

海洋浮游动物学研究

李少菁, 许振祖, 黄加祺, 曹文清, 陈 钢, 柯才焕, 陈丽华

(厦门大学海洋学系, 亚热带海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 中国的海洋浮游生物学由我校已故科学家郑重、金德祥教授创建于本世纪 40 年代. 近 10 年来, 该领域继续取得一批研究成果, 促进了我国海洋浮游生物学的发展. 在浮游动物生物学方面, 揭示了台湾海域及其邻近海域浮游动物多样性, 发现水母类 39 个新种, 桡足类 2 个新种, 并对浮游动物生态类群、群落结构、微小型浮游动物在生态系统中的地位和作用等基础生态学取得了系列成果. 同时, 开展了实验生理生态学及个体生物学研究. 其中, 浮游动物生化组成与生理生态功能、浮游桡足类卵型与滞育、浮游动物能学、主要浮游动物染色体、生活周期与世代, 摄食生态, 经济贝类幼体附着与变态等研究.

关键词: 浮游动物; 生态学; 生物学

中图分类号: Q 959

文献标识码: A

海洋浮游动物是海洋生态系统中非常重要的一大生态类群, 种类组成繁杂, 数量大, 分布广, 有着极为重要的生态学意义. 因此, 无论在生物海洋学还是海洋生物学研究中, 海洋浮游动物都是重要研究对象, 其研究贯穿了两大学科的发展. 德国生物学家 V. Hensen 1887 年正式提出“浮游生物”(Plankton) 名词^[6], 至今对海洋浮游动物的研究已有一个多世纪的历程. 纵观一百多年的研究历史, 大体可以划分为以下 3 个阶段:

1. 探险调查阶段

该时期约从 19 世纪下叶开始到 20 世纪初的二三十年代. 此期间的主要科学研究集中在海洋学探险考察, 生物海洋学家通过海上调查, 建立浮游生物的采集方法, 认识自然海区中的浮游生物, 包括浮游植物和浮游动物.

2. 实验生物学研究阶段

这一阶段可以说始于 20 世纪的二三十年代, 海洋生物学家的工作开始从浮游生物的分类鉴定慢慢转向生态习性的观察与分析, 特别是在实验室中开展实验生态研究. 这个阶段在 20 世纪的六七十年代达到鼎盛. Omori & Ikeda (1984) 出版了《浮游动物生态研究法》一书, 标志

收稿日期: 2001-02-15

基金项目: 国家自然科学基金重点(49636220); 国家自然科学基金重大(G19990437)和国家自然科学基金(39800021)资助项目

作者简介: 李少菁(1931-), 男, 教授.

着浮游动物研究体系的形成. 在此期间, 自然海区浮游动物种类组成与数量分布的调查研究更趋完善, 自然生态调查也总是与实验生态研究相结合, 试图阐明浮游动物的种群动态和对海洋生物生产力的贡献. 这段时间的一些标志性的成果包括: Marshall & Orr (1955) 撰写的《The Biology of a Marine Copepod, *Calanus finmarchicus*》; Mauchline (1980) 的《The Biology of Mysids and Euphausiids》; Raymont (1963) 的《The Plankton and Productivity in the Oceans》; Bougins, P. (1976) 的《Marine Plankton Ecology》等等.

3. 现代化综合调研阶段

进入 20 世纪 80 年代, 海洋浮游动物的研究也跨入一个新时期, 现代化的实验室研究技术和海洋观测技术带动浮游动物学研究的全面开展. 当前人们特别关注的是大海洋生态系统的动力学过程和全球变化, 而生态系统动力学过程的关键又是浮游动物的生物学和生态学过程, 这使得浮游动物的全面深入研究成为当前海洋生态学研究的核心问题之一. 实验室中的浮游动物研究更多地借助于生理生化的方法, 特别是分子生物学的技术方法已渗透进来, 解决浮游动物的生物多样性, 生态遗传学和种群动力学中的诸多问题. 在海洋观测方面, 大量的先进观测仪器和手段开始结合用于浮游动物的调查, 如 ADCP, 浮游动物连续计数采样器, 浮游动物大容量采水器等. 现代化综合调研阶段的一个重要标志是海洋生态系统功能特征的定量化研究. 生态系统动力学模型的研究是当前的一个热点. 它的目的是对复杂生态系统中各要素间作用关系加以定量化, 从而监控系统的动态变化, 最终实现预测和管理. 与浮游动物有关的生理生态过程, 包括摄食、呼吸、排泄、消化、吸收等等的数值模拟现已日臻完善, 成为各类生态模型的重要构成部分.

我国海洋浮游动物的研究与国外相比起步较晚, 自 40 年代起到现在, 半个多世纪来的海洋生态学研究对中国沿海浮游动物的群落组成、数量分布、区系特征、数量变动规律已作了大量的调查工作. 80 年代以来, 相继开展了实验室实验生态的研究. 近年来, 在全球海洋生态系统动力学研究的推动下, 我国的海洋生态学研究, 包括海洋浮游动物的研究正在全面深入地开展起来.

