

Doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2013.02.015

尹健强, 黄良民, 李开枝, 等. 南海西北部陆架区沿岸流和上升流对中华哲水蚤分布的影响[J]. 海洋学报, 2013, 35(2):143-153.
Yin Jianqiang, Huang Liangmin, Li Kaizhi, et al. Effects of coastal current and upwelling on the distributions of *Calanus sinicus* on the northwest continental shelf of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2013, 35(2):143-153.

南海西北部陆架区沿岸流和上升流 对中华哲水蚤分布的影响

尹健强¹, 黄良民¹, 李开枝¹, 练树民², 李超伦³, 张吉林¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广东广州 510301; 2. 热带海洋环境国家重点实验室, 广东广州 510301; 3. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 山东青岛 266071)

摘要: 中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)是广泛分布于西北太平洋大陆架水域的浮游桡足类,在海洋生态系统的物质循环和能量流动中具有重要作用。根据 2006 年 7 月至 2007 年 10 月 4 个季节使用网目孔径为 0.505 mm 的浮游生物网采集的样品,分析了南海西北部陆架区中华哲水蚤的水平、季节和昼夜垂直分布以及与季风、海流和温度的关系。中华哲水蚤丰度季节变化显著,整个调查海域春季的平均达 (22.30 ± 77.78) 个/ m^3 ,夏季的降低,平均为 (13.74 ± 45.10) 个/ m^3 ,秋季消失,冬季调查期间仍未出现。中华哲水蚤的区域分布差异十分显著,将调查海域划分为粤西近海、琼东近海、粤西-琼东外海三个亚区,在粤西近海亚区春、夏季中华哲水蚤的平均丰度分别为 (115.63 ± 145.93) , (68.12 ± 84.00) 个/ m^3 ,远高于另外两个亚区。夏季琼东沿岸上升流区的中华哲水蚤没有昼夜垂直移动行为,呈底层分布,以躲避表层高温的伤害。南海西北部陆架区是中华哲水蚤的季节分布区,冬春季东北季风期间由广东沿岸流从东海沿岸携带而来,出现的时间从北往南逐渐推迟;夏季西南季风期间雷州半岛东部近海的冷涡和琼东沿岸上升流区成为中华哲水蚤度夏的避难所;秋季季风转换时期上升流减弱或消失,中华哲水蚤因耐受不了高温($>27^\circ\text{C}$)死亡而消失。因此,中华哲水蚤对东北季风时期的沿岸流和西南季风时期的上升流均具有良好的指示作用。

关键词: 中华哲水蚤;南海北部;分布;季风;海流;指示种

中图分类号:Q958.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2013)02-0143-11

1 引言

中华哲水蚤(*Calanus sinicus* Brodsky, 1962)是广泛分布于西北太平洋大陆架水域的桡足类,从日本周围海域到南海的越南沿岸均有分布^[1-4]。它个体大、数量多、分布广,又是植食性种类,它的卵、无节幼虫、

桡足幼体、成体可为鱼类,尤其幼体提供不同粒径的食物^[5]。由于它在海洋生态系统物质循环和能量流动中的重要作用,它被中国—全球海洋生态系统动力学研究计划选择为浮游动物的关键种^[5-6]。

中华哲水蚤是日本内海(Inland Sea of Japan),中国渤海,黄海、东海以及台湾海峡的浮游动物优势种,

收稿日期:2012-03-29;修订日期:2012-08-13。

基金项目:中科院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q07-02);中国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ST08);中国科学院战略先导专项(XDA05030403);国家自然科学基金重点项目(41130855)。

作者简介:尹健强(1953—),男,广东省东莞市人,研究员,从事海洋浮游动物分类学和生态学研究。E-mail: jiqin@scsio.ac.cn

有关它的分布和季节变化已经有很多的研究报道^[1,7-11],但有关它在南海北部的时空分布格局资料却很少,仅 Hwang 和 Wong^[4]研究了中华哲水蚤在香港水域的数量分布及季节变化; Tam 等^[12]和 Li 等^[13]分别报道了中华哲水蚤为珠江口海域冬季(1 月份)和春季(4 月份)的浮游动物优势种;张武昌等^[14]报道了中华哲水蚤在南海北部冬季和夏季的分布。本文根据在南海西北部陆架区 4 个季节的调查资料,分析了中华哲水蚤的空间分布和季节变化,以及与季风、海流和温度的关系,可为深入研究中华哲水蚤在西北太平洋大陆架的地理分布格局、探讨南海北部中华哲水蚤种群的补充和维持机制以及度夏等科学问题提供资料,在开展生物海洋学研究方面也有很重要的科学意义。

2 材料与方法

2.1 调查区域概况

调查海域位于南海西北部,位置在 $17^{\circ}17.10' \sim 21^{\circ}25.62'N$, $109^{\circ}28.74' \sim 113^{\circ}13.26'E$ 之间,包括粤西至海南岛东南部近海。调查海区大部份区域的地貌类型为大陆架,水深在 200 m 以浅,仅琼东南部为大陆坡,最大水深近 1 900 m。粤西东部大陆架宽阔,地势平坦,琼东南大陆架明显变窄,坡度变大,水深变化剧烈,梯度大。属热带和副热带季风气候,10 月至翌年 3、4 月盛行北到东北风,6—8 月盛行西南风,9 月

和 4、5 月为季风转换期。

调查海域流系复杂,主要受广东沿岸流、雷州半岛东部近海(广州湾)的气旋式环流(冷涡)、琼东沿岸上升流和南海暖流的影响(图 1)。广东沿岸流的路径、方向,与季风、珠江径流有关,习惯上以珠江口为界,将其划分为粤东沿岸流和粤西沿岸流。冬季盛行东北季风,广东沿岸流由东北流向西南,至雷州半岛东岸受阻而分两支:一支折西进入琼州海峡流入北部湾;另一支则向南沿海南岛东岸南流,影响范围可达海南岛以南水域。夏季南海北部盛行西南风,粤东沿岸流由西南流向东北,而粤西沿岸流由于受汛期珠江冲淡水的影响,流向仍然为西南向^[15-16]。在调查海域外陆架区,终年存在一支沿等深线走向,自西南流向东北的“南海暖流”^[17-20]。粤西沿岸流外侧的海流的流向与粤西沿岸流相反,因此在雷州半岛东部水域($20^{\circ}20' \sim 21^{\circ}10'N$, $110^{\circ}50' \sim 112^{\circ}00'E$)形成一个局地气旋式环流^[15-16,21]。该气旋式环流终年存在,夏强冬弱,夏季可引发底层水涌升,形成上升流(冷涡)。夏季在西南季风和海底地形的影响下,海南岛东岸会形成强劲的沿岸上升流^[22-25]。琼东沿岸上升流的中心位置紧靠岸边,低温区出现在 $18^{\circ}30' \sim 20^{\circ}30'N$ 、 $112^{\circ}30'E$ 以西的 30 m 等深线以浅的海域。琼东沿岸上升流自 4 月开始出现,6—8 月最强,9 月减弱,10 月以后消失,持续时间约 150 d。

