

河口浮游动物生态学研究进展

杨宇峰¹, 王庆¹, 陈菊芳¹, 庞世勋²

(1. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632; 2. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380)

摘要:综述了国内外有关河口浮游动物种类组成、时空分布、生物量及其环境影响因素等方面的若干研究进展。河口地区潮流、径流共存, 是陆海相互作用的集中地带, 环境因子复杂多变, 生态环境敏感脆弱。因此, 研究河口浮游动物群落结构的时空变化有助于更好地揭示近海生态系统的特征。河口水域重要的浮游动物有原生动、轮虫、桡足类、糠虾、水母等。环境因素和人类的活动对浮游动物种类组成和时空分布具有重要影响, 河口浮游动物群落结构变化主要受到食物、温度、盐度、动物摄食以及径流等因素的影响, 盐度是决定浮游动物分布的关键性非生物因子。近年来的研究表明, 微型浮游动物(原生动、轮虫和无节幼体)在河口生态系统中占有重要地位, 是微食物网和传统食物网连接的关键环节。浮游生物网是采集浮游动物样品的主要工具, 对研究结果有重要影响, 我国许多学者使用浅水 I 型或 II 型浮游生物网(网孔为 507 μm 和 169 μm)采集样品, 导致小型和微型浮游动物(如无节幼体)逃逸, 研究结果被严重低估, 而这些小型和微型浮游动物是幼鱼的重要开口饵料, 因此合适的浮游生物网对于研究浮游动物极其重要。并对今后我国河口浮游动物生态学研究值得关注的科学问题进行了探讨。

关键词:河口; 浮游动物生态学; 进展

文章编号: 1000-0933(2006)02-0576-10 中图分类号: Q143, Q178.1 文献标识码: A

Research advance in estuarine zooplankton ecology

YANG Yu-Feng¹*, WANG Qing¹, CHEN Ju-Fang¹, PANG Shi-Xun² (1. Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Guangzhou 510380, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (2): 576 ~ 585.

Abstract: Advances in ecological studies on estuarine zooplankton are reviewed on the domestic and abroad published papers. This paper includes estuarine zooplankton species composition, spatial and temporal distribution, biomass and the reviews of the effects of the environmental factors. Estuaries are tidally-influenced ecological systems. Fluctuations of environmental factors are more significant and complex in the systems due to the combination of fresh water and salt water, land and ocean influences. As a result, the study of the spatial and temporal variability of estuarine zooplankton communities is very important for a better understanding of the functioning of coastal ecosystems. Estuaries comprise extreme environments for zooplankton development. Typically, the most abundant groups of zooplankton are protozoans, rotifers, copepods, mysids and medusas. Environmental parameters and anthropogenic impacts play major roles in determining spatial and temporal patterns of zooplankton distribution and species composition. Variability is mainly caused by food, temperature, salinity, herbivory and riverflow. The fluctuation in salinity is tightly correlated with distribution of zooplankton. The influx of freshwater into the estuary has a dramatic impact on the community structure. The microzooplankton - protozoans, rotifers and copepod nauplii - plays a significant role in estuarine ecosystem. Microzooplankton represents a key link in the microbial food web and the traditional food web. Any attempt to determine the relative abundance of zooplankton groups, must be based on collections obtained using a plankton net with an appropriate mesh size. For example, many Chinese scientists use the plankton net I or II (mesh size 507 and 169 μm) to collect

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40473046); 广东省科技攻关资助项目(2004B50301010)

收稿日期: 2004-12-02; 修订日期: 2005-07-05

作者简介: 杨宇峰(1963-), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要从事海洋环境和水生生物研究. E-mail: tyf@jnu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40473046) and Project of Science and Technology of Guangdong (No. 2004B50301010)

Received date: 2004-12-02; Accepted date: 2005-07-05

Biography: YANG Yu-Feng, Ph.D., Professor, mainly engaged in marine environment and hydrobiology. E-mail: tyf@jnu.edu.cn

zooplankton samples. This was lead to serious underestimates of the smaller components of the zooplankton (e.g. copepod nauplii) which constitute an important component of the diet of larval fishes. Additionally some ideas for further studies on estuarine zooplankton in China are proposed.

Key words: estuary; zooplankton ecology; advance

中国沿海有 1500 多条江河入海^[1]。在河口水域,径流、潮流、风浪共存,水流、泥沙运动具有很强的非恒定性,形成了有别于淡水和海洋的独特河口环境。河口既是流域物质的归宿,又是海洋的开始。河口是陆海相互作用的集中地带,物理、化学、生物和地质过程耦合多变,演变机制复杂,生态环境敏感脆弱。长江口、黄河口和珠江口以及世界上许多河口地区人口稠密、社会经济发达,河口环境对所在地区社会经济的可持续发展有重要影响。在河口生态系统中,浮游动物是一类重要生物类群,它是水生生物食物链的重要环节,其种类组成、数量的时空变化及其对浮游植物的摄食都对河口生态系统结构、功能运转、渔业资源和环境产生影响。因此,对河口浮游动物的生态学研究具有十分重要的理论和实践意义。

近年来,国内外学者在河口浮游动物生态学领域开展了许多卓有成效的工作^[2-16]。研究领域除种类组成、丰度和时空分布,还涉及食物链、生产力、能量流动、物质循环等,为河口生态系统研究奠定了基础,也极大地促进了浮游动物生态学的发展。针对近年来国内外浮游动物生态学的研究进展,我国学者李少菁等^[17]和杨宇峰等^[18]分别对我国海洋和淡水浮游动物研究进行了综述,但对河口浮游动物生态学少有涉及。本文综述了近年来国内外河口浮游动物生态学的研究进展,以期为我国河口生态学研究提供参考,为河口资源的可持续利用提供科学依据。

1 河口浮游动物生态学研究

1.1 河口浮游动物的种类组成

由于径流和潮流的交汇作用,河口浮游动物既有淡水和海水种类,又有河口特有的半咸水种类,从而形成了一个复杂多变的生物群落,其种类组成在很大程度上取决于两股水流的强弱~径流增强,淡水种类随之增多;反之,潮流增强,海水种类就占优势。通常情况下,半咸水种类在河口浮游动物群落中占主要地位^[11]。