我校是我国海洋生物研究的摇篮, 我校浮游生物组率先在国内进行海洋浮游动物研究. 早在 1935 年, 金德祥对厦门港浮游生物进行研究^[1], 解放初, 郑重报道厦门港浮游动物及浮游甲壳动物的形态、分类及生态^[2], 丘书院报道中国东南沿海及厦门港的水母类及栉水母^[3]. 在 20 世纪 90 年代以前, 本研究组在浮游动物的分类、形态、生态及生理、生化作了不少工作. 在浮游动物分类和形态方面, 郑重等发表了《中国海洋浮游桡足类》上卷(1965)^[4]和中卷(1982)^[5], 许振祖等发表多篇论文, 对我国南部沿海, 特别是福建沿海水母类作了较详细记述, 为我国水母类的分类打下基础, 并就厦门港几种水母类的刺细胞进行研究, 发表水母刺胞一新种 3 个新型^[11]. 此外, 在浮游甲壳动物的枝角类、磷虾类和莹虾类、毛虾类作了不同程度的研究. 在形态上李少菁对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)作了形态比较, 发现它的个体大小有季节和纬度差异. 丘书院对厦门港栉水母类形态进行详细描述. 本研究组参加不少海区和渔场综合调查, 参加 1958 ~ 1960 年全国海洋普查、厦门港、九龙江口、台湾海峡、闽南—台湾浅滩、福建罗源湾调查, 对调查区的浮游动物的种类组成, 数量的时空分布以及与环境的关系, 有一定了解. 在这方面发表不少论文, 并对浮游甲壳动物、水母类的昼夜垂直移动进行研究. 并就区系和地理分布、种群与群落生态进行分析. 在个体生物学研究上, 丘书院对蝶水母(*Ocyropsis chievementi*), 李

松等对厦门港几种常见桡足类,傅素宝对双齿许水蚤(*Schmackeria dubia*)幼体发育进行研究,李少菁对厦门港 10 种桡足类的食物组成及食性进行分析,郑小衍等对桡足类大颚齿缘进行电镜扫描观察,探讨桡足类大颚齿缘结构与食性的关系.在实验生态方面,沈国英等用同位素方法研究中华哲水蚤的过滤率、摄食率、吸收率及和外界因子的关系,黄加祺等对温度与盐度对桡足类存活率的影响进行研究.在经济动物幼体实验生态研究方面,也是当前研究热点.在此,本研究组对对虾幼体及贝类幼体等经济动物幼体,进行了不少工作.在生理生化方面,这也是当今研究的热点之一.王文雄等进行过贝类幼体趋性行为的研究,王雄进等(1988)报道了中华哲水蚤碳、氮、氢含量的季节变化,苏永全等发表我国海洋浮游甲壳动物的化学成分论文.

值得提出的是,郑重等在 1984 年出版了《海洋浮游生物学》一书,得到同行高度的评价,并撰英文版向国外发行,1992 年台湾又用繁体字出版.此外,郑重还写《浮游生物学概论》、《海洋浮游生物生态学文集》、《郑重文集》、及《郑重文集(续)》,郑重等 1992 年发表《海洋桡足类生物学》.这些著作的发表,促进了我国海洋浮游生物研究的发展.

1 自然生态研究

本研究组在近 10 年内主要进行“福建省海岛调查”、“闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系统研究”、“台湾海峡生物生产力及其调控机制研究”以及“台湾海峡生源要素生物地球化学过程的研究”等项目,以及以往在台湾海峡调查的资料,综合分析有关浮游动物资料,总结归纳台湾海峡浮游动物主要生态特点.

1.1 种类组成

表 1 台湾海峡各类浮游动物的种类组成

Tab.1 Species component of zooplankton in Taiwan Strait

类 别	种数	本海域发现的新种数	未定名种数
纤毛虫(Ciliata)	135	13	31
放射虫类(Radiolaria)	167		30
有孔虫类(Foraminifera)	24		
水母类(Medusae)	232	39	
栉水母类(Ctenophora)	7		
浮游多毛类(Polychaeta)	14		
浮游腹足类(Gastropoda)	46		
枝角类(Cladocera)	4		
介形类(Ostracoda)	99	7	
桡足类(Copepoda)	298	4	
端足类(Hyperiidea)	81		4
糠虾类(Mysiacea)	24		
磷虾类(Euphausiacea)	27		
十足类(Decapoda)	11		
毛颚类(Chaetognatha)	27		2
被囊类(Tunicata)	32		2
鱼卵、仔稚鱼(Fish eggs & larvae)	101		43
总 计	1 329	63	112

以 1983 ~ 1998 年间台湾海峡中、北部调查结果为基础, 参考其他调查报告, 我们统计了台湾海峡各类浮游动物的种类组成(表 1)^[10]. 由于台湾海峡隶属亚热带海区, 生物多样性相对较高, 物种丰富度大, 浮游桡足类和水母类尤为突出. 本研究组报导水母类 39 个新种^[11], 桡足类 2 个新种^[12].

1.2 生态类群和群落划分

台湾海峡的浮游动物主要是热带-亚热带种和广布种. 据李少菁等研究, 把该区域浮游动物分为 3 个生态类群.

1) 高温低盐近岸类群. 分布在福建沿岸河口区. 代表性的种类有桡足类的中华哲水蚤、锥形宽水蚤 (*Temora turbinata*)、微刺哲水蚤 (*Canthocalanus pauper*); 枝角类的鸟喙尖头溞 (*Penilia avirostris*), 肥胖僧帽溞 (*Evadne tergestina*); 软甲类的中华假磷虾 (*Pseudeuphausia sinica*)、日本毛虾 (*Aetes japonicus*); 以及双生水母 (*Diphyes chamissonis*)、针刺真浮萤 (*Euconchoecia aculeata*).

