 1985, 9(4): 1-7.
- Zhang N Y. Mathematical analysis on growth of *Penaeus orientalis* Kishinouye[J]. Marine Sciences, 1985, 9(4): 1-7 (in Chinese).
- [16] 徐炳庆. 山东近海中国对虾增殖放流的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- Xu B Q. Study on the releasing of *Penaeus chinensis* in coastal waters off Shandong[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [17] 陈宗尧, 刘永昌, 邱盛尧, 等. 黄海中部沿岸放流增殖对虾生长特性初步研究[J]. 海洋学报, 1990, 12(6): 758-764.
- Chen Z Y, Liu Y C, Qiu S Y, *et al.* Primary study on the growth characteristics of released *Penaeus orientalis* in coastal water of Central Yellow Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 12(6): 758-764 (in Chinese).
- [18] 邓景耀. 渤海对虾(*Penaeus orientalis* Kishinouye)的生长[J]. 海洋水产研究, 1981, 2(1): 85-93.
- Deng J Y. Studies on the growth of penaeid shrimp (*Penaeus orientalis* Kishinouye) in the gulf of Po-Hai[J]. Marine Fisheries Research, 1981, 2(1): 85-93 (in Chinese).
- [19] 张澄茂. 闽东海区中国对虾放流虾的生长特性[J]. 水产学报, 2001, 25(2): 116-119.
- Zhang C M. Growth characteristics of releasing *Penaeus orientalis* in the Mindong waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2001, 25(2): 116-119 (in Chinese).
- [20] 浙江省对虾增殖课题组. 浙江象山港中国对虾放流群的生长[J]. 浙江水产学院学报, 1987(1): 13-22.
- Propagation Research Group for Penaeid Shrimp of Zhejiang Province. Studies on the growth of the liberated stock of penaeid shrimp *Penaeus orientalis* in Xiangshan Bay[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1987(1): 13-22 (in Chinese).
- [21] Conides A J, Nicolaidou A, Apostolopoulou M, *et al.* Growth, mortality and yield of the mudprawn *Upogebia pusilla* (Petagna, 1792) (Crustacea: Decapoda: Gebiidea) from western Greece[J]. Acta Adriatica, 2012, 53(1): 87-103.
- [22] Gislason H, Daan N, Rice J, *et al.* Does natural mortality depend on individual size [C]. ICES CM, 2008.
- [23] 邓景耀, 韩光祖, 叶昌臣. 渤海对虾死亡的研究[J]. 水产学报, 1982, 6(2): 119-127.
- Deng J Y, Han G Z, Ye C C. On the mortality of the prawn (*Penaeus orientalis* Kishinouye) in Po Hai Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 1982, 6(2): 119-127 (in Chinese).
- [24] 叶昌臣. 渤海对虾(*Penaeus orientalis*)死亡的估算[J]. 动物学杂志, 1981(4): 22-23.
- Ye C C. Estimate the mortality of *Penaeus orientalis* in Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Zoology, 1981(4): 22-23 (in Chinese).
- [25] 朱耀光, 郑玉水, 叶泉土. 对虾放流增殖的技术探讨[J]. 福建水产, 1994(3): 1-3.
- Zhu Y G, Zheng Y S, Ye Q T. The technologies about stocking *Penaeus orientalis*[J]. Journal of Fujian Fisheries, 1994(3): 1-3 (in Chinese).
- [26] 邓景耀, 任胜民, 朱金声. 中国对虾苗种放流规格试验[J]. 水产学报, 1996, 20(2): 188-192.