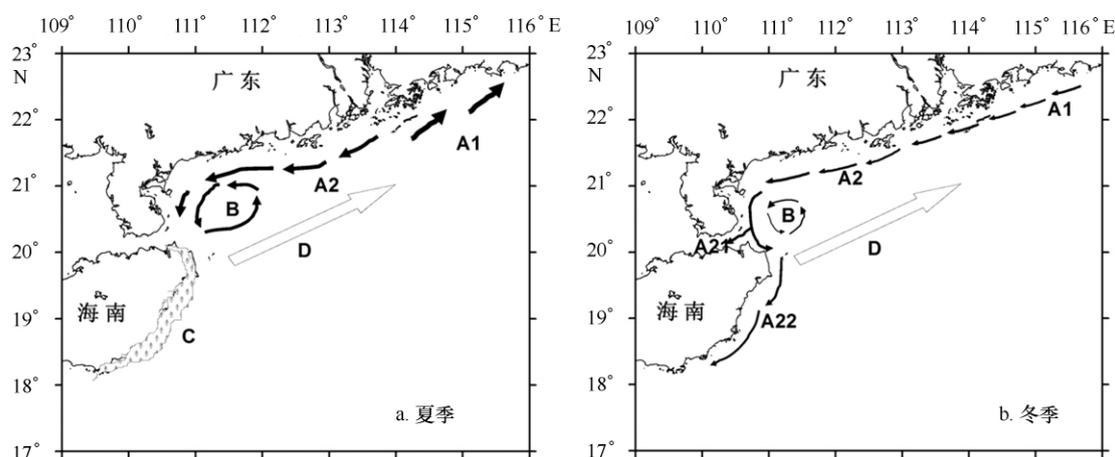


图 1 南海西北部陆架区海流示意图

A1. 粤东沿岸流, A2. 粤西沿岸流, A21, A22. 广东沿岸流分支, B. 冷涡, C. 琼东上升流, D. 南海暖流

2.2 样品采集与分析

共进行了 4 个季节的浮游动物调查,2006 年 7 月 19 日至 8 月 7 日(夏季)、2006 年 12 月 26 日至 2007 年 1 月 18 日(冬季)、2007 年 4 月 12 日至 25 日(春

季)和 2007 年 10 月 6 日至 29 日(秋季)分别使用“实验 3”和“科学一号”综合科学调查船进行。大面站调查共设置 13 个断面 82 个测站。根据地形和水环境将调查区域划分为 3 个亚区(见图 2), I: 粤西近海区,

水深小于 50 m, 共有 16 个测站, 在该区域终年为沿岸冲淡水团和近岸混合水团所控制; II: 琼东近海区, 水深小于 100 m, 共有 24 个测站, 在该区域主要受南海表层水团所影响, 在夏季存在明显的上升流, 在冬、春季也受广东沿岸流的影响; III: 粤西—琼东外海区, 共有 42 个测站, 在该区域终年为南海表层水团所控制^[26]。此外, 于 2006 年 8 月 6 至 7 日在海南岛东南部近岸上升流区设置连续站 1 个(水深约 70 m; 图 2) 进行浮游动物的昼夜连续分层采集。

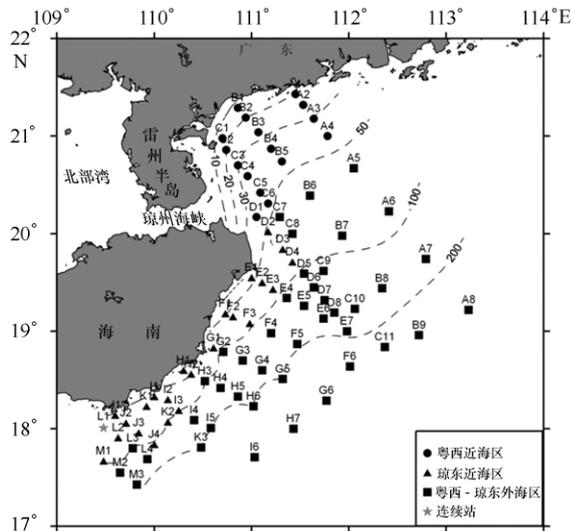


图 2 浮游动物调查站位

浮游动物大面站样品在水深 30 m 以浅海域使用浅水 I 型浮游生物网(网口内径 50 cm、网长 145 cm、网目孔径 0.505 mm)、在 30 m 以深海域使用大型浮游生物网(网口内径 80 cm、网长 280 cm、网目孔径 0.505 mm)进行垂直拖网采集, 网口系有 438115 型流量计 (HYDRO-BIOS)。在水深大于 200 m 时拖网深度为 200 m, 在水深小于 200 m 时从底至表拖曳。连续站采样每 2 h 进行一次, 使用安装闭锁器的大型浮游生物网分 0~20 m, 20~40 m, 40~60 m 三个水层采集。样品立即用 5% 的甲醛溶液固定保存。中华哲水蚤的 IV 期桡足幼体 (CIV) 至成体在体视显微镜下进行鉴定和计数, 无节幼虫 (N) 至 III 期桡足幼体 (C III) 由于采集网具的网孔太大而基本漏掉了。

同步进行了水温、盐度环境参数的调查, 使用 Seabird 公司生产的 CTD 测定。春、夏季进行了叶绿素 a 的测定: 现场采水后, 经 0.70 μm GF/F 玻璃纤维滤膜过滤, 丙酮萃取后使用 Turner-Design 10 型荧光计测定。

3 结果

3.1 调查海域的环境特征

3.1.1 温度的水平和断面分布

温度被认为是影响中华哲水蚤种群分布的主要环境因素^[5,27], 调查海域属于热带和亚热带海区, 温度更是中华哲水蚤分布的制约因素。关于中华哲水蚤分布的适温上限, 不同学者有不同的见解, 但都不超过 27 °C^[5,27-29]。调查海域春季、夏季、秋季、冬季表层温度的变化范围分别为 20.73~28.79 °C, 23.71~30.74 °C, 26.61~28.48 °C, 18.77~25.27 °C, 平均值分别为 (25.32±2.06), (28.62±1.53), (27.37±0.46), (22.95±1.54) °C。调查海域 4 个季节表层温度的分布趋势基本是自北往南递增, 近岸低、外海高, 尤其春季和冬季更为明显(见图 3 a, d)。粤西近海区春、冬季的表层水温分别小于 24, 23 °C。夏季表层温度的水平分布不均匀, 在雷州半岛东部的冷涡区和琼东近岸上升流区各形成了一个水温小于 27 °C 的低温区, 尤其低温中心的 C4 和 C5 站的表层温度仅有 24 °C, 而粤西和海南岛东部外海海域表层温度几乎达 30 °C(见图 3b)。秋季表层温度分布均匀, 夏季出现的低温区减弱或消失, 调查海域的水温普遍大于 27 °C(见图 3c)。