2) 高温高盐的外海类群. 分布于海峡中部、东北部和东南部, 代表种有桡足类的普通波水蚤 (*Undinula vulgaris*)、强真哲水蚤 (*Eucalanus crassus*)、亚强真哲水蚤 (*E. subcrassus*)、平头水蚤 (*Candacia* spp.) 和真刺水蚤 (*Euchaeta* spp.); 软甲类的长额磷虾 (*Euphausia diomedae*)、中型莹虾 (*Lucifer intermedius*)、正型莹虾 (*L. typus*); 以及半口壮丽水母 (*Aglaura hemistoma*)、肥胖箭虫 (*Sagitta enflata*)、萨利纽鳃樽 (*Thalia democratica*) 等.

3) 深水类群. 主要栖息于 200m 以深水域, 代表种有隆线似哲水蚤 (*Calanoidescarinatus*)、

表 2 台湾海峡浮游动物的群落特征

Tab. 2 characteristics of zooplankton community in Taiwan Strait

群落类别	栖居位置	理化特征	浮游动物代表类别	营养结构特点
北部近岸群落	闽江口 - 围头的沿岸带	低温低盐, 闽浙沿岸水、闽江冲淡水和其他径流控制	鸟喙尖头溞、中华哲水蚤、海龙箭虫和双生水母等	组成较简单, 以桡足类、枝角类为主
南部近岸群落	厦门外海以南的近岸水域	高温低盐, 海峡暖流水、粤东沿岸水、沿岸径流以及季节性上升流控制	中华哲水蚤、锥形宽水蚤、芦氏拟真刺水蚤、海龙箭虫、中华假磷虾、亨生莹虾、双生水母、软拟海樽、异体住囊虫等	组成复杂, 有季节性变动, 大型浮游动物有重要作用
中部群落	近岸群落以东的海峡中部	高温高盐, 海峡暖流水终年控制	波水蚤、真刺水蚤、真哲水蚤、锚哲水蚤、肥胖箭虫、乳点水蚤、异肢水蚤、正型莹虾等	组成较复杂, 外海种为主
东北部群落	台湾西北部水域	高温高盐, 海峡外海水控制	真刺水蚤、强真哲水蚤等	组成简单, 生物量低
东南部群落	台湾浅滩东南部水域	高温高盐, 南海水、黑潮水控制	中部群落代表以及隆线似哲水蚤、樱磷虾、多变箭虫等	组成较简单, 以深水种为主

芦氏拟真刺水蚤(*Pareuchaeta russelli*)、乳点水蚤(*Pleuromamma* spp.)、异肢水蚤(*Heterorhabdus* spp.)、海羽水蚤(*Haloptilus* spp.)、多变箭虫(*Sagitta decipiens*)、樱磷虾(*Thysanopoda* spp.)等。

而在九龙江口,浮游动物可分为4个生态类群,即淡水类群、河口类群、沿岸类群和外海类群^[13]。

台湾海峡是理化环境多变的海区,浮游动物受其影响,结构和功能多不稳定,群落的栖境界不明显,为了深入研究海峡生态系统的功能特点,简化变化的系统结构,把海峡划分为五个群落(表2)^[10]。

1.3 台湾海峡微型浮游动物及微食物网研究

近一二十年来,海洋微生物生态研究日益受重视,其中最大的进展是微生物环(Microbial Loop)的发现(Azam, et al., 1983)。所谓微生物环,就是海洋生态系统中相对传统食物链的另一个营养通道,由大量自由生活的异养微生物吸收利用海水中的溶解有机质,使其变成颗粒物质(微生物自身生物量),然后经原生动物摄食作用转化为更大的颗粒,最后传递进入后生动物食物网。目前,微生物环的研究已成为水域生态学的热点。由于微食物环中的成员组成越来越复杂多样化,我们也称其为微生物食物网(简称微食物网)。

进入九十年代后,我们在台湾海峡从事海洋生态系统研究的时候,也开始注意到微型浮游生物和营养生态学问题,并开展了一些零星的研究。结合台湾海峡以往的综合调查,我们发现浮游生态系统中的碳流较难用传统的食物链结构来解释,并发现小型浮游生物可能存在较大的作用^[14]。近年来在台湾海峡及其邻近海域相继开展的国家教育部、国家基金委重大项目研究中均将微型浮游生物及其重要生态功能作为研究重点,并通过研究取得了显著的成果。

1) 成员组成与生态类群划分:一般认为经典的微食物网组成成员主要是微型浮游植物、异养细菌、小型浮游动物(主要是原生动鞭毛虫和纤毛虫)。在实际工作中,不同海区有一些出入,特别是在小型浮游动物方面,有的是以异养鞭毛虫为主,有的是以纤毛虫为主,还有的加入了甲壳动物的无节幼体、住囊虫等。我们在台湾海峡微食物网的工作是围绕浮游生物粒级生态类群,结合生物种类展开的,主要针对超微型浮游植物、微型浮游植物、网采浮游植物、细菌、异养鞭毛虫、纤毛虫、中小型浮游动物等。有关台湾海峡微食物网成员组成上的研究的一个突出的工作是对原生动物纤毛虫的生态研究,建立了纤毛虫的固定方法,鉴定了纤毛虫的种类组成,测定了纤毛虫的生物量,并开展了部分实验生态学工作。其中在种类组成上采集发现纤毛虫116种,已定名80种,未定名的36种。发现一种新种——网状原纹虫(*Rhabdonella reticulata* n. sp.)。50种为中国海新纪录,70种为台湾海峡新纪录。裸纤毛虫的急游虫(*Strombidium* spp.)是台湾海峡全年的优势种,占总纤毛虫数量的46.3%~51.4%,其它裸纤毛虫占11.8%~13.3%,具壳纤毛虫占36.8%~40.4%。在此前这项工作还是个空白。

