

春末夏初莱州湾浮游动物生物量谱 及潜在鱼类生物量的估算

彭 荣^{1,2} 左 涛^{1*} 万瑞景¹ 林 群¹ 李显森¹ 王 俊¹ 金显仕¹

(¹山东省渔业资源与生态环境重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(²上海海洋大学水产与生命学院, 201306)

摘 要 分析了 2008 年春末夏初(5 月和 6 月)利用浮游生物网(孔径 160 和 500 μm)采集的莱州湾浮游动物样品, 对此季莱州湾浮游动物的生物量——个体粒级分布和生产力进行研究, 构建了莱州湾浮游动物的标准生物量谱, 并应用生物量谱理论 Borgmann 模型(1987)对莱州湾的渔业资源现存量进行了初步的估算。结果表明, 5 月和 6 月莱州湾浮游动物个体粒级(Log_2 含碳量)分布范围为 $-3 \sim 10$ 。浮游动物的 Sheldon 型生物量谱的特征为: 5 月生物量高, 表现为由双刺纺锤水蚤和中华哲水蚤、强壮箭虫构成的双峰曲线; 6 月生物量低, 表现为由中华哲水蚤、强壮箭虫构成的单峰曲线。浮游动物混合粒级的日生产力和日周转率 P/B 值: 5 月为 $75 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{d}$ 和 0.20 , 6 月为 $24 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{d}$ 和 0.16 。5 月的标准生物量谱线性方程 $y = -0.9629x + 14.893$ ($R^2 = 0.60$), 6 月 $y = -0.9063x + 12.832$ ($R^2 = 0.80$)。基于 Borgmann 模型的估算, 5 月粒级为 $14 \sim 16$ 的渔业生物的生物量为 0.57 gC/m^2 , 6 月粒级 $12 \sim 25$ 的渔业生物的生物量为 0.1 gC/m^2 。

关键词 浮游动物 生物量谱 潜在鱼类生物量估算 莱州湾

中图分类号 Q145 文献标识码 A 文章编号 1000-7075(2012)01-0010-07

Zooplankton biomass size spectra and prediction of fish biomass in late spring in Laizhou Bay, Bohai Sea

PENG Rong^{1,2} ZUO Tao^{1*} WAN Rui-jing¹ LIN Qun¹

LI Xian-sen¹ WANG Jun¹ JIN Xian-shi¹

(¹Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

(² Aquatic and Life School, Shanghai Ocean University, 201306)

ABSTRACT Biomass size distributions of zooplankton in the Laizhou Bay, Bohai Sea, were analyzed based on the samples collected by plankton nets (mesh size of 160 μm and 500 μm) in May and June, 2011. Results showed that, in both months, zooplankton individuals from samples were in the size range of $-3 \sim 10$ (in logarithmic carbon unit), and continuous Sheldon-

国家重点基础研究发展计划(2011CB403604)、国家自然科学基金(40976103)、山东省自然科学基金(ZR2009EQ010)、山东省泰山学者工程专项(鲁证办发[2008]67)和中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室共同资助

* 通讯作者。E-mail: zuotaolinch@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-05-02; 接受日期: 2011-06-20

作者简介: 彭 荣(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游动物生态学研究。E-mail: pengrong1128@126.com

type biomass size spectra without gaps were found similarly. But in May, Sheldon-type biomass size curve was composed of two major domes attributed by small copepod *Acartia bifilosa* and meso-individuals, *Calanus sinicus*, *Sagitta crassa* respectively. While in June, it had only one remarkable dome attributed by meso-individuals, *C. sinicus* and *S. crassa*. Total zooplankton biomass in June was much lower than that in May as the *A. bifilosa* declined greatly. Moreover, the production and P/B of zooplankton were calculated as $75 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{d}$, 0.20 for May and $24 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{d}$, 0.16 for June. Normalized biomass size spectra were also constructed on a double log plot and fitted closely with a linear regression line with equations $y = -0.9629x + 14.893$ ($R^2 = 0.60$) for May and $y = -0.9063x + 12.832$ ($R^2 = 0.80$) for June. According to theoretical Borgmann model (1987), the fish biomass is predicted to be 0.57 gC/m^2 in the size range of 14~16 in May and 0.1 gC/m^2 in the size range of 12~25 in June.