许多研究表明,河口区浮游动物的种类组成以甲壳动物占绝对优势,其中又以桡足类为优势类群。长江口已报道^[10,19-21]的浮游动物有 80 多种,甲壳动物占绝对优势,其中桡足类所占比例最大,糠虾和水母次之。优势种类是河口半咸水种类和近岸低盐种类以及长江径流带到河口的淡水种类。珠江口浮游动物种类组成共有 9 大类群 30 种,其中桡足类最多,有 13 种,占总种类数的 43.3%;水母类次之,有 6 种,占总种类数的 20.0%^[22]。渤海湾淮河口浮游动物中桡足类和浮游幼虫占绝对优势^[23]。国内对河口浮游动物研究较为全面的是九龙江口。九龙江口位于厦门岛西南面,处在亚热带地区。从 20 世纪 20 年代开始,我国学者就对九龙江口及其邻近海域的浮游动物进行研究。20 世纪 80 年代以来,郑重,陈柏云,黄加祺,许振祖等对九龙江口浮游动物进行了比较全面、深入的调查,共鉴定浮游动物 150 多种,其中甲壳类 85 种,约占 56.7%^[12]。甲壳类中的桡足类有 52 种,枝角类 11 种,糠虾 7 种;水母类 58 种,约占 38.7%;毛颚类 6 种^[12]。另外还报道了 21 种浮游幼虫、多种鱼卵和仔鱼^[13]。九龙江口浮游动物以广布暖水性的沿岸、河口种为主,呈现出亚热带河口区浮游动物的特点^[13]。

国外学者对不同类型河口的浮游动物进行了科学考察,取得了丰硕的研究成果。如南非的大部分河口永久性浮游动物的优势种是桡足类和糠虾,暂时性浮游动物中大部分种类是底栖无脊椎动物的幼体^[3]。在澳大利亚 Swan 河口^[24]和墨西哥 Bahia Magdalena 河口^[25]桡足类是浮游动物的主要优势种。Gaughan 和 Potter^[2]通过对浮游动物采样方法的分析,发现许多研究者采用的浮游生物网孔径 $\geq 100\mu\text{m}$ 。如果网径 $> 150\mu\text{m}$,会导致桡足类无节幼体、原生动物、轮虫、软体动物和多毛类环节动物的浮游幼虫等多种小型生物逃逸。他们改用 $53\mu\text{m}$ 孔径的生物网采样,发现澳大利亚 Wilson 河口桡足类(特别是无节幼体),钟形虫、轮虫、软体动物和多毛类环节动物的幼虫是浮游动物的主要组成部分。同样改用小孔径浮游生物网对美国 Mount Hope 湾^[26]和东北

部的 Peconic 河口湾^[27] 采样后分析发现,桡足类无节幼体是浮游动物的优势种类。

在我国,浮游动物工作者所用的采样工具不一,浮游动物数据相差很大,几乎没有可比性。如在大亚湾海区,采用大型浮游生物网(浅水 I 型或 II 型,网径分别为 507 μm 和 169 μm)采集水样,许多小型浮游动物逃逸,平均密度在 1 ind./L 以下^[28],胶州湾的结果与此相似^[29]。因此,有必要根据海洋浮游动物个体大小分粒级进行研究,如微型浮游动物(20~200 μm),中型浮游动物(200~2000 μm)等,以增强数据的可比性。在以往的研究中,由于检测技术和研究方法不够完善,我国学者对近海微型浮游动物的研究没有给予应有的关注。事实上,微型浮游动物常常能摄食那些不能被大型消费者有效利用的微小颗粒,是非常重要的营养中介,是微食物网的重要组成部分^[30];有研究显示,在河口微型浮游动物(<200 μm)中,纤毛虫和腰鞭毛虫的比例可以达到 43%,是浮游动物的优势种^[4]。因此,加强微型浮游动物生态学研究对于科学全面的了解河口和海洋生态系统的结构和功能是非常必要的。

1.2 河口浮游动物的时空分布

河口地区生态环境复杂多变,河口的水动力状况和理化性质时空变化剧烈,气候的变化进一步增加河口环境的异质性,从而改变浮游动物的组成和丰度,因此河口浮游动物的时空分布比其它水体变化剧烈。

在温带河口,浮游动物的密度有显著的季节变化。一般在夏季达到高峰,春季或秋季偶尔也会出现高峰,冬季最少^[31]。长江口的研究显示,丰水期浮游动物多样性指数大于枯水期^[10];种类组成存在着明显的季节差异,且与温度的周年差异变动基本一致,夏季最高,冬季最少^[21]。长江口浮游动物有时全年会出现 3 个数量高峰,夏季最高,秋季较高,其次为春季^[21];平均生物量季节变化呈双峰型,即冬季最低,3 月份开始数量增加,高峰出现于 6 月份,次高峰在 9 月份^[19]。

九龙江口浮游动物的生物量、数量及种数以夏季最高,秋季次之,冬季最低,其种类数随盐度上升而提高,生物量及数量有随盐度的上升而下降的趋势^[13]。九龙江口水母种数呈单周期型的季节分布,7~8 月份种数最高,主要取决于具有世代交替的水螅水母的繁殖季节,与水温升高有密切关系。水母类数量周年有两个高峰,分别出现在 7 月份和 4 月份,这两个高峰是由于随潮流外来的管水母个体数增加所致^[16]。九龙江口桡足类数量呈双周期的季节分布,6 月份和 9 月份出现高峰,冬季最低。种类数量的季节分布一年有两个高峰,最高峰在 7 月份,次高峰 12 月份,最低谷在 3 月份,呈双周期的季节分布,其分布除与水温有关外,还与盐度和海流密切相关。盐度越高,河口外进入的种数越多,7 月份出现数量高峰的原因除了温度和盐度较高外,南海暖流也起了相当大的作用^[14]。九龙江口的浮游幼虫数量季节变化十分显著,冬季数量很少,春夏明显增加,反映了河口区底栖动物季节性繁殖规律^[13]。

