

# 基于 LOPC 的夏季南黄海 35°N 断面浮游动物水平和垂直分布初探\*

潘俊<sup>1</sup> 于非<sup>1</sup> 李超伦<sup>2</sup> 司广成<sup>1</sup> 李征<sup>1</sup> 刁新源<sup>1</sup>  
程方平<sup>2</sup> 金鑫<sup>2</sup> 任强<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所环境工程中心 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**提要** 用集成在移动船载温盐剖面仪(MVP)的激光型浮游生物光学计数仪(LOPC), 于2012年7月底在南黄海 35°N 断面调查浮游动物丰度的水平和垂直分布情况, 并对获得高时空分辨率的数据资料进行分析。结果表明, 本次调查海域浮游动物的丰度为西高东低, 浮游动物分布可能受温度、浮游植物分布、潮致涌升等因素影响, 其中温度为最主要因素。该仪器可以作为中国近海浮游生物调查, 特别是对浮游动物资源的走航大面调查、垂直分布及其生态学研究的一种有效的手段。

**关键词** LOPC; 黄海冷水团; 温跃层; 垂直分布; 浮游动物

**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyhz20131100164

黄海是一个三面环陆地的半封闭陆架浅海, 其中央海槽水深一般在 50—80m(秦蕴珊等, 1989)。黄海冷水团是引人关注的物理海洋学现象, 20 世纪 50 年代以来, 已有国内外海洋学者尤其是中国学者对该现象展开了大量的考察和研究(赫崇本等, 1959; 赵保仁, 1987; 袁业立等, 1993; 苏纪兰等, 1995; 于非等, 2006)。黄海冷水团中化学、生物和水文等因子具有非常明显的层化结构(韦钦胜等, 2010), 南黄海是研究浮游生物分布及其与环境因子相互关系的理想海区。

在浮游动物的 100 多年的研究历史中, 浮游生物野外现场调查手段在不断地发展和完善。20 世纪 40 年代, 浮游生物连续采样记录仪(CPR)得到应用; 70 年代出现了 MOCNESS、BIONESS 的分层采样技术; 1980 年以后, 随着海洋观测和研究技术的发展, 出现了浮游生物可视记录仪(VPR)、光学浮游生物计数器(OPC)、声波扫描观测技术、遥控深潜器(ROV)等一系列技术(刘镇盛, 2013); 新世纪以来涌现了激光浮游生物计数仪(LOPC)、水下图像剖面仪(UVP)、浮游

动物图像扫描仪(Zooscan)等。这些仪器的投入使用, 有效地促进了浮游动物研究的发展。

LOPC(Laser optical plankton counter)是一种新型的激光型光学浮游生物计数仪, 它采用窄激光束(1mm 厚)作为激发光源、进水口尺寸为 7cm×7cm。该仪器具有以下特点: (1)最高计数颗粒浓度高, 能满足大部分情况下海洋浮游动物调查的需要; (2)计数粒级范围大, 检测 ESD(Equivalent spherical diameter, 等效球形粒径)值区间在 100—35000μm, 涵盖近海常见的小型到大型浮游生物; (3)可以在走航中(最高拖速为 8m/s)使用, 用于野外调查实时测算海洋浮游生物在不同深度的丰度分布情况; (4)准确率高: LOPC 与网样(网目孔径大小为 75μm)的浮游动物的丰度分析呈线性关系: 针对不同粒径大小的浮游动物, LOPC 与网样品两者之间的相关系数  $r$  的范围在 0.8—0.94(Herman *et al.*, 2004)。

LOPC 可附加于多种搭载平台, 如浮游生物采样网(Herman *et al.*, 2006)、MVP(Herman *et al.*, 1998)、

\*中国科学院战略性先导专项项目, XDA11020301 号; 国家重点基础研究发展计划(973 项目), 2011CB403604 号。潘俊, E-mail: panjun@qdio.ac.cn

通讯作者: 于非, 研究员, 博士生导师, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

收稿日期: 2013-11-01, 收修改稿日期: 2014-05-03

Batfish(Herman *et al*, 2004)、浮标(Petrik *et al*, 2013)、MVP(Moving vessel profiler), 是一个拖拽走航式海水剖面测量系统(Brooke Ocean Technology, 2010)。它相当于一个自由落体拖体(流线型)可集成 CTD、浊度、叶绿素等探头, 并可集成激光型光学浮游生物计数仪(LOPC)。母船航速 12kn 以内航行时 MVP 系统均能正常工作, 其中在 10kn 的船速下 MVP 拖体下降速度最大能达到 3—4m/s, 到达设定好的深度之后, 系统自动停止下降, 然后开始回收至表层(图 1)。

目前, 国外已广泛应用 LOPC 来研究浮游动物在海洋中的实时分布, 并成功应用在多种海洋环境中: 在近海(Petrik *et al*, 2013)、海湾(Herman *et al*, 2004; Herman *et al*, 2006)、亚寒带大洋(Gaardsted *et al*, 2010)、极地(Trudnowska *et al*, 2012; Basedow *et al*, 2014)以及人类影响下的湖泊、河口环境(Finlay *et al*, 2007; Yurista *et al*, 2009), 均有报道。

