

我国中华哲水蚤生物学研究进展

曹文清, 林元烧, 杨 青, 李少菁

(厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 中华哲水蚤 (*Calanus sinicus* Brodsky) 是西北太平洋陆架区的特征种, 也是我国重要的浮游桡足类之一。基于中华哲水蚤在海洋生态系统物流和能流中的重要地位, 故被列为我国近海生态系统中浮游动物的关键种之一。中华哲水蚤生物学研究已有 50 多年历史, 是浮游动物研究中最系统、全面, 资料积累最为丰厚的种类。本文将我国中华哲水蚤生物学研究成果加以汇总和综述, 旨在今后更广泛和深入地开展该种类研究提供参考。

关键词: 中华哲水蚤; 生物学

中图分类号: Q 959

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2006)S2-0054-08

上世纪 90 年代, 国际海洋科学界联合发起了全球海洋生态系统动力学 (Global Ocean Ecosystem Dynamics GIOBEC) 研究计划, 其主要研究目标之一是探索大陆架海域控制浮游动物输送、种群补充与死亡的物理学和生物学过程, 并将飞马哲水蚤 (*Calanus finmarchicus*) 作为生态系统中浮游动物的关键种进行深入研究。中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 为西北太平洋陆架区的特征桡足类, 是我国渤海、黄、东海各主要渔场中上层经济鱼类的主要饵料, 其数量变动不仅与渔业的丰歉直接相关, 对渔业资源结构有间接的影响, 在我国近海生态系统中的作用和地位与北大西洋的飞马哲水蚤相当, 故在“黄 东海生态系统动力学研究 (973 项目)”中被列为我国近海生态系统中的“关键种”。

我国关于中华哲水蚤生物学研究近 50 年历程, 也记载着厦门大学海洋浮游生物学教研组在人才培养和科学研究中的长足进步和发展。几十年间, 涉及该种类生物学的学术论文及各类毕业论文 (研究生和本科生) 60 余篇。本文拟在综合一些文献的基础上从 9 个方面对我国中华哲水蚤生物学研究的过程、现状与展望做一粗浅的概述。

1 结构与功能

1962 年, Brodsky^① 修订了太平洋哲水蚤 (*Calanus pacificus*) 种内的 3 个变种为 3 个不同的地理亚种 (*C. pacificus oceanicus*, *C. pacificus japonicus*, *C. pacificus californicus*), 同时将分布于亚洲沿岸的太平洋哲水蚤

分为独立的新种, 即中华哲水蚤 *Calanus sinicus* Brodsky, 认为中华哲水蚤与太平洋哲水蚤之间没有中间过渡类型存在。李少菁 (1963)^[1] 发表了比较形态学方面的研究论文。陈清潮 (1964)^[2] 比较了我国各海区的哲水蚤与 Brodsky 描述的太平洋哲水蚤和中华哲水蚤的主要形态, 指出我国各海区的哲水蚤与 Brodsky 所描述的中华哲水蚤形态相符, 并对我国近海中华哲水蚤的形态特征进行了详尽的描述。

中华哲水蚤的个体大小具有季节变化, 在冬、春季个体最大, 夏、秋季最小^[2], 水温是影响其个体大小变化的主要因素。陈清潮 (1964)^[2] 发现该种类在渤海和北黄海, 由于低温期较长, 最大个体的出现持续期也较长; 南黄海和东海的低温期较短, 以中等体长的个体占优势; 而南海的水温较高, 其体长远较北部水域的小。王雄进^[3] 比较了不同纬度海区中华哲水蚤平均体长: 琼州海峡 (20°N) 为 2.76 mm, 厦门港 (24°25'N) 为 2.81 mm, 浙东外海 (29°30'N) 为 2.98 mm, 青岛 (36°N) 为 3.30 mm, 结果表明, 中华哲水蚤个体大小随着纬度的增高而逐渐增大。中国海域随着纬度的增高, 水温逐渐降低, 因此个体大小随纬度的变化 (王雄进, 1990) 与个体大小随水温的变化 (陈清潮, 1964) 趋势是一致的。

陈小英 (1988)^[4,5] 对中华哲水蚤消化道超微结构进行了观察, 并与肉食性的汤氏长足水蚤进行了比较, 探讨了其消化道的生理功能。中华哲水蚤前肠具较发达的肌肉系统、微管和微丝, 表明它有较强的运

收稿日期: 2006-11-20

作者简介: 曹文清 (1954-), 女, 教授。

Email: wqca@xmu.edu.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

① Brodsky K. A. Comparison of *Calanus* species (Copepoda) from the Southern and Northern hemispheres. N. Z. Sci. Industr. Res. Inf. Ser. 1964, 33: 15-17. (原文未见, 引自参考文献 [2])

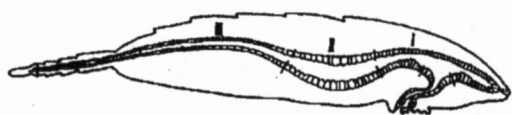


图 1 中华哲水蚤的消化道
(引自陈小英, 1988)

Fig 1 Mandibular edge of *Calanus sinicus* (from Chen 1988)