Mouny 和 Dauvin 发现 Seine 河口浮游动物的海水种类最大丰度出现在 6 月份,而河口种类的高峰期在冬春之交,夏初下降^[32]。Gironde 河口桡足类两次最大丰度分别出现在 6 月份和 9 月份,是由于 *Acartia bifilosa* 和 *Acartia tonsa* 的繁殖期的不同所致:6 月份是 *A. bifilosa* 的繁殖季节,而 9 月份是 *A. tonsa* 的繁殖季节^[33]。河口浮游动物的优势种有显著的季节变化,如墨西哥 Bahia Magdalena 河口夏季浮游动物的优势种是桡足类 *Acartia lilljeborgii* 和 *A. tonsa*,冬季则由 *Paracalanus parvus* 代替^[25]。

河口浮游动物的垂直分布具有时间(如昼夜、季节)和空间差异,其分布规律不仅与浮游动物的生态习性和生理变化(如种类、发育期)有关,而且还受外界环境(如饵料、光照、温度、径流和潮汐)的变化影响。夏季长江口由于水温的不同和浮游植物的分层,造成浮游动物的优势种出现明显的垂直分布,而在冬季,由于水体分层现象的消失,浮游动物优势种的垂直分布不明显^[34]。在 Kariega 河口,浮游动物的最高生物量和最大丰度均出现在夜间,而且白天和夜间的优势种也不一样,可能与浮游动物的垂直分布有关^[35]。Mpenjati 河口的研究表明,夜间丰度值比白天高出 1~3 个数量级^[7]。九龙江口桡足类数量具有黄昏、黎明上升,白天和午夜下降的趋势^[36]。Froneman 认为夜间浮游动物丰度和生物量的增加是由于浮游动物独特的日垂直迁徙模式,是逃避捕食的一种生存策略,因为夜晚位于水体表层的摄食压力比白天低^[35]。

1.3 环境因子对河口浮游动物群落结构的影响

河口浮游动物的种类组成、分布以及生产力受河口复杂环境以及营养关系的影响。不同种类,在不同的环境条件下,常表现出不同的适应性特征。从适应性的强弱来看,对于食物可以分为专一食性与杂食性;对于盐度可分为广盐性与狭盐性;对于温度有广温性和狭温性之分。径流和潮流的对比消长,直接影响浮游动物的群落结构,并且河口往往是鱼类的越冬场,它们的大量摄食,也在很大程度上减少浮游动物的数量。河口浮游动物种群或群落结构的改变,正是浮游动物的适应性与环境条件的综合作用的结果^[37]。

1.3.1 食物对河口浮游动物的影响 浮游植物是浮游动物的主要食物来源,浮游植物的种类和数量变化对浮游动物群落结构的改变有重要影响。长江口外水域浮游动物的优势种皆属滤食浮游植物的种类,两者的高生物量区往往会呈现互相重叠现象^[9]。河口浮游动物优势种桡足类的食性经常发生季节性的改变,在夏季,浮游植物是浮游动物最重要的碳源,而在其它季节其它的碳源会被利用^[5],由于受到摄食大小的限制,只有3种来源有可能发挥主要作用:有机碎屑,微型异养生物和微型底栖藻类(microphytobenthos)^[38]。稳定同位素研究显示,Kariega河口的浮游动物的同位素标记与碎屑相一致^[39],表明碎屑是河口浮游动物食物来源之一。

由于应用的技术和方法的差异,很难对不同河口浮游动物摄食压力的研究结果进行比较。Froneman使用肠道荧光素技术显示Kariega河口的成体桡足类和糠虾的摄食占总浮游植物日生产力的4%~21%^[35]。Kibirige和Perissinotto使用同样技术,评估了温带Mepanji河口的浮游动物牧食压力小于总浮游植物日生产力的20%^[40]。其它的河口如南非Sundays河口浮游动物摄食的浮游植物量大约占浮游植物日生产力的40%^[3];滩河口外浮游动物优势种群体的日摄食量占初级生产力的32.28%^[23]。众多的研究指出,河口浮游动物的摄食率一般小于日浮游植物生产力的50%。桡足类的摄食存在着周日变化,植食性桡足类一般主要集中在夜间摄食,桡足类肠道色素含量的周日变化与潮汐变化同步^[23]。

许多研究显示近海微型浮游动物(<200 μm)能够摄食相当比例的浮游植物,而且常超过大型浮游动物摄食的比例。Kariega河口夏季微型浮游动物的摄食压力相当于日浮游植物生产力的50%~65%,表明微型浮游动物是Kariega河口浮游植物最重要的消费者^[4]。在亚热带河口,微型浮游动物的摄食量占到整个浮游动物摄食量的95%^[41]。微型浮游动物对浮游植物的高牧食压力有可能与浮游植物的粒径大小有关,已有报道认为大型浮游动物不能利用超微型浮游植物(picophytoplankton),而微型浮游动物却能够摄食pico-大小的颗粒^[4]。法国Gironde河口的研究结果显示,当细胞粒径较小的浮游植物成为优势种,微型浮游动物便成为最重要的摄食者^[42]。研究表明5 μm 是中型浮游动物有效摄食的最小食物颗粒,当食物颗粒小于5 μm ,桡足类等中型浮游动物优势种的滤食效率明显下降^[35]。

