

# 南黄海潮汐锋对浮游细菌生物量分布的影响

李洪波<sup>1,2</sup>, 肖天<sup>1\*</sup>, 刘桂梅<sup>1</sup>, 吕瑞华<sup>3</sup>, 丁涛<sup>4</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266000; 4. 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**摘要:** 2001年5月16~23日、6月10~24日和2002年6月5~12日, 利用“北斗号”船只对南黄海鱼产卵场进行了3次专项调查。研究了潮汐锋断面叶绿素a浓度、浮游细菌生物量的分布, 目的是阐明潮汐锋的存在对浮游细菌生物量分布的影响。

3个航次中的叶绿素a浓度变化范围分别是0.06~2.34mg/m<sup>3</sup>(2001-05)、0.08~0.9mg/m<sup>3</sup>(2001-06)、0.14~3.04mg/m<sup>3</sup>(2002-06)。3航次的聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量变化范围分别为7.62~22.06 mgC/m<sup>3</sup>(2001-05)、8.53~27.52mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)、0.69~55.90 mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)。异养细菌生物量变化范围分别为7.56~51.82 mg C/m<sup>3</sup>(2001-05)、8.54~24.77 mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)、3.12~10.05 mg C/m<sup>3</sup>(2002-06)。而聚球藻蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献(CB/PB)平均值分别为: 58%(2001-05)、77%(2001-06)、31%(2002-06)。

结果表明: 南黄海鱼产卵场在春末夏初(5~6月份), 叶绿素a浓度最大值及次大值主要分布在锋区及其邻近的层化区20m以浅位置; 聚球藻蓝细菌生物量最大值主要分布于锋区及层化区表层和水体中层; 异养细菌生物量最大值则多出现在混合区的表、底层和层化区的表层; 就聚球藻蓝细菌对浮游植物生物量的贡献而言, 以层化区较高, 且主要为表层和底层, 而锋区及混合区较小。

**关键词:** 潮汐锋; 浮游细菌; 生物量; 黄海

## Impact of the tidal front on the distribution of bacterioplankton biomass in the southern Yellow Sea

LI Hong-Bo<sup>1,2</sup>, XIAO Tian<sup>1\*</sup>, LIU Gui-Mei<sup>1</sup>, LU Rui-Hua<sup>3</sup>, DING Tao<sup>4</sup> (1. Key laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 4. Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2608~2615.

**Abstract:** Bacterioplankton is composed mainly of heterotrophic bacteria and two types of photosynthetic prokaryote cyanobacteria, *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. They are basic components of microbial loop, and play an important role in the marine food web. In spring and summer, the tidal front, a significant hydrological feature of the Yellow Sea, plays a key role in the distribution of zooplankton and phytoplankton.

To study the influence of tidal front on bacterioplankton, three special surveys were carried out in May and June, 2001, and June, 2002 in the southern Yellow Sea, China. Chlorophyll a (Chl-a) concentration, bacterioplankton abundance and biomass were quantified and the variation of these three parameters within the zone of tidal front was compared. Samples for bacterioplankton were collected from a SeaBird CTD-General Oceanic Rosette assembly with 10 l Go-Flo bottles, and preserved with buffered glutaraldehyde at a concentration of 1%. Concentrations of Chl-a were measured on a Turner fluorometer.

**基金项目:** 国家重点基础研究专项经费资助项目(G19990437); 国家自然基金资助项目(40376048)

**收稿日期:** 2003-12-27; **修订日期:** 2004-4-20

**作者简介:** 李洪波 (1976~), 男, 河南人, 博士生, 主要从事海洋微生物生态学研究。E-mail: lihongbo@ms.qdio.ac.cn

\* **通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: txiao@ms.qdio.ac.cn

**致谢:** 感谢法国 Wu Long-Fei 博士、“北斗号”渔业调查船船长及全体船员对本文的帮助, 在此一并致谢

**Foundation item:** National Key Fundamental Developing Project (G19990437); National Natural Science Foundation of China (No: 40376048)

**Received date:** 2003-12-27; **Accepted date:** 2004-4-20

**Biography:** LI Hong-Bo, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine microbial ecology. E-mail: lihongbo@ms.qdio.ac.cn

Phytoplankton biomass was calculated by a conversion factor of 50 mg C/mg chlorophyll. *Synechococcus* cyanobacteria abundance was determined by directly counting cell numbers using epifluorescence microscopy method; and heterotrophic bacteria after acridine orange staining. The biomass of *Synechococcus* cyanobacteria and heterotrophic bacteria were calculated with a carbon conversion factor of 294 fg/cell and 20 fg/cell, respectively.