动力, 加之其几丁质层还有形成内具微丝束的乳状突起, 故前肠的主要功能可能还包括了输送食物并对其进行机械消化, 是否还进行食物的化学消化还有待于进一步研究; 中肠占消化道总长的 89%, 是生理功能最活跃、最重要的部分, 具有微绒毛层, 可明显划分为 3 个主要区段 (I、II、III) (图 1), II 段以 B 细胞的分布为其重要特征, 中肠各类细胞特征比较倾向植食性; 后肠仅有几十微米, 加上其发达的环肌, 可能仅起着通道、排泄废物的作用。

李少菁 (1964)^[6] 和郑小衍等^[7] 对厦门港中华哲水蚤口部附肢的结构, 特别是大颚齿缘进行光学显微镜和扫描电镜的观察研究, 发现中华哲水蚤大颚齿缘咀嚼缘齿较多, 呈臼齿状, 且有发达硅质齿冠; 口部附肢具发达刚毛, 其摆动产生了摄食涡流, 第二小颚伸向前方, 其网状刚毛形成致密的过滤网, 并由此推断中华哲水蚤通过滤食的方式来获得食物。Itoh (1970) 提出用齿缘指数 (E I) 来区分植食、肉食和杂食性的哲水蚤类, $E I < 500$ 的属植食性类群, $E I > 900$ 的为肉食性类群, $E I$ 介于 500~900 的是杂食性类群。郑小衍、郑重 (1989)^[7] 通过测量和计算得出中华哲水蚤的齿缘指数。中华哲水蚤共有 9 枚缘齿, 第二腹齿几乎完全退化消失, 只在 V_1 的落破处呈已很不明显的小隆起, 齿式表示为 $V_1 + C_{1-4} + D_{1-3} + Se$ (V 代表腹齿, C 为中央齿, D 为背齿, Se 代表缘刺); $E I$ 值为 523 指出中华哲水蚤应属杂食性种类, 而非之前所认为的植食性。

2 卵型、孵化率和产卵量

卵型、孵化率和产卵量的研究, 为更好地了解海区中华哲水蚤种群数量的季节变动和补充机制提供了依据。这方面的工作, 已有 20 年成果积累。

2.1 卵型与孵化率

李少菁等 (1989)^[8] 对厦门海区中华哲水蚤的卵型进行研究, 观察到中华哲水蚤卵表具有鞘, 并测定了中华哲水蚤的卵径 ($(165.8 \pm 9.6) \mu m$)、卵鞘的宽

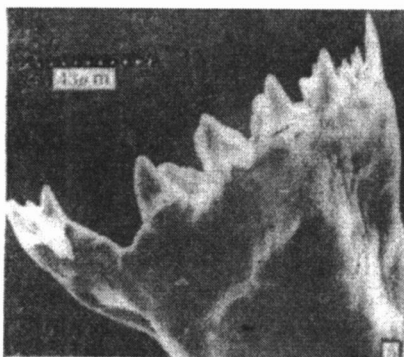


图 2 中华哲水蚤大颚齿缘
(引自郑小衍等, 1989)

Fig 2 Ention of *Calanus sinicus* (from Zheng et al, 1989)

度 ($(23.0 \pm 6.7) \mu m$) 以及卵的孵化率 ($(55.9 \pm 16.0)\%$); 研究还表明: 卵径随着海水表层温度的升高而减小, 卵鞘随着温度的升高而变窄, 孵化率与卵鞘宽度变化正相关, 并给出了上述相关关系的拟合函数; 指出卵孵化率的季节变化并非卵的滞育。2002 年以来, 林元烧、曹文清先后带领厦大浮游生物组研究生用 2 年多时间收集了厦门港各出现月份的中华哲水蚤, 专门针对其卵型和胚胎发育进行了观察研究^[9], 发现厦门港中华哲水蚤仅存在一种基本卵型, 属于无鞘卵, 但卵表面具有透明、柔软的胞膜 (blister), 胞膜呈褶皱结构, 以前本课题组所认为的卵鞘 (李少菁等, 1989) 实际就是这层胞膜; 胞膜可因外力而脱落, 但胚胎仍可正常发育, 认为胞膜很可能只是起着生态学上的保护作用, 如减少风浪等外力作用对卵的机械性损伤等; 在本实验室水温为 $16 \sim 22^\circ C$ 条件下, 受精卵均可正常孵化与发育; 胞膜的宽度有一定的变化, 与水温基本呈负相关关系, 这与李少菁等 (1989) 观察的结果一致。通过卵型分析与孵化实验, 得出厦门港中华哲水蚤不存在休眠卵 (dormant egg) 或滞育卵 (diapause egg)。

2.2 产卵量与产卵行为

林元烧等 (1986)^[10] 在实验室条件下研究了厦门港中华哲水蚤雌性成体的产卵量, 发现产卵种群的产卵量有显著的季节变化, 每雌体平均产卵量和产卵个体百分数有 3 次高峰, 分别出现在 12~1 月, 3~4 月和 5 月中旬; 环境中饵料、温度高低对产卵量均有影响, 饥饿 3 d 后中华哲水蚤不产卵, 若重新喂食, 将继续产卵; 低浓度的饵料环境或低温环境减慢了中华哲水蚤的代谢率, 从而使产卵间隔时间变长, 产卵量降低; 不同世代雌体产卵的最适水温也略有不同, 冬季世代最适水温为 $12 \sim 16^\circ C$, 春季世代的为 $16 \sim 20^\circ C$,