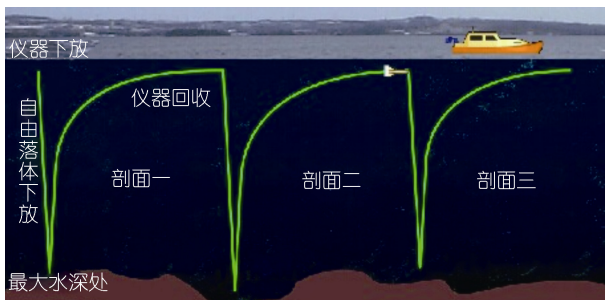


图 1 移动船载温盐剖面仪工作示意图

Fig.1 The principle of MVP working

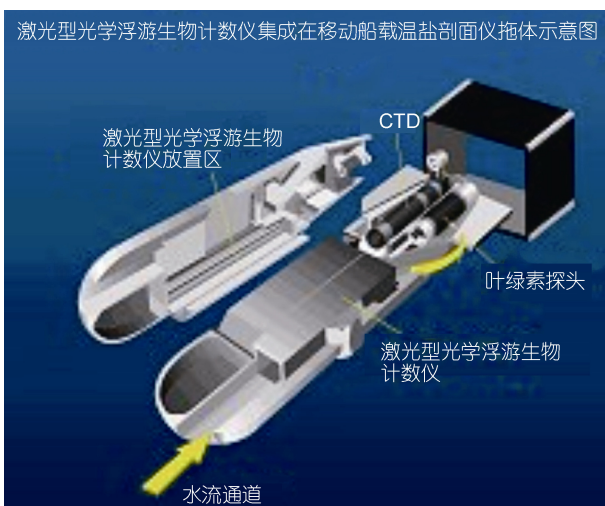


图 2 移动船载温盐剖面仪集成激光型光学浮游生物计数仪示意图(引自 Herman 等, 1998)

Fig.2 The MVP aluminum fish with split halves opened illustrating the Laser-OPC (after Herman *et al*, 1998)

我国在南黄海对浮游动物开展过长期调查, 也有对浮游动物垂直分布的报道, 但都局限在定点观测(左涛等, 2004; 张芳等, 2005)。LOPC 是研究浮游动物垂直分布的理想仪器, 本研究选 35°N 断面的浮游动物作为研究对象, 该断面处于南黄海的中部, 跨度较大, 夏季大部分海域处在黄海冷水团之中(左涛等, 2004; Sun *et al*, 2010)。

本研究依托 2012 年 7 月份中国科学院海洋研究所开放航次, 将 LOPC 集成在 MVP 上(图 2), 利用 LOPC 的观测资料分析南黄海冷水域 35°N 断面浮游生物特别是浮游动物水平和垂直分布, 并探讨浮游动物分布与环境因子之间的相互关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间及地点

2012 年 7 月随“科学三号”海洋科考船对南黄海和东海进行调查, 在 7 月 27 日 18 点开始 35°N 断面 MVP-LOPC 走航观测, 自东向西(124°E—121°E)至次日 14 点(图 3), 采样时间约为 20 小时, 在船速 10kn 运动下设置采样间隔约为 3 分钟, 获得高时空分辨率(1.5km/剖面)资料, 调查海域的水深范围在 30—75m (设置离底 10m 时仪器停止下降并立即回收)。

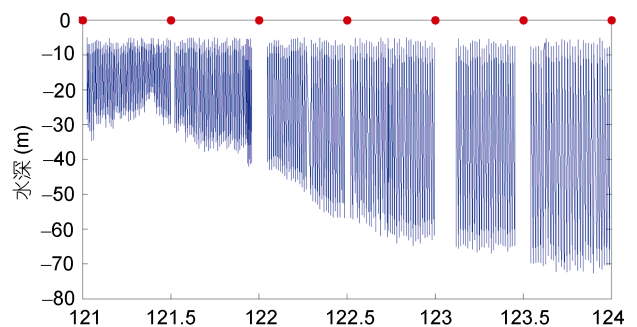


图 3 35°N 断面下降剖面(红点: 网样采集站位)

Fig.3 The descending profile of 35°N section (red dots indicate net sampling stations)

### 1.2 数据采集及浮游动物网样采集

LOPC 集成在 MVP 拖体中, 由 MVP 的甲板单元一同控制, MVP 和 LOPC 集成的系统从自由落体开始到回收至预定深度就完成了了一个剖面的测量过程, 每个剖面的数据均由计算机自动记录保存。计算机根据拖体的离底高度、出缆长度和压力值等多项指标同步介入水深和定位信息, 避免 MVP 在工作过程中触底, LOPC、CTD、GPS 数据获取频率分别为是 2Hz、25Hz、1Hz, 实时传送到随船电脑。LOPC 以光电

