

南海北部大陆架底层鱼类资源 密度概率分布型的研究*

陈正兴 李辉权

(中国水产科学研究院南海水产研究所)

提要 本文把底层鱼类资源密度看成是海洋生态系整体系统的一个组成成份。应用柯尔莫哥洛夫假设拟合优度检验,系统分析了近两周年(二十三个月)共1,445网次的“南海北部大陆架底层鱼类资源调查”的综合渔获量资料。发现理论的对数正态分布完全符合观察的频率分布,二十三个月无一例外。因而,得出了该海域底层鱼类的渔获密度服从对数正态分布型这个初步结论。在此基础上,进一步推证了资源密度同样服从对数正态分布型。这一发现,为研究该海域底层鱼类的数量分布提供了一个确当的随机性模型。

主题词 概率分布型,资源密度,渔获密度,底层鱼类

南海北部大陆架位处热带、亚热带,温、盐适中,水质肥沃,饵料丰富,是多种鱼类栖息、索饵、繁殖的优良水域。集居于该海域的底层鱼类多达860种^[1],产量较为大宗、经济价值较高的“主要经济鱼类不下几十种”^[2]。据1966年《南海北部底拖网鱼类资源调查报告》统计,占渔获物总量0.1%以上的经济鱼类就有54种。若每种经济鱼类都采用经典的单一类型渔业研究方法,显然会使人力物力分散、旷日费时、容易顾此失彼。为此,费鸿年等于1965年发表了《南海北部底层鱼类群聚的研究》^[4],1981年撰写了《南海北部大陆架底栖鱼群聚的多样性以及优势种区域和季节变化》^[6]等文,为自立地构造我国南海北部多种类型渔业管理模型作了良好的开端。

随着第三届世界海洋法会议的结束,沿岸国管理沿海二百哩专属经济区的权力得到不少国家的承认,使发达国家远洋渔船的活动受到限制,发展中国家沿海渔业资源受到了保护,传统的近海多种类型渔业得到了恢复和发展。多种类型渔业管理理论重新为世界渔业界所重视。为了尽快取得经济效益,资源学家除了研究新的管理模型外,还有选择地改造和延伸一些经典模型为多种类型模型。即便如此,要完善多种类型渔业管理理论,还必须增加生态系统模型等新理论⁽¹⁾。

数学生态学的发展和电子计算机的问世,为多种类型渔业管理模型的开拓展示了美好的前景。在生态模型构造问题上,尽管并存着势力相匹的“简单模型派”和“复杂模型派”,然而他们却一致认为:“只要可能就需要随机性(或概率的)模型”、“引进了随机机制的模型一定要比确定性模型更接近于真实”^[3]。

* 在撰写过程中,得到姚冠锐、林茵茵、梁小云同志的大力帮助,特此致谢。

(1) 费鸿年,1983. 多种类型渔业管理概述。中国水产科学研究院南海水产研究所。

建国以后,为了探索南海北部大陆架底层鱼类洄游分布规律,我国组织了多次大规模的考察,专家们也不止一次地用确定性模型描述过该海域底层鱼类资源的分布状况,提出了不少开发、利用和管理底层鱼类资源的宝贵意见。但由于时代的限制,未能及时引入计算量相当庞大的随机性模型,因而在使用“面积法”来估算资源量时,不得不接受“在研究海域内资源密度的分布是均匀的”这个与南海实际情况出入较大的假设。

针对上述情况,本文试图把底层鱼类资源密度作为南海北部大陆架海洋生态系整体系统的一个组成成份,用概率统计的有关方法,系统分析了两次周年资源普查共二十三个月、一千多网次的综合渔获量资料,发现每一个月的观察资料的频率分布均密切符合理论的对数正态分布,二十三个月无一例外。这一发现,给南海北部大陆架提供了描述底层鱼类数量分布的一个确当的随机性模型。为构造该海域的生态系统模型提供了理论依据。