它产卵的适宜水温随海区水温的升高而升高。张芳等(2002)^[11]发现黄海中华哲水蚤室内产卵为不规则性间歇式,产卵时间为1~9 d不等,最长为9 d,间歇时间一般为1~2 d,最长为5~6 d,饥饿会降低雌体的生殖力,饵料质量对产卵量有明显影响;卵的孵化速度随温度的降低而减慢,这与林元烧(1986)的结果基本一致。在南黄海^[12]夏季表层水温最高达到27°C,此时中华哲水蚤的生殖活动相对较弱,尽管怀卵量还处于一个相对较高的水平上,但产卵率却是所有调查季节中最低的,说明此时大部分的雌体已经停止产卵;室内培养也得到了相同的情况,在高温27°C下培养的雌性成体在24 h后就停止产卵,卵在27°C下的孵化率明显低于其他温度,同时有较多畸形胚胎产生,此外,黄海冷水团(8~9°C)的中华哲水蚤产卵率也明显低于其他区域。可见高温和低温对中华哲水蚤的生殖均有伤害作用。

中华哲水蚤的产卵行为有显著的昼夜节律性。张光涛等(2002)^[13]观察到:该种类午夜至凌晨(尤其是03:00~06:00之间)多集中迁移到表层产卵;同时,南黄海现场24小时连续观察也发现在03:00~06:00时间段中华哲水蚤卵以表层密度最大,就整个水体中的现存量而言,也是在06:00时最高,随后下降,直到第2天才会重新出现升高。

3 分布

3.1 平面分布

中华哲水蚤为西北太平洋陆架区的广布种,北起日本海、南至越南近海均有分布,在日本海、渤海、黄海和东海海域构成浮游动物的主要优势类群^[14]。我国最早开展的中华哲水蚤分布的研究是与渔场的生态调查结合在一起的,中华哲水蚤的卵、无节幼体、桡足幼体和成体为鱼类的仔鱼、稚鱼、幼鱼和成鱼提供了不同粒径的食饵,因此了解中华哲水蚤的分布为掌握鱼类的生态习性和数量变动提供了依据。郑重等(1965)^[15]对烟、威鲈鱼渔场及邻近水域的中华哲水蚤的平面分布和季节变化进行研究。李超伦等(2003)^[16]调查了南黄海鲈产卵场鲈的主要饵料生物——中华哲水蚤的数量分布。

黄加祺等(2002)^[17]对台湾海峡中华哲水蚤的平面和季节分布情况进行了详细的报道。在台湾海峡中、北部,中华哲水蚤全年均有分布,证实了台湾海峡中、北部应是中华哲水蚤基本的分布区^[18]。对于厦门港,中华哲水蚤在秋末或冬初出现,春末或夏初消失,是明显的季节性分布区域。在粤东沿海及台湾海峡南部,中华哲水蚤冬季出现,春季达数量高峰,夏季数量

急剧减少,秋季几乎匿迹,因此认为这些区域也是中华哲水蚤的季节分布区^[17]。毕洪生等^[19]分析了渤海浮游动物群落结构,发现中华哲水蚤在渤海全年都有出现;认为渤海中华哲水蚤可能存在两个群体,从黄海随流补充进来的群体和渤海本地形成的越冬群体,此外也可能通过休眠卵进行补充。值得一提的是,徐兆礼等(2003)^[20]对东海赤潮高发区春季浮游动物进行调查,中华哲水蚤为最主要优势种,指出东海春季赤潮高发区桡足类优势种的数量变动主要是由中华哲水蚤的动态变化所决定的。

温度被认为是影响中华哲水蚤种群分布的主要环境因素。虽然中华哲水蚤属于温带种,其温度分布范围较大(1~27°C)^[21],10~18°C是中华哲水蚤种群的繁殖最盛期的温度,繁殖的数量随平均水温的增高而由北向南逐渐减少^[2]。高温被认为是导致夏季中华哲水蚤数量降低和分布区向深水区退缩的主要原因^[21]。

3.2 垂直分布与昼夜垂直移动

黄加祺等(2002)^[17]发现在台湾海峡中部,中华哲水蚤从底至表均有分布,但其成体夏季栖息于底层,冬季则分布在35 m以浅的表层,并具有明显的昼夜垂直移动。不同性别的个体昼夜垂直移动情况也不尽相同,厦门港的中华哲水蚤雌性个体具有明显的黎明、黄昏上升,白天、午夜下降的规律;而雄性个体大部分分布于下层,昼夜垂直移动不显著(1986)^[22](图3)。夏季,台湾海峡北部,中华哲水蚤在中层以深水域有明显的昼夜垂直移动现象,其在夜晚时上升到上层的数量不多(图4),这可能与夏季上层水温较高(>28°C)有关。

南黄海夏季中华哲水蚤的分布中心主要位于60 m以下水层(温跃层以下),黄昏时上升近温跃层下限,入夜后又开始回落^[23](左涛等,2004)。张芳等(2005)^[24]在南黄海定点研究了中华哲水蚤各个发育期的昼夜垂直分布,雌体在后半夜上升到表层产卵,形成卵的高密度区;随后,卵在大约20 h内边沉降边孵化成NI期无节幼体,导致相应时间内卵的密度减少;NI到CV期幼体的垂直分布规律基本相同,其密集群的平均深度主要分布在30 m的温、盐跃层。中华哲水蚤各期幼体昼夜垂直移动的幅度、数量也会随着季节的变化有所变化,垂直移动的能力从无节幼虫至成体越来越显著^[25](刘晓丹等,1991)。