另一部分工作集中在水样中的原生动物鞭毛虫和浮游生物中网中的小型浮游动物的种类组成和数量分布,从数量上看,鞭毛虫、浮游桡足类幼体和浮游被囊类动物都应该是微食物网中重要的组成部分。

2) 微食物网成员的生物量:微食物网主要成员的生物量和时空分布是我们重点研究的一项工作,它是在判定生态过程与机制之前必须要了解的现象(表3)。

表 3 台湾海峡微食物网主要成员的生物量

Tab. 3 Standing stock/quantity of main components in Microbial food web in Taiwan Strait
(mgC/m^3)

生态类群	1997 年夏季	1998 年冬季	变动范围
DOC		1000*	175.2 ~ 1897.2
POC		100*	1.1 ~ 429.6
细菌	16.6*	16.8*	10.0 ~ 25.8
PICO 浮游植物	9.2	16	
NANO 浮游植物	9.2	12	10 ~ 90
NET 浮游植物	8.6	7	
鞭毛虫	17.6	3.1	0.5 ~ 41.1
纤毛虫	0.3	0.5	0.1 ~ 0.9
中小型浮游动物	32*	24*	12 ~ 56*
大型浮游动物	54*	9.6*	4 ~ 70*

* 间接估算值

数据直观地告诉我们 3 个结果: 1. DOC POC 浮游植物生物量的比值为 1000 100 27 ~ 35, 这与一般认为的溶解有机质、颗粒有机质、活体生物量之间的 100 10 2 比值(参见 Parsons & Lalli, 1993) 基本是一致的. 2. 原生动物的生物量不如细菌、浮游植物、中小型浮游动物稳定, 鞭毛虫变化较大, 纤毛虫则远没有想象的那样丰富, 约为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mgC}/\text{m}^3$. 3. 中小型浮游动物的生物量占浮游动物的比例高, 意味着过去对这类动物的生态功能的忽视可能给我们的生态系统分析带来不小的影响.

3) 营养相互作用分析与推测: 水生生态系统微食物网研究告诉我们原生动物纤毛虫在浮游细菌与后生动物食物链间有重要的链接作用. 然而我们在台湾海峡估测的生物量水平, 由于量级差别过大, 很难成为微食物网中的源或汇. 厦门海域的调查显示, 纤毛虫的平均生物量为 $1.0 \sim 1.2 \text{ mgC}/\text{m}^3$, 与台湾海峡的结果基本在同一量级. 为了验证纤毛虫的生态功能, 实验室下测定了纤毛虫对细菌和小球藻的摄食速率, 结果分别为 $4.3 \text{ pgC}/\text{cell} \cdot \text{hr}$ 和 $4.9 \text{ pgC}/\text{cell} \cdot \text{hr}$. 以此数据外推的结果为纤毛虫的摄食量仅为细菌生产力和初级生产力的 $0.1\% \sim 2.4\%$. 种种迹象使我们逐步倾向得出这样的结论: 台湾海峡的纤毛虫较少, 原生动物中异养鞭毛虫占据主要的地位, 而在上行的过程中, 中小型浮游动物起到重要的连接作用(参见图 1).

4) 台湾海峡微食物网生态模型的研究: 台湾海峡微食物网生态模型的研究, 目的是为了能从数量的角度方面, 阐明台湾海峡微食物网的结构和功能.

为了考察台湾海峡整体系统中的生态功能特点, 陈钢等(2001)^① 针对海峡南部的闽南-台湾浅滩上升流生态系统构建了稳态的 Eco-path 模型, 模型中重点侧重了中上层鱼类资源的形成机制和微型生物食物网的功能. 模型的输出结果如图 2 所示.

模型结果表明, 浮游植物的初级产量有一大部分(77.6%) 是为细菌和异养鞭毛虫所利用的. 这说明作为亚热带海区的闽南台湾浅滩系统微型生物的发展潜力是很大的. 异养鞭毛虫表

现了较高的生态传递效率 (21.5%)。以整个浮游后生动物群落为枢纽, 微型食物网对传统食物链的贡献达到 33.1%, 这与世界上普遍报导的水平大体相当。在这个特殊的上升流浮游生态系统中, 浮游动物群落表现了相对较低的传递效率 (3.3%), 可能与其中胶体动物的作用有关, 在系统中它们更接近碳流的一个汇, 尽管它们是中上层鱼类的主要维持者。