信号处理后,形成数字信息,最终通过计算机输出颗粒的大小(以ESD表示)和数量(Brooke Ocean Technology, 2010)。与此同时本航次从124°E开始自东向西每隔30kn,使用中型浮游生物网(网口面积0.2m<sup>2</sup>,网长270cm,筛绢孔径160μm)进行浮游动物定点采样,拖网方式按照国家海洋调查规范(GB/T 12763.6-2007)进行。

### 1.3 数据处理

**1.3.1 LOPC 所得数据处理** 利用MATLAB软件进行编程,将标准输出格式数据进行筛选和分析,所有的数据的显示时间间隔统一为1s,根据颗粒物的数量和计算出的每秒下降速度等数据求出每秒通过LOPC采样通道的水柱体积及丰度。按照生物统计学的方法,使用MATLAB软件进行相关性分析(温度与LOPC丰度相关性),得出Pearson相关系数 $r(P<0.05)$ ,计算公式如下:

$$Abu = Tol/V; \quad (1)$$

$$V = S \times H; \quad (2)$$

$$\text{水平丰度分布: } Abu_{\text{水平}} = \text{Total counts}/(S \times H_{\text{高度差}}); \quad (3)$$

$$\text{垂直丰度分布: } Abu_{\text{垂直}} = \text{Total counts}/(S \times H_{\text{每秒下降水深}})。 \quad (4)$$

其中, Abu: 丰度, 单位 ind/m<sup>3</sup>; Tol: 个数; V: 体积, 单位 m<sup>3</sup>; S: LOPC 进水框表面积 0.0049m<sup>2</sup>; H: 下降水深, 单位 m。

为更好地反映35°N断面浮游动物的水平和垂直分布,尽量减少浮游植物、气泡及杂质颗粒等对仪器采集的干扰,选取5m层以下、颗粒物的检测ESD值范围在200—35000μm的数据进行分析(孙松等, 2012; Petrik *et al.*, 2013),同时由于下降过程中拖网近似于垂直下降,比上升过程能更好地反映浮游动物垂直

分布态势。本文仅分析约230个下降剖面(图3)。

### 1.3.2 网采浮游动物计数及与LOPC数据的比较

将网采样品倒入浮游生物计数框中,于体视显微镜下镜检计数。使用MATLAB软件编程将7个站位的网采样品的丰度与选取靠近该网采站位最近的LOPC垂直剖面所得不同大小粒径的颗粒物丰度进行比对,查找两者的相关性。取不同ESD下限(最低为200μm,以15μm/次依次增加),将大于该值的所有粒子进行累计,与网采样品的丰度做相关性分析。由于网采的样本数量较少(7个采样站),需要做校正分析(王梓坤, 1976),计算公式为式(5),同时需要相关系数 $r^k > 0.6664$ (k表示修正)才能体现显著正相关( $P < 0.05$ )。由于网采样品的丰度是对整个水柱体的浮游动物取平均值,故与LOPC颗粒物的丰度垂直分布进行比对,而LOPC的颗粒物丰度的水平分布仅是対仪器自身获取数据的进行分析。

$$r^k = r \left[ 1 + \frac{1-r^2}{2(n-4)} \right]。 \quad (5)$$

( $r^k$ : 无偏相关系数;  $r$ : Pearson 相关系数;  $n$ : 样本量)

## 2 结果

### 2.1 丰度水平分布

南海海35°N海域断面上LOPC拖行的水深范围在30—75m,选取整个调查断面的LOPC获取数据中的5—30m之间的水层来分析。检测颗粒物的丰度范围在 $(1.58—7.45) \times 10^4 \text{ ind/m}^3$ , 121°E到121.5°E出现丰度高值区,最高值在121.4°E附近;自121.5°E到122°E,丰度先降低然后升高再逐渐降低。122°E以东丰度分布的总体趋势是降低的,颗粒物丰度的低值区主要分布在123.6°E东侧(图4)。

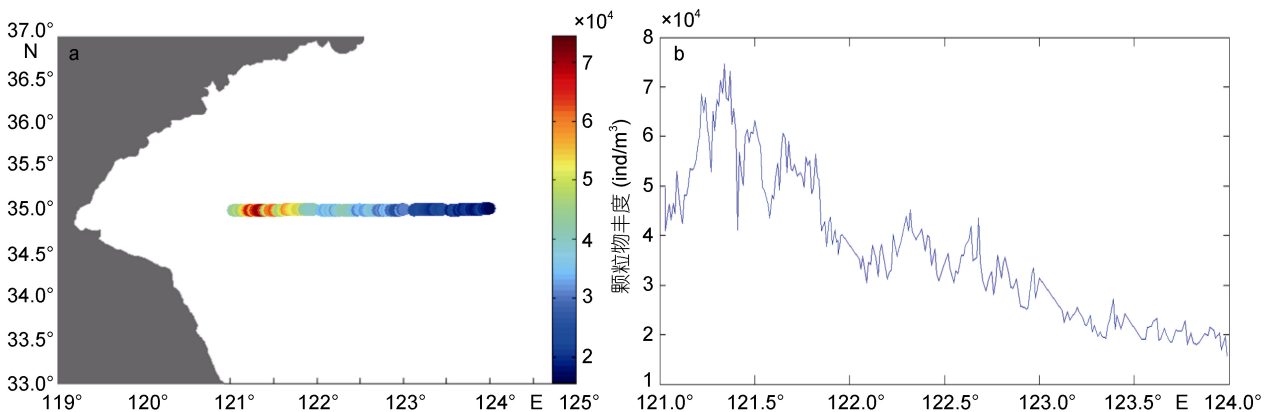


图4 35°N断面颗粒物丰度水平分布(a:散点图;b:折线图)

