

东海带鱼种群动态管理与最优化开发策略*

薛 频 罗 秉 征

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 根据 1960—1986 年东海带鱼春夏汛和冬汛资料, 提出了均匀渔捞死亡假设, 推导出种群状态更新方程式, 并应用状态变量法建立了东海带鱼的随机动态系统模型; 在此基础上以随机动态规划理论计算了东海带鱼资源在不稳定补充条件下的最优化开发率和限额捕捞量, 并模拟预测了带鱼最优化策略的效应。

关键词 带鱼 动态模型 最优化策略

据最近研究¹⁾, 分布在中国近海的东海带鱼系 *Trichiurus japonicus* T. et S. 是我国重要的经济鱼类。许多学者对其资源状况、数量变动及渔业管理等问题进行了研究, (许永明, 1988)。在进行渔获物年龄结构的分析时, 一般都采用 VPA (Virtual Population Analysis) 法或 Pope 的 CA (Cohort Analysis) 近似法(1972)。Waters (1975) 最早将动态规划理论引入渔业管理, 并成功地计算了鲑鳟鱼类的最优捕捞策略。但他采用的状态方程未考虑种群的年龄结构与自然死亡。东海带鱼渔业有明显两大渔汛, 即以机轮作业为主的春夏汛和以群众渔业为主的冬汛; 同时, 带鱼也是常年兼捕的对象, 因此带鱼的渔捞死亡过程不同于一年一汛的鱼类, 为此本文提出均匀渔捞死亡假设。根据 1960—1986 年东海带鱼春夏汛和冬汛的渔获物组成资料, 假设在均匀渔捞死亡条件下, 推导了一新的捕捞方程式, 建立东海带鱼的动态模型, 并用随机动态规划技术计算了东海带鱼资源在不稳定补充条件下春夏汛与冬汛的最优开发率和限额捕捞量, 最后采用 Monte Carlo 法模拟预测了动态管理的实际效应。其目的在于对东海带鱼动态管理与最优化开发策略的研究方法作一探讨。

1 捕捞方程式的推导

假设某鱼类群体资源在时间 T 内被渔业利用, 其瞬时自然死亡系数为 M , 初始群体数量为 $N(t)$, 经过时间 T 后其数量为 $N(t+T)$, 如图 1。假设产量与捕捞时间成正比, 即渔捞死亡是一个均匀发生过程, 产量随时间呈线性增加。设在时间 T 内渔获量为 C_t , 为推导方便, 先将 C_t 看作是分 n 次获得, 每隔时间 $\Delta t = T/n$ 从群体中获得 $\Delta C_t = C_t/n$, 于是有

$$N(t + \Delta t) = N(t) \exp(-M \Delta t) - \Delta C_t$$
$$N(t + T) = N(t) \exp(-nM \Delta t) - \Delta C_t \{ \exp[-M(n-1)\Delta t] \}$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2002 号。硕士论文。

收稿日期: 1989 年 2 月 23 日; 接受日期: 1991 年 5 月 15 日。

1) Li Chunsheng, 1992, Hairtail fishes from chinese coastal waters (Trichiuridae), *Marine Sciences*, 4(3):212—219.

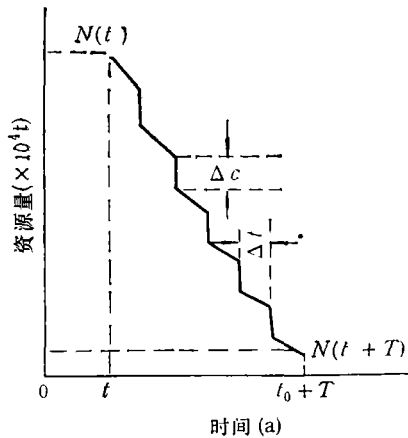


图 1 均匀渔捞死亡假设下自然死亡与渔捞死亡的分解

Fig. 1 The resolution of natural mortality and fishing mortality with the presuppositions of even fishing mortality

$$\begin{aligned}
 & + \exp[-M(n-2)\Delta t] + \cdots + 1 \\
 = & N(t)\exp(-MT) - \frac{Ct}{n} \cdot \frac{\exp[-MT/n] - \exp(-M\Delta t)}{1 - \exp(-MT/n)}
 \end{aligned}$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 对上式取极限可将离散过程变成连续过程。利用罗毕塔 (L'Hospital) 法则可得:

$$\lim x[1 - \exp(-MT/x)] = MT$$

易证: 当 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = A$ 时, 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(n) = A$