The Chl-a concentration ranged from 0.06 to 2.34 mg C/m<sup>3</sup> in May, 2001, from 0.08 to 0.9 mg C/m<sup>3</sup> in June, 2001 and from 0.14 to 3.04 mg C/m<sup>3</sup> in June, 2002. The maximum Chl-a concentration was observed in the frontal zone and the neighboring stratified zone. The biomass and abundance of *Synechococcus* ranged from, respectively, 7.62 to 22.06 mg C/m<sup>3</sup> and 2.59 to 7.5 × 10<sup>4</sup> cells/ml in May, 2001, from 8.53 to 27.52 mg C/m<sup>3</sup> and 2.90 to 27.52 × 10<sup>4</sup> cells/ml in June 2001, and 0.69 to 55.90 mg C/m<sup>3</sup> and 0.23 to 19.01 × 10<sup>4</sup> cells/ml in June, 2002. *Synechococcus* was found mainly in the front, the mid-layer and the surface of the stratified zone. The contribution of *Synechococcus* to the total phytoplankton biomass (CB/PB) varied with mean values of 58% (May, 2001), 77% (June, 2001) and 31% (June, 2002) along the transect of the tidal front observed for the three cruises, respectively. The highest value occurred especially in the surface and bottom layer of the stratified zone. The biomass of the heterotrophic bacteria was 7.56~51.82 mg C/m<sup>3</sup> (abundance ranged 3.78~25.91 × 10<sup>5</sup> cells/ml) in May, 2001, 8.54~24.77 mg C/m<sup>3</sup> (abundance ranged 4.27~12.39 × 10<sup>5</sup> cells/ml) in June, 2001 and 3.12~10.05 mg C/m<sup>3</sup> (abundance ranged 1.56~5.02 × 10<sup>5</sup> cells/ml) in June, 2002 respectively. Maximal abundance of heterotrophic bacteria occurred in the surface, bottom of the stratified zone and bottom of the mixing zone. The tidal front might be an important factor to affect the distribution of bacterioplankton biomass in the late spring and early summer in the southern Yellow Sea.

**Key words:** tidal front; bacterioplankton; biomass; Yellow Sea

文章编号:1000-0933(2004)11-2608-08 中图分类号: Q173 文献标识码:A

海洋浮游细菌(bacterioplankton)为个体小于2μm的超微型浮游生物(picoplankton),它主要包括异养细菌,两类光合原核生物聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌、原绿球藻(*Prochlorococcus*)等,是海洋微型生物环(Microbial loop)<sup>[1]</sup>的重要组成部分。近年来,浮游细菌在生态能量、物质循环,以及其时空分布与海洋水文现象的关系已成为许多国际海洋研究计划(如GLOBEC, JGOFS)的重要内容<sup>[2]</sup>。

潮汐的搅拌作用,即潮混合,常常在中纬度陆架浅海中形成一种重要的水文现象——浅海陆架锋,亦称潮汐锋,它是近岸充分混合区和外海层化区的分界面,常伴随浮游动物、浮游植物、鱼类等的聚集<sup>[3]</sup>。例如在中国黄海,潮汐锋对浮游植物、浮游动物(中华哲水蚤)、鱼卵的分布均存在聚集作用,结果见文献<sup>[4~6]</sup>。但黄海潮汐锋对浮游细菌分布是否存在聚集作用,还没有报道。其他国家研究已经证实,陆架锋的存在对细菌的分布表现了不同程度的影响<sup>[7,8]</sup>。

本文在973项目“东、黄海生态系统动力学与生物资源可持续性利用”的‘黄海 鱼产卵场’专题调查中,对浮游细菌的分布与潮汐锋关系进行研究,目的在于阐明潮汐锋的存在对浮游细菌的分布的影响,为该项目研究提供基础认识。

## 1 材料与方法

在2001年5月16~23日、6月10~24日和2002年6月5~12日,用“北斗号”渔业资源调查船对南黄海 鱼产卵场进行了3次专项调查。浮游细菌的采集方法为:各站位用ROSETTE采水器分层采集,收集水样50 ml装于无菌的螺盖塑料杯中,用戊二醛溶液固定(终浓度为1%),4℃黑暗保存至实验室分析。参照Waterbury和Hobbie的方法用荧光显微镜镜检计数<sup>[9,10]</sup>,然后换算成浮游细菌的丰度——每毫升海水中聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌细胞数量(cells/ml)和异养细菌的细胞数量(cells/ml)。丰度乘以浮游细菌细胞碳含量得出生物量<sup>[11]</sup>。而浮游细菌细胞碳含量的转换因子随浮游细菌种类不同而异,研究中聚球藻蓝细菌的转换因子用294 fg C/cell<sup>[12,13]</sup>,异养细菌用20 fg C/cell<sup>[14]</sup>。叶绿素a与浮游植物生物量之间的转换关系按照1单位叶绿素a等于50单位碳含量来换算<sup>[15,16]</sup>,将叶绿素a浓度转换为浮游植物生物量(mg m<sup>-3</sup>)。

温度和盐度用美国海鸟电子公司(Sea-Bird Electronics

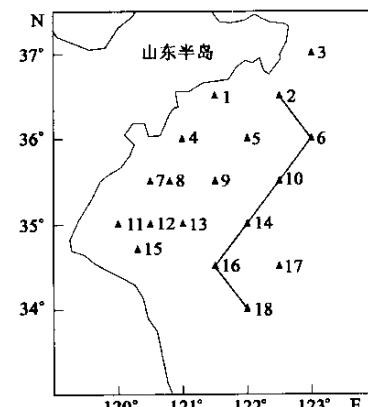


图1 2001年5月与6月及2002年6月调查站位图

Fig. 1 Sampling stations in May and June, 2001, and June, 2002. Line showed the transect for analysis