KEY WORDS Zooplankton Biomass size spectrum Prediction of fish biomass
Laizhou Bay

莱州湾位于中国渤海东南侧,紧邻黄河入海口,具有丰富的营养物质输入,是渤海生物资源较为丰富、生产力较高的海域,同时也是多种经济鱼类的产卵场和索饵场。近年来因为受到环境变化、沿岸人类活动的增强等因素影响,莱州湾的海洋生物组成、资源量已表现出明显的变化或衰退。为改善湾内生物,特别是渔业生物资源状况,近 10 年来中国各级政府部门不断在湾内放流特有地方种类,以期达到增殖、提高产量的目地。然而,如何评估湾内生态系统中潜在的鱼类产量,确定湾内的生态系统容量及放流的种类和数量是一个关键的技术难点。

浮游动物是海洋生态系统食物网中承前启后的中间枢纽,它不仅是大多数渔业生物的食物来源和捕食对象,而且渔业生物结构的显著变动会通过浮游生物的组成、数量和生物量的变化得到不同程度的反映(Reid *et al.* 2000)。

生物量谱以粒级为单位,能简化生物群落组成,诠释水生生态系统中的能流过程及多营养级关系。其中定量浮游动物与鱼类的食物营养关系,进行不同营养级生物量及生产力估算,评价生态系统的产出功能等是其重要的应用方面。利用生物量谱理论进行水生生态系统中不同营养级的产量估算,尤其是潜在鱼类产量的估算的相关模型大致可分为两类:一类是基于捕食过程中能量流动的 T-D 模型(Thiebaut *et al.* 1993);另一类是基于水生生态系统中,营养级以个体大小来粗略表示的 Borgmann 模型(Borgmann *et al.* 1982,1987)。这两类模型在湖泊生态系统中有一些应用,但在海洋生态系统中应用得很少(周林滨等 2010)。相对而言,Borgmann 模型以离散的营养级为对象,可以根据任一营养级推算出相邻营养级的生物量,所需参数更易获得。因此,本研究在对莱州湾浮游动物生物量谱研究的基础上,应用 Borgmann 模型尝试性对湾内的潜在渔业资源产量进行估算,以为相关实践研究提供基础参数和依据。

1 方法

1.1 样品采集和分析

2008 年 5~6 月在莱州湾定点站位进行生物随机采样。取样站位见图 1。调查站位平均水深 14.89 m。

浮游动物样品用浮游生物(网孔径分别为 500 和 $160 \mu\text{m}$)垂直底到表拖网采集。样品保存于 5%

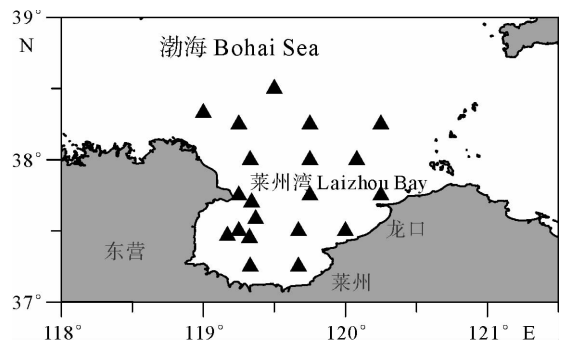


图 1 采样站位地理分布

Fig. 1 Geographic distributions of sampling sites in Laizhou Bay, Bohai Sea

甲醛海水溶液。实验室内,体视显微镜下鉴定、计数。测定各浮游动物种类,个体体长和生物量,记录各站、不同体长、各种类的数量丰度和生物量。渔获物生物学测定数据来源于同航次底拖网作业。