从而有 $\lim_{n \rightarrow \infty} n[1 - \exp(-MT/n)] = MT$

于是

$$N(t+T) = N(t)\exp(-MT) - C_t \frac{1 - \exp(-MT)}{MT} \quad (1)$$

2 东海带鱼种群动态模型

东海带鱼渔业传统上划分为春夏汛与冬汛,前者捕产卵群体,时间为5—8月;后者捕索饵和越冬鱼群,时间11月至翌年1月。为使模型简化,将9—10月划入冬汛;2—4月划入春夏汛。带鱼种群生命周期较短,大多数当年出生个体第二年就成为产卵群(罗秉征等, 1983 a,b; Luo Bingzheng et al., 1984),设计模型时将1龄鱼及1龄以上鱼作为产卵亲体。带鱼生殖季节较长,5—7月为产卵盛期,故将6月以后出现的1龄鱼及其以上的个体作为产卵亲体数量。根据东海群系带鱼的年龄组成¹⁾,可分为7个年龄组,即0.5龄和1—6龄;1龄鱼在渔获中占优势。近年来,0.5龄鱼在冬汛渔获物中所占比重有增大的现象,实际上0.5龄鱼已加入捕捞群体而被渔业利用了;因此将0.5龄鱼作为补充群体,11月初为补充群体进入渔场的时间。

1) 马永钧,1990,东海群系带鱼年龄组成,再论东海群系带鱼亲体与补充量关系。

亲体数量与补充的关系是决定种群动态的核心。环境条件的变动,对补充群体有较大的影响。为此本模型以 Ricker 亲体-补充曲线为基础,并列入一随机变量 α 来模拟环境条件的波动。如下式:

$$R = S \exp(\alpha - bS) \quad (2)$$

以 1974—1983 年东海带鱼产卵亲体与补充量关系适配参数,得 $\alpha \sim N(1.7458, 0.1101)$, $b = 5.3388 \times 10^{-3}$ 。

根据(1)式和(2)式应用状态变量法建立东海带鱼的动态模型如下:

$$\left. \begin{aligned} N_1(k+1) &= a_1 R(k) - b_1 C_r(k) \\ N_2(k+1) &= a_2 a_3 N_1(k) - a_2 b_3 C_{s1}(k) - b_2 C_{w1}(k) \\ N_3(k+1) &= a_2 a_3 N_2(k) - a_2 b_3 C_{s2}(k) - b_2 C_{w2}(k) \\ N_4(k+1) &= a_2 a_3 N_3(k) - a_2 b_3 C_{s3}(k) - b_2 C_{w3}(k) \\ N_5(k+1) &= a_2 a_3 N_4(k) - a_2 b_3 C_{s4}(k) - b_2 C_{w4}(k) \\ N_6(k+1) &= a_2 a_3 [N_5(k) + N_6(k)] - a_2 b_3 [C_{s5}(k) \\ &\quad + C_{s6}(k)] - b_2 [C_{w5}(k) + C_{w6}(k)] \\ R(k) &= S(k) \exp[\alpha(k) - bS(k)] \\ S(k) &= a_4 \sum_{i=1}^6 N_i(k) - b_4 \sum_{i=1}^6 C_{si}(k) \\ a_i &= \exp(-M \Delta T_i) \\ b_i &= (1 - a_i) / M \Delta T_i \\ \alpha(k) &\sim N(1.7458, 0.1101) \\ b &= 5.3388 \times 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ΔT_1 , 11 月初—翌年 1 月底, $\Delta T_1 = 3/12$ 年; ΔT_2 , 9 月初—翌年 1 月底, $\Delta T_2 = 5/12$ 年; ΔT_3 , 2 月初—8 月底, $\Delta T_3 = 7/12$ 年; ΔT_4 , 2 月初—5 月底, $\Delta T_4 = 4/12$ 年; M , 年自然死亡系数, $M = 0.44$; $N_i(k)$, 第 k 年 2 月初 i 龄鱼之数量; $N_i(k+1)$, 第 $k+1$ 年 2 月初 i 龄鱼之数量; $R(k)$, 第 k 年 11 月初 0.5 龄鱼之数量; $S(k)$: 第 k 年 6 月初 1 龄及以上鱼之数量; $C_{si}(k)$ 第 k 年 2 月初—8 月底 i 龄鱼渔获量; $C_{wi}(k)$, 第 k 年 9 月初—翌年 1 月底 i 龄鱼渔获量; $C_r(k)$, 第 k 年 11 月初—翌年 1 月底 0.5 龄鱼渔获量; $\alpha(k)$, 第 k 年环境波动参数,服从正态分布的随机变量; k , 表示年变化的状态变量时间序列参数, $k = 0, 1, 2, \dots$; $a_1, a_2, a_3, a_4, b, b_1, b_2, b_3, b_4$, 均为变量系数。

