

# 夏季南黄海浅海潮汐锋对小拟哲水蚤和 叶绿素 *a* 分布的影响\*

刘光兴<sup>1,2</sup> 孔 维<sup>2</sup> 杨桂朋<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266100;  
3. 中国海洋大学化学化工学院 青岛 266100)

**摘要** 为分析夏季南黄海潮汐锋及其对浮游动物和初级生产分布的影响, 本文利用 2011 年夏季航次的水文数据、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)样品及叶绿素 *a* 资料, 对南黄海潮汐锋区位置及小拟哲水蚤丰度和叶绿素 *a* 分布进行了研究, 探讨了夏季南黄海潮汐锋对小拟哲水蚤丰度和初级生产分布的影响。结果表明, 在调查水域存在明显的浅海潮汐锋; 小拟哲水蚤丰度高值(18267 ind/m<sup>3</sup>)出现在锋区, 其低丰度值(1480 ind/m<sup>3</sup>)出现于锋区附近混合区, 两者之间相差 1 个数量级, 其丰度由远岸层化区至锋区逐渐升高。叶绿素 *a* 表层浓度高值(4.7 μg/L)出现在锋区附近层化区, 锋区叶绿素 *a* 表层浓度较低(2.2 μg/L)。锋区中出现小拟哲水蚤丰度高、表层叶绿素 *a* 浓度较低的现象, 表明桡足类的摄食压力对初级生产具有明显影响。可见, 潮汐锋是影响南黄海浮游生物分布的重要驱动因子。本研究可为深入探讨潮汐锋对跨锋区生物要素分布乃至海洋生态系统结构与功能的影响提供重要依据。

**关键词** 潮汐锋; 桡足类; 小拟哲水蚤; 初级生产; 南黄海

**中图分类号** Q959.223<sup>+</sup>.38 **doi:** 10.11693/hyhz20140400113

浅海潮汐锋是在增温季节由潮混合与层化共同作用形成的近岸垂直混合区与远岸层化区之间的过渡海域, 也被称为海洋锋(Simpson *et al.*, 1974)。因浅海潮汐锋具有独特的理化性质和生态作用, 遂引起国内外学者重视, 如欧美陆架区等海域浅海潮汐锋现象的发现(Fearnhead, 1975; Griffiths *et al.*, 1981), 我国黄海冷水团锋面及黄海潮汐锋与温度锋的关系研究(赵保仁, 1985; Lie, 1989)、浅海潮汐锋及跨锋区生态环境变化的研究(赵保仁, 1991)。浅海潮汐锋影响浮游植物、浮游动物及初级生产跨锋区分布的研究国内外均有报道。Floodgate 等(1981)研究表明春末夏初浮游植物生物量在锋区临近的层化区一侧出现最大值; Tarran 等(2011)认为硅藻最大生物量出现在锋区临近的混合区一侧; Schultes 等(2013)对法国韦桑岛潮汐锋中中型浮游动物群落受环境因子的影响做了研究, 发现中型浮游动物生物多样性最大值出现在

锋区, 而其生物量最大值出现在距离锋区 30 海里以西的层化区。国内也有学者针对潮汐锋区桡足类的分布及初级生产进行了研究(Liu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007; 傅明珠等, 2009), 发现强混合潮汐锋区环境有利于中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)聚集, 而叶绿素 *a* 浓度高值区位于锋区临近的层化区或混合区一侧。

以往潮汐锋区浮游动物分布的研究主要针对浮游动物群落或大型桡足类, 而跨潮汐锋区小型桡足类分布的研究报道并不多(Uye, 1992)。国内外学者对于小型桡足类在海洋生态系统中的重要作用均有报道, Hirst 等(2003)以及 Turner(2004)均指出小型桡足类在海洋生态系统食物网中处于重要环节; 我国学者李超伦等(2000)研究发现夏季小型桡足类对于初级生产的利用率远大于大型桡足类, 其是浮游动物摄食浮游植物的主要类群, 摄食量占桡足类群体总量的 84.0%—87.9%; 而王荣等(2002)也同样指出小型

\* 国家自然科学基金项目, 40876066 号, 41030858 号

通讯作者: 刘光兴, 教授, 博士生导师, E-mail: gxliu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2014-04-15, 收修改稿日期: 2014-06-25

桡足类在海洋生态系统中起着更为重要的作用, 目前有关黄海跨潮汐锋区小型桡足类分布的研究还未见报道, 因此开展潮汐锋对小型桡足类及叶绿素 *a* 分布的研究具有重要意义。