1.3.2 盐度和温度对河口浮游动物的影响 盐度是影响海洋生物,特别是河口生物的重要环境因素,它不仅影响浮游动物的生长、发育和繁殖,而且也影响种类和数量的时空分布。在河口区,随着径流和潮流的变化,河口盐度变化幅度大,盐度是决定河口浮游生物群落结构变化的关键性非生物因子^[3]。在Seine河口,海水种类分布河口外,而更多的寡盐种类分布河口内,混合区域主要分布沿海浅水种类^[32]。Wilson河口径流和潮流变化不大,浮游动物的主要种类是广盐性的浮游动物,河口水域盐度变化不大,导致淡水种类和海水种类较少,优势类群桡足类的种类多样性下降^[2]。枝角类的丰度和数量在河口上段最高,在河口下段,盐度升高,数量和种类数均下降,与盐度呈负相关^[43]。盐度是影响九龙江口桡足类不同生态类群演替的最主要因素,九龙江口上游桡足类种数少,随着盐度的增高,种数逐渐增加,不同盐度水域数量分布不同^[15]。盐度对九龙江口水母的分布有相似的影响^[16]。

河口浮游动物种类数随着盐度的降低,逆江河方向有逐渐减少的趋势,反之,愈接近海洋,盐度愈高,种数也愈多^[44]。九龙江口浮游动物的种数随盐度的上升而增加,这个现象在其他河口普遍存在,对这一现象的解释有不少假说,其中,环境稳定说获得较多人的支持。这个学说认为河口环境不如海洋稳定,所以种数少。然而,环境较稳定的地区也存在这种现象。因此,不应只从环境多变来解释,还应从动物本身的内在因素(如生理生化状态,渗透压调节能力等)以及种类的起源和进化辩证地解释这一现象^[13,37]。至于盐度和浮游动物数

量之间的关系,有学者指出,他们之间不在线性相关,而存在指数相关^[13]。

水温也是影响浮游动物数量波动和分布的重要因素。河口一般较浅,温度变化大,既有昼夜变化,又有季节变化,因此河口广温性种类占优势。据陈亚瞿等^[9]对东海近海及长江口羽状锋区内浮游动物生物量的研究发现,春、夏期间水温升高导致生物量增加,7~8月份的水温一般高于22℃,不少种类滞育,生物量不再增加,处于高峰期或平衡期,9月份后生物量呈下降趋势。Seine河口桡足类 *Eurytemora affinis* 的丰度呈现出季节性差异,最大丰度出现在春季(幼体阶段),夏季以后丰度下降,这可能与水温增加时桡足类进入繁殖期有关^[32]。九龙江口水温以夏季最高,秋季次之,冬季最低,这和浮游动物的生物量、数量以及种数的季节分布大体一致。温度影响浮游动物和底栖动物的代谢和繁殖,以致夏季河口地区出现大量的阶段性浮游动物和浮游幼虫,丰富了河口浮游动物的群落组成^[13]。

温度的变化也是诱发浮游动物休眠卵萌发的重要环境因子。研究发现在Wilson河口,夏季温度的升高诱发钟形虫休眠卵的孵化并导致钟形虫丰度显著增加^[2];在Kromme河口,低盐、高温是 *Acartia natalensis* 休眠卵在不利环境条件下从沉积物中孵化的两个必需因子^[45];在南非Cape东部河口的 *Acartia longipatella* 休眠卵也有类似现象。李少菁等通过实验证实九龙江口桡足类歪水蚤卵的孵化时间和孵化率也和温度有关,温度越高,孵化时间越短,孵化率也越高^[46]。

盐度和温度是影响浮游动物种类组成、群落结构、时空分布的重要环境因子,浮游动物种类组成和生物量的变化主要取决于盐度和温度的相互作用,通过改变浮游动物的生理状态来影响浮游动物的生长繁殖和摄食以及休眠卵的孵化,导致浮游动物数量和种类的剧烈变动。

1.3.3 水动力条件对河口浮游动物的影响 淡水的流入和海水的潮汐作用是决定河口生态系统理化性质的两种主要因素,在潮汐作用下,河口(特别是河口的中下段)盐度升高,水体相对分层并具有高丰度的浅海生物种类;如果冲淡水作用强烈,河口盐度下降,水体混合程度增高,生物群落的优势种类主要是典型的河口种类,甚至是淡水种类^[47]。

河口径流量的改变对水体生态系统结构和功能有明显影响。对南非Kariega河口的调查表明,淡水流入的减少,通过影响浮游植物粒径大小和浮游动物的丰度,从而显著改变系统的能量流动^[35];而且浮游动物的丰度和生物量一般低于径流量更为丰富的同一地区其它河口^[3]。对Kasouga河口的研究也发现淡水的流入对浮游生物群落结构,生产力及浮游动物对浮游植物的牧食压力都有显著影响^[6]。浮游动物生物量的季节变化与径流量关系密切,长江口生物量高峰均出现于径流流量高值月份(7~8月份);在枯水期(冬季)生物量低;生物量波动原因除季节因素外,也与径流量周年变化呈正相关性,生物量在丰水期远远高于枯水期,生物量分布呈现自西北向东南部水域递增的趋势,高生物量区较小且分布不均匀^[9]。在间歇性Mpenjati河口的枯水期,浮游动物是典型的河口种类;丰水期阶段,优势种是海水和淡水浮游动物,该期间浮游动物的多样性较高,而浮游动物的生物量却比枯水期时减少^[7]。因为在枯水期径流量减少,附近海岸的泥沙在海流和潮汐的作用下回流至河口淤积,形成大面积的沙坝(sandbar),阻挡了海水种类随潮汐进入河口,造成浮游动物多样性下降,但河口水体理化环境趋于稳定,导致典型河口种类的生物量增加;丰水期阶段,丰富的降水带来的强大径流冲垮了沙坝,海水浮游动物种类随潮汐进入河口,增加了浮游动物的多样性,同时沉积物的再悬浮,增加了水体的盐度和浊度,导致河口浮游动物生物量的下降,也有可能是捕食压力增大的结果^[7]。南非河口Kasouga的研究发现,在洪季时浮游动物生物量明显高于枯水期和丰水期,而枯水期和丰水期的生物量没有明显不同^[6]。对南非Nyara河口的研究发现,在枯水期阶段,浮游动物生物量最高^[38]。

Lee等人对浮游动物和潮高的关系通过统计学分析,发现有些种类有明显的正相关,有的种类呈负相关,有的则与潮流无关,有些浮游动物能利用潮流使本身保持在同样盐度的区域^[12]。有关浮游动物和潮高的关系尚待进一步的研究。