用于生物量谱分析的数据主要是作为鱼类饵料生物的浮游动物种类,如甲壳类、毛颚类以及一些浮游幼体,水母以及被囊类生物未在本研究数据分析之列。

1.2 浮游动物个体含碳量换算和各粒级生产力估算

个体生物量粒级(Size class)确定,即分别将浮游动物个体含碳量 M 以 2 为基底取对数,以最小值为起点,每一粒级的上限所对应的个体生物量 M_{j+1} 是下限相应值 M_j 的两倍(Sheldon *et al.*, 1972)。不同种类、不同粒级的总生物量为:

$$B = \sum A_{ij} \times C_{ij} \quad (1)$$

式中, B 为生物量(含碳量)($\mu\text{gC}/\text{m}^3$)、 A 为数量丰度(ind/m^3)、 C 为个体含碳量($\mu\text{gC}/\text{ind}$)、 i 为种类、 j 为粒级。各种类个体含碳量 C 根据所测浮游动物体长,参照邻近海域相同或相近种类的体长-含碳量经验公式计算所得。主要种类所使用的生长率参照文献相关经验公式计算(表 1)。

表 1 主要种类所使用的生长率参照文献相关经验公式

Table 1 Regression equations on the individual body length-carbon weight and specific growth rate of various zooplankton taxa

种类 Taxon	计算含碳量参考文献 Carbon content referred	近似生长率(g)参考文献 Growth rate referred
<i>Calanus sinicus</i>	Uye 1982	Hirst <i>et al.</i> 1998
<i>Centropages abdominalis</i>	Uye 1982	Liang <i>et al.</i> 1996a
<i>Labidocera</i> sp. (包括 <i>L. bipinata</i> and <i>L. euchaeta</i>)	Uye 1982	Hirst <i>et al.</i> 1998
<i>Paracalanus</i> sp.	Uye 1982	Uye 1991
<i>Acartia</i> sp. (包括 <i>A. bifilosa</i> , <i>A. clause</i>)	Uye 1982	参照同属 <i>A. omori</i> , Liang <i>et al.</i> 1996b
<i>Oithona similis</i>	Uye 1982	Uye <i>et al.</i> 1997
<i>Sagitta crassa</i>	Uye 1982	Hirst <i>et al.</i> 2003

粒级的多样性(Ruiz 1994)计算:

$$H_c = - (1/\text{Log}_2 N) \sum (C_j/R) (p_j) \text{Log}_2 p_j \quad (2)$$

式中, H_c 为粒级多样性指数, N 为粒级数, C_j/R 为各粒级大小 / 总粒级大小, P_j 为各粒级的生物个体数量与总数量的比值。

根据 Sheldon 等(1977),在一个相对稳定的生态系统中,各粒级的总生产力率为组成种类的生产力率的和为:

$$P_j = \sum B_i g_i \quad (3)$$

式中, P_j 为第 j 粒级组生产力率($\text{mg C}/\text{m}^2\text{d}$), g 为生长率(d^{-1}), B 和 i 同公式(1)。总浮游动物生产力率

$$P = \sum_{j=1}^n P_j \quad (4)$$

日周转率 P/B 值即浮游动物日生产量与生物量的比值,它是反映浮游动物日生产能力的重要指标。 P/B 值越高,说明该浮游动物的单位生物量的碳生产能力越强。计算各粒级的日周转率 P/B 值,并建立 P/B 值与粒级大小关系的对数线性方程。

1.3 生物量谱的构建

Sheldon 模型即是相应粒级的总生物量分布。标准生物量谱(又称 P-D 模型)则采用线性回归公式(Platt *et al.* 1978):

$$y = a + bx \quad (5)$$

式中, y 为 Log_2 (浮游动物标准生物量), x 为 Log_2 (浮游动物个体生物量)。

1.4 潜在鱼类生物量的估算

根据 Borgmann (1987) 潜在鱼类生物量估算模型,对莱州湾存在的鱼类群体的生物量进行估算。该模型的基础假设为:稳定的水生生态系统中,个体大小是营养级的粗略表示,假定生产力率及其生物量(P/B)均与个体粒级大小具有异速生长关系,则任何粒级组的生物,生物量都可以认为:

$$B_{xy} = b(M_{\max}^{n-\epsilon} - M_{\min}^{n-\epsilon}) \quad (6)$$

式中, M_{\max} 和 M_{\min} 分别是对应粒级组中最大和最小的个体生物量。 b , n 和 ϵ 都为经验系数,它可以从其他已知的组群去推算。 n 是生产力率和生物量间异速生长关系式中的指数。

$$P/B = aM^{-n} \quad (7)$$

式中, M 是粒级组个体生物量的几何平均值。 P/B 值即是生产量与生物量的比值,它与个体生物量(能量)的大小具有较为稳定的对数线性关系(Banse *et al.*, 1980)。因此在同一生态群体中, n 亦假定为常数,理论上可以从任一已知的粒级组的 P/B 与个体生物量对数线性方程的斜率得到 n 值。 ϵ 是粒级转换效率,需要基于两个营养级组群的生产力和生物量数据才可算出。本研究采用经验值 0.24(Sheldon *et al.*, 1977)。