为研究夏季南黄海跨潮汐锋区小型桡足类及初级生产的分布规律, 我们于 2011 年夏初在南黄海进行调查, 以中国近海小型桡足类代表种同时也是本次调查的优势种小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)为对象, 研究了浅海潮汐锋对小拟哲水蚤丰度分布的影响, 同时也对跨锋区叶绿素 *a* 的分布特征进行了分析, 揭示了小型桡足类跨潮汐锋区的分布特征及其对跨潮汐锋区初级生产的影响, 为深入研究潮汐锋对海洋生态系统的影响提供了重要依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 调查时间和地点

2011 年 6 月 13 日至 17 日(夏季), 利用“东方红 2 号”科考船对南黄海进行调查, 调查区域分为四个断面: 36°N 断面、35°N 断面、34°N 断面及 33°N 断面, 具体调查站位及断面设置见图 1。

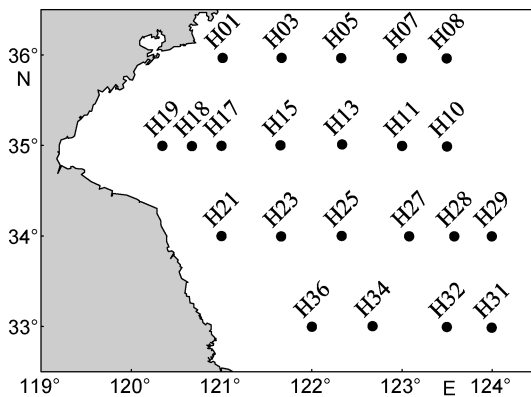


图 1 夏季南黄海调查站位

Fig.1 Survey area and sampling stations in the South Yellow Sea in summer

### 1.2 样品采集、处理方法

样品的采集、保存及数据分析均参照《海洋调查规范—海洋生物调查》(GB/T12763.6-2007)执行。采用 WP2 型浮游生物网(网口内径 0.25m<sup>2</sup>, 筛绢网孔径 202μm), 并由底至表层垂直采集浮游动物样品, 样品用 5%福尔马林海水溶液固定和保存, 带回实验室后浓缩, 在解剖镜下进行种类鉴定和计数。

各个水层温度数据由调查船配置的 CTD 现场测得。叶绿素 *a* 表层浓度数据由中国海洋大学化学化工学院杨桂朋老师提供。

### 1.3 数据分析方法

浅海潮汐锋温度锋划分标准(汤毓祥等, 1990):

$$\frac{\Delta T}{\Delta X} \geq 0.05^{\circ}\text{C}/\text{nmile}.$$

式中,  $\Delta T$  为不同站位间相同水层温度差, 单位 $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta X$  为站位间距离, 单位 nmile; 不同站位间相同水层温度梯度不小于 0.05 $^{\circ}\text{C}/\text{nmile}$  即满足锋区标准。

黄海潮汐锋区判定特征: 锋区混合强, 其西部为垂直混合区, 东部为层化区, 锋区站位上层等温线上翘至海面, 下层等温线下弯至陆架坡(赵保仁, 1987)。

小拟哲水蚤的丰度(abundance): 根据拖网时的滤水体积, 以每立方米水体中的小拟哲水蚤个体数表示(单位: ind/m<sup>3</sup>)。

叶绿素 *a* 浓度: 数据采用站位表层(5m 层)叶绿素 *a* 平均浓度表示(单位: μg/L)。

采用 Surfer 8.0 软件绘制调查区域站位图、表层温度与底层温度的平面分布图、温度垂直分布图以及小拟哲水蚤丰度的平面分布图。

## 2 结果

### 2.1 夏季南黄海潮汐锋位置的判定

现场实测结果显示, 在整个调查区域中表层水温变化范围为 17—20 $^{\circ}\text{C}$ (图 2a), 在苏北沿岸出现向东北方向延伸的高温水舌。虽然苏北沿岸高温水舌的边缘在海州湾外侧出现较密集等温线, 但其并非近岸混合区与远岸层化区之间形成的等温线较密集的过渡区, 而是高温水舌与近岸温度较低水团间的过渡区, 因此并不符合潮汐锋的特征, 整个调查区域表层温度由近岸至远岸没有出现等温线较密集区域, 所以调查区域表层温度锋现象不显著。底层温度水平分布在苏北沿岸外海至山东半岛东南部海域之间出现等温线较密集的区域(图 2b)。依据上述浅海潮汐锋温度锋划分标准  $\frac{\Delta T}{\Delta X} \geq 0.05^{\circ}\text{C}/\text{nmile}$ , 此区域 36°N 断面上 H01 与 H03 之间、35°N 断面上 H15 与 H17 之间、34°N 断面上 H23 与 H25 之间和 33°N 断面上 H34 与 H36 站位之间底层温度梯度满足锋区标准。