C 断面是横跨雷州半岛东部海域冷涡区的一个断面(图 2), 其近岸的测站是中华哲水蚤春季和夏季的分布密集区。图 4 是 4 个季节 C 断面温度分布图。春季、夏季和冬季 C 断面温度分布趋势为近岸低、外海高。春季和冬季近海温度垂直分布均匀, 前者小于 24 °C(见图 4a), 后者小于 23 °C(见图 4d)。夏季近海温度等值线明显由外海往近岸向上抬升, 冷涡区被涌升的低温水体占据, 除表层外, 温度小于 26 °C(见图 4b)。秋季 50 m 以浅水层温度分布均匀, 近海与外海差别不明显, 温度大于 27 °C(见图 4c)。

3.1.2 温度和盐度的季节与区域变化

表层平均温度季节变化明显, 夏季最高、秋季其次、冬季最低(见图 5a)。冬、春季粤西近海区的平均表层水温明显低于琼东近海区和粤西—琼东外海区, 而秋季 3 个亚区的平均表层水温差别不明显。

表层平均盐度季节变化不明显, 以秋季较低。4 个季节粤西近海区的平均表层盐度均明显低于琼东近海区和粤西—琼东外海区(见图 5b)。

3.1.3 连续站温度和盐度的垂直分布

图 6 是连续站中华哲水蚤出现最多的 3 个时刻的温度和盐度的垂直分布, 从图中可以看出, 温度垂

直变化显著,存在明显的跃层,水温从 0 m 的大约 28 °C 迅速下降到 20 m 的 24 °C 左右,在 20 m 以下水层则缓慢下降,底层约为 23.5 °C;而盐度垂直变化不

大,仅在 20 m 以浅水层从上往下稍微升高,在 20 m 以深水层均匀一致。

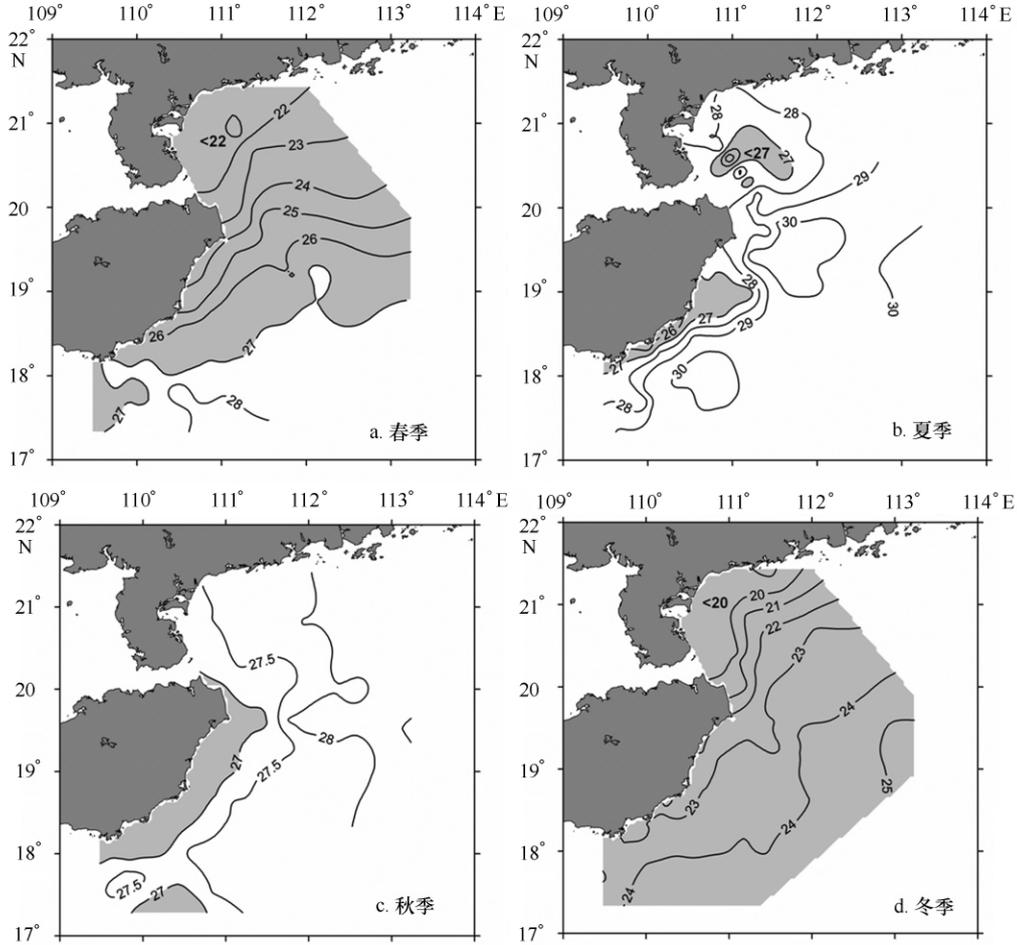


图 3 4 个季节表层温度(°C)水平分布
阴影部分为水温小于 27 °C 的区域

3.1.4 水柱叶绿素 a 平均浓度的区域分布

从表 1 可以看出,调查海区的水柱叶绿素 a 平均浓度的区域分布差异显著,粤西近海区明显高于另外两个海区,琼东近海区又稍高于粤西—琼东外海区。

表 1 不同区域水柱叶绿素 a 平均浓度(mg/m³) 平均值的比较

区域	春季	夏季
粤西近海区	1.19 ± 0.66	0.90 ± 0.84
琼东近海区	0.26 ± 0.11	0.46 ± 0.26
粤西—琼东外海区	0.17 ± 0.12	0.22 ± 0.29