Inc.)生产的SBE-19型CTD观测。普遍认为,增温季节黄海海洋锋存在形式主要体现为潮汐锋,即在潮混合发达的近岸浅水区和潮混合较弱的远岸区之间形成的等温线密集的过渡区<sup>[17]</sup>。海洋锋面位置确定参考赵保仁和刘桂梅的方法判定<sup>[4,17]</sup>。图1为采样站位和下文所要研究的断面,图2为各航次温度的平面分布及锋面温度的断面垂直分布。

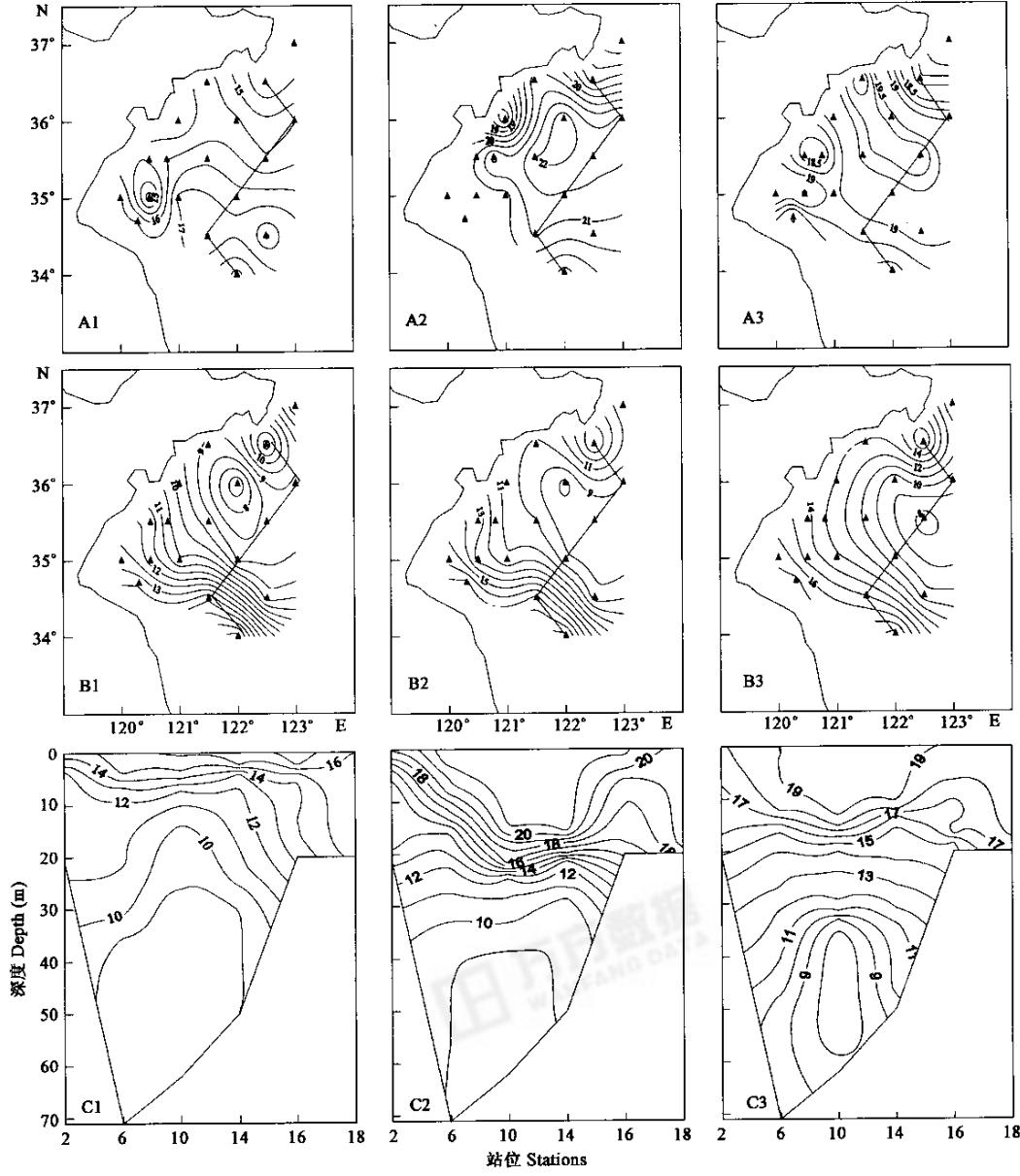


图2 2001年5月、6月和2002年6月表底及断面温度(℃)分布

Fig. 2 Temperature of Surface, Bottom and Transect in May, June, 2001, and June 2002

A1、A2、A3三个航次表温Surface temperature;B1、B2、B3底温Bottom temperature;C1、C2、C3断面温度分布Vertical temperature along the transect

## 2 结果

### 2.1 黄海潮汐锋位置的确定

3个航次海上实测表、底温度,根据温度锋划分的标准 $\Delta T / \Delta X \geq 0.05^{\circ}\text{C}/\text{n mile}$ ,结果表明:在苏北浅滩外侧和山东半岛东侧两个海区等温线密集,见图2B1~B3,满足锋区标准<sup>[4,18,19]</sup>。表层锋不显著,见图2A1~A3,这与表层锋受多种海洋和气象因素而表现出时强时弱、时隐时现的不稳定性密切相关。所研究断面温度的垂直分布见图2-C1~C3。本文的分析结果与赵保仁