表 1 给出了各个断面临近底层温度锋区站位的表、底温度差。H23 站表底温度差为 0.01 $^{\circ}\text{C}$ , H36 站表底温度差为 0.02 $^{\circ}\text{C}$ , 两者均属于混合区特征, H15 站表底温度差达 13.36 $^{\circ}\text{C}$ , 属于层化区特征, 而介于表、底温度差 0.02 $^{\circ}\text{C}$  与 13.36 $^{\circ}\text{C}$  之间的其他站位中, 除 H34 站表底温度差为 1.33 $^{\circ}\text{C}$ (初步判定其为锋区站位)以外,

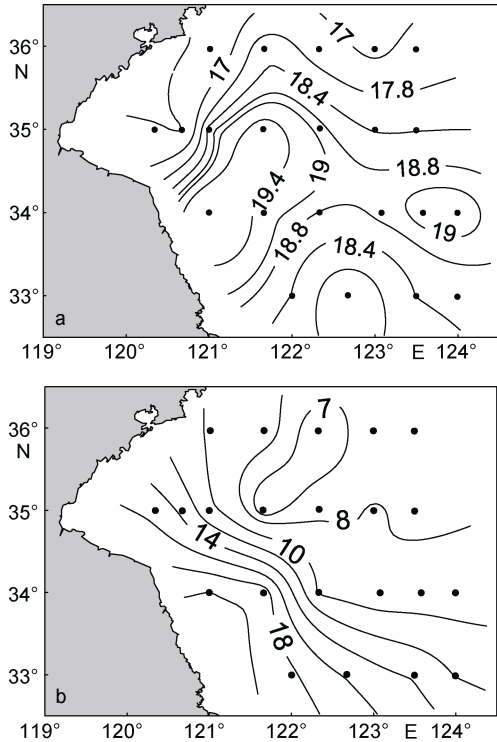


图2 调查区域表层温度、底层温度的平面分布  
(单位: °C, ●为调查站位)

a. 表层温度; b. 底层温度

Fig.2 Temperature distribution at surface and bottom of the survey area (● indicates the sampling stations)  
a. at surface; b. at bottom

其余站位表底温度差都较高, 均具备层化区特征。

由各断面温度垂直分布来看, 36°N 断面中 H03 站位等温线上层为水平层化特征, 下层垂直于陆架坡, 下层出现沿陆架坡涌升冷水, 涌升冷水被上层层化区域阻碍而没有到达海面, 因此 H03 站位不处于锋区; H01 站位等温线在上层为层化特征, 下层为混合区特征因而其整体为层化区站位(图 3a)。35°N 断面中 H15 站位等温线上层为层化特征, 下层延伸至陆架坡, 并存在涌升冷水, 涌升冷水受上层层化阻碍未到达海面, 因此 H15 不处于锋区; H17 站位等温线在上层为层化特征, 下层延伸至海底呈现混合特征, 因而其整体为层化区站位(图 3b)。34°N 断面中 H25 站位等温线上层为水平层化特征, 下层延伸至陆架坡, 且下层存在被上层阻碍未到达海面的涌升冷水, 因此 H25 不处于锋区; H23 站位等温线在上层与下层之间连通并延伸至海底, 其整体呈现出混合特征因而为混合站位(图 3c)。33°N 断面 H34 站位上层等温线向海面抬升, 下层下弯连接海底陆架坡, 其西侧为垂直于陆架坡的混合区, 东侧向远岸延伸逐渐成为层化区, 符合典型潮汐锋模式, 因此 H34 站位处于潮汐锋区; H36 站位等温线上层延伸至海面下层延伸至海底而处于混合区(图 3d)。36°N、35°N、34°N 断面不是跨潮汐锋断面, 33°N 断面为跨潮汐锋断面。

表1 调查区域临近底层温度锋站位表层与底层温度差

Tab. 1 The difference in temperature between the surface and bottom at the station near the bottom temperature front of the study area

断面	36°N		35°N		34°N		33°N	
站位	H01	H03	H15	H17	H23	H25	H34	H36
表底温差 $T/^\circ\text{C}$	6.14	9.54	13.36	8.11	0.01	9.03	1.33	0.02