3.2 中华哲水蚤的分布及变化

3.2.1 中华哲水蚤的水平分布及季节变化

中华哲水蚤是南海西北部陆架区春、夏季桡足类

的优势种。春季中华哲水蚤在 51 个站出现,出现频率为 0.62,丰度变化范围为 0~501.41 个/m³,平均值为(23.00 ± 77.78) 个/m³,占桡足类总丰度(67.08 个/m³)的 34.29%,居首位,中华哲水蚤广泛分布于粤西和琼东近海,在粤西近海形成密集区,而在海南岛东部外海数量十分稀少(见图 7a)。夏季仅在 31 个调查站出现,出现频率为 0.38,丰度变化范围为 0~269.74 个/m³,平均值为(13.74 ± 45.10) 个/m³,占桡足类总丰度(111.35 个/m³)的 12.34%,仅次于强次真哲水蚤(*Subeucalanus crassus*)居第二位,中华哲水蚤主要分布于粤西和海南岛南部近海,密集区仍然位于粤西近海(见图 7b)。秋季仅在一个站出现,平均丰度为 0.001 个/m³(见图 7c)。冬季中华哲水蚤在整个调查区均未出现(见图 7d)。

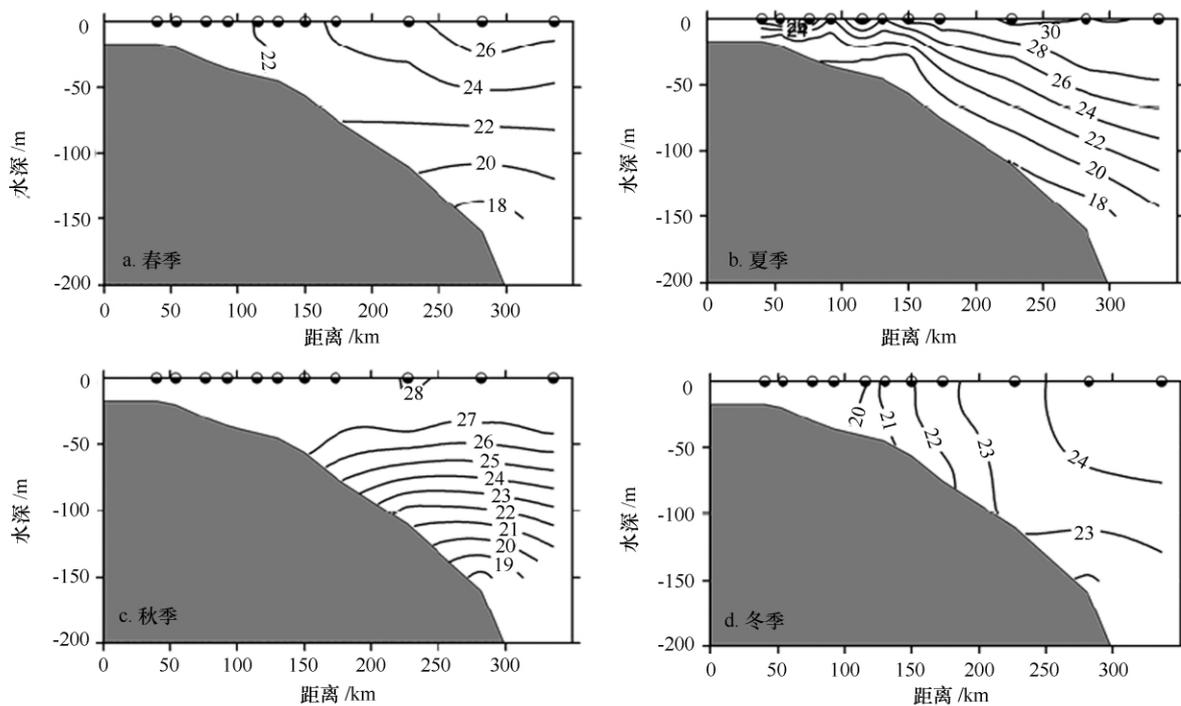


图4 4个季节C断面温度(°C)分布

南海西北部陆架区中华哲水蚤的丰度季节变化相当显著,以春季最高,夏季降低,秋季消失,冬季仍未出现(见图5c)。南海西北部陆架区中华哲水蚤的区域分布差异也十分显著,粤西近海区春、夏季中华哲水蚤的平均丰度分别为 (115.63 ± 145.93) , (68.12 ± 84.00) 个/ m^3 ,远高于琼东近海区和粤西—琼东外海区。琼东近海区和粤西—琼东外海区春、夏季中华哲水蚤的平均丰度分别仅为 (1.04 ± 1.40) , (1.24 ± 2.25) 个/ m^3 和 (0.30 ± 0.44) , (0.16 ± 0.52) 个/ m^3 。琼东近海区和粤西—琼东外海区春、夏季中华哲水蚤的平均丰度差异都不大。

3.2.2 连续站中华哲水蚤的昼夜垂直分布

在连续站样品中,中华哲水蚤以桡足幼体的比例占多数,为77.4%,成体仅占22.6%。由于受水流和中华哲水蚤不均匀分布等因素的影响,连续站不是每个时刻都能采到中华哲水蚤,但仍然可以大致看出中华哲水蚤没有明显的昼夜垂直移动,它仅分布于20m以深水层,特别是低温的40m以深水层,在20m以浅水层没有出现,呈现底层分布的特征(见图8)。

4 讨论

4.1 中华哲水蚤的季节分布及其调控机制

中华哲水蚤是暖温种^[30-31]。它是黄海和东海近

岸水域的优势种,这些水域也是中华哲水蚤的分布中心,向东北分布到日本本州的东、西两岸,向南分布到中国南海北部沿岸^[28,31]。中华哲水蚤在台湾海峡中、北部及其以北海区是全年分布的^[4,7-8,10-11,31-32]。台湾海峡南部及以南海区是中华哲水蚤的季节分布区^[4,11,28,30-31]。台湾海峡南部及以南海区的中华哲水蚤的分布是与冬、春季南下的沿岸流有关,其冬季的种群来自东海沿岸。因此,中华哲水蚤可以作为沿岸流的生物指示种^[4,11,31]。此外,中华哲水蚤在南海西北部陆架区呈明显的近海分布特征(见图7),也表明其分布与沿岸流有关。台湾海峡是中华哲水蚤从东海沿岸进入南海北部沿岸的通道。冬春季东北季风期间,从北往南,中华哲水蚤开始出现的时间是逐渐推迟的。在台湾海峡中部的厦门港开始出现的时间为11月^[30,33],在台湾海峡南部的东山湾开始出现的时间为11、12月^[30,34],位于珠江口的香港水域开始出现的时间为1月^[4]。中华哲水蚤从台湾海峡南部随沿岸流漂流到香港水域需要1~2个月时间。粤西近海到香港的距离与香港到台湾海峡南部的距离大致相等,因此估计中华哲水蚤在2、3月即可进入粤西近海。本文的冬季调查(12—1月)中华哲水蚤在调查海域还未出现,但春季调查(4月)中华哲水蚤已经随沿岸流分布到海南岛南部的研究结果进一步证