罗会明(1983)^[26]探讨了中华哲水蚤昼夜移动的机制,他们定量测定了中华哲水蚤在水平及垂直光梯度下对白光和各种单色光的反应以及其移动速度,发现垂直移动过程中运动速度和方向依光强和波长的不同而变化;当午后太阳高度逐渐降低时,水层中光

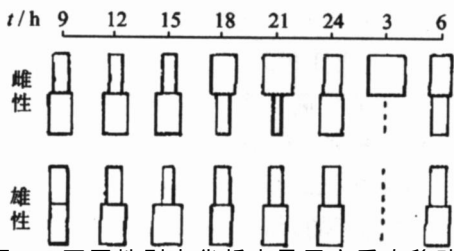


图 3 不同性别中华哲水蚤昼夜垂直移动 (厦门港, 1984)

(引自黄加祺等, 1986)

Fig 3 Diurnal vertical migration of female and male *Calanus sinicus* (from Huang et al 1986)

梯度方向也跟着倾斜, 浮游动物对着光源 (太阳) 运动的本身就是垂直与水平运动的和运动, 提出“昼夜垂直移动”的实际方向并非真正垂直的; 证实了郑重 (1982)^[27] 关于产生昼夜垂直移动的最重要因素是光的论断; 认为光是作为产生昼夜垂直移动这一非条件反射的刺激信号, 而这种移动的本身则是由动物的生活习性和生理状况来决定的。

也有学者认为浮游动物的垂直迁移与昼夜摄食节律有关。浮游动物为躲避捕食者, 白天栖息在深层, 夜间迁移到饵料相对丰富的海洋上层进行摄食。中华哲水蚤的垂直迁移主要是由于外部的捕食压力造成的^[28]。刘晓丹等 (1991)^[25] 还探讨了温度、盐度对中华哲水蚤幼体垂直移动的影响, 认为光、温度、盐度是主要的外界影响因素。

韩希福等 (2001)^[29] 用最优化适合度种群生态学模型模拟研究了中华哲水蚤种群在渤海生态系统中的垂直移动模式。认为决定它垂直移动的主要因素是生命周期、世代时间、繁殖力和产卵量, 主要是为维持其种群的存在而做出的生存抉择, 并且受到环境条件特别是水流大小的强烈影响。在中华哲水蚤生活史类型中, 无水平流动或水平流动速率很小时, 昼夜的垂直移动能使其获得最优的生态适合度。水流的增加或方向的改变会使其在底层的停留时间增加。

4 摄食

李少菁 (1964)^[6] 探明厦门港中华哲水蚤的饵料组成以浮游硅藻为主, 其中又以具槽直链藻 (*Melosira sulcata*)、圆筛藻 (*Coscinodiscus* spp.)、小环藻 (*Cyclotella* spp.)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、中华盒形藻 (*Biddulphia sinensis*)、菱形海链藻 (*Thalassiona nitzschoides*) 和小型菱形藻等占优势, 还有个别原生动物和小型桡足类。而这些饵料成分基本上反映了厦门港海区浮游植物的组成情况, 并随海区浮游植物的季

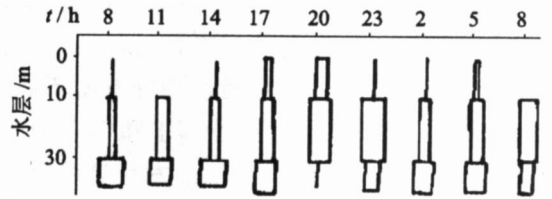


图 4 夏季中华哲水蚤在台湾海峡北部昼夜垂直移动 (引自朱长寿, 1997)

Fig 4 Diurnal vertical migration of *Calanus sinicus* in north of Taiwan Strait in summer (from Zhu 1997)

节变化而变化, 可以看出厦门港中华哲水蚤对饵料的选择性不大。杨纪明分别对渤海中华哲水蚤成体 (1997)^[30] 和桡足幼体的摄食 (1998)^[31] 进行初步研究, 采用消化道内食物分析方法, 揭示中华哲水蚤成体和桡足幼体的食性特征。成体和桡足幼体均营浮游植物食性, 主要摄食硅藻类 (成体和桡足幼体食物中硅藻类分别占其食物组成的 94.6% 和 99.7%), 圆筛藻是它们的主要摄食对象。在渤海所摄食的食物类群四季都以硅藻类为主; 成体摄食强度秋季最高, 春季居第二位, 冬季居第三位, 夏季最低; 桡足幼体则为冬季摄食强度最高, 春、夏次之, 秋季最低。但值得注意的是, 此研究所采用的消化道内食物分析方法本身存在局限性, 如圆筛藻具有厚的硅质外壳, 不易消化, 更容易残留在消化道内而被检出。