Fig.4 The abundance of horizontal distribution particles of 35°N section

### 2.2 丰度垂直分布及调查海区的温度、叶绿素分布情况

整个断面颗粒物平均丰度垂直分布范围为  $5.6 \times 10^3$ —

$1.8 \times 10^5 \text{ ind/m}^3$ , 颗粒物数量较多且整体较均匀, 多出现在温跃层以下; 低温冷水层数量较低, 到近底层数量有增多的趋势(图 5)。

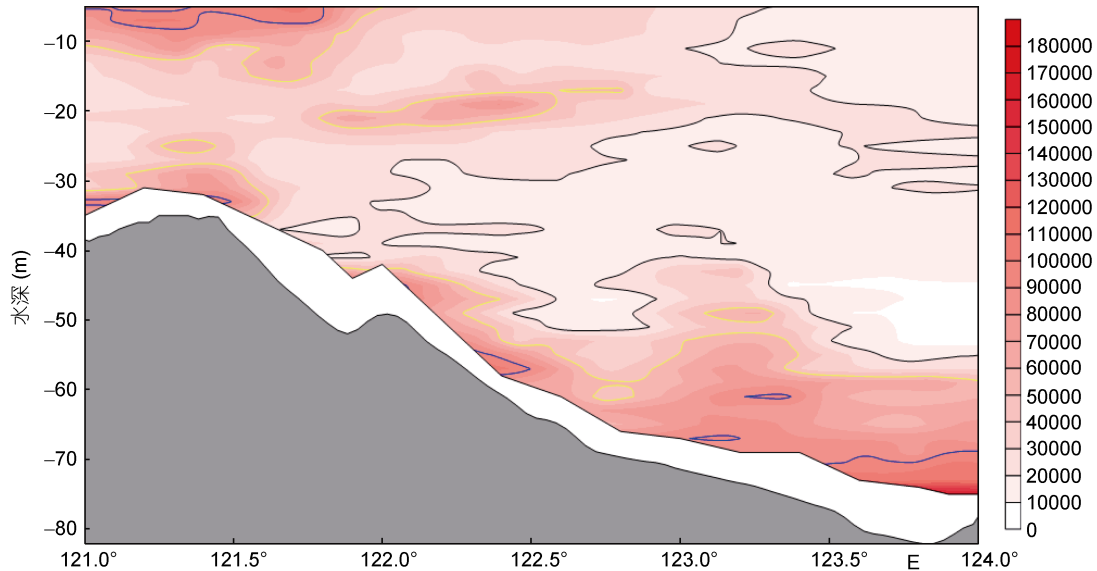


图 5 35°N 断面颗粒物丰度垂直情况分布 (单位: individuals/m<sup>3</sup>, 黑线  $2 \times 10^4$ , 黄线  $5 \times 10^4$ , 蓝线  $9 \times 10^4$ )  
Fig.5 Vertical distributions of Abundance in section 35°N

本次调查在 35°N 断面的深水区水温垂直分布基本上呈现 3 层结构: 约 10m 以浅为上混合均匀层, 水温都大于 22°C(图 6); 其下水温随水深增加迅速递减, 并大致在 10—20m 深度间形成温跃层, 强跃层区的跃层厚度浅而薄约 10m 左右; 跃层以下为垂直分布较均匀的低温冷水团。

夏季, 温跃层附近存在 Chl a 最大值现象( $>1.5 \text{ mg/m}^3$ ), 其范围从深水域一直伸展到冷水团边界附近, 该现象作为浮游植物对海区的光照、营养盐、水文等环境条件共同作用的响应。冷水域深水区中的 Chl a 含量较低(图 7)。