通过卫星图像分析得到夏季潮汐锋主要分布在山东半岛东侧、苏北浅滩外侧、朝鲜半岛西侧等位置的结果较一致<sup>[19]</sup>。

表1给出了3个航次两个锋区临近各站位的表、底温差。可知18站位3个航次中表、底温差分别为0.03、0.02°C和0.01°C,平均0.02°C,具较明显的混合区特点。6、10、14和17站位3个航次的平均表、底温差分别为9.60、10.69、9.62°C和9.39°C,是较为明显的层化区。而2和16站位的表、底温差3个航次分别平均为2.94°C和3.73°C,介于表、底温差最大与最小值之间,确定为锋区。由以上分析,结合表1、图2确定2、16站位为锋区位置所在;6、10、14站位为层化区所在;而18站位为混合区位置所在。

## 2.2 叶绿素a浓度分布及其与潮汐锋的关系

3个航次中叶绿素a浓度变化范围分别是0.06~2.34 mg/m<sup>3</sup>(2001-05)、0.08~0.9 mg/m<sup>3</sup>(2001-06)和0.14~3.04 mg/m<sup>3</sup>(2002-06)。按照每单位叶绿素a相当于50单位C计算的浮游植物总生物量分别为3~117 mg C/m<sup>3</sup>(2001-05)、4~45 mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)和7~152 mg C/m<sup>3</sup>(2002-06)。图3表示了叶绿素a浓度在所研究断面3个航次的分布状况。从图3可以得出,2001年5月,叶绿素a浓度最大值分布在14站的10m水层,次大值出现在16站的10m、15m水层;2001年6月,叶绿素a浓度最大值分布在16站的15m水层,而次大值出现在2站的表层;2002年6月,叶绿素a浓度最大值和次大值分别分布在16站的15m和10m处。由此得出在3个航次所研究断面中,叶绿素a浓度最大值及次大值主要分布在锋区(2,16站)及其邻近的层化区(14站)20m以浅位置。

表1 断面站位表、底温差(°C)

Table 1 Temperature difference ( $\Delta T$ , °C) between the surface and bottom layers along the transect

站位 Cruises	2	6	10	14	16	17	18
2001-05	2.67	6.61	6.80	7.73	3.57	8.10	0.03
2001-06	4.53	12.76	13.00	12.12	3.78	11.34	0.02
2002-06	1.63	9.42	12.26	9.02	3.85	8.74	0.01
Average	2.94	9.60	10.69	9.62	3.73	9.39	0.02

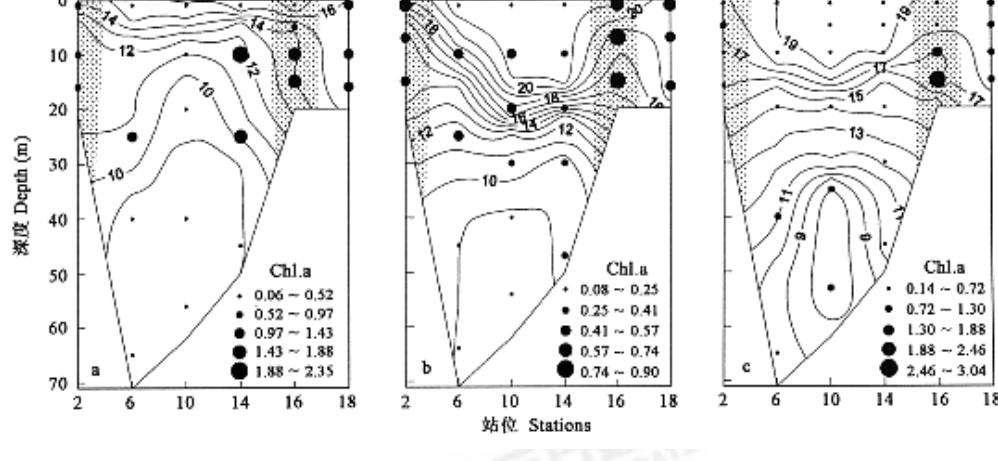


图3 Chl a 浓度在3个航次中的断面分布

Fig. 3 Distribution of chl a of the transect in three cruises

a 2001年5月2001-05; b 2001年6月2001-06; c 2002年6月2001-06

——温度 Temperatur(°C); ●叶绿素a浓度 Chlorophyll a concentration(mg/m<sup>3</sup>)

## 2.3 潮汐锋对聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量分布的影响

3个航次中聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量变化范围分别为7.62~22.06 mg C/m<sup>3</sup>(2001-05)、8.53~27.52 mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)和0.69~55.90 mg C/m<sup>3</sup>(2002-06)。图4表示的是聚球藻蓝细菌生物量在3个航次所选断面中的垂直分布状况,图5表示的是其在所研究断面站位的平均值大小。从图4可得出3航次聚球藻蓝细菌生物量最大值分别出现在锋区16站10m水层(图4a)、层化区6站的表层(图4b)和层化区6站的20m水层(图4c)。另从图5可以得出3航次聚球藻蓝细菌生物量平均最大值分别出现在锋区16(图5a)、层化区6(图5b)、层化区6(图5c)站。由此得出聚球藻蓝细菌生物量峰值多分布在锋面和层化区中上层(20m以浅)水体。