陈刚等 (1997)^[32] 在台湾海峡北部应用肠荧光技术对中华哲水蚤的摄食强度、摄食习性做了定性和定量的追踪研究, 得到中华哲水蚤肠色素水平为 $0.067 \sim 1.932 \mu\text{g}/\text{ind}$ 肠排空速率为 0.033 h^{-1} , 日摄食量为 $5.4 \mu\text{g}/\text{ind}$ 相当于体碳含量的 5%, 摄食压力为现存量的 1.5% ~ 3.1%, 对应初级产量的 26.8% ~ 53.7%。李超伦等 (2003)^[16] 对南黄海鲷产卵场的中华哲水蚤的摄食强度进行现场实验研究, 中华哲水蚤的肠道色素含量平均为 $1.19 \text{ ng}/\text{ind}$ ($0.21 \sim 4.14 \text{ ng}/\text{ind}$), 与水体中叶绿素 a 的最大浓度呈现一定的相关关系。中华哲水蚤种群还具有一定的昼夜摄食节律, 夜间的肠道色素含量明显高于白天; 南黄海鲷产卵场 A、B 两个站位中华哲水蚤的摄食率, 分别为 $76.9 \text{ ng}/\text{ind} \cdot \text{d}$ 和 $39.6 \text{ ng}/\text{ind} \cdot \text{d}$ 相当于体碳含量的 7.5% 和 3.9%, 此数据是通过肠道色素法测定的, 由于色素可能在浮游动物消化过程中存在降解问题, 因此结果可能低于其实际值。

5 发育与生活史

李松等 (1983)^[33] 对中华哲水蚤幼体发育进行研究, 得出中华哲水蚤无节幼体分为 6 期 NI ~ NVI,

桡足幼体分为 5 期 C I ~CV, 详细描述各期特征, 并与同属的其他 4 种哲水蚤幼体形态进行比较, 指出中华哲水蚤第 V 期桡足幼体雌雄两性特征有所不同. 张芳等 (2002)^[34]报道了中华哲水蚤 N I 和 N II 的发育时间随着温度的降低而延长, 在整个发育过程中各期幼体的发育时间是不相等的, 其中 N I 和 N II 的发育时间较短, N II 和 N IV 的发育时间较长, N V ~C II 的发育倾向于等时生长, C III ~C V 发育时间又开始延长. 对中华哲水蚤整个幼体的发育来说, 平均生长率基本随着发育期的增长而增大, 随着饵料组分的不同而不同.

中华哲水蚤在渤、黄、东海 3 个水域中, 主要繁殖期为春、夏、秋三季 (3 ~5 月、6 ~8 月、10 ~11 月), 一年有 3 个世代, 东海的繁殖盛期较渤海和黄海水域早. 林元烧等 (1984)^[35]分析了厦门港中华哲水蚤种群的年龄组成、雌雄成体两性比率和雌体成体头胸部长度的逐周变化, 推断它在厦门港一年有 3 个世代, 分别出现在: 12 月底 ~2 月中旬、3 月底 ~4 月和 5 月中旬. 水温是影响厦门港中华哲水蚤世代周期长短和雌雄成体个体大小的主要因素, 它们之间呈负相关关系.

6 生化组分与生态能学

王雄进等 (1990)^[3]分析了厦门港中华哲水蚤的 C、N、H 含量, 分别为 $37.49 \pm 4.44\%$, $10.30 \pm 1.32\%$ 和 $5.72 \pm 0.73\%$, 而 C:N 和 H:N 分别为 3.65 ± 0.29 和 0.555 ± 0.057 . 陈刚等 (1997)^[36]研究了台湾海峡中华哲水蚤的化学组成, 第 4 (C IV) 和 5 (C V) 期桡足幼体同雌性成体之间有明显差别 (表 1), C、N、H 的百分比含量随着发育呈下降趋势, 以第 4 期桡足幼体的值最高. 苏永全等 (1986)^[37]分析了厦门港 7 种桡足类 (包括中华哲水蚤) 的氨基酸组分, 以谷氨酸、天冬氨酸、赖氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸的含量较高. 中华哲水蚤的雌、雄成体的氨基酸总量也略有不同, 分别为 474.77 和 488.24

表 1 台湾海峡北部中华哲水蚤的化学组成

Tab. 1 Chemical elements of *Calanus sinicus* in north of Taiwan Strait

发育期	C %	N %	H %	C:N	H:N
C IV	45.14	11.17	6.42	4.04	0.58
C V	41.03	9.51	5.24	4.31	0.55
雌性成体	36.31	9.48	5.37	3.83	0.56

注: 引自陈刚等, 1997.

成基础上, 研究其各项生理速率并估算碳氮收支. 摄食率与饵料含量呈线性相关, 同化效率介于 $92\% \sim 96\%$ 之间, 与饵料含量及摄食率无关. 呼吸率与摄食率及同化率均呈线性相关, 其 SDA 系数介于摄入碳量的 9.3% ($m \cdot h$) 或同化碳量的 9.9% ($m \cdot h$). 总氮排泄率随摄食率与同化率的提高而呈线性增加. 随着摄食率的提高, 分配给卵生产的能量也增多, 二者呈线性相关. 饵料中氮含量是厦门港中华哲水蚤生长的主要限制因子, 当其对氮的摄食率低于 10.5×10^{-3} ($m \cdot h$) h 时, 动物“负”生长. 陈丽华等^[39]探讨了温度对中华哲水蚤呼吸率的影响, 呼吸率随温度的变化呈峰形, 20°C 时呼吸率最大, 为 $17.69 \text{ mm}^3 / \text{ind} \cdot \text{d}$ 与厦门港春季另外两种主要桡足类真刺唇角水蚤 (*Labidocera euchaeta*) 和太平洋纺锤水蚤 (*Acartia pacifica*) 的最适温度 (最大呼吸率出现的温度) 不同, 后两者的最适温度分别为 25°C 和 24°C , 这与它们本身的习性有关. 张武昌等^[40]发现中华哲水蚤的耗氧率和排氮率都随着温度的升高而升高; 每只中华哲水蚤含碳 $44 \mu\text{g}$ 含氮 $8.8 \mu\text{g}$ 每天丢失的碳占体碳的 4% (0°C) 到 30% (30°C), 每天丢失的氮占体氮的 6% (0°C) 到 45% (30°C); O:N 比值 (原子比) 在 0°C 是 8.5 在 30°C 是 8 说明蛋白质是中华哲水蚤的主要代谢基质.