## 2.2 夏季南黄海小拟哲水蚤丰度及叶绿素 *a* 浓度与潮汐锋的关系

各断面站位小拟哲水蚤丰度值显示(图 4), 36°N 断面中丰度高值区位于 H03 站位, 达到  $3200\text{ind}/\text{m}^3$ ; 35°N 断面中丰度高值区位于 H15 站位, 达到  $5524\text{ind}/\text{m}^3$ ; 34°N 断面丰度高值区位于 H25, 达到  $6947\text{ind}/\text{m}^3$ ; 33°N 断面中丰度高值区位于 H34 站位, 达到  $18267\text{ind}/\text{m}^3$  (也是整个调查水域的最高丰度值), 丰度低值出现在苏北沿岸海域及远岸黄海中部海域(分别为 H21 站的  $847\text{ind}/\text{m}^3$  和 H28 站的  $870\text{ind}/\text{m}^3$ ), 自苏北沿岸东南部外海至山东半岛南部外海方向, 小拟哲水蚤丰度值由  $18267\text{ind}/\text{m}^3$  逐渐降低至  $3200\text{ind}/\text{m}^3$ , 但相比其两侧丰度低值区形成一丰度高值带。跨锋区断面(33°N 断

面)中锋区站位(H34)西侧的混合区站位(H36)小拟哲水蚤丰度值为  $1480\text{ind}/\text{m}^3$ , 仅是锋区站位丰度值的 8.1%; 锋区站位(H34)东侧层化区站位(H31)小拟哲水蚤丰度值为  $5867\text{ind}/\text{m}^3$ , 是锋区站位丰度值的 32.1%; H32 站位处于锋区与层化区之间, 小拟哲水蚤丰度为  $14941\text{ind}/\text{m}^3$ , 与锋区站位丰度值较接近。

由调查区域各站位叶绿素 *a* 表层浓度的平面分布来看(图 5), 最高值出现在苏北沿岸东南部外海的 H32 站位, 达到  $4.7\mu\text{g}/\text{L}$ , 低值区出现在远岸黄海中部, 此区域浓度值低于  $0.2\mu\text{g}/\text{L}$ 。自苏北沿岸东南部外海至南黄海中部叶绿素 *a* 表层浓度逐渐降低, 在山东半岛东南部外海出现叶绿素 *a* 表层浓度较高区, 达到  $1\mu\text{g}/\text{L}$ , 此高值区周围出现一叶绿素 *a* 表层浓度低

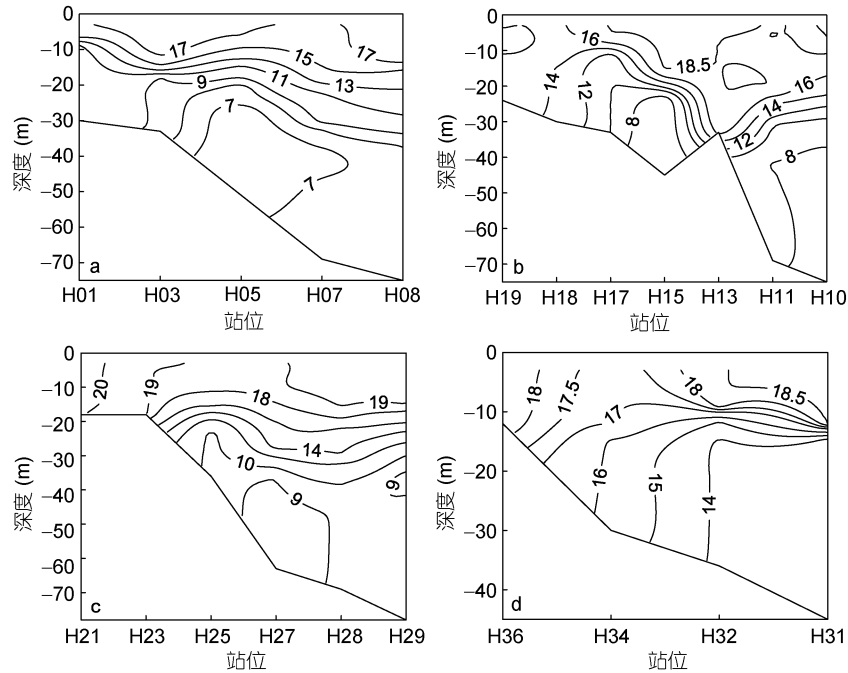


图 3 调查区域各断面温度垂直分布(单位: °C)