材 料 和 方 法

本文先后使用两批共二十三组样品资料,逐组施行柯尔莫哥洛夫假设拟合优度检验,综合推断总体的概率分布型。

(一) 资 料 来 源

第一批资料来自1964年3月到1965年2月南海水产研究所对南海北部大陆架(东经 $110^{\circ}00'$ — $115^{\circ}45'$)等深线120米以内海域的底拖网鱼类资源调查记录⁽²⁾。调查海域面积为十三万七千多平方公里。取样点共设五十三个,每隔三十哩均匀布点。每月在各取样点用同类型、同规格的船和网,以相同的速度拖曳两小时来获得底拖网鱼类样品资料。除1964年9月因台风影响资料的收集外,其余十一个月均获得48到53个取样点的样品资料。

第二批资料来自1978年2月至1979年1月南海水产研究所对南海北部大陆架(东经 $110^{\circ}30'$ — $117^{\circ}30'$)等深线90米到200米海域进行的底拖网鱼类资源调查记录⁽³⁾。调查海域面积为七万五千多平方公里,取样点共设六十五个,分别在所跨的26个渔区的四角和中心布点。每月在各取样点用同类型同规格的船、网以相同的速度拖曳三小时、遇到高产则反复拖捕二至三次取其均值作为该取样点的观察值,连续12个月均获得50到64个取样点的样品资料。

(二) 研 究 方 法

把调查海域看作总体,域内取样点看作元素,单位小时综合渔获量作为元素的数量表征。则每月在各取样点所获得的单位小时综合渔获量的观察值的集合便构成一组样品资料。本文共分析了二十三组样品资料(1,445有效网次的观察值)。每组样品资料分别施

(2) 水产部南海水产研究所,1966。南海北部底拖网鱼类资源调查报告。

(3) 国家水产总局南海水产研究所,1979。南海北部大陆架外海底拖网鱼类资源调查报告。

行十二种概率分布型的假设拟合优度检验, 从而找出最优的以及在显著水平 $\alpha=0.05$ 下能被接受的分布型。当二十三组样品全部检验完成后, 再归类统计, 综合分析检验结果, 以此来推断总体的概率分布型。由于计算量大, 因此, 大部份计算工作均自编程后, 靠 AP-065 型电子计算机来完成。具体工作过程是:

1. 根据研究对象的数量特征, 选择有可能适合总体分布的连续型概率分布十二种(表 1), 编程送入计算机程序库。

表 1 用于拟合检验的分布密度函数

Tab. 1 Distribution density function used for test of fit

分布型 Distribution	密度函数 Density function	分布型 Distribution	密度函数 Density function
均匀分布 Uniform distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > b \end{cases}$ $-\infty < a < b < +\infty$	指数分布 Exponential distribution	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ $\lambda > 0$
正态分布 Normal distribution	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $-\infty < x < +\infty$ $-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$	韦伯分布 Weibull distribution	$f(x) = \begin{cases} \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ $\alpha > 0, \lambda > 0$
对数正态分布 Lognormal distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ $-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$	瑞利分布 Rayleigh distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\mu^2} e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ $\mu > 0$
三角形分布 Triangular distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mu^2} x, & 0 < x \leq \mu \\ \frac{2}{\mu} - \frac{1}{\mu^2} x, & \mu < x \leq 2\mu \\ 0, & x \leq 0 \text{ 或 } x > 2\mu \end{cases}$ $0 < \mu < +\infty$	马克斯威尔分布 Maxwell distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha^2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} x^2 e^{-\frac{x^2}{2\alpha^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ $\alpha > 0$
甘倍分布 Gumbel distribution	$f(x) = \lambda e^{-\lambda(x-\mu)} - e^{-\lambda(x-\mu)}$ $-\infty < x < +\infty$ $-\infty < \mu < +\infty, \lambda > 0$	柯西分布 Cauchy distribution	$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{\lambda^2 + (x-\mu)^2}$ $-\infty < x < +\infty$ $-\infty < \mu < +\infty, \lambda > 0$
伽玛分布 Gamma distribution	$f(x) = \begin{cases} \frac{b^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-bx}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ $b > 0, p > 0$	拉普拉斯分布 Laplace distributor	$f(x) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{ x-\mu }{\lambda}}$ $-\infty < x < +\infty$ $-\infty < \mu < +\infty, \lambda > 0$