(3)式可写为非线性矢量状态方程式:

$$N(k+1) = f[N(k), C_s(k), C_w(k), \alpha(k)] \quad (4)$$

3 动态规划与最优化开发策略

3.1 最优开发策略计算 从系统论的观点来看,资源管理是多阶段或无穷阶段决策过程,而动态规划理论可以认为是多阶段或无穷阶段过程最优化的基本理论。

根据 Ricker 定义开发率的概念, $e = C/N$, 以(3)式为状态更新方程,采用随机动态规划方法(库柏等,1985)同时计算了东海带鱼春夏汛与冬汛的最优化开发率 $e_s(N)$ 与 $e_w(N)$ 。计算春夏汛与冬汛的管理目标分别是:

表 1 东海带鱼最优化开发策略计算结果

Tab. 1 The calculation results of optimal harvesting strategies of the hairtail (*Trichiurus japonicus*) in the East China Sea

年初资源量 $N(\times 10^4\text{t})$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
春夏汛开发率 $e_s(\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.12	0.43	0.47	0.50	0.54	0.56
春夏汛开发量 $(\times 10^4\text{t})$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	4.8	10.5	14.9	20.2	23.6	31.8
冬汛开发率 $e_w(\%)$	0.06	0.22	0.32	0.36	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
冬汛开发量 $(\times 10^4\text{t})$	1.7	8.7	15.1	20.0	25.0	25.0	24.3	24.1	24.0	24.0	23.8

$$\max \sum_{k=0}^{\infty} R(k) \quad (5)$$

$$\max \sum_{k=0}^{\infty} [p_1 C_s(k) + p_2 C_w(k)] \quad (6)$$

(5)式表示使冬汛进入渔场的补充群体极大；(6)式表示使春夏汛与冬汛产量的线性组合极大， $p_1 p_2$ 为加权系数，其组合代表不同的产量结构模式。参照1960—1986年春夏汛与冬汛平均产量之比确定其值，使计算结果与现行产量结构保持一致。计算结果如表1与图2所示。

3.2 Monte Carlo 模拟 根据上面计算的最优化开发率 $e_s(N)$ 与 $e_w(N)$ ，应用 Monte Carlo 法产生模拟环境波动的随机数 $\alpha(k)$ ，在计算机上模拟实验渔业管理采用最优决策后的种群动态，从而得到春夏汛、冬汛及全年渔获出现的概率值，并可进一步得到平均年产量。模拟时间为5000年，其结果如图3所示。所得春夏汛平均产量 $\bar{C}_s = 13.64 \times 10^4\text{t}$ ，冬汛平均产量 $\bar{C}_w = 28.96 \times 10^4\text{t}$ ，年平均产量 $\bar{C} = 42.6 \times 10^4\text{t}$ ；年初资源量的平均值为 $\bar{N} = 54.91 \times 10^4\text{t}$ 。