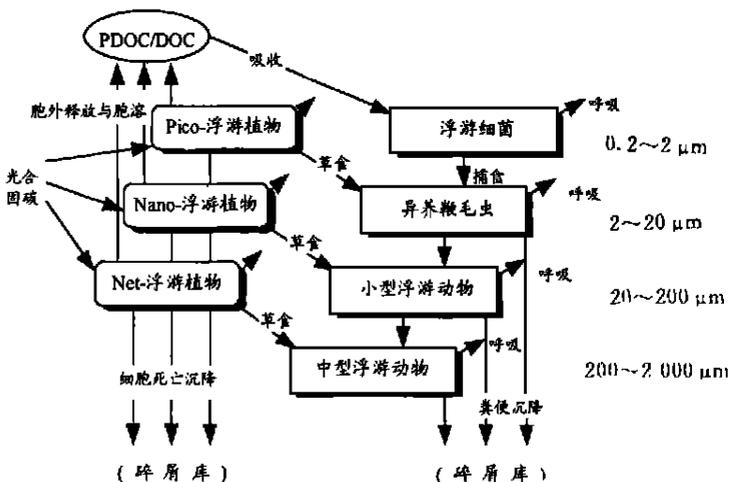


图 1 台湾海峡微食物网的概念模型

Fig.1 notional model of microbial loop in Taiwan Strait

2 浮游动物实验生态的研究

2.1 浮游动物的种群动态与生物生产力

林元烧等 (1984) 曾对厦门港中华哲水蚤的种群动态做了成功的研究报道^[15], 其中包括中华哲水蚤的产卵量、种群数量变动、世代组成等。李少菁、陈峰、高亚辉、林森杰、王雄进等分别对厦门港海域常见的近岸、河口浮游动物的种类进行了繁殖力、产卵率、生长率、呼吸率、排泄率等的专项研究^[17, 18]。这些种类包括中华哲水蚤、真刺唇角水蚤、瘦尾胸刺水蚤、特氏歪水蚤、精致真刺水蚤、百陶箭虫、球形侧腕水母、中华假磷虾、日本毛虾等。这些研究都是了解自然海区浮游动物种群的发生、发展与变动的基础。李松曾用生理学方法估算了台湾海峡浮游动物的次级产量^[16]。

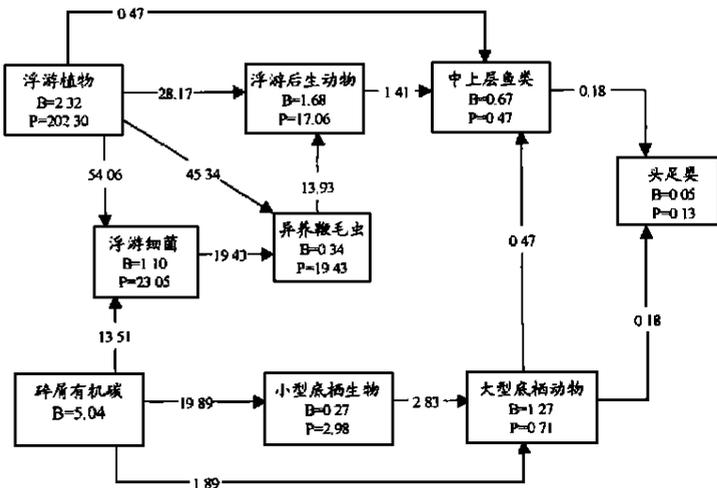


图 2 台湾海峡闽南-台湾浅滩生态系统 Ecopath 模型的简化碳流流程图

Fig.2 Carbon flow diagram of the Ecopath model of eco-system of Min-nan Taiwan Bank in Taiwan Strait

2.2 浮游桡足类滞育卵的研究

李少菁等 (1989) 对厦门海域 18 种桡足类的卵的形态、大小及卵鞘 (刺) 等特征进行了分

析^[17]. 发现不同种类卵的形态明显不同(包括颜色), 即使同一种类如亚强真哲水蚤、特氏歪水蚤、太平洋纺锤水蚤和刺尾纺锤水蚤也产生不同形态的卵. 可以认为有两种基本形态: 一种是卵的表面光滑; 另一种是卵表面具有附属结构如刺和鞘. 陈峰等(1991)对歪水蚤也观察到相似现象^[18]. 而歪水蚤属的卵鞘有半透明的外鞘. 王桂忠等人(1994)通过对纺锤水蚤的滞育卵研究, 认为季节性是导致滞育卵的控制因素, 而高温仅是辅助因素或诱发因素. 而陈峰等(1991)对特氏歪水蚤的研究结果认为温度对滞育卵的产生具有重要影响^[18].

2.3 浮游动物的摄食生态学

浮游动物摄食生态学的内容包括摄食习性、摄食强度、摄食行为(节律行为和选食行为)、种群压力等. 李少菁、郑重、郑小衍、黄加祺、陈钢等^[19, 20]分别对台湾海峡、厦门海域及大亚湾优势的浮游动物开展了摄食习性的划分研究; 以后高亚辉、李松、郑慧苑、陈峰、陈钢等对常见浮游动物开展了摄食实验工作, 用不同方法测定了摄食速率; 陈钢等用肠荧光技术对上述海域优势的浮游动物中华哲水蚤、亚强真哲水蚤等做了摄食压力、摄食节律行为等研究^[19, 20].

2.4 浮游动物染色体的研究

遗传多样性是生物多样性研究中重要的组成部分. 我国海洋地理区域差异较大, 各海区地理环境、生态条件不尽相同, 不仅有着各自的浮游动物群落面貌和特征, 其共有种在适应外界不同环境和自然选择以及遗传漂移过程中常出现遗传趋异, 有的种群可能已完全适应其生态