2. 计算各组样品资料的特征值和经验分布函数。

3. 从程序库轮番取出十二种概率分布作为样品的假设分布, 并施行假设拟合优度检验。步骤是:

(1) 视不同的分布函数适当选用矩法、极大似然法、最小二乘法来估计子样的理论分布参数值。

(2) 以柯尔莫哥洛夫定理为依据, 计算假设分布的检验统计量 D_n 。

(3) 给定显著水平 α , 查表得临界值 $D_{n,\alpha}$, 然后观察 D_n 的计算结果, 看其是否落入接受域 $(0, D_{n,\alpha})$ 来判断分布假设是否可接受。

4. 逐组样品比较十二种分布假设的检验结果, 找出该组样品拟合最优的概率分布型和在 $\alpha = 0.05$ 下, 能被接受的概率分布型。

5. 归纳和分析二十三组样品的检验结果, 对总体的研究指标(渔获密度)的概率分布型作出推断。

6. 根据渔获密度与资源密度的函数关系, 进一步推证资源密度的概率分布型。

结 果

通过假设拟合优度检验, 第一批共十一组样品资料中, 拟合优度最佳的, 对数正态分布型占六个; 以显著水平 $\alpha = 0.05$ 检验各样品是否服从对数正态分布型, 结果表明: 十一个样品的柯尔莫哥洛夫检验统计量 D_n 均小于临界值 $D_{n,0.05}$ 而全部被接受(表2)。

表2 第一批子样对于对数正态分布的柯尔莫哥洛夫检验统计量 D_n 的计算结果

Tab. 2. Results of kolmogorov test statistics (D_n) of fit for Lognormal distribution curve in the first group of samples

样品编号 Sample No.	64-3	64-4	64-5	64-6	64-7	64-8	64-9	64-10	64-11	64-12	65-1	65-2
容量 n Sample Size	53	48	50	50	50	50	15	50	50	50	50	50
$D_{n,0.05}$	0.1868	0.1963	0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	-	0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	0.1923
D_n	0.0773	0.0959	0.1038	0.1336	0.1204	0.0723	-	0.0715	0.1023	0.0981	0.0724	0.0993

第二批共十二个样品中, 拟合优度最佳的全是对数正态分布型; 以显著水平 0.05 来检验假设, 对数正态分布型均全部被接受(表3)。

第一批样品的最佳分布对数正态分布型只占十一分之六, 主要原因是这批资料的观察站只设了五十三个, 而每网也只拖曳两小时, 因而抽样误差较大。第二批样品的观察站

表3 第二批子样对于对数正态分布的柯尔莫哥洛夫检验统计量 D_n 的计算结果

Tab. 3. Results of kolmogorov test statistics (D_n) of fit for lognormal distribution curve in the second group of samples

样品编号 Sample No.	78-2	78-3	78-4	78-5	78-6	78-7	78-8	78-9	78-10	78-11	78-12	79-1
容量 n Sample Size	58	58	55	60	60	62	64	60	64	63	64	63
$D_{n,0.05}$	0.1786	0.1786	0.1834	0.1755	0.1755	0.1727	0.1700	0.1755	0.1700	0.1713	0.1700	0.1713
D_n	0.0988	0.0851	0.0947	0.1017	0.0683	0.0610	0.0920	0.0652	0.1029	0.0937	0.1227	0.210

却设了六十五个,而且“每网拖曳三小时,遇到高产则反复拖捕二至三次,取其均值作为该抽样点的观察值”,因此,“拟合优度最佳的,全是对数正态分布”。

尽管第一批样品存在较大的抽样误差,但显著性检验还是一致表明,两批共二十三组样品均全部服从对数正态分布,其置信度为百分之九十五。因此可以得出结论:“南海北部大陆架海域(指调查海域,下同)的底层鱼类渔获密度全年均服从对数正态分布型”。

从渔业资源管理这个角度来看,渔获密度无疑是个重要的研究指标,但人们更感兴趣的往往却是资源密度的分布情况。下面将推证:“南海北部大陆架底层鱼类的资源密度同样也服从对数正态分布型”,这是本文的中心结论。推证过程如下:

设 y 为资源密度, z 为渔获密度, b 为单位小时拖网的扫海面积与捕获系数之积。因而有关系式:

$$Y = Z/b \quad (1)$$

由于渔获密度 z 服从对数正态分布,因而有密度函数

$$f_z(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} s \cdot x} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \alpha}{s} \right)^2}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 α 和 s^2 分别为样品观测值取对数后的均值和方差:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \alpha)^2}{n}}$$

其相应的概率分布函数为

$$F_z(x) = P(z < x) = \int_0^x f_z(u) du \quad (3)$$

由于渔获密度 z 与资源密度 y 有(1)式的关系,因此

$$F_y(x) = P(y < x) = P(z < bx) = F_z(bx) = \int_0^{bx} f_z(u) du$$

令 $v = u/b$,且注意到 $u = bx$ 时, $v = x$,则有:

$$F_y(x) = \int_0^x f_z(bv) d(bv) = b \int_0^x f_z(bv) dv \quad (4)$$

这就是资源密度的概率分布函数。从(4)式可知,资源密度的概率密度函数为:

$$f_y(x) = b \cdot f_z(bx)$$

参照(2)式有:

$$f_y(x) = b \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} (bx) \cdot s} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(bx) - \alpha}{s} \right]^2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi} x \cdot s} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - (\alpha - \ln b)}{s} \right]^2}$$

令: $\alpha' = \alpha - \ln b$,便可得到标准型的对数正态分布密度函数

$$f_y(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\sigma \cdot x \cdot s}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \alpha'}{s} \right)^2}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

推证完毕。

图1是样品79-1的渔获密度(公斤/小时)的对数正态分布曲线,其参数值分别为:

$$n = 63, \alpha = 4.09, s = 0.98,$$

它的众数 M_o 、中位数 M_e 、均值 E 分别为:

$$M_o = e^{\alpha - s} = 22.42$$

$$M_e = e^{\alpha} = 59.74$$

$$E = e^{\alpha + s^2/2} = 96.56$$

从图1曲线可以看到,渔获密度落在众数附近的可能性最大;渔获密度落在零到中位数这个区间的,其出现的概率为二分之一;如果我们要计算渔获密度落入某个区间的概率,例如零到均值间的概率,那么,只要把 $s = 0.98$, $\alpha = 4.09$ 代入(2)式,再把零和 $E = 96.56$ 代入积分号的下限和上限,便可算出其概率约为百分之七十。

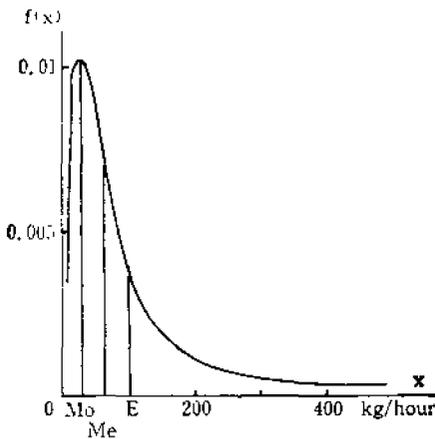


图1 79-1号样品的渔获密度对数正态分布曲线

Fig. 1. Lognormal distribution curve of catch rate in the sample 79-1

由于资源密度和渔获密度同样服从对数正态分布。因此,对数正态分布曲线所具有的各种特性,将从随机的角度揭示了研究对象的分佈和变动规律。举例说:由于对数正态分布曲线是恒正偏的——均值总是大于中位数、大于众数。因此可以认为,研究对象的空间分佈是比较分散的,密度在均值以下的,总是占据了半数以上的空间;又由于均值以上的曲线总是沿着X轴逐渐下降,并趋近X轴,因此可以认为,南海北部大陆架底层鱼类的集结总是从“低密”到“较密”到“高密”逐渐

形成,并始终维持略高于均值的“低密区”总是大于“较密区”,“较密区”又大于“高密区”,密度越大,出现率就越少。

过去,水产科研工作者也曾多次指出,“南海北部大陆架位处热带亚热带,温盐适中、水质肥沃、饵料丰富,到处都适于鱼类索饵、繁殖、栖息。因而群体比较分散。更由于品种繁什,生态特性各异,产卵期、索饵期各不相同,因此,从综合资源密度这一角度来说,洄游和集结远不象品种较单纯的海域那么明显”。这些论点,与对数正态分布曲线所反映的分佈特征,是完全一致的。