2 结果

莱州湾春季 5、6 月浮游动物常见种类包括:中华哲水蚤 *Calanus sinicus*、腹针胸刺水蚤 *Centropages abdominalis*、小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 和强额拟哲水蚤 *Paracalanus crassirostris*、拟长腹剑水蚤 *Oithona similis*、双刺纺锤水蚤 *Acartia bifilosa*、真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta* 和双刺唇角水蚤 *Labidocera bipinnata* 以及少量的长尾类幼体、住囊虫。

5 月,海区数量最多的浮游动物种类依次为双刺纺锤水蚤、小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤。6 月,数量最多的种类与 5 月相同,除拟长腹剑水蚤和唇角水蚤数量略有增加外,其他种类的数量均较 5 月有明显降低。

2.1 浮游动物粒级组成和生产力

基于粒级组成,计算 5、6 月莱州湾浮游动物粒级多样性水平。5 月 H_c 值为 0.002 5,较 6 月份的 0.001 8 略高。5 月和 6 月莱州湾双刺唇角水蚤和真刺唇角水蚤多为未成体,且其个体生物量粒级相近,因此本研究中将这两种的生物量和数量按相应粒级合并,标为 *Labidocera sp.*。

由图 2 可知,5 月浮游动物的个体生物量粒级介于 -3~10 间。各粒级浮游动物的总生物量分布表现为明显的双峰型,峰值位于 -1~0 和 6~7 两个粒级。总数量丰度分布表现为单峰型,峰值位于粒级 -1~0。在各粒级生物量和数量的种类组成中,双刺纺锤水蚤是 -3~2 粒级的主要贡献者,该粒级范围内还有一定比例的小拟哲水蚤(-1~0 粒级)和腹针胸刺水蚤(1~2 粒级)。中华哲水蚤和强壮箭虫是生物量第二波峰的主要贡献者,它们分别在粒级 3~7、7~10 粒级的生物量种类组成中占绝对优势。

6 月与 5 月的浮游动物个体粒级组成相似,但其数量分布为单峰型。两个月的不同之处在于,6 月生物量的波峰变化相对缓和,特别是粒级 -1~0 的峰值不突出,趋向于单峰型分布。分析各粒级的生物量和数量种类组成发现,双刺纺锤水蚤、中华哲水蚤和强壮箭虫分别是 -2~2、4~7 和 7~10 粒级生物量和数量的主要贡献者。此外,6 月拟长腹剑水蚤的数量和生物量都较 5 月有明显的增加,在粒级 -2~1 中占相当的数量比例。

计算浮游动物所有粒级的日生产力,5 月为 $75\text{mg C/m}^2 \cdot \text{d}$,6 月为 $24\text{mg C/m}^2 \cdot \text{d}$ 。按航次调查面积为 $3\,000\text{ km}^2$ 估算,5、6 月的莱州湾调查海区浮游动物月生产力约为 6 981 和 2 214tC。

日周转率 P/B 值 5 月均值为 0.20,6 月为 0.16。图 3 为日周转率 P/B 值与粒级大小的分布,相应的线性回归关系式分别为:5 月, $\text{Log}_2(P/B) = -0.22, \text{Log}_2(M) - 1.71 (R^2 = 0.903\,1)$;6 月, $\text{Log}_2(P/B) = -0.18, \text{Log}_2(M) - 1.66 (R^2 = 0.883\,3)$ 。