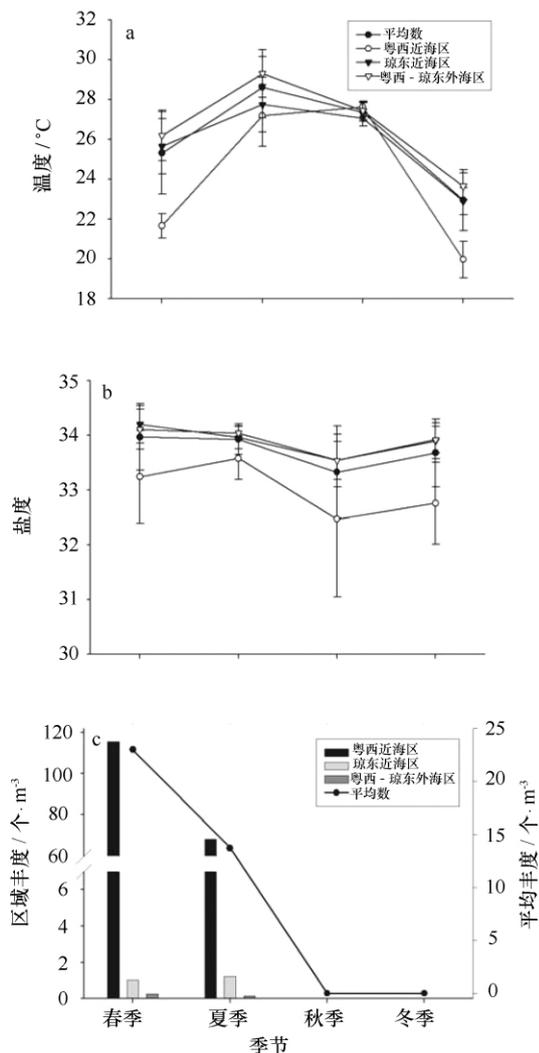


图5 平均表层温度(a)、盐度(b)和中华哲水蚤丰度(c)的季节变化

实了这个推测。张武昌等^[14]也发现2—3月粤西近海已出现中华哲水蚤。夏季调查(7—8月)期间在粤西近海中华哲水蚤的种群丰度仍然比较高,张武昌等^[14]在8月末9月初的调查也发现类似的结果。综上所述,在粤西近海中华哲水蚤出现的时间为2、3月至8、9月,与厦门港出现的时间为11—6月^[30,33]长短差别不大,明显长于在香港水域出现的时间(1—3月)^[4]。一些学者认为南海北部沿岸由于春季水温迅速升高,到6、7月中华哲水蚤已经消失^[28],本文的研究结果与之不一致。

4月份以后,珠江口香港水域中华哲水蚤已经没有出现^[4],表明由于季风的转换,粤东沿岸流流向开始改变,已不再向粤西近海输送中华哲水蚤的东海种群,仍然停留在粤西近海的中华哲水蚤种群完全依赖

自身的繁殖来维持一定的种群密度,时间长达五六个月之久,可到9月份季风开始转换以致上升流减弱以后种群才消失。

温度是影响中华哲水蚤种群分布的重要因素^[3,28,33]。虽然中华哲水蚤属于暖温种,但其耐受温度的范围是比较宽的,陈清潮^[28]认为中华哲水蚤的适温范围是5~24°C,一些学者^[5,27]认为它的适温范围是1~27°C。中华哲水蚤繁殖的温度上限大约是23°C^[7,29,35]。Wang等^[5]和Li等^[29]分析了中国海现场调查的文献资料,认为中华哲水蚤出现的温度上限为26~27°C。黄加祺和郑重^[36]在实验室内观察到了中华哲水蚤雄性和雌性分别在温度达到26°C和28°C时即濒临死亡的现象。在实验条件下,在高温27°C时,中华哲水蚤的孵化率是低的^[32,37];V期桡足幼体的存活率也是低的^[6]。春季在粤西至琼东近海的水温在中华哲水蚤的适温范围之内(见图3a),因此它分布范围最广、丰度最大(见图5c,图7)。

夏季在强烈的太阳辐射作用下,上层海水显著升温,但同时西南季风和地形作用下在雷州半岛东部近海和琼东近岸会形成强劲的冷涡和上升流,在这些区域水温是比较低的,表层水温可在27°C以下(见图3b)。因此中华哲水蚤的分布范围和丰度虽然比春季有所减小和降低,但仍然维持了较高的丰度,特别在粤西近海。一些学者发现夏季当黄海近岸和上层海水温度升高时,中华哲水蚤分布中心会迁移到黄海冷水团,黄海冷水团成为中华哲水蚤度夏的避难所^[5,38]。南海西北部陆架区的中华哲水蚤在夏季高温季节仍出现于雷州半岛东部的冷涡区和琼东沿岸上升流区,表明这些上升流区成为了中华哲水蚤度夏的避难所。

秋季西南季风消失,冷涡和上升流强度减弱或消失,调查海域50m以浅水层水温分布趋向均匀,水温大于27°C(见图4c),超过了中华哲水蚤的适温范围上限,中华哲水蚤因耐受不了高温死亡而消失。而且,水温更超过中华哲水蚤的繁殖适温上限,种群也不能得到补充。有研究者认为,福建沿海的中华哲水蚤在高温季节期间的消失,除了自然死亡和被捕食外,也有可能是向外海深层移栖^[28,30]。Nonomura等^[39]也发现日本相模湾(Sagami Bay)中华哲水蚤的丰度在中水层(200~1000m)仍然很高。但我们认为,南海西北部中华哲水蚤在秋季消失的原因是由于死亡,而不太可能是迁移到深层,因为我们的调查范围已经覆盖了大陆架水域,而且采样水深达到了200m,也基