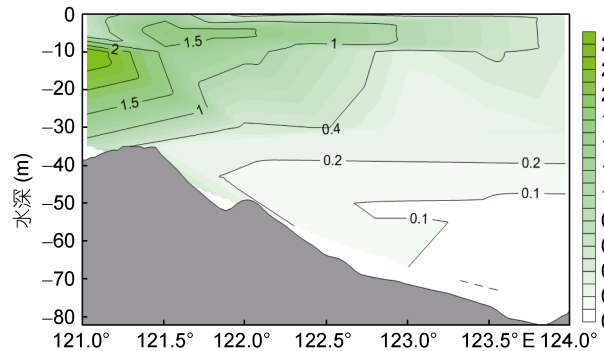


图 7 35°N 断面叶绿素 a 分布  
Fig.7 Vertical distributions of Chl a at 35°N in Summer

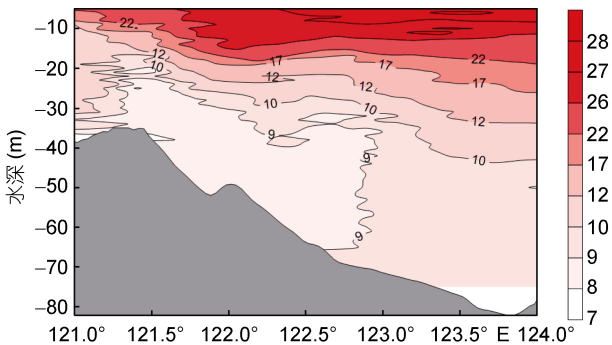


图 6 35°N 断面等温线  
Fig.6 The thermocline at 35°N section

### 2.3 LOPC 与网样对比

将 LOPC 垂直剖面数据与网采样品的数据进行分析, 根据所取不同 ESD 下限(最低为 200 $\mu\text{m}$ ), 将大于该值的所有粒子进行累计, 与网采样品的丰度做相关性分析, 并将结果作图(图 8、9)。由图可知, LOPC 在 480 $\mu\text{m}$  以上检测的颗粒物的丰度与网样中同粒径范围的浮游动物(Huo *et al*, 2012)—中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)的 I-V 期幼体、C5 期及其成体; 也有少量的个体较大的双刺纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*); 磷虾类的太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)及毛颚类的强壮箭虫(*Sagitta*

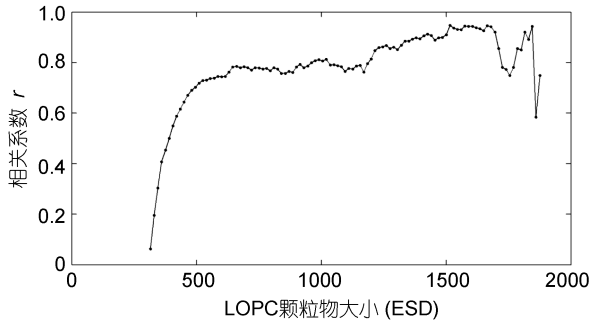


图 8 LOPC 跟网采样品数据相关性系数  $r$  与 LOPC 的粒径大小的线性相关

Fig. 8 Correlation coefficient ( $r$ ) in grain size between the net sampling and LOPC

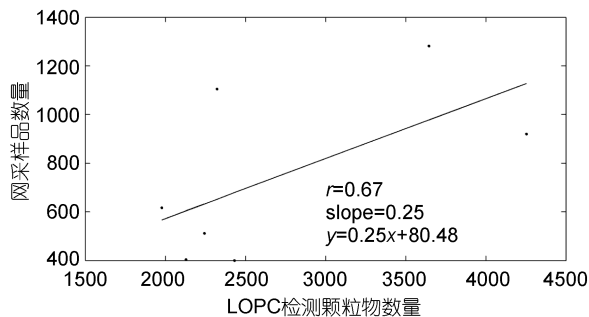


图 9 LOPC (480 $\mu\text{m}$ )与网采样品丰度相关性分析

Fig. 9 Correlation in zooplankton count between net sampling and LOPC at size of 480 $\mu\text{m}$

*crassa*)之间丰度具有较好的相关性( $r>0.67$ )。说明 LOPC 在检测 480 $\mu\text{m}$  以上的颗粒物中浮游动物比例较大。

### 3 讨论

#### 3.1 LOPC 测量结果可靠性

国外多位学者针对 LOPC 与其它浮游动物野外调查仪器做比较, 如与浮游生物采样网、OPC、Wider LOPC、Multinet、Video Plankton Recorder 均做过两两之间的数据分析。Herman 等(2006)在加拿大 St. Lawrence 海湾通过 NBSS(标准生物量谱)分析 LOPC 和采用浮游生物网采数据(网口宽 0.5m, 网目孔径大小 80 $\mu\text{m}$ ), 发现对在小于 900 $\mu\text{m}$  的浮游动物中两者吻合性较高(斜率大于 0.7), 说明 LOPC 采集的颗粒物的组成较大比例(超过 69%)是浮游动物。另有研究表明, 在冬季挪威北部海岸中使用 LOPC 和 Multinet 发现在 900—1500 $\mu\text{m}$  两者之间误差小, 然而, LOPC 在节省船时、获取数据快速分析及结合水文因素的紧密度等方面更具优势(Gaardsted *et al.*, 2010), 目前已经成熟地运用在大尺度范围内的海洋浮游生物, 特别是浮