a、b、c、d 分别为 36°N、35°N、34°N、33°N 断面

Fig.3 Vertical distribution of temperature at different sections

a、b、c and d represent 36°N, 35°N, 34°N, and 33°N sections respectively

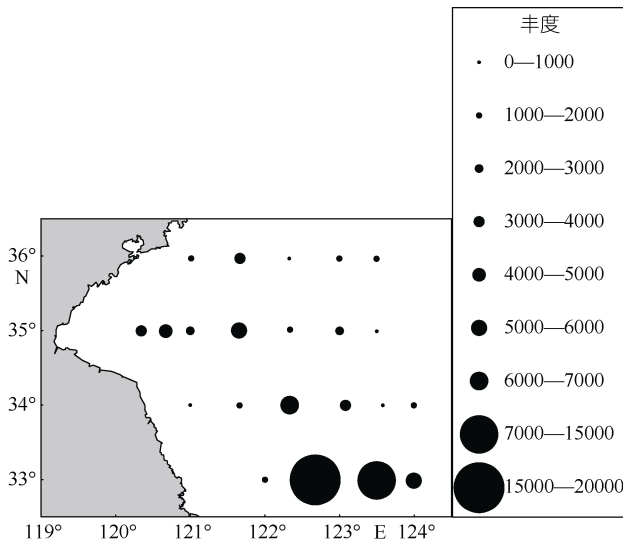


图 4 调查区域各断面站位小拟哲水蚤丰度(单位: ind/m³)

Fig.4 The abundance of *Paracalanus parvus* at different stations of the survey area

值带, 浓度为 0.2—0.4μg/L。跨锋区断面(33°N)上叶绿素 a 表层浓度高值出现在层化区站位(H32), 锋区站位(H34)及混合区站位(H36)叶绿素 a 表层浓度低于层化区站位, 分别为 2.2μg/L 和 2.0μg/L。在非跨锋区断面中, 叶绿素 a 平均浓度高值区出现在存在冷水涌升站位的临近站位(H05、H17 和 H23)。

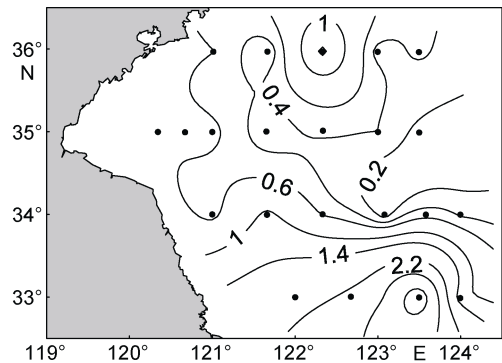


图 5 叶绿素 a 表层浓度水平分布(单位: μg/L, 为调查站位)

Fig.5 Horizontal distribution of the surface concentration of chlorophyll a (indicates the sampling stations)

比较调查区域小拟哲水蚤丰度值与叶绿素 a 表层浓度分布可见, 在跨锋区断面, 小拟哲水蚤丰度值高值区(H34)对应的叶绿素 a 表层浓度较低, 而叶绿素 a 表层浓度高值区(H32)对应的小拟哲水蚤丰度值较高。在非跨锋区断面中, 小拟哲水蚤丰度高值区(H03、H15 和 H25)对应的叶绿素 a 表层浓度较低, 叶绿素 a 表层浓度高值区(H05、H17 和 H23)对应的小拟哲水蚤丰度值较低, 其丰度值仅是高值区的 1/6—1/2。

### 3 讨论

本研究发现,跨潮汐锋断面中近岸混合区小拟哲水蚤丰度较锋区站位下降一个数量级,而从远岸至锋区站位小拟哲水蚤丰度逐渐升高。这与之前学者研究中华哲水蚤丰度跨潮汐锋分布的趋势基本一致,Liu等(2003)发现中华哲水蚤在锋区大量聚集,而其近岸混合区丰度为锋区丰度值的1/3,远岸层化区丰度为锋区丰度值的1/7。Uye等(1992)在日本内海 Bungo 海峡对潮汐锋区中几种桡足类及其无节幼体的调查结果显示,只有拟哲水蚤及其无节幼体在潮汐锋区中丰度值很高,其他桡足类(如纺锤水蚤、长腹剑水蚤和大眼剑水蚤)的丰度都较低,其研究结果显示不同桡足类在潮汐锋区的丰度分布模式并不完全相同。Visser等(2001)在北海的调查中也指出,不同桡足类对于湍混合强弱依赖性并不相同,这也说明小拟哲水蚤丰度的跨锋区分布趋势显示了其对环境的特殊适应性。由本研究跨锋区小拟哲水蚤丰度分布趋势推测,浅海潮汐锋可将大量小拟哲水蚤带至锋区,并在锋区大量聚集,且其很难从锋区进入近岸混合区。Lagadeuc等(1997)研究发现桡足类在强混合海区会改变其垂直分布状况,出现逃避此种强混合的向下移动趋势。由此我们可以推测,由于南黄海夏季潮汐锋锋区连接左右两侧不同水体而呈现混合较强的特征(赵保仁,1987),所以在锋区大量聚集的小拟哲水蚤会出现逃避此种强混合的向下层移动的趋势,并且其较难离开锋区。