结论和讨论

数学生态学认为:“生物种群在其特定的生态环境内的空间分佈型的形成,一般均系

种群本身生物学特征与其环境作用因素相互综合作用的结果”^[1]。南海北部大陆架底层鱼类资源密度服从对数正态分布型这一事件的出现，自然也不例外。这是由于生活在该海域的多种鱼类的综合生物学特性与海洋生态环境诸因子相互作用、长期适应的结果。如果某一环节被干扰和破坏，那么，它所服从的分布型也必将改变。

过去，我们在描述该海域底层鱼类分布状况时，往往仅限于文字、数字和图表，还没有把多年积累的经验 and 观察数据归纳为简明概括的数学模型。因而在使用“面积法”来估算资源量时，不得已才接受“资源密度在研究海域内的分布是均匀的”这个与实际出入较大的假设。现在，本文通过对二十三组样品，一千四百四十五个观察数据的检验和分析，结果表明，理论的对数正态分布全部密切符合观察的频率分布，二十三组样品无一例外。因此可以这样说，我们现在已找到了描述南海北部大陆架底层鱼类资源密度分布的一个确当的模型。利用这一数学模型的已知关系，我们必将设计出符合南海实情的资源量估算模式。如果设计合理，那么，对该海域底层鱼类数量变化的研究，将是十分有意义的。

费鸿年在《多种类渔业管理概述》中说：“生态系统模型就是把鱼作为一个淡水或海洋生态系整体系统的一个组成部分，来研究它在复杂的生态环境下多种鱼的数量变动，从而采取适当管理措施来增进产量和经济效益。所以也可以称为整体系统模型”。很明显，本文所得的结论，正是构造生态系统模型所必需的组成成分。

近数十年，我国对南海北部大陆架进行了多次大规模的考察，积累了大批宝贵的资料数据。现在，我们可以进一步发挥这些现成资料的作用，直接应用“分布型”，可以比较底层鱼类（或其他研究指标）在不同时间、不同季节、不同海域所呈现的集聚程度；监测鱼类资源的变动情况；而且，还可以通过分析“分布型”的形成过程，进一步深化各项研究工作，为自立地构造南海北部大陆架多种类渔业管理模型开创新路。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院动物研究所等，1962。南海鱼类志。科学出版社。
- [2] 皮洛，E. C. (卢泽恩译)，1969。数学生态学引论。科学出版社。
- [3] 陈敬隆等，1981。应用生物种群空间概率分布型研究黄海重要饵料生物——太平洋磷虾的空间分布型。海洋湖沼通报，1:1—10。
- [4] 费鸿年、郑修信，1965。南海北部底层鱼类群聚的研究。水产学报，2(1):1—19。
- [5] 费鸿年等，1981。南海北部大陆架底层鱼类群聚的多样性以及优势种区域和季节变化。水产学报，5(1):1—20。

THE PATTERN OF PROBABILITY DISTRIBUTION ON THE DENSITY OF DEMERSAL FISHES STOCK IN THE NORTHERN CONTINENTAL SHELF OF THE SOUTH CHINA SEA

Cheng Zhengxing and Li Huiquan

(South China Sea Fisheries Research Institute)

ABSTRACT In this paper the density of the demersal fish stock was considered

as a component part of whole marine ecosystem. The data of fish caught were accumulated for about two years (23 months) and with 1,445 hauls. Materials were systematically analysed by means of kolmogorov test of goodness fit hypothesis. It was found that frequency of distribution was closely related with the theoretical lognormal distribution. so we came to the primary conclusion that the index of catch density of the demersal fish stock followed lognormal distribution. On this basis, we further deduced that the stock density followed lognormal distribution as well. This discovery provided a suitable stochastic model for the study of quantitative distribution of the demersal fishes in the sea area.

KEY WORDS Pattern of probability distribution, Stock density, Catch rate, Demersal fishes