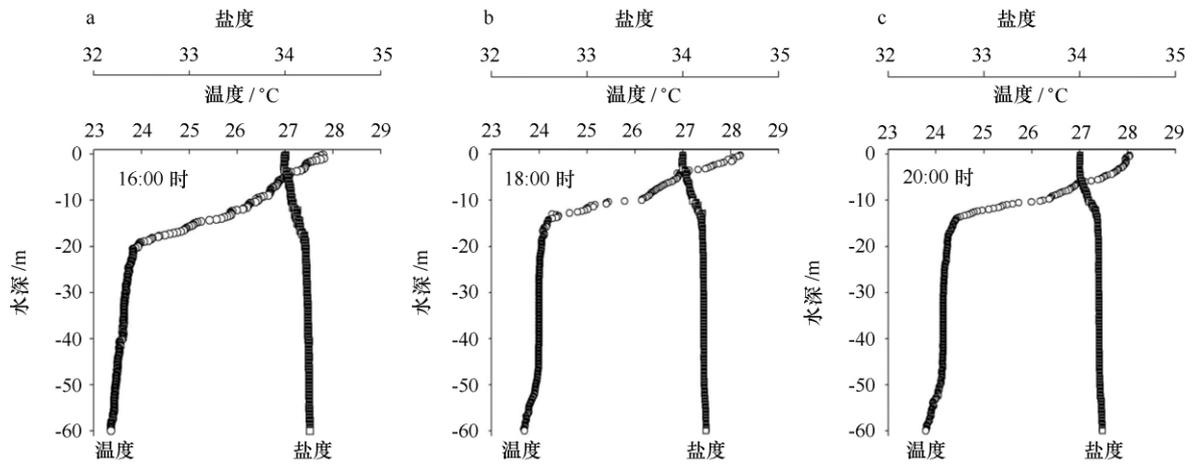


图6 连续站温度和盐度的垂直分布

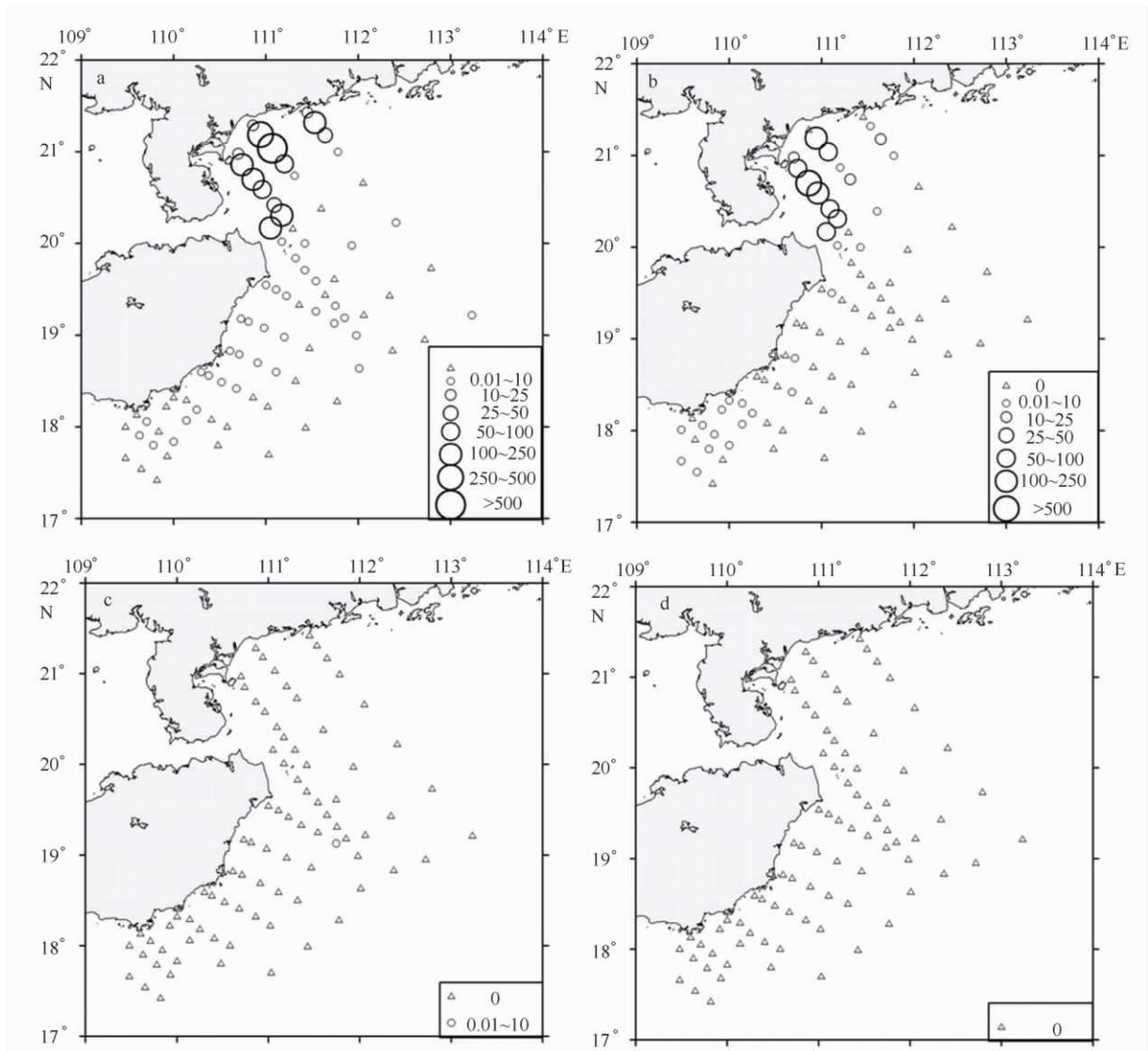


图7 4个季节中华哲水蚤丰度(个/m³)水平分布

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季

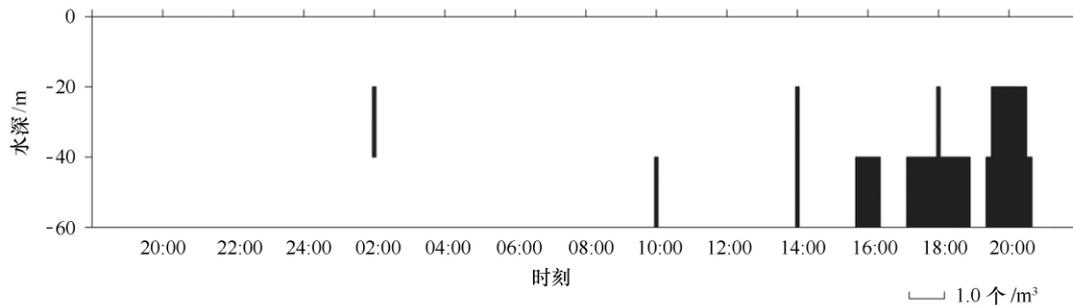


图8 2006年8月6—7日连续站中华哲水蚤的昼夜垂直分布

本没有发现中华哲水蚤。南海北部的中华哲水蚤分布于沿岸水域^[2,28,31],它们在高温季节迁移到外海深层的可能性不大。

冬季是调查海域4个季节之中水温最低的(图3d,图5a),最适合中华哲水蚤分布、繁殖和发育,但未见中华哲水蚤出现,这是由于秋季中华哲水蚤因死亡消失后,冬季调查期间中华哲水蚤的东海种群尚未随沿岸流进入调查海域。这表明南海西北部不存在中华哲水蚤地方种群,也不存在休眠卵,也进一步证实了中华哲水蚤不大可能在高温季节迁移到外海深层。南海北部的中华哲水蚤种群必须每年冬春季由广东沿岸流连接东海沿岸流补充。