在非跨锋区断面中,皆存在底层冷水涌升的站位(H03、H15和H25),而涌升冷水被表层层化海水阻碍而没有到达海面。韦钦胜等(2012)发现夏季苏北沿岸高温水舌存在向东北部延伸现象,并认为此高温水舌的存在抑制了典型潮汐锋的形成。本次调查中,苏北沿岸高温水舌同样出现向东北延伸的趋势,但与韦钦胜等(2012)的调查结果相比,延伸较远,使其延伸海域及周边大部海域的表层水温较底层水温高9—10°C。针对冷水涌升问题,Lü等(2010)给出了黄海潮汐锋锋区次级垂向环流的结构,且指出环流上升的一侧常位于锋面靠近岸一侧,上升流与夏季黄海表层冷水块较吻合。韦钦胜等(2011)通过南黄海跨锋断面上化学生物特性及水文特征的综合分析,也指出黄海潮汐锋与冷水团边界区域存在锋面上升流现象。本研究中存在冷水涌升站位的小拟哲水蚤丰度值都为同断面中最高值,与跨锋区断面丰度值分布状

况相近,从而我们推测底层冷水涌升现象是潮汐锋锋区形成的前身。由于表层较厚的层化水体阻碍底层冷水涌升至海面,因此未形成典型潮汐锋垂向环流模式,但涌升冷水将底层营养盐等物质带至上层,促进初级生产的同时也为次级生产者提供了丰富的食物来源。由不同纬度小拟哲水蚤丰度分布来看,跨锋区小拟哲水蚤整体丰度要高于北部三个非跨锋区断面(36°N、35°N、34°N),而北部三个非跨锋区断面主要受黄海底层冷水团控制,表层与底层之间温跃层明显,因此底层营养盐不易通过垂直移动被带至上层。韦钦胜等(2011)的研究结果也指出南黄海36.7°N、35.3°N和34°N断面营养盐积聚于底层,这可以解释三个非跨锋区断面表层叶绿素 $a$ 浓度也同样低于锋区断面,初级生产较低,因此小拟哲水蚤的食物来源并不丰富,导致其丰度总体上低于锋区断面。而锋区断面营养盐受长江口混合水影响,其含量较高,此结果也与韦钦胜等(2011)的研究结果基本一致,因此叶绿素 $a$ 浓度及小拟哲水蚤丰度的水平分布出现南部锋区断面高,而北部非锋区断面低的现象。

在跨锋区断面上,叶绿素 $a$ 表层浓度高值区出现在锋区站位附近的层化区站位,这与以往学者研究结果基本一致(Liu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007)。以往的观点认为锋区叶绿素 $a$ 浓度相比附近层化区或混合区较低的原因主要是浮游动物对浮游植物的摄食,同时也认为海洋锋的垂向次级环流结构可能对初级生产产生一定的影响。Savidge(1976)认为有三个因素可以解释锋区附近海区叶绿素 $a$ 浓度较高:(1)漂浮性物质在锋区的聚集和不断累积;(2)随上升流到达层的营养物质;(3)锋区两侧不同水团通过锋面混合互补促进光合作用。Gregory和Manning(2001)研究发现乔治海岸南侧锋区存在双环次级环流模式,即锋面混合区一侧的上升流、表层聚集区域和层化区一侧的沉降流。苏纪兰和黄大吉(1995)曾利用数值模拟方法指出夏季黄海冷水团边界存在次级垂向环流,Lü等(2010)指出潮汐锋区垂向环流为上下流向相反的双环流,且上环强度较弱下环强度较强。此种锋区环流模式中混合区一侧的上升流可将富营养水团由底层带至上层,刺激浮游植物生长,而层化区一侧的沉降流又可将浮游植物带离锋区从而进入锋区附近的层化区。锋区两侧水体混合促进光合作用以及沉降流将锋区浮游植物带至层化区可以解释本研究中跨锋区断面叶绿素 $a$ 表层浓度高值区出现在锋区附近的层化区一侧。而由于温跃层阻隔作用,上层水体温度