1.3.4 其它动物摄食对浮游动物的影响 在河口和海洋生态系统中,鱼类、水母、哺乳类等对浮游动物有较强的摄食作用,它们之间存在非常复杂的食物关系。长江口外的许多经济鱼类、甲壳类等在很大程度上均以

浮游动物为食,此外水母、毛颚动物等大型浮游动物也皆以浮游动物为食,每年5~9月份浮游动物在长江口区大量繁殖栖息,为长江口渔场提供了丰富的饵料基础^[9]。动物的捕食对浮游动物的空间分布起限定作用,河口外生活的海水鱼类群落抑制着河口桡足类在河口外的分布^[48]。鱼类密度与浮游动物密度之间呈现负相关,显示这些摄食鱼类通过对局部水域生物的摄食影响桡足类的分布;水体的分层和缺氧有可能导致浮游动物种群和摄食鱼类群落的复杂关系,影响能量在两个营养级之间的传递和鱼类产量,如在水体分层的 Neuse 河口,底部水体溶氧较低,对幼鱼有致死效应,导致凤尾鱼的幼体较少,而桡足类的密度却较高^[49]。

2 我国河口浮游动物生态学研究中的问题与展望

2.1 浮游动物在河口水环境监测中的作用

在污染生态学研究,生物监测比化学监测具有不可替代的优势。在河口区,由于环境条件相对恶劣,对河口区特殊生态环境具有指示作用的优势种、敏感种进行研究就具有重要意义。浮游动物为天然水域食物链中一个重要环节,与水体质量关系密切。浮游动物由于个体小,生活周期短、繁殖速度快,极易受环境中各种因素的影响而在较短周期内发生改变,其中不少种类对环境变化比较敏感,有些种类本身能积累和代谢一定量的污染物质,在水体自净过程中发挥重要作用;并且,污染会导致浮游动物的某些耐污种类数量的大幅度增加,浮游动物的种类多样性下降。因此,应用浮游动物群落结构特征的变化监测和评价水体污染程度和自净作用,目前国内外应用较为广泛^[3,6,9]。值得指出的是,关于浮游动物对我国河口水质污染的监测研究,尚处于基础资料积累阶段。我国河口水域的污染严重,将浮游动物与水质直接相联系进行调查分析,是今后河口浮游动物生态学研究的一个重要方面。

2.2 河口水域赤潮的发生与浮游动物的关系

随着工农业的发展,河口水域接受陆源输入的大量营养盐,导致河口水域富营养化严重,赤潮频发。目前对赤潮的爆发机制和防治途径仍不清楚。许多浮游动物以浮游植物为食,对浮游植物种类、数量的变动乃至赤潮的发生、发展过程有着重要的影响。目前,我国河口水域赤潮的研究主要集中于上行效应(bottom-up effect),即藻类的生长和理化因子关系的研究,而有关浮游动物对藻类的下行效应(top-down effect)的研究较少,有研究表明浮游植物生物量的减少取决于浮游动物的密度和大小,以及摄食率的昼夜变化和浮游植物的丰度^[50]。浮游动物和浮游植物在水体中既可通过捕食关系直接相互作用,又可通过影响水体的理化性质间接相互作用。浮游动物能否有效的控制浮游植物的生物量是人们关心的问题,研究显示浮游植物的生物量为 $200 \sim 300 \mu\text{g C L}^{-1}$ 时,浮游动物对浮游植物生物量的抑制最明显^[51]。甲藻赤潮期间,微型浮游动物摄食率与桡足类幼体,轮虫等生物量的增加呈正相关^[51]。浮游动物的牧食作用能够直接影响浮游植物的演替,浮游动物牧食较高的种类向牧食较低的种类转变;浮游植物种类组成的改变,反过来又导致浮游动物组成和生物量的改变。Swan-Canning 河口浮游植物优势种随着甲藻向绿藻转变,桡足类生物量下降,微型浮游动物成为优势种,摄食率增加,随着盐度的升高,浮游植物的优势种由绿藻向甲藻转变,桡足类生物量增加,重新成为优势种^[51]。浮游动物群落组成的改变有可能预示着富营养化水平的增加。有证据表明,随着水体富营养化水平的增加和缺氧的越来越频繁,浮游动物群落组成逐渐由桡足类向微型浮游动物转变^[52]。浮游动物特别是微型浮游动物通常是赤潮藻的主要摄食者,对于控制赤潮的发生具有重要作用;由某些赤潮藻产生的藻毒素影响浮游动物的存活和生长繁殖,抑制浮游动物的摄食。因此,对于赤潮与微型浮游动物的关系以及如何利用浮游动物来防治赤潮,将成为今后赤潮研究中值得重视的问题。

2.3 外来浮游动物对河口生态系统的影响

外来有害生物入侵性传播正危害着海洋生态系统的健康,引起全球性关注。船舶排放压舱水是造成地理性隔离水体间的有害生物传播的最主要途径。目前,对于外来有害生物的生物学和生态学研究以及对当地生态系统的影响研究较少。河口地区常常是重要的港口,国际间船舶航行密集,加剧了有害外来生物物种的传播,对河口水域的生态平衡和居民健康造成了严重危害。外来有害浮游动物中主要包括桡足类、水母和轮虫等,如肉食性桡足类捕食浮游动物和鱼苗,对当地河口渔业资源造成严重威胁,它们与本土生物竞争食源、传

播寄生虫和病原体、甚至导致本土物种的灭绝,造成巨大的经济损失和灾难性的破坏。20世纪70年代北美水母侵入黑海,嗜食浮游生物、鱼卵及鱼苗,给当地凤尾鱼和鲱鱼养殖业带来了灭顶之灾。肉食性桡足类 *Cercopagis pengoi* 是俄罗斯 Neva 河口的外来浮游动物,目前已成为 Neva 河口的优势物种,它改变了浮游生物食物网以及物质和能量流动,加剧了 Neva 河口的富营养化^[53]。目前,对外来浮游动物的研究主要集中于桡足类,微型浮游动物在过去很长时间被忽视,鉴于微型浮游动物极其重要的生态学作用,应当加强对外来微型浮游动物的研究。我国河口地区经济发达,船舶来往众多,因此有必要加强对我国河口外来浮游动物的监测,以及评估外来浮游动物入侵对河口生态系统和渔业资源的影响,加强对外来浮游动物的种群动力学及其生态学效应的研究。