7 生理生态

林汝榕等^[41]进行了重金属对中华哲水蚤毒性的实验, 经一定时间培养, 中华哲水蚤的重金属的积累量随水体重金属浓度的增大和培养时间的延长而提高. 不同金属的毒性大小不同, 依次为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+}$; 48 h LC_{50} 分别为 171×10^{-9} Cu, 828×10^{-9} Zn, 1.216×10^{-6} Cr, 1.5×10^{-6} Cd. 重金属会引起中华哲水蚤一系列生理活动的改变, 不同的浓度, 引起的反应也有所不同. 在亚致死浓度下当海水重金属浓度较低时, 表现为摄食活动加强, 排粪量增多; 当浓度较高时, 排粪量减少; 高浓度时则表现出抑制效应. 排粪是中华哲水蚤排除体内相当一部分的重金属的重要途径, 对不同培养条件下中华哲水蚤排泄的粪块分析重金属含量, 得出粪块含重金属的量高于培养用藻类. 重金属对中华哲水蚤氨基酸含量也有影响 (林汝榕等, 1991)^[42], 当外加重金属浓度较低时 ($\text{Cu} 2 \sim 10 \mu\text{g/L}$, $\text{Cd} 10 \sim 150 \mu\text{g/L}$), 动物各种氨基酸含量明显提高, 总氨基酸含量比对照约增加 $10\% \sim 31\%$; 重金属浓度提高时, 动物氨基酸含量则出现下降趋势. 说明低浓度重金属对动物有刺激效应, 此时活动加强, 浓度提高则产生抑制效应. 因此, 检测氨基酸含量的变化, 可作为桡足类对外界重金属污染物作出生

李少菁等 (2003)^[38]在分析中华哲水蚤的元素组

理反应的指标之一。

8 种群遗传学研究

早期中华哲水蚤种群遗传学的研究, 借助于遗传的染色体鉴别的方法和技术。林元烧等^[43]对中华哲水蚤染色体核型进行研究, 得出中华哲水蚤染色体数目及核型为 $2n=22(2n=12m+6sm+2st+2t)$ 。染色体的组型分析对于宏观上的物种甄别、疑难种类的鉴定等是一个有力的工具, 但是, 染色体组型提供的信息较少, 无法进行深一层次的多态性分析, 难以进行近缘种及种内群体进化研究。

大约 20 世纪 70 年代末至 90 年代之间, 同工酶技术和等位酶 (allozyme) 分析作为间接反映 DNA 遗传变异的分子标记, 在海洋浮游甲壳类特别是桡足类群体遗传和分化研究中得到较广泛应用。谭树华等^[44]采用等位酶分析技术对采自黄、东海 4 个站位的中华哲水蚤进行了种群分化的研究, 共检测了 4 种酶 (EST, MDH, ME 和 SDH) 的 5 个多态位点。等位基因的有效数目 A_e 为 2.1459 来自 4 个站位的中华哲水蚤均有较高的杂合度, 实际杂合度为 $H_o=0.5776$ 预期杂合度 $H_e=0.5264$; 种群间的遗传相似度 (I) 很高, 平均为 0.9815 平均遗传距离 (D) 为 0.0193 种群遗传分化程度很低。从研究结果推论, 黄、东海之间中华哲水蚤的遗传多样性较高, 其差异应为地理种群间的差异。曹文清等^[45]比较了中华哲水蚤不同地理种群的苹果酸脱氢酶 (MDH), 为进一步度量种群的遗传多样性或者进行不同地理种群之间的遗传学关系的分析奠定了基础。

20 世纪 90 年代以来, 以核酸为研究对象的分子遗传学成了生物系统学、分子生态学和生态遗传进化的主要研究内容。浮游动物专家 Ann Bucklin 博士曾在 2000 年国际海洋开发协会 (ICES) 培训班中, 指出“遗传多样性研究可以估计五种系统发生的大概年代。物种之间以及物种之内的遗传多样性模式可以用以甄别疑难种类, 重新构建族群的进化历程和精确估算生物多样性。群体遗传结构可以定量地估算不同地理种群的基因扩散 (基因流) 程度和了解由于海流携带而导致的基因的扩散范围”。林元烧等^[46]首先报道了采自胶州湾青岛海域的中华哲水蚤基因组 DNA, 以相应引物经 PCR 扩增得到线粒体 DNA 细胞色素氧化酶 I 亚基基因 (mtCOI) 片段, 中华哲水蚤线粒体 DNA COI 碱基大小为 710 bp 其碱基组成 A、C、G、T 含量分别为 24.23%、19.15%、22.54% 和 34.08%; G+C 含量为 41.69%, A+T 为 58.31%。随后, 又全面采集了我国沿海各海区中华哲水蚤个体 (渤海 5 个, 黄海 14 个,