较高, 叶绿素 *a* 在温跃层附近或其上层形成高值区(李宝华等, 1999), 以浮游植物为食的浮游动物分布也与此有关。锋区存在大量聚集的小拟哲水蚤, 其对浮游植物的摄食压力也会使锋区叶绿素 *a* 表层浓度降低, 可见摄食压力与沉降流将浮游植物带离锋区进入层化区的共同作用导致锋区叶绿素 *a* 表层浓度较低。在本研究中非跨锋区断面上, 叶绿素 *a* 表层浓度高值出现在冷水涌升站临近的层化区或混合区, 而出现冷水涌升现象的站其叶绿素 *a* 表层浓度较低, 对应的小拟哲水蚤丰度为同断面中最高。由于冷水因表层水体阻碍未涌升至海面, 没有形成海洋锋垂向环流模式, 则不存在层化区一侧的沉降流将浮游植物带离锋区, 所以非跨锋区断面上叶绿素 *a* 表层浓度高值在冷水涌升站附近的层化区或混合区均有出现。Costello 等(1990)以钩胸刺水蚤(*Centropages hamatus*)为对象研究了其在湍混合中的摄食情况, 发现湍流对其产生刺激时, 其有逃避此种刺激的趋势, 并因此增加遇到食物的几率。Alcaraz(1997)也研究发现小尺度湍流作用下, 桡足类摄食行为受到影响, 其逃避湍流影响的趋势导致获得食物的几率增加, 摄食率上升。韦钦胜等(2011)还指出, 冷水团锋面上升流可将底层浑浊度较低的冷水带至表层, 使表层水文条件更适宜浮游植物光合作用。由此我们推断, 非跨锋区断面冷水涌升站中小拟哲水蚤对浮游植物的摄食可能导致其叶绿素 *a* 表层浓度较低, 而在跨锋区断面中, 锋区叶绿素 *a* 表层浓度在桡足类摄食压力和次级环流表层运输的共同影响下较低, 但导致锋区中此种生态现象出现的根本动力机制还需继续研究。同时, 叶绿素 *a* 垂直分布与锋区次级垂向环流的关系我们会在后续的报道中继续研究。

#### 4 结论

夏季南黄海潮汐锋对小拟哲水蚤有聚集作用, 并阻碍其进入近岸混合区海域, 致使混合区小拟哲水蚤丰度值相比海洋锋区小 1 个数量级。在非跨锋区出现底层冷水涌升区域, 且底层冷水涌升区域为同纬度中小拟哲水蚤丰度值高值区。整个调查区域叶绿素 *a* 表层浓度高值区出现在锋区以及底层冷水涌升区附近的层化区或混合区。跨锋区断面中锋区小拟哲水蚤丰度值最高, 相应的叶绿素 *a* 表层浓度较低, 在非跨锋区断面中小拟哲水蚤丰度高值区的叶绿素 *a* 表层浓度同样较低。

致谢 中国海洋大学环境科学与工程学院海洋浮游生物实验室黄有松、李自尚、房静等同学帮助采集浮游动物样品, 谨致谢忱!

#### 参 考 文 献

- 王 荣, 张鸿雁, 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—460
- 韦钦胜, 葛人峰, 李 艳等, 2012. 夏季江苏近海水文化学要素特征及其对沿岸水东北向扩展的指示. 海洋学报, 34(5): 197—204
- 韦钦胜, 葛人峰, 臧家业等, 2011. 夏季南黄海跨锋断面的生态环境特征及锋区生态系的提出. 海洋学报, 33(3): 74—84
- 汤毓祥, 郑义芳, 1990. 关于黄、东海海洋锋的研究. 海洋通报, 9(5): 89—96
- 苏纪兰, 黄大吉, 1995. 黄海冷水团的环流结构. 海洋与湖沼, 26(5): 1—7
- 李宝华, 傅克村, 曾晓起, 1999. 南黄海夏末叶绿素 *a* 的分布特征. 海洋与湖沼, 30(3): 300—305
- 李超伦, 王 荣, 2000. 莱州湾夏季浮游桡足类的摄食研究. 海洋与湖沼, 31(1): 15—22
- 赵保仁, 1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451—460
- 赵保仁, 1987. 黄海潮生陆架锋的分布. 黄渤海海洋, 2: 002
- 赵保仁, 1991. 潮混合与潮生陆架锋研究. 海洋科学消息, (2): 30—31
- 傅明珠, 王宗灵, 孙 萍等, 2009. 2006 年夏季南黄海浮游植物叶绿素 *a* 分布特征及其环境调控机制. 生态学报, 29(10): 5366—5375
- Alcaraz M, 1997. Copepods under turbulence: grazing, behavior and metabolic rates. *Scientia Marina*, 61(S1): 177—195
- Costello J H, Strickler J R, Marrase C *et al*, 1990. Grazing in a turbulent environment: behavioral response of a calanoid copepod, *Centropages hamatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(5): 1648—1652
- Fearnhead P G, 1975. On the formation of fronts by tidal mixing around the British Isles. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Elsevier, 22(5): 311—321
- Floodgate G D, Fogg G E, Jones D A *et al*, 1981. Microbiological and zooplankton activity at a front in Liverpool Bay. *Nature*, 290: 133—136
- Gregory L R, Manning J P, 2001. Tidal-front entrainment and retention of fish larvae on the southern flank of Georges Bank. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(1): 631—644
- Griffiths D K, Pingree R D, Sinclair M, 1981. Summer tidal fronts in the near-arctic regions of Foxe Basin and Hudson Bay. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research*, 28(8): 865—873
- Hirst A G, Bunker A J, 2003. Growth of marine planktonic copepods: global rates and patterns in relation to chlorophyll *a*, temperature, and body weight. *Limnology and Oceanography*, 48(5): 1988—2010
- Lagadeuc Y, Bouté M, Dodson J J, 1997. Effect of vertical mixing on the vertical distribution of copepods in coastal waters. *Journal of plankton research*, 19(9): 1183—1204