2.4 大型水利工程建设对河口生态环境和浮游动物群落的影响

近年来,大型水利工程建设,在发展经济和促进社会进步的同时,也对河口生态环境造成了较大影响。葛洲坝、三峡大坝的建设和南水北调工程的实施,改变了长江径流量的时空分布,对河口水域的盐度、悬浮物和营养盐等产生影响,进而改变包括浮游动物在内的水生生物群落的组成^[54]。人们对水利工程与河口生态环境关系的认识,经历了点(工程位置)到线(河段,河流梯级开发)到面(库区生态与环境)到体(流域,河口,近海,陆海的相互作用)的发展变化。水利工程建设对河口生态环境的影响是长期的,极其复杂的,尚存许多未被认识或未被充分了解的领域,如径流量的时空变化对浮游动物群落组成,鱼类的洄游和水生生态系统以及河口渔业资源的影响等。

2.5 加强河口微型浮游动物生态学和微食物网的研究

过去几十年由于受到采样方法和观测技术的限制,微型浮游动物($< 200\mu\text{m}$)一直未受到足够的重视。近年来,随着实验方法的改进和现代技术手段的运用,导致了微食物网的重大发现^[30]。在河口水域, nano-级和 pico-级浮游植物对初级生产力的贡献巨大,甚至超过其它浮游植物,成为优势类群。细菌不仅是传统食物网中的分解者,还是微食物网中的生产者,利用水中的溶解有机物进行细菌的二次生产,提高种群数量,其对总初级生产力的贡献在河口和海湾水域甚至超过了浮游植物。但是这些巨大的初级生产力却不能被桡足类等大型浮游动物所利用,只能通过微型浮游动物的摄食,再经大型浮游动物摄食微型浮游动物,从而进入传统食物网。因而微型浮游动物是微食物网和传统食物网连接的关键环节,其在营养循环、能量流动和生物地球化学循环中起着重要作用^[30]。因此对微型浮游动物在微食物网中的作用进行深入的研究,对于有效利用总初级生产力,从而提高河口生产力具有重要意义。国外已经对河口微型浮游动物的生物学和生态学进行了深入的研究,而国内这方面的研究处于刚刚起步的阶段。

3 结语

河口是河流与海洋相互作用的区域,环境因子变化剧烈。河口区是人口密集、经济发达地区,在人类生存与社会发展过程中起着非常重要的作用。河口是水产资源的宝库,是渔业的重要基地,而浮游动物是水产经济动物的重要饵料,浮游动物作为水生生态系统物质循环和能量流动中的重要环节,在水生生态系统中起着重要的承上启下作用,浮游动物的种群动态变化和生产力的高低,对于河口生态系统结构功能以及生源要素循环都有着十分重要的影响。河口区浮游动物中甲壳动物尤其是桡足类常占优势,其次有糠虾,水母等。近年的研究发现,微型浮游动物(如原生动物、轮虫等)在河口浮游动物中占有重要地位,微型浮游动物是微食物网和传统食物网连接的关键环节,其生态学研究日益受到重视。河口浮游动物群落种类组成、数量的时空变化明显,受到食物、温度、盐度、径流以及其它水生动物摄食等因素的影响。加强河口浮游动物生态学研究,对全面了解河口生态系统的结构和功能,保护河口环境和可持续利用河口资源具有重要的科学意义。

References:

- [1] Sun C Q. Review and prospect on the inland river transport in China. *China Water Transport*, 2001, (1): 29 ~ 31.
- [2] Gaughan D J, Potter I C. Composition, distribution and seasonal abundance of zooplankton in a shallow, seasonally closed estuary in temperate Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 41(2): 117 ~ 135.