4 讨论

4.1 捕捞方程的理论意义 当自然死亡系数 M 较小时，(1)式的计算结果与 VPA 或 CA 法中的捕捞方程结果很接近，但对大多数渔业来说，均匀渔捞死亡的假设较 Pope 的脉冲式渔捞死亡假设更接近实际情况，因此(1)式有较广泛的应用前景。此外，(1)式很容易解释由于捕捞而造成的某世代的可能灭绝。即令(1)式左端为零便可计算出在时间间隔 T 内可导致该世代灭绝的最大渔获量 C_{\max}

$$C_{\max} = \frac{N_t M T \exp(-MT)}{1 - \exp(-MT)} \quad (7)$$

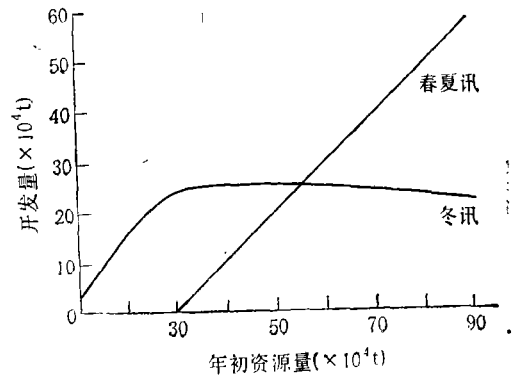


图 2 东海带鱼年初资源量与开发量的关系
Fig. 2 Relationship between the stock at the beginning of year and the catches of the hairtail (*Trichiurus japonicus*) in the East China Sea

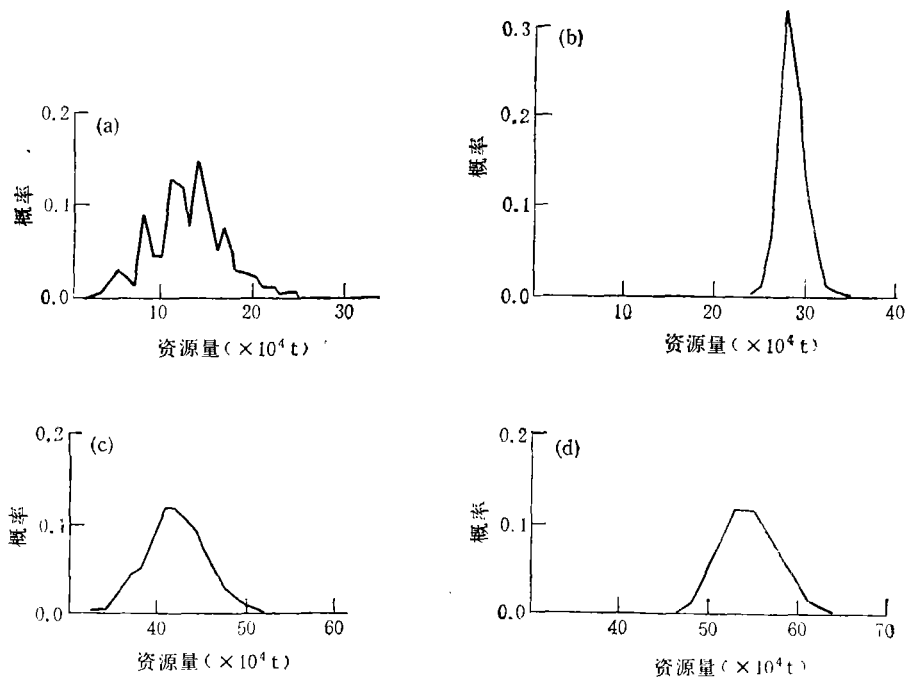


图3 最优开发策略下东海带鱼开发量与年初资源量概率分布曲线

Fig. 3 The probability distribution curves of catches and stock at the beginning of year of the hairtail (*Trichiurus japonicus*) in the East China Sea for optimal harvesting strategies

a. 春夏汛; b. 冬汛; c. 全年; d. 年初资源量。

从而利用(1)式进行世代分析和逆算不必像 CA (Pope, 1972) 那样须首先假设最高龄鱼的渔捞死亡系数, 摆脱了渔捞死亡系数的束缚, 使整个计算过程更为简洁。