4.2 中华哲水蚤对海流的指示作用

浮游动物的分布受海流或水团所影响,反过来可以利用浮游动物的分布特征来阐明海流或水团的动态,特别是在比较复杂的交汇区域,水团发生变性,一般用温、盐度难以判别海流和水团时,用浮游生物指示种的分布有助于了解海流或水团的移动和水文性质。上面已经提到中华哲水蚤可以作为冬春季东北季风期间南海北部沿岸流的生物指示种。本文的冬季调查时间是12月下旬至1月中旬,基本上属于初冬,由于调查海域离台湾海峡还有较长一段距离,冬季调查期间中华哲水蚤没有出现的原因是由于源于东海的沿岸流还没有推移到调查海域。再结合春季中华哲水蚤已广泛分布于调查区域的沿岸水域的现象进行分析,从中可以清楚了解到冬春季源于东海的沿岸流有关流向、时空变化和影响范围等信息。另外,中华哲水蚤同样可作为夏季西南季风期间上升流的生物指示种。夏季西南季风期间中华哲水蚤基本上仅分布于雷州半岛东部的冷涡区和琼东沿岸上升流区(图7b),并伴随着上升流的减弱过程而消失。尽管中华哲水蚤不是来源于深层冷水,但上升流

的低温环境为中华哲水蚤的度夏提供了避难所,因此对上升流也具有良好的指示作用。He等^[40]和Guo等^[41]也分别指出,中华哲水蚤对浙江沿岸和台湾海峡南部夏季上升流时期的低温涌升水具有良好指示作用。

陈清潮^[31]发现,受北上的我国台湾暖流所影响的浙东外海没有出现中华哲水蚤,或者仅有少量出现于锋面区。Hwang等^[42]和Hsiao等^[43]也发现在受黑潮暖流影响的台湾南部和东部海域也未出现中华哲水蚤。同样,在南海西北部受南海暖流或外海水影响的粤西和琼东外海区中华哲水蚤也仅有少量分布。

4.3 中华哲水蚤的区域分布特征与影响因素

在南海西北部陆架区,粤西近海区是中华哲水蚤种群密集区,其丰度远高于另外两个区(见图5c,图7),与3个原因有关:一是更为合适的相对的低温低盐环境(见图3,图5a,b);二是食物丰富,粤西近海区的水柱叶绿素a含量相对较高^[44](见表1);三是适宜的水深,Uye^[3]发现在水深20~70m的位置中华哲水蚤的丰度最大。

4.4 中华哲水蚤的垂直分布对水温变化的响应

中华哲水蚤在不同海区和季节的昼夜垂直分布特征不同,温度是重要影响因素。夏季琼东沿岸上升流区的中华哲水蚤的昼夜垂直分布特征与在黄海冷水团度夏过程中的中华哲水蚤一样^[38],昼夜垂直移动行为消失,呈底层分布,以躲避表层高温(见图6)的伤害。而在水温较低的本内海中华哲水蚤的晚期桡足幼体(CIV,CV)和雌性成体呈现显著的昼夜垂直移动,雄性成体尽管没有昼夜垂直移动,但也并非呈底层分布^[45-46]。此外,琼东沿岸上升流区中华哲水蚤的种群结构与黄海冷水团的度夏种群相似,晚期桡足幼体的数量比例明显大于成体^[38]。

5 结论

(1)南海西北部陆架区中华哲水蚤的时空分布格

局受季风驱动的海流所控制。它在冬春季东北季风期由沿岸流从东海沿岸携带而来,呈近岸分布;夏季西南季风时期,雷州半岛东部近海的冷涡和琼东沿岸上升流为中华哲水蚤提供了度夏的避难所;入秋以后,随着季风的转换,冷涡和上升流的强度减弱,低温区消失,中华哲水蚤最终由于耐受不了高温($>27^{\circ}\text{C}$)而死亡,以致完全消失。因此,中华哲水蚤对冬春季东北季风时期的沿岸流和夏季西南季风时期的上升流均具有良好的指示作用。

综合分析,粤西近海中华哲水蚤出现的时间为2、3月至8、9月,4月份以后在没有得到东海种群补充的情况下,完全依赖自身的繁殖来维持一定的种群密度,时间长达五六个月之久。

(2)中华哲水蚤的区域分布差异十分显著,粤西近海是中华哲水蚤分布的密集区。

(3)夏季琼东沿岸上升流区的中华哲水蚤没有昼夜垂直移动行为,呈底层分布,以躲避表层高温的伤害。

参考文献:

- [1] 陈清潮,章淑珍. 黄海和东海的浮游桡足类:I. 哲水蚤目[J]. 海洋科学集刊, 1965, 7: 20—137.
- [2] Hulsennann K. *Calanus sinicus* Brodsky and *C. jashnivi*, nom. nov. (Copepoda: Calanoida) of the North-west Pacific Ocean: a comparison, with notes on the integumental pore pattern in *Clanus* s. str. [J]. Invertebrate Taxonomy, 1994, 8: 1461—1482.
- [3] Uye S. Why does *Calanus sinicus* prosper in the shelf ecosystem of the Northwest Pacific Ocean? [J]. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57: 1850—1855.
- [4] Hwang J S, Wong C K. The China Coast Current as a driving force for transporting *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) from its population centers to waters off Taiwan and Hong Kong during the winter northeast monsoon period [J]. Journal of Plankton Research, 2005, 27: 205—210.
- [5] 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.
- [6] Pu X M, Sun S, Yang B, et al. The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer [J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26(9): 1049—1057.
- [7] Huang C, Uye S, Onbe T. Geographic distribution, seasonal life cycle, biomass and production of a planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan and its neighboring Pacific Ocean [J]. Journal of Plankton Research, 1993, 15(11): 1229—1246.
- [8] 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.
- [9] 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(Suppl.): 55—63.
- [10] Xu Z L, Chen B J. Seasonal distribution of *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) in the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 26(3): 150—159.
- [11] 黄加祺,李少菁,陈刚. 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.
- [12] Tam P F, Wong C K, Chen Q C, et al. Planktonic copepods of the Zhujiang estuary, 1991—1996 [J]. National Taiwan Museum Special Publication Series 2000, 10: 87—100.
- [13] Li K Z, Yin J Q, Huang L M, et al. Spatial and temporal variations of mesozooplankton in the Pearl River estuary, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67: 543—552.
- [14] 张武昌,高尚武,孙军,等. 南海北部冬季和夏季浮游哲水蚤类群落 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 448—458.
- [15] 黄企洲,王文质,李毓湘,等. 南海海流和涡旋概况 [J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 1—9.
- [16] 杨仕瑛,鲍献文,陈长胜,等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制 [J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1—8.
- [17] 管秉贤. 南海暖流—广东外海一支冬季逆风流动的海流 [J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(2): 117—127.
- [18] 管秉贤. 南海暖流研究回顾 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(3): 322—329.
- [19] 李立. 南海上层环流观测研究进展 [J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 114—125.
- [20] Wang D X, Hong B, Gan J P, et al. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter [J]. Deep-Sea Research I, 57: 1206—1221.
- [21] 管秉贤,袁耀初. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述:I. 南海和台湾以东海域 [J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 1—16.
- [22] 韩舞鹰,王明彪,马克美. 我国夏季最低表层水温海区——琼东沿岸上升流区的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(3): 267—275.
- [23] 吴日升,李立. 南海上升流研究概述 [J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269—277.
- [24] Jing Z Y, Qi Y Q, Hua Z L, et al. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 467—478.
- [25] Su J, Pohlmann T. Wind and topography influence on an upwelling system at the eastern Hainan coast [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114, C06017, doi:10.1029/2008JC005018.