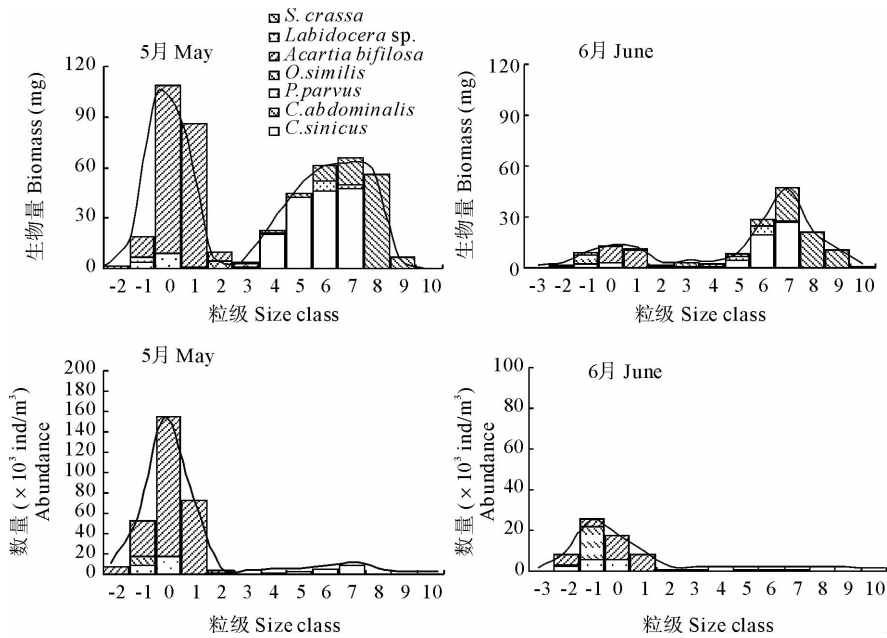


图 2 基于粒级分布的莱州湾浮游动物生物量和数量的种类组成

Fig. 2 Biomass and abundance compositions of major zooplankton species based on the continuous size classes in Laizhou Bay, Bohai Sea

2.2 生物量谱

图 2 中各粒级浮游动物总生物量分布的曲线即是 Sheldon 型生物量谱。

图 4 中,由线性回归分析所得的 5 月和 6 月的标准生物量谱为斜率相近且近似平行的两直线,其中 5 月的谱线方程 $y = -0.9629x + 14.893 (R^2 = 0.60)$,其截距较 6 月 $y = -0.9063x + 12.832 (R^2 = 0.80)$ 的相应值要高。

2.3 潜在鱼类生物量的估算

公式(7)中的一 n 的值即是结果 2.1 中 P/B 值与粒级大小对数线性方程的斜率,5、6 月的一 n 值分别为 -0.22 、 -0.18 。

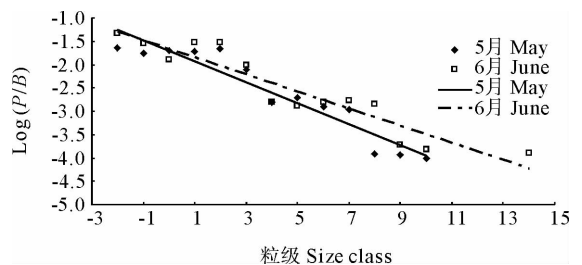


图 3 莱州湾浮游动物各粒级标准化的 P/B 值分布
Fig. 3 Normalized P/B size spectra of net zooplankton in Laizhou Bay

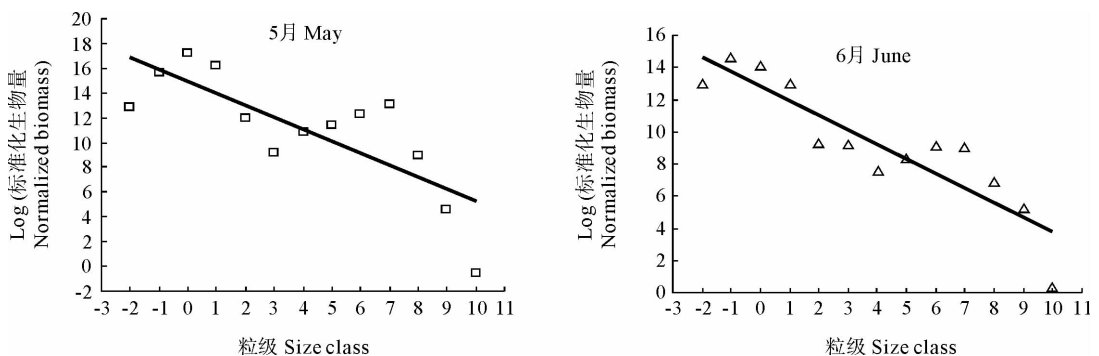


图 4 莱州湾浮游动物标准生物量谱

Fig. 4 Normalized biomass size spectra of net zooplankton in Laizhou Bay, Bohai Sea