东海沿岸 20 个, 粤东沿岸 5 个) 分析其 mtCOI 序列^[47], 探讨中国海域中华哲水蚤种群分化问题, 发现了 24 个变异位点, 核酸多样性 (P_i) 0.00313 19 种单倍型, 其多样性 (h) 0.8742 其中第三和第六类型的单倍型发生频率最高, 几乎占总受测个体的 50%; 对核酸多样性和单倍型多样性分析和计算结果表明, 中国各海域中华哲水蚤基因流分别为 $F_{st}=0.01913$ $N_m=12.82$ 和 $G_{st}=0.03342$ $N_m=7.23$ 卡方检验 (Chi-square test) 和 PM (permutation test) 检验表明我国各海域中华哲水蚤没有出现种群分化 ($p>0.05$) 现象, 这为进一步探讨中华哲水蚤的种群发生、发展及补充机制提供了依据, 对探索我国近海渔业资源结构变化具有重要的理论和实际意义。

9 展望

所述研究状况仅是对我国中华哲水蚤生物学研究 50 年的历程和现状做了简单的回顾与归纳。诚然, 我国学者已做了大量的基础工作, 为今后更好地开展中华哲水蚤种群动力学研究积累了丰富的资料, 但与北大西洋的飞马哲水蚤的研究相比, 还有一定距离, 还需要加快步伐, 向研究的深度和广度进军。

研究海洋生态系统动力学, 探索系统能量和物质的输入和输出以及系统内部的运转机制, 是合理利用生物资源和资源保护的重要基础研究, 也是全球环境变化对海洋生产力和产量影响的重要研究内容。作为我国近海浮游动物的关键种, 中华哲水蚤的种群发生、发展及补充过程和机制, 生活史策略, 生存对策等重大生物学和生态学问题我们仍知之甚少, 许多问题诸如种群数量补充机制、渡夏机制等仍然悬而未决, 有待于今后继续深一层次的研究。相信日后同行们的不懈努力和探索, 将能揭示这些应该揭示但至今尚未揭示的问题。

参考文献:

- [1] 李少菁. 福建沿海太平洋哲镖水蚤 (*Calanus Pacificus* Brodsky) 的比较形态研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1963 10(1): 57-81.
- [2] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率和个体大小的研究 [J]. 海洋与湖泊, 1964 6(3): 272-288.
- [3] 王雄进, 康洁生, 李松. 厦门港中华哲水蚤的体长、体重、化学组成和呼吸率的研究 [C] / 甲壳动物学论文集 (第二辑). 北京: 科学出版社, 1990 53-65.
- [4] 陈小英. 中华哲水蚤和汤氏长足水蚤的消化道超微结构观察 I. 前肠和后肠 [J]. 热带海洋, 1988 2 9-15.
- [5] 陈小英. 中华哲水蚤和汤氏长足水蚤的消化道超微结构的观察 II. 中肠 [J]. 热带海洋, 1988 7(4): 69-80.