- [3] Wooldridge T. Estuarine zooplankton community structure and dynamics. In: Allanson, B. R. & Baird, D., eds. *Estuaries of South Africa*. Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1999. 141 ~ 166.
- [4] Froneman P W, McQuaid C D. Preliminary investigation of the ecological role of microzooplankton in the Kariega estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45(5):689 ~ 695.
- [5] Froneman P W. Seasonal changes in zooplankton biomass and grazing impact in the temperate estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52(5):543 ~ 553.
- [6] Froneman P W. Response of the plankton to three different hydrological phases of the temporarily open/closed Kasouga Estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(4):535 ~ 546.
- [7] Kibirige I, Perissinotto R. The zooplankton community of the Mpenjati Estuary, a South African temporarily open/closed system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58(4): 727 ~ 741.
- [8] Froneman P W. Food web dynamics in a temperate temporarily open/closed estuary (South Africa). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 59(1):87 ~ 95.
- [9] Chen Y Q, Xu Z L, Wang Y L, et al. An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang(Yangtze) River estuarine area I. biomass distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2 (1):49 ~ 58.
- [10] Guo P Y, Shen H T, Liu A C, et al. The species composition, community structure and diversity of zooplankton in Changjiang estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5):892 ~ 900.
- [11] Zhen Z. Estuarine plankton research. *Ziran Zazhi*, 1982, 5(3):218 ~ 222.
- [12] Zhen Z, Chen B Y. General introduction to ecosystem research of Jiulongjiang estuary in Xiamen. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 1982, 21: 351 ~ 358.
- [13] Huang J Q. On the species composition and distribution of estuarine zooplankton at the Jiulong River. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 1983, 22(1):88 ~ 95.
- [14] Huang J Q, Chen B Y. Species composition and distribution of planktonic copepods in the Jiulong river estuary, Fujian. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1985, 4(1):79 ~ 88.
- [15] Huang J Q, Zhen Z. Effect of Salinity on the distribution of copepods in Jiulong River estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986b, 8(1):83 ~ 91.
- [16] Xu Z Z, Huang J Q. Ecologic research on hydromedusae, siphonophore, Scyphomedusae, Ctenophora in the Jiulong River estuary. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 1983, 22(3):364 ~ 373.
- [17] Li S J, Xu Z Z, Huang J Q, et al. Studies on biology of marine zooplankton in China. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2001, 40(2):574 ~ 585.
- [18] Yang Y F, Huang X F. Advances in ecological studies on zooplankton. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(1):81 ~ 89.
- [19] Chen Y Q, Zhen G X, Zhu Q Q. A preliminary study of the Zooplankton in the Changjiang estuary area. *Donghai Marine Science*, 1985, 3(3):53 ~ 61.
- [20] Chen Y Q, Zhen G X, Zhu Q Q. Study on component and quantitative distribution of pelagic crustaceans from the Changjiang River estuary. *Essays on crustacean*, Beijing: Science Press, 1986. 258 ~ 259.
- [21] Lai W, Lin W Y, Du L S. Ecological investigation on the zooplankton community of the Changjiang River estuary. *Essays on the forth conference on the science of oceanology and limnology*. Beijing: Science Press, 1991. 158 ~ 163.
- [22] Liu Y, Li S Y, Wu W H, et al. Community characteristics of plankton and benthos in the Lingding waterway of the Pearl River Mouth. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(Suppl. 2): 114 ~ 118.
- [23] Li C L, Wang K, Wang R. The gut pigment contents of the dominant zooplankton species and their grazing pressure on the phytoplankton in the Weihe Estuary. *Marine Fisheries Research*, 2000, 21(2):27 ~ 33.
- [24] Swadling K M, Bayly I A. E. Different zooplankton communities in confluent waters: comparisons between three marine bays in Victoria, Australia. *Proceeding-Royal Society of Victoria*, 1997, 109(1):113 ~ 118.
- [25] Ricardo P G, Jaime G G. Copepod Community Structure at Bahia Magdalena, Mexico during El Niño 1983 ~ 1984. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(5):583 ~ 595.
- [26] Toner R C. Interrelationships between biological, chemical and physical variables in Mount Hope Bay, Massachusetts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 1981, 12:701 ~ 712.
- [27] Turner J T. The annual cycle of zooplankton in a Long Island estuary. *Estuaries*, 1982, 5:261 ~ 274.
- [28] Chen S P, Chen X M, Li C P, et al. Distribution features of zooplankton in the southwest of the Daya Bay. In: *The synthetic experimental station of marine biology in the Daya Bay(Chinese Academy of Sciences) eds. Research on the ecosystem of the Daya Bay(I)*. Beijing: Meteorological Press, 1999. 73 ~ 100.
- [29] Gao S W, Wang K. The abundance and distribution of zooplankton in the Jiaozhou Bay. In: *Dong J H, Jiao L Z eds. Ecological research of the Jiaozhou Bay*.

- Beijing: Science Press, 1995. 151 ~ 158.
- [30] Azam F, Fenchel T, Field J G, *et al.* The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10: 257 ~ 263.
- [31] Kennish M J. *Ecology of Estuaries. Vol. II: Biological Aspects.* CRC Press, Ann Arbor, 1990. 391.
- [32] Mouny P, Dauvin J C. Environmental control of mesozooplankton community structure in the Seine estuary (English Channel). *Oceanologica Acta*, 2002, 25(1): 13 ~ 22.
- [33] Irigoien X, Castel J. Feeding rates and productivity of the copepod *Acartia biflosa* in a highly turbid estuary: the Gironde (SW France). *Hydrobiologia*, 1995, 311: 115 ~ 125.
- [34] Xu Z L, Wang Y L, Chen Y Q, *et al.* An ecological study on zooplankton in plume frontal zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area III. vertical distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2(1): 64 ~ 70.
- [35] Froneman P W. Feeding studies of selected zooplankton in a temperate estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(5): 543 ~ 552.
- [36] Huang J Q, Chen B Y. Preliminary ecological study of copepods of the Jiulong River estuary, Fujian Province. *Essays on crustacean*, Beijing: Science Press, 1986. 260.
- [37] Lu J J. *Estuarine ecology.* Beijing: Ocean Press, 63 ~ 69.
- [38] Perissinotto R, Walker D R, Webb P, *et al.* Relationships between zoo- and phytoplankton in a warm temperate, semi-permanently closed estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(1): 1 ~ 11.
- [39] Paterson A W, Whitfield A K. A stable isotope study of the food web in a freshwater-deprived South African Estuary, with particular emphasis on the ichthyofauna. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45(6): 705 ~ 715.
- [40] Kibirige I, Perissinotto R. The structure and trophic role of zooplankton community of the Mpenjati estuary, a subtropical temporarily-closed system on the KwaZulu-Natal coast. *Programme Abstracts and Directory. Wilderness, South Africa*, 1999. 78.
- [41] Dagg M J. Ingestion of phytoplankton by the micro- and mesozooplankton communities in a productive subtropical estuary. *J Plankton Res*, 1995, 17: 845 ~ 857.
- [42] Sautour B, Artigas L F, Delmas D, *et al.* Grazing impact of micro- and mesozooplankton during a spring situation in coastal waters of the Gironde estuary. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(3): 531 ~ 553.
- [43] Chen Y P, Huang J Q. Distribution of Cladocera in Jiulong River Estuary. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1992, 11(3): 233 ~ 237.
- [44] Zheng Z. *Essays on Marine Plankton Ecology.* Xiamen: Xiamen University Press, 1986. 169 ~ 182.
- [45] Wooldridge T H, Callahan R. The effects of a single freshwater release into the Kromme Estuary. Part 3. Estuarine zooplankton response. *Water South Africa*, 2000, 26: 311 ~ 318.
- [46] Li S Q, SG, S. Studies on the comparative morphology of *Tortanus* eggs and the effect of temperature on egg production and hatching rate of *T. dextrilobatus* of Jiulong River estuary. *Essays on crustacean*, Beijing: Science Press, 1986. 240 ~ 241.
- [47] Perissinotto R, Nozais C, Kibirige I. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and microphytobenthos in a South African temporarily-open estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(1): 47 ~ 58.
- [48] Mouny P, Wang Z, Dauvin J C. *Premie' res donne' es sur la structure spatio-temporelle du mesozooplancton et du suprabenthos de l' estuaire de la Seine.* *Journal Recherche Oceanographique*, 1996, 21: 100 ~ 108.
- [49] Taylor J C, Rand P S. Spatial overlap and distribution of anchovies (*Anchoa* spp.) and copepods in a shallow stratified estuary. *Aquatic Living Resources*, 2003, 16(3): 191 ~ 196.
- [50] Griffin SL, Herzfeld M, Hamilton DP. Modelling the impact of zooplankton grazing on phytoplankton biomass during a dinoflagellate bloom in the Swan River Estuary, Western Australia. *Ecological Engineering*, 2001, 16(3): 373 ~ 394.
- [51] Griffin SL, Rippingale RJ. Zooplankton grazing dynamics: top-down control of phytoplankton and its relationship to an estuarine habitat. *Hydrological Processes*, 2001, 15(13): 2453 ~ 2464.
- [52] Uye S. Replacement of large copepods by small ones with eutrophication of embayments: cause and consequence. *Hydrobiologia*, 1994, 292/293: 513 ~ 519.
- [53] Telesh I. V. Zooplankton studies in the Neva estuary (Baltic sea): a brief excursion into history. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.*, 2001, 50(3): 200 ~ 210.
- [54] Shen H T, Mao Z C, Gu Y L. Impact of south-north water transfer (east route) on saltwater intrusion in the Changjiang estuary with consideration of its countermeasures. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 150 ~ 154.