4.2 渔业资源的动态管理问题 由稳定补充假定前提下推导出的 MSY (最大持续渔获量) 在实际渔业管理中有很大的局限性 (Waters, 1975)。因为渔场环境条件及人类的捕捞活动都是处在不停变化之中, MSY 要求的整个系统处于动态平衡是很难保持的。现代渔业管理是动态系统的管理, 最优化开发策略是一种实时处理技术, 它随渔业资源本身的变化而及时调整开发量, 可以避免由于盲目开发而造成对资源的严重损害。因此最优化开发策略是实现渔业动态管理十分有效的手段。

Monte Carlo 模拟是对最优化开发策略的优劣在计算机上的检验。5 000 年的模拟时间基本概括了不同种群大小下补充群体可能出现的情况, 就研究方法而言, 可使检验结果更准确。

4.3 渔业管理意见 (1) 实施限额捕捞: 根据最优化策略可以直接计算为限额捕捞量 (表 1)。从每年春夏汛前预测的资源量, 制定出春夏汛和冬汛的限额捕捞量, 即使产生一定误差亦可在下年修正。(2) 实施春夏汛部分时间休渔期: 当春夏汛年初资源量小于 $29 \times 10^4 \text{t}$ 时, 春夏汛开发率为零, 即实行休渔可确保冬汛有最好的补充进入渔场 (图 2)。从实验结果看 (图 3), 只要冬汛真正实现限额捕捞, 春夏汛出现休渔的概率还是较小的。

参 考 文 献

- 许永明,1988,东海带鱼资源特征和渔业管理,生态学杂志,7(1): 4—8。
- 罗秉征等,1983a,东海北部带鱼性成熟的研究 I. 雌鱼的成熟过程与特性,海洋与湖沼,14(1): 59—68。
- 罗秉征等,1983b,东海北部带鱼种群结构与特性,海洋与湖沼,14(2): 148—159。
- 库柏, L., 库柏, M. U., (张有为译),1985,动态规划导论,国防工业出版社, 241—276。
- Luo Bingzheng, Lu Jiwu and Huang Songfang, 1984, Brood discrimination, maturation, and population structure of the hairtail, *Trichiurus haumela* (Forskål) in northern East China Sea, *Chin. J. Ocean. Limn.*, 2(2): 141—157.
- Pope, J. G., 1972, An investigation of accuracy of virtual population analysis using cohort analysis, *Res. Bull. Inter. Comm. Northwest Atl. Fish.*, 9: 65—74.
- Waters, G. J., 1975, Optimal harvest strategies for salmon to environment variability and uncertainty production parameters, *J. Fish. Res. Board Can.*, 32: 1774—1784.

DYNAMICS MANAGEMENT OF THE HAIRTAIL *TRICHIURUS JAPONICUS* (PISCES, TRICHIURIDAE) STOCKS IN THE EAST CHINA SEA AND THE STUDY OF ITS OPTIMAL HARVESTING STRATEGIES*

Xue Pin, and Luo Bingzheng

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071)

ABSTRACT

The data used for the present paper were obtained in the years 1960—1986 from the spawning ground and wintering ground in the East China Sea. A new-state-update equation for fish stock with the presupposition of even fishing mortality is derived:

$$N(t+T) = N(t) \cdot \exp(-MT) - C_t \frac{1 - \exp(-MT)}{MT}$$

On this basis, a stochastic dynamic system model of the hairtail in the East China Sea has been set up by means of state variable:

$$N(k+1) = f[N(k), C_s(k), C_w(k), \alpha(k)]$$

The dynamic optimal exploration rates and yields for both spring-summer and winter seasons have been calculated by means of principles of stochastic programming in the case of unstable recruitment. Finally, Monte Carlo method is adopted for simulating and forecasting the population dynamics of the hairtail in the East China Sea under exploration by optimal harvesting strategies on a computer. The studies have shown that an average annual yield of 42×10^4 tons could be obtained from the dynamic fishery management.

Key words Hairtail(*Trichiurus japonicus*) Dynamics model Optimal harvesting strategies

* Contribution No. 2002 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.