## 2.4 潮汐锋对异养细菌生物量分布的影响

3个航次中异养细菌生物量变化范围分别为7.56~51.82 mg C/m<sup>3</sup>(2001-05)、8.54~24.77 mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)和3.12~10.05 mg C/m<sup>3</sup>(2002-06)。图6表示的是异养细菌生物量在3个航次所选断面中的垂直分布状况,图7表示的是其在所研究断面站位的平均值大小。从图6a可得出在2001-05航次中异养细菌生物量最大值出现在18站次表层(5m);从图6b可得出在2001-

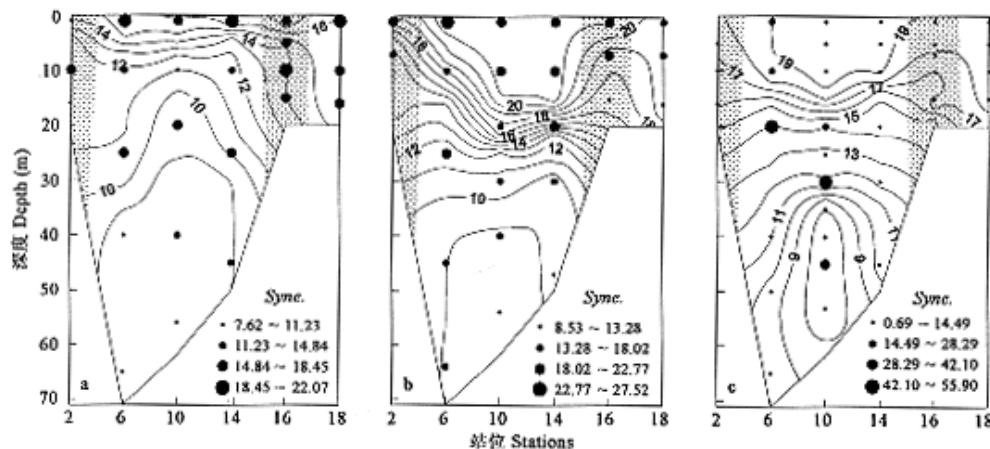


图4 3个航次中所选断面聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量的分布状况

Fig. 4 Distribution of the biomass *Synechococcus* spp. along the transect in three cruises

a 2001年5月; b 2001年6月; c 2002年6月

——温度 Temperature(℃); ●: 蓝细菌生物量 Biomass of *Synechococcus* spp. (mg C/m<sup>3</sup>)

06航次中,异养细菌生物量最大值出现在18站底层(16m);从图6c可得出在2002-06航次中,异养细菌生物量最大值在层化区6、10站的表层出现。另从图7来看,其平均最大值在3个航次中分别出现在18、18、6站,即在混合区、混合区、层化区出现。由此分析可得异养细菌生物量最大值多出现在混合区表、底层和层化区的表层。

表2是对聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌和异养细菌的丰度和生物量最大值和最小值的分布和浮游植物总生物量的最大和最小值进行了说明。从表2可以得到与上述2.2, 2.3, 2.4分析所一致的结果。

## 2.5 聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量(CB)在浮游植

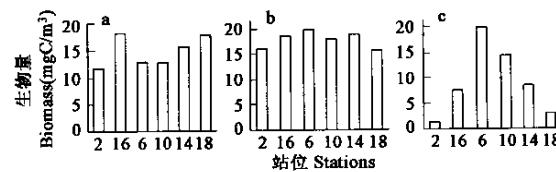


图5 3个航次中聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量在所选断面各个站位平均值

Fig. 5 Average *Synechococcus* spp. biomass of different stations along the transect of three cruises

a 2001年5月; b 2001年6月; c 2002年6月

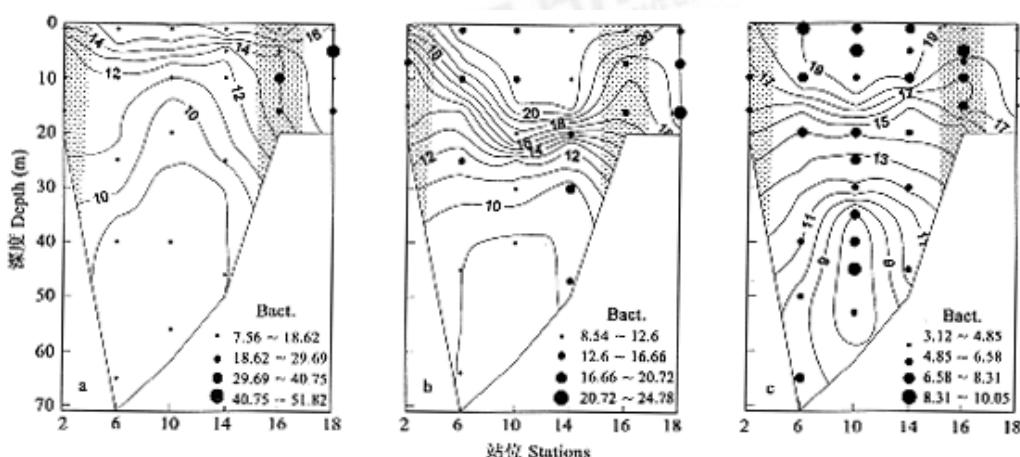


图6 3个航次中所选断面异养细菌生物量的分布状况

Fig. 6 Distribution of the biomass of Heterotrophic Bacteria along the transect in three cruises