- Deng J Y, Ren S M, Zhu J S. Experiment on releasing size of chinese shrimp[J]. Journal of Fisheries of China, 1996, 20(2): 188-192 (in Chinese).
- [27] 邓景耀, 叶昌臣. 渔业资源学[M]. 重庆: 重庆出版社, 2001.
- Deng J Y, Ye C C. Science of fishery resources[M]. Chongqing: Chongqing Press, 2001 (in Chinese).
- [28] 韩光祖, 刘玉琪, 汤庭耀. 增殖对虾受鱼类危害的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 1988(2): 73-81.
- Han G Z, Liu Y Q, Tang T Y. Primary investigation on the juveniles of shrimp (*Penaeus orientalis* Kishinouye) for enhancement Predated by fishes[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988(2): 73-81 (in Chinese).
- [29] 周军, 李怡群, 张海鹏, 等. 中国对虾增殖放流跟踪调查与效果评估[J]. 河北渔业, 2006(7): 27-30.
- Zhou J, Li Y Q, Zhang H P, *et al.* Follow-up investigation and effect evaluation of released Chinese shrimp[J]. Hebei Fisheries, 2006(7): 27-30 (in Chinese).
- [30] Chen Y, Xu L X, Chen X J, *et al.* A simulation study of impacts of at-sea discarding and bycatch on the estimation of biological reference points  $F_{0.1}$  and  $F_{max}$ [J]. Fisheries Research, 2007, 85(1-2): 14-22.
- [31] Hewitt D A, Hoenig J M. Comparison of two approaches for estimating natural mortality based on longevity[J]. Fishery Bulletin, 2005, 103(2): 433-437.
- [32] 李文抗, 刘克奉, 苗军, 等. 中国明对虾增殖放流技术探讨[J]. 中国渔业经济, 2009, 27(2): 59-63.
- Li W K, Liu K F, Miao J, *et al.* Stocking technology on Chinese shrimp[J]. Chinese Fisheries Economics, 2009, 27(2): 59-63 (in Chinese).
- [33] 叶昌臣. 渤海对虾(*Penaeus orientalis*)和对虾渔业[J]. 水产科学, 1982(2): 23-25.
- Ye C C. Penaeid shrimp and fishery in Bohai Sea[J]. Fisheries Science, 1982(2): 23-25 (in Chinese).
- [34] 童玉和, 陈新军, 田思泉, 等. 渔业管理中生物学参考点的理论及其应用[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1040-1050.
- Tong Y H, Chen X J, Tian S Q, *et al.* Theory and application of biological reference points in fisheries management[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1040-1050 (in Chinese).
- [35] Gabriel W L, Mace P M. A review of biological reference points in the context of the precautionary approach[C]//Proceedings of the Fifth National NMFS Stock Assessment Workshop. NOAA Tech Memo NMFS-F/SPO-40, 1999: 34-45.

## Impacts of mortality factors and uncertainty on the population and biological reference points in stock Chinese shrimp fishery

XU Hailong<sup>1,2</sup>, CHEN Xinjun<sup>1\*</sup>, CHEN Yong<sup>3</sup>, GU Dexian<sup>4</sup>, QIAO Xiuting<sup>2</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Department of Fishery Sciences, Tianjin Agricultural University,

Tianjin Key Laboratory of Aqua-ecology and Aquaculture, Tianjin 300384, China;

3. School of Marine Sciences, University of Maine, Maine 04469, USA;

4. Tianjin Fishery Institute, Tianjin 300171, China)

**Abstract:** In order to evaluate the factors affecting the yield of released fishery resources and impact of their uncertainty on the amount of resources and catch, as well as on biological reference points ( $F_{\max}$  and  $F_{0.1}$ ), The uncertainty was introduced into the parameters about growth and mortality, and based on the developed yield per recruit (YPR) model, and the dynamics of released Chinese shrimp was simulated, and difference index was applied to evaluate the difference between based scenario and other scenarios. Four factors influencing mortality, i.e., environment change, predation, intake sea water and illegal fishing, were shown to have similar influence on resource biomass. They had greater impacts on resource reduction when the mortality was high. At the same mating death rate, the impact on catch quantity was greater when the mating occurred earlier. Contrast to scenario 1, when four factors influencing mortality are at low level and the mating death occurred later, the BRP at the beginning and end of fishing, and accumulated YPR at the end of fishing increased by 14.38%, 24.88% and 17.28%, respectively. In the absence of uncertainty, the level of mortality factors occurring before fishing did not impact the biological reference points; after the introduction of uncertainty to mortality factors and the parameters in length-weight relationship, as well as VBGF, although  $F_{0.1}$  and  $F_{\max}$  did not display the certain specific trend with the uncertainty increasing, they were possibly underestimated when the age-structure YPR model was used. And the effects of introduced uncertainty on the mean and median of biological reference points are different, the mean and median of  $F_{\max}$ , and the median of  $F_{0.1}$  did not change obviously with the uncertainty, and the max mean of  $F_{0.1}$  is 3.52 times the min mean. Additionally, the C.V.  $F_{0.1}$  is between 392.15% and 630.28% at the three levels of uncertainty, and then the C.V.  $F_{\max}$  is from 24.99% to 48.48% under the same conditions. So, the better techniques were applied to improve the effect of stock Chinese shrimp fishery, and the impact of mating must be taken into consideration in formalating the fishing strategy. Compared with mean of BRP, the median has an advantage in resisting disturbance of uncertainty introduced into mortality and parameters of VBGF when stock assessment was made.

**Key words:** *Fenneropenaeus chinensis*; mortality factors; uncertainty; BRP; stocking fishery

**Corresponding author:** CHEN Xinjun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn

**Funding Projects:** Local Colleges and Universities in Shanghai Liberal Arts Academic Programme (B5201120003); Key Laboratory of Mariculture & Stock Enhancement in North China's Sea, Ministry of Agriculture, China (2014MSENCKF09)