游动物的丰度及分布情况调查中(Basedow *et al.*, 2012)。

然而需要注意, LOPC 记录的颗粒物并不仅代表浮游动物, 其测量的误差主要来源于非生物成分(杂质、气泡)和生物成分(海雪、较大型的浮游植物)等因素的干扰。由于 LOPC 的设计思路所限, 仪器无法对采集的颗粒物进行分类。南黄海 35°N 断面深水区是冷涡泥质区域, 存在悬浮体浓度高值区(韦钦胜, 2012), 对发生絮凝作用而粒度粗化的颗粒物(较大的浮游植物、海洋雪花及海洋碎屑)仪器统一当成浮游动物进行计数; 根据 LOPC 的设计原理可以看出测出的粒径大小(ESD)仅与颗粒所遮挡的光线量有关, 除重合现象外, 生物的透明度、形状及其在光道中的方向都可能会影响测量的准确度(李征, 2008)。本文选取 200 $\mu\text{m}$  以上计数个体进行分析, 目的是尽可能减少仪器的检测干扰因素, 同时 LOPC 无法鉴别进入采样通道的浮游动物的存活状态, 对活体浮游动物和浮游动物的残体一并计数。这也将使得 LOPC 所得数据高于镜检计数结果。

结合本航次的常规调查站的网采数据进行辅助分析, 如 121.5°E 浮游生物中网采集的样品进行分析, 浮游动物丰度(含夜光虫)在  $2.3 \times 10^4 \text{ ind/m}^3$ , 优势种为中华哲水蚤、小拟哲水蚤、强壮箭虫, 夜光虫丰度最高, 而使用 LOPC 测定颗粒物的丰度在  $1.94—9.58 \times 10^4 \text{ ind/m}^3$ , 较网采的丰度高。

另一方面, 本次调查 LOPC 集成在 MVP 中使用, 而不是集成在浮游动物拖网中进行采样, 同时采用了传统调查所得的浮游动物网样, 固定保存进行镜检分析后, 与之进行比对。两种调查方式的不同也造成了一定差异。首先, 本航次网采样品经过近 20 个月的保存后进行分析, 不可避免地会有细胞破裂、体液损失以及个体组分的浸出等多种会导致数量、生物量变化的情形出现(Bottger *et al.*, 1986), 经过固定的样品所包含的个体信息可能与浮游动物活体有相当的出入(Omori, 1978; Williams *et al.*, 1982); 另一方面, 一些易碎的生物体捕集效率较低, 在网中被破坏而不被镜检计数, 导致网采样品镜检结果数据偏小(Gallienne *et al.*, 2001)。其次, 对网采浮游动物样品进行分析, 浮游动物在垂直方向的分布可能具有不均匀性。王荣等(2002)指出浮游动物在实际海域中斑块分布的特点, 局部水层或水块的丰度达到  $10^4 \text{ ind/m}^3$  或者  $10^5 \text{ ind/m}^3$  都是可能的。浮游动物的斑块分布, 增加了两种取样方法对比的不确定性。今后可以结合浮



游动物垂直分层采样进一步验证 LOPC 与网采浮游动物的丰度的比例, 更好地校正 LOPC 高估浮游动物丰度的误差。最后, 由本文图 3 可知, 为保证仪器安全及减少干扰因素, LOPC 下降剖面选取水深 5m 层以下、离底 10m 层以上水体; 而浮游动物网样则为自底到海表面垂直拖网。实际测量范围的差异也会对两种方法所得数据的相关性造成干扰。

尽管存在以上种种不足, LOPC 的测量结果与网样镜检计数结果仍然存在一定相关性, 可以认为 LOPC 测量结果在一定程度上反映了浮游动物丰度的真实值。总体上, LOPC 的结果有一定的可信性, 本航次浮游动物的丰度分布趋势与 2006 年 7 月份齐衍萍(齐衍萍, 2008)在南黄海调查得到的浮游动物丰度分布趋势较一致。

### 3.2 LOPC 数据反映浮游动物与环境因子的关系

**3.2.1 温度与浮游动物的关系** 温度对浮游生物的分布起了重要的作用(左涛, 2004), 黄海夏季温跃层的存在对浮游动物的垂直移动具有明显的阻隔作用(图 6)。本文使用 MATLAB 程序作温度与 LOPC 所得颗粒物丰度分布的相关性分析, 发现在 122°E 以西表层、次表层海水中两者的相关性吻合很好, 体现正相关, 相关系数  $r > 0.9$ 。这表明在这一区域, 浮游动物主要分布于高温低盐水层即夏季表层水体; 122°E 以东区域中位于黄海冷水团中心区, 由于表层温度较高( $>27^{\circ}\text{C}$ ), 为躲避高温的影响, 大部分浮游动物分布在温跃层及以下区域。LOPC 颗粒物丰度反映出, 断面的底层浮游动物丰度与温度多为负相关, 相关系数  $r < -0.8$ , 结合对网采样品分析, 中大型浮游动物中华哲水蚤和太平洋磷虾主要分布于低温高盐的水层, 如夏季温跃层以下水体即黄海冷水团中心区, 这与 LOPC 测得结果基本一致。