- [26] Li F Q, Li L, Wang X Q, et al. Water masses in the South China Sea and water exchange between the Pacific and the South China Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 1(1): 19—24.
- [27] 曹文清, 林元烧, 杨青, 等. 我国中华哲水蚤生物学研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(Sup 2): 54—61.
- [28] Chen Q C. Zooplankton of China Seas (1) [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [29] Li C, Sun S, Wang R, et al. Feeding and respiration rates of a planktonic copepod (*Calanus sinicus*) overwintering in Yellow Sea Cold Bottom Waters[J]. Marine Biology, 2004, 145: 149—157.
- [30] 李少菁. 福建沿海太平洋哲水蚤(*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.
- [31] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率和个体大小的形态研究[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(3): 272—288.
- [32] Zhang G T, Sun S, Zhang F. Seasonal variation of reproduction rates and body size of *Calanus sinicus* in the Southern Yellow Sea, China[J]. Journal of Plankton Research, 2005, 27(2): 135—143.
- [33] 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.
- [34] 林景宏, 陈瑞祥. 东山湾浮游桡足类的分布[J]. 海洋通报, 1992, 11(4): 41—46.
- [35] Uye S. Temperature dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the Laboratory[J]. Hydrobiologia, 1988, 167/168: 285—293.
- [36] 黄加祺, 郑重. 温度和盐度对厦门港几种桡足类存活率的影响[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(2): 161—167.
- [37] Zhang G T, Sun S, Yang B. Summer reproduction of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Yellow Sea: influences of high surface temperature and cold bottom water[J]. Journal of Plankton Research, 2007, 29(2): 179—186.
- [38] 孙松, 王荣, 张光涛, 等. 黄海中华哲水蚤夏机制初探[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(浮游动物研究专辑): 92—99.
- [39] Nonomura T, Machida R J, Nishida S. Stage—V copepodites of *Calanus sinicus* and *Calanus jashnovi* (Copepoda: Calanoida) in mesopelagic zone of Sagami Bay as identified with genetic markers, with special reference to their vertical distribution[J]. Progress in Oceanography, 2008, 77, 45—55.
- [40] He D H, Yang G M, Shen W L, et al. Study of zooplankton ecology in Zhejiang coastal upwelling system—Species distribution and diversity of zooplankton[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 7(2): 304—313.
- [41] Guo D H, Huang J Q, Li S J. Planktonic copepod compositions and their relationships with water masses in the southern Taiwan Strait during the summer upwelling period[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31: S67—S76.
- [42] Hwang J S, Dahms H U, Tseng L C, et al. Intrusions of the Kuroshio Current in the northern South China Sea affect copepod assemblages of the Luzon Strait[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 352: 12—27.
- [43] Hsiao S H, Fang T H, Shih C T, et al. Effects of the Kuroshio Current on copepod assemblages in Taiwan[J]. Zoological Studies, 2011, 50(4): 475—490.
- [44] 李开枝, 尹健强, 黄良民, 等. 粤西—琼东海域住筒虫属(*Fritillaria*)的种类描述及其数量分布[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 76—85.
- [45] Uye S, Huang C, Onbe T. Ontogenetic diel vertical migration of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan[J]. Marine Biology, 1990, 104: 389—396.
- [46] 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.

Effects of coastal current and upwelling on the distributions of *Calanus sinicus* on the northwest continental shelf of the South China Sea

YIN Jianqiang¹, HUANG Liangmin¹, LI Kaizhi¹, LIAN Shumin², LI Chaolun³, ZHANG Jianlin¹

(1. Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 3. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: *Calanus sinicus* is a planktonic copepod with wide geographical distribution on the continental shelf of the northwest Pacific. It plays an important role in marine system. Four cruises were conducted from July 2006 to October 2007 in order to understand the seasonal and horizontal variations with the influences of monsoon, ocean cur-

rent and temperature on its distributions on the northwest continental shelf of the South China Sea. The diel vertical migration (DVM) of *C. sinicus* was studied at one station located in the southeast of Hainan Island during summer. The results showed that the distribution of *C. sinicus* abundance varied seasonally and regionally. The mean of *C. sinicus* abundance was high with 23.30 ± 77.78 ind /m³ in spring, and decreased to 13.74 ± 45.10 ind /m³ in summer. It disappeared in autumn and did not enter into the study area during the investigated period in winter. The surveyed area was divided into three sub-regions in order to further analyze the regional difference, including the east inshore waters of Leizhou Peninsula, the east inshore waters of Hainan Island and the offshore waters from Leizhou Peninsula to Hainan Island. The average abundance of *C. sinicus* within the inshore waters of Leizhou Peninsula was reached to be $115.63 (\pm 145.93)$ and $68.12 (\pm 84.00)$ ind/m³ in spring and summer, respectively, which was higher than those of the inshore Hainan Island and the offshore from Leizhou Peninsula to Hainan Island. The behavior of *C. sinicus* DVM was not found in the upwelling area in summer. *C. sinicus* seemed to be mostly habited in the bottom layer in order to avoid the damage of high temperature in the surface layer. The study area is the seasonal distribution zone of *C. sinicus*. Our findings suggested that *C. sinicus* was transported from the East China Sea to the northwest continental shelf of South China Sea by the Guangdong Coastal Current, which was driven by the northeast monsoon in winter and spring. The presence of a cold eddy, in addition to coastal upwelling driven by the southwest monsoon, provided suitable survival conditions for *C. sinicus* in summer. This species disappeared in autumn due to high temperatures (>27 °C) and did not begin to enter into the northwest continental shelf of South China Sea from the East China Sea during the period of investigation in winter. *C. sinicus* could be considered as an indicator species for China Coastal Current driven by the northeasterly monsoon, and coastal upwelling by the southwesterly monsoon in the northern South China Sea.

Key words: *Calanus sinicus*; northern South China Sea; distribution; monsoon; ocean current; indicator species