- [6] 李少菁. 厦门几种海洋浮游桡足类的食性与饵料成分的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1964 11(3): 93 - 103
- [7] 郑小衍, 郑重. 桡足类大颚齿缘与摄食机制关系的研究[J]. 海洋与湖沼, 1989 20: 308 - 313
- [8] 李少菁, 陈峰, 王桂忠. 厦门海区浮游桡足类卵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
- [9] 杨青. 中华哲水蚤卵和胚胎发育研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2004
- [10] 林元烧, 李松. 厦门港中华哲水蚤产卵量的初步研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1986 25(1): 107 - 112
- [11] 张芳, 孙松, 张光涛. 中华哲水蚤室内产卵和孵化的初步研究[J]. 海洋与湖沼: 浮游动物研究专辑, 2002 10 - 18
- [12] 张光涛, 孙松, 张芳, 等. 度夏过程中温度对中华哲水蚤生殖的伤害作用[J]. 海洋与湖沼: 浮游动物研究专辑, 2002 85 - 91
- [13] 张光涛, 孙松, 孙晟. 中华哲水蚤的昼夜产卵节律以及温度对产卵量和孵化率的影响[J]. 海洋与湖沼: 浮游动物研究专辑, 2002 71 - 77
- [14] Uye S Why does *Calanus sinicus* prosper in the shelf ecosystem of the Northwest Pacific Ocean? [J]. ICES J Mar Sci 2000 57: 1850 - 1855
- [15] 郑重, 郑执中, 王荣, 等. 烟、威鲑鱼渔场及邻近水域浮游动物生态的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1965 7(4): 329 - 354
- [16] 李超伦, 王荣, 孙松. 南黄海鲰产卵场中华哲水蚤的数量分布及其摄食研究[J]. 水产学报, 2003 27(sup): 55 - 63
- [17] 黄加祺, 李少菁, 陈钢. 台湾海峡及其邻近海域中华哲水蚤的分布和繁殖[J]. 海洋科学集刊, 2002 44 95 - 100
- [18] 福建省海洋研究所. 台湾海峡中、北部海洋综合调查研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 1988 269 - 305
- [19] 毕洪生, 孙松, 高尚武, 等. 渤海浮游动物群落生态特点 II. 桡足类数量分布及变动[J]. 生态学报, 2001 21(2): 177 - 185
- [20] 徐兆礼, 蒋玫, 陈亚瞿, 等. 东海赤潮高发区春季浮游桡足类与环境关系的研究[J]. 水产学报, 2003 27(Sup): 49 - 54
- [21] Wang R, Zuo T, Wang K. The Yellow Sea cold bottom water an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) [J]. Journal of Plankton Research 2003 25(2): 169 - 183
- [22] 黄加祺, 许振祖, 李应仁. 厦门港浮游甲壳动物昼夜垂直移动的初步研究[J]. 海洋学报, 1986 8(2): 215 - 222
- [23] 左涛, 王荣, 王克, 等. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动[J]. 生态学报, 2004 24(3): 524 - 530
- [24] 张芳, 孙松, 张永山, 等. 南黄海中华哲水蚤昼夜垂直分布[J]. 海洋科学, 2005 29(9): 9 - 13
- [25] 刘晓丹, 王真良. 北黄海中华哲水蚤各期幼体昼夜垂直移动的初步研究[J]. 海洋学报, 1991 13(2): 247 - 253
- [26] 罗会明. 光对中华哲水蚤昼夜垂直移动的影响[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1983 22(1): 82 - 87
- [27] 郑重. 海洋浮游生物学新动向[J]. 自然杂志, 1982 5(6): 443 - 447
- [28] Huang C, Uye S, Onbe T. Ontogenetic diel vertical migration of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan III. Early summer and overall seasonal pattern [J]. Marine Biology, 1993 117: 289 - 299
- [29] 韩希福, 王荣, 王军萍. 渤海中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和小拟哲水蚤 (*Panacalanus Parvus*) 种群垂直移动生态适应性模型研究[J]. 生态学报, 2004 21(5): 820 - 826
- [30] 杨纪明. 渤海中华哲水蚤摄食的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1997 28(4): 376 - 382
- [31] 杨纪明. 渤海中华哲水蚤桡足幼体摄食的初步研究[J]. 海洋水产研究, 1998 19(2): 1 - 4
- [32] 陈钢, 李少菁, 黄加祺. 台湾海峡两种优势浮游桡足类——亚强真哲水蚤与中华哲水蚤的摄食研究[C] / 中国海洋学文集. 北京: 海洋出版社, 1997 7: 196 - 203
- [33] 李松, 方金钊. 中华哲水蚤的幼体发育[J]. 台湾海峡, 1983 2(1): 111 - 116
- [34] 张芳, 孙松, 王新刚. 温度和饵料对中华哲水蚤生长影响的初步研究[J]. 海洋与湖沼: 浮游动物研究专辑, 2002 19 - 25
- [35] 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
- [36] 陈钢, 李少菁, 彭兴跃. 台湾海峡浮游桡足类的化学元素组成[C] / 中国海洋学文集. 北京: 海洋出版社, 1997 7: 142 - 145
- [37] 苏永全. 几种海洋浮游甲壳动物的生化组成及必需氨基酸研究[D]. 厦门: 厦门大学, 1986
- [38] 李少菁, 郭东晖, 陈峰, 等. 厦门港中华哲水蚤碳氮收支的研究[J]. 台湾海峡, 2003 22(4): 415 - 421
- [39] 陈丽华, 陈钢, 李少菁, 等. 温盐度对厦门港春季主要桡足类呼吸率影响的实验[J]. 台湾海峡, 2001 20(sup): 184 - 189
- [40] 张武昌, 王荣, 王克. 温度对中华哲水蚤代谢率的影响[J]. 海洋科学, 2000 24(2): 42 - 44
- [41] 林汝榕, 李少菁. 浮游动物对重金属的积累及转移[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1988 27(1): 104 - 109
- [42] 林汝榕, 李少菁. 重金属对桡足类的急性毒性及其对排泄的生理效应[J]. 海洋环境科学, 1991 7(3): 7 - 15

- [43] 林元烧, 曹文清, 姚津津. 厦门港中华哲水蚤染色体组型 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2000 39(6): 826 - 830
- [44] 谭树华, 林元烧, 曹文清, 等. 黄、东海中华哲水蚤种群遗传的初步研究 I: 等位酶分析 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2003 42(1): 87 - 91.
- [45] 曹文清, 杨明, 谭树华, 等. 中华哲水蚤不同地理种群苹果酸脱氢酶 (MDH) 的比较 [J]. 海洋科学, 2002 26(8): 18 - 21.
- [46] 林元烧, 方旅平, 曹文清, 等. 中华哲水蚤线粒体 DNA COI 基因序列分析 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2003 44(1): 90 - 93.
- [47] 林元烧. 中华哲水蚤种群遗传学研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2005

Advanced in Biology of *Calanus sinicus* in China

CAO Wen-qing LIN Yuan-shao YANG Qing LI Shao-jing

(Department of Oceanography Xiamen University Xiamen 361005 China)

Abstract *Calanus sinicus* is a characteristic copepod widely distributed in Northwest Pacific continental shelf because it dominates the mesozooplankton in the shelf ecosystem, also components a major copepod in China seas for its eggs, larvae and adults provide a wide size spectrum of food to the commercial pelagic fish stocks. Owing to it plays a most important role in the material and energy flows in ecosystem of China seas, *Calanus sinicus* is named "key species" in China seas, especially in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea. In the past five decades, the biological research on *Calanus sinicus* has been made systematically and comprehensively. This paper summarized the biological research findings about *Calanus sinicus* in China, which is meant to provide scientific information for its further study in the future.

Key words *Calanus sinicus* biology