根据两个航次渔获物的生物学测定数据,5、6 月航次渔获物中鱼类的大小范围分别为 0.16~670 和 0.05~280 g。按鱼类湿重中有机碳含量为 13% 计算(卢振彬 2006),两个航次渔获物的鱼类粒级范围分别为 14~16 和 12~25。由公式(6)推算出,5 月,粒级为 14~16 的渔获物的总生物量为 0.57gC/m²,6 月粒级为 12~25 的渔获物的总生物量为 0.1 gC/m²,转换成湿重其相应值分别为 4.38、0.77 g/m²。

3 讨论

由本研究结果可以看出,5 月和 6 月莱州湾浮游动物生物量粒级分布曲线明显不同。5 月生物量高,其粒级分布表现为主要由双刺纺锤水蚤、中华哲水蚤和强壮箭虫构成的双峰曲线;6 月,小型浮游桡足类双刺纺锤水蚤急剧减少,总生物量降低,生物量粒级分布曲线表现为由中华哲水蚤和强壮箭虫构成的单峰曲线。1959 年全国海洋综合调查报告认为,腹针胸刺水蚤和中华哲水蚤的大量减少,是引起 6 月莱州湾浮游动物生物量降低的原因(中国科学院海洋研究所浮游生物组 1964),但该结论是基于大型浮游生物网(孔径 500 μm)采集的样品分析结果。

王 荣等(2001)认为,双刺纺锤水蚤、小拟哲水蚤和强额拟哲水蚤等小型浮游桡足类是渤海仔稚鱼和幼鱼最为重要的饵料来源。双刺纺锤水蚤作为典型的近岸种,其数量峰值出现在 4~5 月,分布中心恰是莱州湾及黄河口附近水域(毕洪生等 2001;Wang *et al.* 2002),这与万瑞景等(2004)的研究结果一致。在本研究相应航次中仔稚鱼的平行调查结果显示,6 月海区的仔稚鱼数量急剧下降,不及 5 月的一半。通过此结果,作者推测,6 月双刺纺锤水蚤数量的急剧减少是造成该海区 6 月仔稚鱼数量急剧下降的原因之一。双刺纺锤水蚤可能是春季莱州湾仔稚鱼和幼鱼最为重要的饵料来源,它的时空分布与莱州湾渔业生物资源的补充密切相关。

在海洋生态系统中,无论捕食者的适应和生活方式如何,被捕食者的个体体长应不超过捕食者个体大小的 7%(Sheldon *et al.* 1977)。由本研究莱州湾浮游动物粒级分布范围可推导出所对应的捕食者生物群体大小应为个体体长介于 5~200 mm 的群体,其优势体长集中于 5~12 和 28~45 mm,而这一群体亦多恰为莱州湾鱼类优势种,如赤鼻棱鲷、小黄鱼、斑鲷等仔稚鱼、幼鱼。