a 2001年5月; b 2001年6月; c 2002年6月

物总生物量(PB)中所占比值分布以及其与潮汐锋的关系

3个航次中聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献(CB:PB)平均值分别为:58%(2001-05)、77%(2001-06)和31%(2002-06)。在2001年5月与6月的航次中,此比值的最大值分布在层化区(6, 10, 14站)的表层和底层、近底层(50m以深);(图8a,b)在2002-06航次中,此比值最大值分布在层化区(6站)的中层和上层(图8c)。另外从图8中还可以得出:在锋区(2,16站)和混合区(18站)处,聚球藻蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献较小,而在层化区较大。故在所研究潮汐锋的3个航次中,聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献在层化区,尤其在层化区表层和底层较大(>40%),而在锋区及混合区,贡献较小(<20%)。

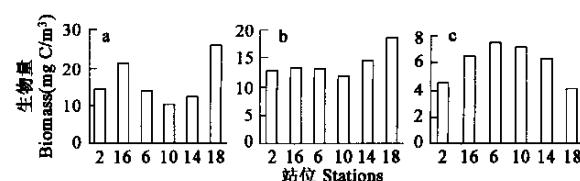


图7 3个航次异养细菌生物量在所选断面各个站位的平均值

Fig. 7 Average heterotrophic bacteria biomass of different stations along the transect of three cruises

a 2001年5月; b 2001年6月; c 2002年6月

表2 3个航次浮游细菌及浮游植物生物量分布状况

Table 2 The distribution of bacterioplankton and phytoplankton biomass in three cruises

航次 Cruises	聚球藻蓝细菌 <i>Synechococcus</i> spp.			异养细菌 Heterotrophic bacteria			浮游植物总生物量 Phytoplankton biomass		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
2001-05	Abu. <sup>①</sup>	7.50	2.59	4.96	25.91	3.78	7.84		
	Bio. <sup>②</sup>	22.06	7.62	14.57	51.82	7.56	15.68	117	3
	Stn. <sup>③</sup>	16(10 m)	6(65 m)		18(5 m)	10(20 m)		14(10 m)	10(40 m)
2001-06	Abu. <sup>①</sup>	9.36	2.90	5.69	12.39	4.27	6.84		
	Bio. <sup>②</sup>	27.52	8.53	16.72	24.77	8.54	13.75	45	4
	Stn. <sup>③</sup>	6(1 m)	2(15 m)		18(16 m)	10(54 m)		16(15 m)	6(64 m)
2002-06	Abu. <sup>①</sup>	19.01	0.23	3.31	5.02	1.56	3.14		
	Bio. <sup>②</sup>	55.90	0.69	9.74	10.05	3.12	6.27	152	7
	Stn. <sup>③</sup>	6(20 m)	2(1 m)		6(1 m)	2(1 m)		16(15 m)	6(65 m)

① Abundance (cells/ml), for *Synechococcus* ( $\times 10^4$ ); for heterotrophic bacteria ( $\times 10^5$ ); ② Biomass (mg C/m<sup>3</sup>); ③ Stations, 站位及所在水深

### 3 讨论

#### 3.1 潮汐锋对异养细菌分布的影响

Floodgate 对 Liverpool Bay 的锋面研究认为冬季晚期(1978-02)异养细菌生物量在锋面层化区有一高值(587mg C/m<sup>3</sup>)。在春末夏初(1978-06)时期,异养细菌生物量在锋面的两侧没有大的区别,且值都较小。并且得出不同大小的细菌分布状况也不相同:小细菌(mini-bacteria,  $0.004 \sim 0.1 \mu\text{m}^3$ )多分布在锋面的混合区;较大的细菌( $0.1 \sim 0.7 \mu\text{m}^3$ )分布在层化区,不随季节改