- Li H B, Lv R H, Ding T *et al*, 2007. Impact of tidal front on the distribution of bacterioplankton in the southern Yellow Sea, China. *Journal of Marine Systems*, 67(3): 263—271
- Lie H J, 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae(Yellow Sea). *Continental Shelf Research*, 9(6): 527—546
- Liu G M, Sun S, Wang H *et al*, 2003. Abundance of *Calanus sinicus* across the tidal front in the Yellow Sea, China. *Fisheries Oceanography*, 12(4—5): 291—298
- Lü X, Qiao F, Xia C *et al*, 2010. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation. *Continental Shelf Research*, 30(6): 620—632
- Savidge G, 1976. A preliminary study of the distribution of chlorophyll a in the vicinity of fronts in the Celtic and western Irish Seas. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 4(6): 617—625
- Schultes S, Sourisseau M, Le M E *et al*, 2013. Influence of physical forcing on mesozooplankton communities at the Ushant tidal front. *Journal of Marine Systems*, 109: S191—S202
- Simpson J H, Hunter J R, 1974. Fronts in the Irish sea. *Nature*, 250: 404—406
- Tarran G A, Zubkov M V, Sleigh M A *et al*, 2001. Microbial community structure and standing stocks in the NE Atlantic in June and July of 1996. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(4): 963—985
- Turner J T, 2004. The importance of small planktonic copepods and their roles in pelagic marine food webs. *Zool Stud*, 43(2): 255—266
- Uye S I, Yamaoka T, Fujisawa T, 1992. Are tidal fronts good recruitment areas for herbivorous copepods? *Fisheries Oceanography*, 1(3): 216—226
- Visser A W, Saito H, Saiz E *et al*, 2001. Observations of copepod feeding and vertical distribution under natural turbulent conditions in the North Sea. *Marine Biology*, 138(5): 1011—1019

## INFLUENCE OF TIDAL FRONT ON DISTRIBUTION OF *PARACALANUS PARVUS* AND CHLOROPHYLL *A* IN SUMMER OVER SOUTH YELLOW SEA

LIU Guang-Xing<sup>1,2</sup>, KONG Wei<sup>2</sup>, YANG Gui-Peng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Marine Environment and Ecology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** To understand the influence of tidal front on the distribution and primary production of marine zooplankton, we studied the location of the tidal front, the abundance of *Paracalanus parvus* and concentration of chlorophyll *a* (chl *a*) using hydrological data and biological samples collected in summer 2011 in the South Yellow Sea, China. Results show that a tidal front existed in the surveyed area. The abundance of *P. parvus* was 10 times higher in the tidal front (18267ind/m<sup>3</sup>) than that in the adjacent mixed areas (1480ind/m<sup>3</sup>), and its abundance increased gradually from the stratification zone to the tidal front. The surface concentration of chl *a* in the stratification zone was higher(4.7μg/L) than that in the tidal front (2.2μg/L). High abundance of *P. parvus* and low concentration of chl *a* co-occurred in the tidal front, while low abundance of *P. parvus* and high concentration of chl *a* in the stratification zone, suggesting that the feeding pressure of copepod affected the primary production apparently. Therefore, a tidal front is an important driving factor affecting the distribution of plankton in the South Yellow Sea, and the influence of hydrological environment affects the biological element in a marine ecosystem.

**Key words** tidal front; copepoda; *Paracalanus parvus*; primary production; South Yellow Sea