表 4 亚热带海区常见浮游动物染色体核型

Tab. 4 chromosomes of common zooplankton in subtropical sea area

种 类	染色体数目及核型	研究者
厦门隔膜水母 (<i>Leuckartiara hoeppli</i>)	2 n = 30, n = 15	曹文清、许振祖、王崇民等(1994)
球型侧腕水母 (<i>Pleurobrachia globosa</i>)	2 n = 30 = 16 m + 8 sm + 2 st + 4 t	曹文清、林元烧、许云飏等(2000)
崂山杯水母 (<i>Sugiura chengshanense</i>)	2n = 24, n = 12	曹文清、许振祖、许云飏(1996)
百陶箭虫 (<i>Sagitta bedoti</i>)	2 n = 16(10 m + 2 sm + 4 st)	曹文清、张跃军、林加涵(1994)
多刺裸腹蚤 (<i>Moina nacrocopa</i>)	2n = 22, n = 11	曹文清、王永聪、林元烧(1995)
蒙古裸腹蚤 (<i>Moina mongolica</i>)	2 n = 24(10 m + 2 sm + 12 t)	曹文清、林元烧、郭东晖等(1999)
中华哲水蚤 (<i>Calanus sinicus</i>)	2 n = 22(12 m + 6 sm + 2 st + 2 t)	林元烧、曹文清、姚津津等(2000)
火腿许水蚤 (<i>Schmackeria poplesia</i>)	2 n = 24 = 14 m + 6 sm + 2 st + 2 t	曹文清、林元烧、张跃军(1994)
刺尾纺锤水蚤 (<i>Acartia spinicauda</i>)	2 n = 20(14 m + 6 sm)	曹文清(1994)
太平洋纺锤水蚤 (<i>Acartia pacifica</i>)	2 n = 20(20 m)	曹文清(1994)

环境,产生了独特的基因型和遗传结构,使得浮游生物遗传多样性有了丰富的内涵.染色体多态性分析,是遗传多样性一个组成部分,可以探讨水域与大气环境对浮游动物细胞染色体遗传变异的影响.曹文清等对厦门海域常见浮游动物染色体核型进行分析(表4),证明浮游动物物种及不同环境的种群存在着染色体多态性^[21].

2.5 浮游动物生活史的研究

王文樵等(1988)对厦门港海区厚伞拟杯水母(*Phialucium condensum*)的生活史,包括胚胎发育、浮浪幼虫对附着基附着、变态过程、变态水螅的形态以及各期发育阶段的刺胞等进行报道^[22].许振祖等(1994)对厦门港寄生于半球美螅水母宿主上的八囊摇篮水母(*Cunina octonaria*)的生活史进行研究,阐明了该种寄生生活史个发育期的形态特征、发育过程、附着方式、营养吸收以及在自然海区出现的季节,讨论了这种水母不同宿主上的发育方式和生活史的类型.首次发现半球美螅水母是寄生八囊摇篮水母另一个属于软水母目的新宿主.

李松等1990发表了《中国海洋浮游桡足类幼体》的专著^[24],首次详细描述11个种桡足类的无节幼体期和桡足幼体期,其中包括中华哲水蚤、精致真刺水蚤、锥形宽水蚤、瘦尾胸刺水蚤、海洋伪镖水蚤、火腿许水蚤、双齿许水蚤、汤氏长足水蚤、真刺唇角水蚤、双刺唇角水蚤和2个种类桡足幼体期(芦氏拟真刺水蚤和海洋真刺水蚤)的形态特征,此外还简要描述国外学者报道的,分布于我国海域53个种桡足类的幼体的形态特征,为研究其种群动态和产量,打下坚实的基础.

2.6 浮游动物的化学组成

浮游动物化学组成包括两个内容:元素组成和生化成分.台湾海峡及邻近海域常见浮游动物的组成(碳、氮、氢)已有多篇报道^[25],现在已经基本了解该海区非胶体浮游动物的元素组成具有显著的热带-亚热带特点,碳元素的百分含量在40%左右,氮元素在10%左右,C/N比率介于3~5之间.元素组成分析既为生要素生物地球化学循环过程提供了必要的资料,元素组成的变化也是分析浮游动物营养生态过程的工具.浮游动物的生化组成指脂类、糖类和蛋白质三大能源物质,生化成分的分析有利于了解浮游动物的能量代谢过程,值得一提的是近年来陈钢、彭兴跃等对浮游动物的脂肪酸、甾醇等方面做了部分分析工作,建立快速分析方法,并对厦门海域常见浮游动物进行分析,脂肪酸和脂肪醇组成分析表现出其对浮游生物营养关系的指示作用.此外,汤鸿等(1994)对桡足类消化酶的活力进行研究^[26].

2.7 浮游动物的能学研究

陈峰等对厦门海域常见浮游动物中华哲水蚤、精致真刺水蚤、日本新糠虾、中华假磷虾、亨生莹虾和球栉水母等进行全面的能学研究,其中包括摄食率、呼吸率、排泄率、生长和发育率等,这方面的工作是了解生态系统浮游动物种群动态及其在能量流动过程中作用的基础^[27].目前陈钢等仍在继续对台湾海峡及厦门海域的关键浮游动物种类的生物能学作进一步深入研究,并以此为基础探讨海域浮游生物生态系统的营养动力学过程^[28].