本研究对莱州湾 5、6 月的浮游动物生产力和日周转率 P/B 分别进行了计算,其结果均高于邻近海区青岛桑沟湾(生产力 0.42~11.8 mgC/m²·d)(毛兴华等 1997)和胶州湾(生产力 0.26~1.09 mgC/m³·d,水深 <20 m, P/B 0.019~0.13,年均值 0.047)(刘光兴等 2000)。综合分析原因,除了各海湾自身的营养水平及季节差异和文献中所使用的碳收支法模型不同以外,可能与采样的方法、分析的浮游动物粒级范围有关。上述两文献中的研究对象均为大型浮游生物网采集的浮游动物,小型浮游动物的重要性相对被低估。谭焯辉等(2003)亦采用碳收支法模型,对南沙群岛海区(水深 >100 m)使用中型浮游生物网采集的浮游动物的生产力进行估算,所得值为 72.9 mgC/m²·d,此值与莱州湾 5 月浮游动物的生产力值相近。此外,日周转率 P/B 值也与生物个体大小有关。一般个体较小的浮游动物,其生物量虽小但其日周转率 P/B 值反而较高。如在桑沟湾,拟长腹剑水蚤和小拟哲水蚤的日周转率 P/B 值为 0.25 和 0.3,就远高于中华哲水蚤的 0.049(毛兴华等 1997)。在同一种类中,发育早期亦较成体的日周转率 P/B 值高。作者在分析样品时发现,5 月中华哲水蚤大多为 CV 期以下尚未发育成熟的个体(粒级在 3~6 间),而至 6 月大多为成熟的雌体。

因为标准生物量谱特征参数对环境变化更为敏感,可以反映出生态系统的营养健康水平,所以可以用于不同生态系统的比较(Platt *et al.* 1978;Boudreau *et al.* 1992;Gamble *et al.* 2006)。将本研究结果与春、秋季黄海中部以及近长江口毗邻水域的浮游动物标准生物量谱(左 涛等 2008a,b)进行比较发现,莱州湾的浮游动物标准生物量谱截距和斜率值较低,这一结果可能反映了莱州湾的初级生产力和生态转换效率相对较低。

应用 Borgmann 模型进行不同营养级生物量估算时,粒径转换效率 ϵ 是最为重要的参数之一(Borgmann 1987),它的变化范围很大,对模型的预测结果影响也较大(Cyr *et al.* 1996)。本研究因数据收集的局限性,采用了经验值 0.24。

本研究应用 Borgmann 模型进行潜在鱼类生物量估算,算是一种初步的尝试,所估算的结果的准确度尚需进一步的考证。较同期海上底拖网作业所获得中上层鱼类的生物量观测结果而言,本研究所估算结果远远高于 5、6 月的相应观测值 0.043 和 0.0016 g/m²。Borgmann 模型在估算生物量时,它的适用范围是,在稳定状态下非捕食死亡率可忽略且人为干扰很小的生态系统食物链,因此应用此模型进行人类活动干扰较大的生态

系统的潜在鱼类生物量估算时,结果一般会较大程度偏离实际水平(Cyr *et al.* 1996)。而莱州湾是受人类活动影响较大、具有较高捕捞压力的生态系统,因此本研究所估算值远高于观测值也是预料之中。另外,由于同期海上拖网作业方式和所采用的网具(囊网网目 20 mm)类型所限,中、小型的中上层鱼类采集效率可能偏低,上述观测值并非代表莱州湾鱼类生物量的准确结果。据专家粗略估计,莱州湾现存量约为 2 000 t,折算后平均值为 0.5 g/m²,如果该估计值较为合理的话,本研究所估算的鱼类生物量与其差异控制在 10 倍以内,这对于实践中的应用还是很有意义的。