**3.2.2 叶绿素与浮游动物的关系** 叶绿素  $a$  可在一定程度反映浮游植物的分布, 本次调查中, 叶绿素  $a$  在温跃层附近形成中层最大值(图 7), 本次调查中叶绿素  $a$  高值区也是该海域夏季历史数据中浮游植物的数量分布较多的区域(Liu *et al.*, 2012; 韦钦胜等, 2013)。浮游动物以植食性居多, 其数量与该水层的浮游植物分布有较大关系, 一部分浮游动物趋向于上层饵料丰富的水体中分布。在靠近海州湾外侧的 121°E 浮游植物数量较多, 为大量浮游动物特别是对高繁殖率的小型浮游动物提供适宜生存的摄食环境, 这可能是 LOPC 测定海州湾附近颗粒物的丰度较高的原因之一。

**3.2.3 水团锋面与浮游动物的关系**  $10^{\circ}\text{C}$  或  $8^{\circ}\text{C}$  等温线包括的区域一般被认为是黄海冷水团的范围(管秉贤, 1963), 而  $17^{\circ}\text{C}$  等温线则为黄海冷水团和周围海水的边界(毛汉礼等, 1964)。等温线的分布可以反映黄海冷水团在黄海西侧的分布状况及冷水团边界区域(即锋区)的位置(韦钦胜等, 2011)。在本文图 6 中, 海州湾外侧的强锋区与该海域的表层冷水区相对应, 具有典型的锋面特征, 此区域的浮游动物受潮致涌升积聚在表层和近表层, 这可以合理解释 LOPC 检测到 35°N 断面 121°E—121.5°E 海域附近表层和近表层颗粒物丰度较高的原因。

## 4 结论及展望

本文通过分析南黄海大部分海域处在黄海冷水团的 35°N 断面近 230 个垂直剖面的 LOPC 数据并结合航次网采的浮游动物数据进行辅助分析, 说明 LOPC 可以用于走航式高密度大范围的浮游动物实时观测, MVP-LOPC 系统可以用于中国近海浮游生物特别是浮游动物的走航大面调查、垂直分布及其生态学研究。

本研究基于 LOPC 实测颗粒物丰度, 对 35°N 断面进行浮游动物的水平和垂直分布进行分析。对颗粒物丰度和环境因子的分析证实, 浮游动物的分布与温度、浮游植物分布、潮致涌升等因素都有一定的相关性。在今后的研究中, 如船时充裕, 可选取典型站位进行连续站观测, 便于分析浮游动物昼夜垂直迁移; 应尝试使用多种调查采样仪器(Multinet、VPR 等)及将 LOPC 固定在浮游动物采样网中使用, 通过以上仪器及更多的网样比对资料, 进一步提高滤除干扰因素的技术。LOPC 的实用化将增加中国海域的浮游动物分布的研究方式, 从而更好地以浮游动物功能群的空间分布及季节变化来模拟能量流动和物质循环过程。

**致谢** 感谢中国科学院海洋研究所胶州湾海洋生态系统国家野外研究站孙晓霞研究员、罗璇老师提供的本航次叶绿素的数据, 中国科学院海洋研究所环境工程中心孙淑慧、魏传杰、李昂在 LOPC 数据处理过程中给予指导。

### 参 考 文 献

- 于 非, 张志欣, 刁新源等, 2006. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. 海洋学报, 28(5): 26—34  
王 荣, 张鸿雁, 王 克等, 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