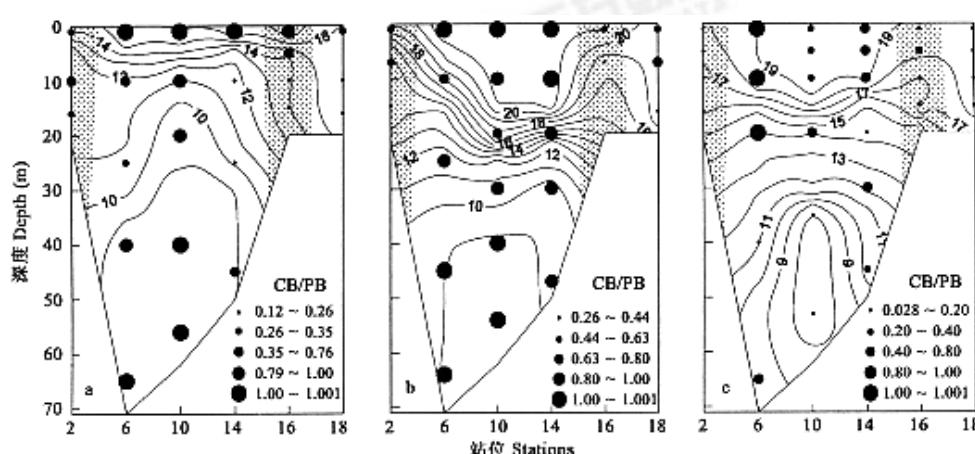


图8 3个航次所选断面中蓝细菌生物量在浮游植物总生物量中所占比例的分布特点

Fig. 8 Distribution of CB:PB of the transect in three cruises

CB Cyanobacterial(*Synechococcus* spp.) biomass; PB Phytoplankton biomass

a 2001年5月; b 2001年6月; c 2002年6月

——温度 Temperature (C); ● CB:PB

变<sup>[8]</sup>。春末夏初季节(2001-05~06, 2002-06), 异养细菌在3个航次中最大生物量51.82mg C/m<sup>3</sup>(2001-05)、24.77mg C/m<sup>3</sup>(2001-06)、10.05mg C/m<sup>3</sup>(2002-06)分别出现在混合区18号站、混合区18号站、层化区6号站(表2)。虽然未对菌体进行大小分级, 但其分布与Floodgate的结果较一致。另Tarran在1996年5~6月期间对大西洋东北部(20°W, 59°18'N~19°W, 37°N)海区研究发现, 异养细菌在锋面的混合区有最大生物量33.70mg C/m<sup>3</sup><sup>[20]</sup>, 与本文研究结果相似。

异养细菌生物量之所以在近岸混合区(inshore mixed waters)有较大值, 是因为细菌营养来源主要依靠于可利用的颗粒(POM)和溶解有机物(DOM)。在研究断面中站位18位于近岸, 雨水径流量大, 颗粒有机物含量比较丰富, 水体混合比较均匀, 溶解有机物浓度相对较高, 为细菌生长提供了足够的营养。

### 3.2 潮汐锋对聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌及其在浮游植物总生物量中所占比值分布的影响

大量研究证明锋面对浮游植物存在聚集作用<sup>[4, 5, 7, 20, 21]</sup>。刘桂梅在对中国黄海的潮汐锋研究中得出叶绿素a高值区通常位于锋区附近邻近的层化区或混合区一侧<sup>[4, 5]</sup>。Floodgate在春末夏初的研究表明, 浮游植物生物量在锋区临近的层化区一侧有最大值<sup>[8]</sup>。Tarran的研究结果认为硅藻最大生物量出现在锋区临近的混合区一侧。这些与本文的研究叶绿素a浓度最大值及次大值出现在锋区及其邻近的层化区(表2, 图3)相一致<sup>[20]</sup>。Savide在解释锋区附近浮游植物生物量增加时, 认为以下3个因素起关键作用:①锋区的聚集作用, 引起漂浮物质的积累;②底层营养物质的上涌;③来自锋区不同方向的水团混合包含了互为补充的因子, 促进了光合作用<sup>[21]</sup>。

作为对浮游植物总生物量有重要贡献的蓝细菌, 研究结果表明:聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌多分布在锋区或锋区附近的层化区表层和水体中层(表2)。Tarran认为聚球藻蓝细菌分布在水体中上层, 生物量峰值出现在锋面层化区表层与35m之间<sup>[20]</sup>, 与本文的结果相一致。

聚球藻蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献, 在3个航次的平均贡献分别为58%(2001-05)、77%(2001-06)、31%(2002-06)。由图8可知, 在层化区的上层(20m以浅)和底层(50m以深)蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献较大。这可以从两方面解释, 一方面从整个海区来看, 聚球藻蓝细菌主要分布在水体中上层, 且最大值出现在跃层附近(图4), 同时又由于有较高的表面积与体积比, 对表层营养的吸收更有利。另一方面浮游植物在近岸50m以深较少分布(图3), 且蓝细菌作为自养超微型生物比其他浮游植物更能适应在较低光辐射水平下生长<sup>[22]</sup>。

海洋潮汐锋作为一种海洋物理过程, 其内部特性以及对营养盐、浮游生物的聚集作用, 对浮游细菌生物量的分布也造成一定的影响。由于浮游细菌生物量分布受温度、营养盐供应(bottom-up control)、摄食压力(top-down control)等影响<sup>[23, 24]</sup>, 又因为锋面对包括碎屑、浮游植物、浮游动物在内的悬浮物质的聚集作用。浮游细菌对有机碎屑的矿化刺激了浮游植物的生长, 同时浮游细菌和浮游植物的生长增加了浮游动物的活动性, 加速了营养物质的再循环<sup>[7]</sup>。锋面的聚集作用, 包含了一个海洋微食物环的过程, 潮汐锋对浮游细菌生物量分布包括对微食物环的影响还有待于进一步研究。