参考文献:

- [1] 孙国庆. 中国内河航运回顾与展望. *中国水运*, 2001, (1): 29 ~ 31.

- [9] 陈亚颢, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 I. 生物量及优势种的平面分布. 中国水产科学, 1995, 2(1): 49 ~ 58.
- [10] 郭沛涌, 沈焕庭, 等. 长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性. 生态学报, 2003, 23(5): 892 ~ 900.
- [11] 郑重. 河口浮游生物研究. 自然杂志, 1982, 5(3): 218 ~ 222.
- [12] 郑重, 陈柏云. 厦门九龙江口生态系统调查研究绪论. 厦门大学学报(自然科学版), 1982, 21: 351 ~ 358.
- [13] 黄加祺. 九龙江口大、中型浮游动物的种类组成和分布. 厦门大学学报(自然科学版), 1983, 22(1): 88 ~ 95.
- [14] 黄加祺, 陈柏云. 九龙江口浮游桡足类的种类组成和分布. 台湾海峡, 1985, 4(1): 79 ~ 88.
- [15] 黄加祺, 郑重. 盐度对九龙江口桡足类分布的影响. 海洋学报, 1986b, 8(1): 83 ~ 91.
- [16] 许振祖, 黄加祺. 九龙江口水螅水母、管水母、钵水母和栉水母类的生态研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1983, 22(3): 364 ~ 373.
- [17] 李少菁, 许振祖, 黄加祺, 等. 海洋浮游动物学研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2): 574 ~ 585.
- [18] 杨宇峰, 黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展. 湖泊科学, 2000, 12(1): 81 ~ 89.
- [19] 陈亚颢, 郑国兴, 朱启琴. 长江口区浮游动物初步研究. 东海海洋, 1985, 3(3): 53 ~ 61.
- [20] 陈亚颢, 郑国兴, 朱启琴. 长江口区浮游甲壳动物组成和数量分布. 甲壳动物论文集. 北京: 科学出版社, 1986. 258 ~ 259.
- [21] 赖伟, 林温育, 堵南山. 长江口浮游动物生态的初步研究. 第四次中国海洋湖沼科学会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991. 158 ~ 163.
- [22] 刘玉, 李适宇, 董燕红等. 珠江口伶仃水道浮游生物及底栖动物群落特征分析. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(增刊2): 114 ~ 118.
- [23] 李超伦, 王克, 王荣. 滩河口浮游动物优势种的肠道色素含量分析及其对浮游植物的摄食压力. 海洋水产研究, 2000, 21(2): 27 ~ 33.
- [24] 沈寿彭, 陈雪梅, 李楚璞, 等. 大亚湾西南部浮游动物的分布特点. 见: 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站主编. 大亚湾生态系统研究(-). 北京: 气象出版社, 1999. 73 ~ 100.
- [25] 高尚武, 王克. 胶州湾的浮游动物数量和分布. 见: 董金海, 焦念志主编. 胶州湾生态学研究. 北京: 科学出版社, 1995. 151 ~ 158.
- [26] 徐兆礼, 王云龙, 陈亚颢, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 III 优势种的垂直分布. 中国水产科学, 1995, 2(1): 64 ~ 70.
- [27] 黄加祺, 陈柏云. 九龙江口桡足类生态的初步研究. 甲壳动物论文集. 北京: 科学出版社, 1986. 260.
- [28] 陆健健. 河口浮游动物生态学. 见: 陆健健主编. 河口生态学. 北京: 海洋出版社, 2003. 63 ~ 69.
- [29] 陈亚萍, 黄加祺. 九龙江口枝角类的分布. 台湾海峡, 1992, 11(3): 233 ~ 237.
- [30] 郑重. 海洋浮游生物生态学文集. 厦门: 厦门大学出版社, 1986. 169 ~ 182.
- [31] 李少菁, 上官步敏, 苏鸣. 九龙江口海区歪水蚤卵的形态比较及温度对产卵量和孵化率的影响. 甲壳动物论文集. 北京: 科学出版社, 1986. 240 ~ 241.
- [32] 沈焕庭, 茅志昌, 顾玉亮. 东线南水北调工程对长江口咸水入侵影响及对策. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 150 ~ 154.