- 王梓坤, 1976. 概率论基础及其应用. 北京: 科学出版社, 148—150
- 韦钦胜, 葛人峰, 臧家业等, 2011. 夏季南黄海锋区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
- 韦钦胜, 傅明珠, 李艳等, 2013. 南黄海冷水团海域溶解氧和叶绿素最大现象值及营养盐累积的季节演变. 海洋学报, 35(3): 142—154
- 韦钦胜, 傅明珠, 葛人峰等, 2010. 南黄海冷水域 35°N 断面化学水文学特征及营养盐的季节变化. 环境科学, 31(9): 2063—2074
- 毛汉礼, 任允武, 孙国栋, 1964. 南黄海和东海北部(28°—37°N) 夏季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析. 海洋科学集刊, 1: 23—77
- 左涛, 王荣, 王克等, 2004. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动. 生态学报, 24(3): 524—530
- 刘镇盛, 杜明敏, 章菁, 2013. 国际海洋浮游动物研究进展. 海洋学报, 35(4): 1—10
- 齐衍萍, 2008. 夏、冬季黄东海浮游动物群落生态学研究. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 41—42
- 孙松, 李超伦, 宁修仁等, 2012. 中国区域海洋学——生物海洋学. 北京: 海洋出版社, 前言: 3
- 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
- 李征, 2008. 浮游生物光学计数器 OPC 和图像分析技术在浮游动物样品分析中的应用. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士论文, 20—23
- 张芳, 孙松, 张永山等, 2005. 南黄海中华哲水蚤昼夜垂直分布. 海洋科学, 29(9): 9—13
- 赵保仁, 1987. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究. 海洋与湖沼, 18(3): 217—226
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉等, 1989. 黄海地质. 北京: 海洋出版社, 1
- 袁业立, 李惠卿, 1993. 黄海冷水团环流结构及生成机制研究: I. 0 阶解及冷水团的环流结构. 中国科学 B 辑, 23(1): 93—103
- 赫崇本, 汪园祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15
- 管秉贤, 1963. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析. 海洋与湖沼, 5(4): 255—284
- Basedow S, Tande K, Norrbin M *et al*, 2012. Capturing quantitative zooplankton information in the sea: Performance test of laser optical plankton counter and video plankton recorder in a *Calanus finmarchicus* dominated summer situation. Progress in Oceanography, 108: 72—80
- Basedow S, Zhou M, Tande K, 2014. Secondary production at the Polar Front, Barents Sea, August 2007. Journal of Marine Systems, 130: 147—159
- Botterger R, Schnack D, 1986. On the effect of formaldehyde fixation on the dry-weight of copepods. Meeresforschung-Reports On Marine Research, 31: 141—152
- Brooke Ocean Technology, 2010. Laser Optical Plankton Counter System integration guide
- Brooke Ocean Technology, 2010. MVP200 Operation and maintenance manual
- Finlay K, Beisner B, Barnett A, 2007. The use of the Laser Optical Plankton Counter to measure zooplankton size, abundance, and biomass in small freshwater lakes. Limnology and Oceanography, methods 5: 41—49
- Gaardsted F, Tande K, Basedow S, 2010. Measuring copepod abundance in deepwater winter habitats in the NE Norwegian Sea: intercomparison of results from laser optical plankton counter and multinet. Fisheries Oceanography, 19(6): 480—492
- Gallienne C, Robins D, Woodd-Walker R, 2001. Abundance, distribution and size structure of zooplankton along a 20 degrees west meridional transect of the northeast Atlantic Ocean in July. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 48: 925—949
- Herman A, Beanlands B, Chin-Yee M *et al*, 1998. The Moving Vessel Profiler (MVP): In-situ sampling of plankton and physical parameters at 12 kts and the integration of a new laser/optical plankton counter. Oceanology, 102: 123—135
- Herman A, Beanlands B, Phillips E, 2004. The next generation of optical plankton counter: the Laser-OPC. Journal of Plankton Research, 26(10): 1135—1145
- Herman A, Harvey M, 2006. Application of normalized biomass size spectra to laser optical plankton counter net intercomparisons of zooplankton distributions. Journal of Geophysical Research-Oceans, 111(C5): 1—9
- Huo Y Z, Sun S, Zhang F *et al*, 2012. Biomass and estimated production properties of size-fractionated zooplankton in the Yellow Sea, China. Journal of Marine Systems, 94: 1—8
- Liu X, Huang B Q, Liu Z Y *et al*, 2012. High-resolution phytoplankton diel variations in the summer stratified central Yellow Sea. Journal of oceanography, 68(6): 913—927
- Omori M, 1978. Some factors affecting on dry weight, organic weight and concentration of carbon and nitrogen in freshly prepared and in preserved zooplankton. Int Rev Ges Hydrobiol, 63: 261—269
- Petrik C, Jackson G, Checkley D, 2013. Aggregates and their distributions determined from LOPC observations made using an autonomous profiling float. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 74: 64—81
- Sun S, Huo Y Z, Yang B, 2010. Zooplankton functional groups on the continental shelf of the yellow sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 57(11): 1006—1016
- Trudnowska E, Szczucka J, Hoppe L *et al*, 2012. Multidimensional zooplankton observations on the northern West Spitsbergen Shelf. Journal of Marine Systems, 98—99: 18—25
- Williams R, Robins D, 1982. Effects of preservation on wet weight, dry weight, nitrogen and carbon content of *Calanus helgolandicus* (Crustacea: Copepoda). Mar Biol, 71(3): 271—278
- Yurista P, Kelly J, Miller S, 2009. Lake Superior zooplankton biomass: alternate estimates from a probability-based net survey and spatially extensive LOPC surveys. Journal of Great Lakes Research, 35(3): 337—346

## USING LASER OPTICAL PLANKTON COUNTER TO EXAMINE SIZE AND ABUNDANCE OF ZOOPLANKTON IN SUMMER AT 35°N

PAN Jun<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1</sup>, LI Chao-Lun<sup>2</sup>, SI Guang-Cheng<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, DIAO Xin-Yuan<sup>1</sup>,  
CHENG Fang-Ping<sup>2</sup>, JIN Xin<sup>2</sup>, REN Qiang<sup>1,3</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*;  
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** A laser optical plankton counter (LOPC) with a moving vessel profiler is a device in high integration and automation for obtaining data with high spatial resolution, with which we examined the horizontal and vertical zooplankton average size and abundance along 35 °N section in the cold water mass of the southern Yellow Sea during July 2012 summer cruises. Results show that the number and abundance of zooplankton increased from the east to west under the influences of temperature, phytoplankton distribution, frontal upwelling and other factors, of which temperature was believed the most important factor on zooplankton vertical distribution in summer in the Yellow Sea. Therefore, LOPC can be applied as a tool for zooplankton investigation in marine ecology.

**Key words** LOPC; Yellow Sea Cold Water Mass; thermocline; vertical distribution; zooplankton