参 考 文 献

- 万瑞景,邱盛尧,李培军,张培超. 2004. 鱼卵、仔稚鱼及其生态特性. 见:黄渤海近岸水域生态环境与生物群落. 程济生编. 青岛:中国海洋大学出版社,243~358
- 王 荣,张鸿雁,王 克,左 涛. 2002. 小型桡足类在海洋生态系统中的功能作用. 海洋与湖沼,33(5):453~464
- 毛兴华,杨小龙. 1997. 桑沟湾浮游动物生产力及其转换效率. 海洋学报,19(4):138~141
- 中国科学院海洋研究所浮游生物组. 1967. 全国海洋综合调查报告. 第 8 册
- 左 涛,王 俊,金显仕,李忠义,唐启升. 2008a. 春季长江口邻近外海浮游生物的生物量谱. 生态学报,28(3):1 174~1 182
- 左 涛,王 俊,唐启升,金显仕. 2008b. 秋季南黄海网采浮游生物的生物量谱. 海洋学报,30(5):71~80
- 毕洪生,孙 松,高尚武,张光涛. 2001. 渤海浮游动物群落生态特点 II. 桡足类数量分布及变动. 生态学报,21(2):177~185
- 卢振彬. 2006. 闽中渔场鱼类资源生产量和最大可持续开发量. 南方水产,2(2):6~14
- 刘光兴,张志南. 2000. 胶州湾北部浮游动物的生物量和生产力. 青岛海洋大学学报,30(2):58~64
- 周林滨,谭焯辉,黄良民,连喜平. 2010. 水生生物粒径谱/生物量谱研究进展. 生态学报,30(12):3 319~3 333
- 谭焯辉,黄良民,尹健强. 2003. 南沙群岛海区浮游动物次级生产力及转换效率估算. 热带海洋学报,22(6):29~34
- Banase, K., and Mosher, S. 1980. Adult body mass and annual production/biomass relationships of field populations. *Ecological Monographs*, 50(3):355~379
- Borgmann, U. 1982. Partial-size-conversion efficiency and total animal production in pelagic ecosystem. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 39(5):668~674
- Borgmann, U. 1987. Models on the slope of, and biomass flow up, the biomass-size spectra. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44(Suppl. 2):136~140
- Boureau, P. R., and Dickie, L. M. 1992. Biomass spectra of aquatic ecosystems in relation to fisheries yield. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49(8):1 528~1 538
- Cyr, H., and Peters, R. H. 1996. Biomass-size spectra and the prediction of fish biomass in lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53(5):994~1 006
- Hirst, A. G., and Lampitt, R. S. 1998. Towards a global model of in situ weight-specific growth in marine planktonic copepods. *Mar. Biol.* 132(2):247~257
- Hirst, A. G., Roff, C. J., and Lampitt, R. S. 2003. A synthesis of growth rates in marine epipelagic invertebrate zooplankton. 3~142. In *Advances in Marine Biology*, ed. by Southward, A. J., Tyler, P. A., Young, C. M., and Fuiman, L. A., Academic Press, London
- Gamble, A. E., Lloyd, R., Aiken, J., Johannsson, O. E., and Mill, E. L. 2006. Using zooplankton biomass size spectra to assess ecological change in a well-studied freshwater lake ecosystem: Oneida Lake, New York. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63:2 687~2 699
- Liang, D., and Uye, S. 1996b. Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland Sea of Japan. II. *Acartia omorii*. *Mar. Biol.* 125(1):109~117
- Liang, D., Uye, S., and Onbé, T. 1996a. Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland Sea of Japan. I. *Centropages abdominalis*. *Mar. Biol.* 124(4):527~536
- Platt, T., and Denman, K. 1978. The structure of pelagic ecosystems. *Rapp. P. -v Reun. Cons-Int. Explor. Mer.* 173: 60~65
- Reid, P. C., Battle, E. J. V., Batten, S. D., and Brander, K. M. 2000. Impacts of fisheries on plankton community structure. *ICES J. Mar. Sci.* 57(3):495~502
- Ruiz, J. 1994. The measurement of size diversity in the pelagic ecosystem. *Sci. Mar.* 58(1-2):103~107
- Sheldon, R. W., Prakash, A., and Sutcliffe, W. H. Jr. 1972. The size distribution of particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 17(3): 327~340
- Sheldon, W. G., Sutcliffe, W. H., and Paranjape, M. A. 1977. Structure of pelagic food chain and relationship between plankton and fish production. *J. Fish. Res. Board Can.* 34(12):2 344~2 353
- Thiebaut, M. L., and Dickie, L. M. 1993. Models of aquatic biomass size spectra and the common structure of their solutions. *J. Theor. Biol.* 159(2):147~161
- Uye, S. 1982. Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38(3):149~158
- Uye, S. 1991. Temperature-dependent development and growth of the planktonic copepod *Paracalanus* sp. in the laboratory. *Bull. Plankton Soc. Japan*, (Spec):627~636
- Uye, S., Nagano, N., and Tamaki, H. 1997. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of meso- and macrozooplankton in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 53(6):689~703
- Wang, R., Zhang, H., Wang, K., and Zuo, T. 2002. Distribution and population dynamics of *Paracalanus parvus*, *Paracalanus crassirostris*, and *Acartia bifilosa* (Copepoda, Calanoida) in the Bohai Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 20(4):348~357