3 贝类浮游幼体附着和变态的研究

浮游幼体附着和变态是海洋底栖无脊椎动物生活史中的关键环节,研究这一过程和机制对于海洋污损生物防除和海水养殖技术改进有重要意义.近年来我们开展了翡翠贻贝(*Perna viridis*)、华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)、僧帽牡蛎(*Saccostrea cucullata*)、波部东风螺

(*Babylonia formosae habei*)、方斑东风螺(*B. aerolata*)和盘鲍(*Haliotis discus discus*)等 6 种经济贝类幼体的附着和变态研究^[29~33]。

实验表明,翡翠贻贝幼体可被肾上腺素、间羟胺、麻黄碱和去甲肾上腺素诱导 11%~26% 的粘着率和 12%~23% 的变态率,诱导幼体粘着的活性顺序为麻黄碱>间羟胺>肾上腺素>去甲肾上腺素。诱导幼体变态的活性顺序为间羟胺=肾上腺素>麻黄碱>去甲肾上腺素。多巴胺、L-DOPA 和异丙肾上腺素无诱导活性。受体学和药理学检验分析得知控制附着行为的受体类型为类似于脊椎动物的 α_A -肾上腺素受体。在人工海水中增加 6~12 mmol/dm³ K⁺ 或减少 16.0~3.5 mmol/dm³ Mg²⁺ 可有效诱导翡翠贻贝幼体附着和变态,添加 12 mmol/dm³ K⁺ 可诱导幼体 48.0% 附着率和 50.0% 变态率,而减少 23 mmol/dm³ Mg²⁺ 可诱导 41.6% 附着率和 52.1% 变态率。神经药理学检验证实了幼体一些可兴奋细胞在附着和变态过程中起重要作用。NH₃ 浓度达 80 mmol/dm³ 时可诱导 80% 以上幼体附着行为反应,经验证, NH₃ 就是诱导活性物质。生物因子在幼体附着和变态过程中也起重要作用,检验翡翠贻贝对 13 种生物和非生物附着基的选择性附着结果,眼点幼体分别以 62.5%、29.0% 和 53.6% 附着在笔螭、同种足丝和同种成体贝壳上,同种成体浸出液则可诱导 100% 幼体附着。研究还发现,翡翠贻贝眼点幼体的机械感受器与附着行为有密切关系,在自然海区眼点幼体的机械感受在选择适宜附着基底过程中可能发挥重要作用,如幼体喜附于粗糙表面可能与机械感受有关。

海水中添加 12 mmol/dm³ K⁺ 可诱导 15.1% 华贵栉孔扇贝幼体变态,添加 K⁺ 在 9~15 mmol/dm³ 范围内均有诱导活性。GABA(γ -氨基丁酸)、多巴胺和 L-DOPA 无明显诱导作用,去甲肾上腺素、肾上腺、间羟胺和麻黄碱 4 种药物均有明显的诱导幼体变态的活性,最佳诱导浓度分别为: 10⁻⁵、10⁻⁴、10⁻⁵、10⁻⁴ mol/dm³, 诱导的幼体变态率分别为 21.3%、16.1%、6.7%、6.2%。

采用外加人工化学物质检验对僧帽牡蛎眼点幼体的附着和变态诱导活性,去甲肾上腺素、肾上腺素和 L-多巴可有效诱导幼体不固着变态。在药物持续作用下,肾上腺素的最佳诱导浓度为 10⁻⁵ mol/dm³,去甲肾上腺素的最佳诱导浓度为 5×10⁻⁵ mol/dm³,L-多巴的最佳诱导浓度为 10⁻⁵ mol/dm³,而对对照组幼体无变态。幼体大多在药物作用 12~24 h 之间完成变态。3 种药物诱导的变态个体中有 85% 以上是不固着变态。L-多巴可以诱导眼点幼体 90% 以上进行早期附着行为反应,而肾上腺素和去甲肾上腺素的诱导效应不明显。间羟胺、异丙肾上腺素和麻黄碱仅诱导很低水平的幼体变态率,D-多巴、多巴胺和多巴酚丁胺无效。比较多种附着基和肾上腺素的变态诱导活性,显示同种贝壳的活性较肾上腺素还高。去甲肾上腺素诱导幼体变态效应对低盐海水有较强耐受能力,而对高盐海水适应性差。研究结果可应用于单体僧帽牡蛎生产、人工育苗技术改进和污损生物防除。

在水温 20.5±0.5 和海水盐度 29.3 的条件下,盘鲍幼体在受精后约 72 h 获得附着能力。2×10⁻⁶~10⁻³ mol/dm³ GABA 可有效诱导幼体的附着,其中 10⁻³ mol/dm³ GABA 在 3.5 h 内诱导 100% 的幼体附着。添加 K⁺ 可以诱导盘鲍幼体的附着行为反应,但不能促使幼体的实质性附着。同种成体的足粘液对诱导幼体的附着是有效的,附着性硅藻特别是卵形藻也有很高的诱导活性。当适宜的附着基缺乏时,幼体有变态延迟现象。对波部东风螺和方斑东风螺幼体的化学诱导实验发现,添加 12~15 mmol/dm³ 的 K⁺ 可有效诱导具变态能力的幼体快速变态和附着,但肾上腺素和去甲肾上腺素却无诱导活性。

上述研究主要集中于贝类幼体附着和变态的化学诱导及其机制^[29~33],进一步地将重点开展微生物粘膜的作用研究,并向其它污损生物类群拓展。

参考文献:

- [1] 金德祥. 厦门浮游动物-鱼类的食物-分布的概况[J]. 岭南农刊, 1935, 1(2): 92- 106.
- [2] 郑重. 厦门海洋浮游生物生态研究的初步报告[J]. 厦门水产学报, 1950, 1(2): 9- 17.
- [3] 丘书院. 论中国东南沿海的水母类[J]. 动物学报, 1954, 6(1): 49- 57.
- [4] 郑重, 等. 中国海洋浮游桡足类(上卷)[M]. 上海: 上海科技出版社, 1965.
- [5] 郑重, 等. 中国海洋浮游桡足类(中卷)[M]. 上海: 上海科技出版社, 1982.
- [6] 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [7] 郑重, 郑重文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1988.
- [8] 郑重. 郑重文集(续)[C]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [9] 郑重, 李少菁, 连光山. 海洋桡足类生物学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1992.
- [10] 李少菁, 陈钢. 台湾海峡浮游动物生态学[M]. 中国海洋生态系统动力学研究. 北京: 科学出版社, 2000. 87- 97.
- [11] 许振祖, 黄加祺, 陈栩. 闽南-台湾浅滩上升流水母新种新记录. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 469- 486.
- [12] 李少菁, 黄加祺. 九龙江口桡足类两新种[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1984, 23(3): 381- 390.
- [13] 黄加祺, 郑重. 盐度对九龙江口桡足类分布的影响[J]. 海洋学报, 1986, 8(1): 83- 91.
- [14] 陈钢, 李少菁, 黄加祺. 台湾海峡两种优势浮游桡足类动物中华哲水蚤和强真哲水蚤的摄食研究. 中国海洋学文集[C]. 1997, 7. 196- 203.
- [15] 林元烧, 李松. 厦门港中华哲水蚤生活周期的初步研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1984, 23(1): 111- 117.
- [16] 李松, 郑榕. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区浮游动物产量. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 346- 355.
- [17] 李少菁, 陈峰, 王桂忠. 厦门海区浮游桡足类卵的形态与孵化率的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1989, 28(5): 538- 543.
- [18] 陈峰, 李少菁. 厦门港歪水蚤数量季节变化与滞育卵的研究[J]. 海洋学报, 1991, 13(5): 721- 727.
- [19] 黄加祺, 陈钢, 许振祖. 大亚湾常见浮游动物食性研究. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 93- 100.
- [20] 陈钢, 黄加祺, 许振祖. 大亚湾常见浮游动物的肠色素研究. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 101- 108.
- [21] 曹文清. 厦门港海区两种纺锤水蚤的染色体研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1994, 33(增刊): 125- 129.
- [22] 王文樵, 许振祖. 厚伞拟杯水母生活史的初步研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1988, 27(4): 454- 458.
- [23] 许振祖, 吴慧端. 厦门港八囊摇篮水母的寄生生活史研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1994, 33(增刊): 154- 159.
- [24] 李松, 方金钊. 中国海洋浮游桡足类幼体[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [25] 陈钢, 李少菁, 彭兴跃. 台湾海峡浮游桡足类的化学组成分析. 中国海洋学文集[C]. 1997. 142- 145.
- [26] 汤鸿, 李少菁. 桡足类消化酶活力的影响因子[J]. 生态学杂志, 1994, 13(1): 45- 50.

- [27] 陈峰. 厦门海域常见浮游动物的生物能学研究. 厦门大学理学博士学位论文[C]. 1992.
- [28] 陈钢. 中国亚热带近海浮游生物的营养生态学研究. 厦门大学理学博士学位论文[C]. 1996.
- [29] 柯才焕, 李少菁, 李复雪, 等. 儿茶酚胺对翡翠贻贝幼体附着和变态的诱导[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1995, 34(6): 975- 981.
- [30] 柯才焕, 李少菁, 李复雪, 等. 翡翠贻贝幼体附着和变态的离子控制[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 128- 134.
- [31] 柯才焕, 李少菁, 李复雪, 等. 僧帽牡蛎幼体附着和变态的诱导[J]. 水产学报, 2000, 24(3): 1- 6.
- [32] Ke Caihuan, Li Shaojing, Li Fuxue, et al. Chemical induction of settlement and metamorphosis in two species of *Babylonia* (Gastropoda) larvae[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 19(1): 59- 67.
- [33] 柯才焕, 孙泽伟, 周时强, 等. 华贵栉孔扇贝幼体附着和变态的化学诱导[J]. 海洋科学, 2000, 24(12): 5- 8.

Studies on Biology of Marine Zooplankton in China

LI Shao-jing, XU Zheng-zhu, HUANG Jia-qi, CHAO Wen-qing,
CHEN Gang, KE Cai-huan, CHEN Li-hua

(Dept. of Ocean., & Inst. of Sub. Ocean., Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: In China, Marine planktology was founded by late biologists Zheng Zhong and Jin Dexiang in 1940s. Since then Chinese planktologists have been devoting themselves to develop the subject. For years, we researchers of marine zooplankton in Xiamen University more actively engaged in studies on biology of marine zooplankton in Taiwan Strait and its adjacent waters and obtained plentiful and substantial achievements in this field. Our outstanding work, especially for the past decade, potentially promoted the development of marine planktology in China.

Achievements of zooplankton research in Taiwan Strait and its adjacent sea areas were involved with various aspects of biology and ecology. We conducted much field investigation work on natural ecology of pelagic ecosystem, including taxonomy and biodiversity of zooplankton (39 new species of medusae and 2 of copepods has been identified), ecological groups and community structure of zooplankton, microzooplankton and its role in pelagic ecosystem. At mean time we actively developed experimental studies on physiological ecology and autecology of zooplankton in the laboratory, including biochemical composition of zooplankton and its ecophysiological function, egg type and diapause of planktonic copepods, feeding ecology and biological energetics of zooplankton, chromosomes of major zooplankton, life history and population dynamics of zooplankton as well as larval attachment and metamorphosis of commercial mollusans.

Key words: zooplankton; ecology; biology