## 4 结语

黄海潮汐锋与浮游细菌生物量分布的关系研究之初步结果表明:在南黄海 鱼产卵场春末夏初(5~6月份)时期, 聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌生物量最大值主要分布于锋区及层化区表层和水体中层, 异养细菌生物量最大值则多出现在混合区的表、底层和层化区的表层。就聚球藻蓝细菌对浮游植物总生物量的贡献而言, 以层化区较高, 且主要为表层和底层;而在锋区及混合区较小。

## References:

- [1] Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1983, **10**: 257~263.
- [2] Tang Q S, Fan Y B, Lin H. Initial inquiring into the development strategy of Chinese ocean ecosystem dynamics research. *Advance in Earth Sciences*, 1996, **11**(2): 160~168.
- [3] Liu Z L, Ning X R. Phytoplankton standing stock and primary production in the front of Hangzhou Bay. *Donghai Marine Science*, 1994, **12**(4): 58~66.
- [4] Liu G M, Sun S. Effect of marine front on abundance of *Calanus sinicus* in the Spring and Autumn, Yellow Sea. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(11): 1150~1154.
- [5] Liu G M, Sun S, Wang H, et al. Abundance of *Calanus sinicus* across the tidal front in the Yellow Sea, China. *Fish. Oceanogr.*, 2003, **12**(4/5): 191~298.
- [6] Wei H, Su J, Wan R, et al. Tidal front and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the Yellow Sea. *Fish. Oceanogr.*, 2003, **12**(4/5): 442.
- [7] Pingree R D, Pugh P R, Holligan P M, et al. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the

English channel. *Nature*, 1975, **258**: 672~677.

- [8] Floodgate G D, Fogg G E, Jones D A, et al. Microbiological and zooplankton activity at a front in Liverpool Bay. *Nature*, 1981, **290**: 133~136.
- [9] Waterbury J B, Watson S W, Guillard R, et al. Widespread occurrence of a unicellular, marine planktonic cyanobacterium. *Nature*, 1979, **277**: 293~294.
- [10] Hobbie J E, Daley R J, Jasper S. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1977, **33**(5): 1225~1228.
- [11] Xiao T, Wang R. Distribution of *Synechococcus* in the Bohai Sea in Autumn and Spring. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(12): 2071~2078.
- [12] Cuhel R, Waterbury J B. Biochemical composition and short term nutrient incorporation patterns in unicellular marine cyanobacterium, *Synechococcus* (WH7803). *Limnol. Oceanogr.*, 1984, **29**: 370~374.
- [13] Gallagar S M, Waterbury J B, Stoecker D K. Efficient grazing and utilization of the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. by larvae of the bivalve *Mercenaria*. *Mar. Biol.*, 1994, **119**: 251~259.
- [14] Lee S, Fuhrman J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1987, **53**(6): 1298~1303.
- [15] Krempin D W, Sullivan C W. The seasonal abundance, vertical distribution, and relative microbial biomass of chroococcoid cyanobacteria at a station in southern California coastal waters. *Can. J. Microbiol.*, 1981, **27**: 1341~1344.
- [16] Harris G P. Picoplankton Ecology, Structure, Function and Fluctuations. *Chapman and Hall*, 1986, 21~235.
- [17] Zhao B. The fronts of the Huanghai Sea cold water mass induced by tidal mixing. *Oceanogr. Limnol. Sin.*, 1985, **16**(6): 451~459.
- [18] Tang Y X, Zheng Y F. Research on fronts in the Yellow & East China Sea. *Marine Science Bulletin*, 1990, **9**(5): 89~96.
- [19] Zhao B. The continental shelf fronts induced by tidal mixing in the Huanghai Sea. *J. Oceanogr. Huanghai & Bohai Seas*, 1987, **5**(2): 16~23.
- [20] Tarran G A, Zubkob M V, Sleigh M A, et al. Microbial community structure and Standing Stocks in the NE Atlantic in June and July of 1996. *Deep-Sea Research II*, 2001, **48**: 963~985.
- [21] Salvide G. A preliminary study of the distribution of chlorophyll a in the vicinity of fronts in the Celtic and western Irish Seas. *Est. Coastal and Shelf Sci.*, 1976, **4**: 617~625.
- [22] Platt T, Subba R D V, Irwin B. Photosynthesis of picoplankton in the Oligotrophic Ocean. *Nature*, 1983, **301**: 702~704.
- [23] Wright R T, Coffin R B. Planktonic bacterial in estuaries and coastal waters of northern Massachusetts: Spatial and temporal distribution. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1983, **11**: 205~216.
- [24] Shiah F K, Ducklow H W. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 1994, **39**(6): 1243~1258.

## 参考文献:

- [2] 唐启升, 范元炳, 林海. 中国海洋生态系统动力学研究发展战略初探. 地球科学进展, 1996, **11**(2): 160~168.
- [3] 刘子琳, 宁修仁. 杭州湾锋区浮游植物现存量和初级生产力. 东海海洋, 1994, **12**(4): 58~66.
- [4] 刘桂梅, 孙松. 春秋季黄海海洋锋对中华哲水蚤分布的影响. 自然科学进展, 2002, **12**(11): 1150~1154.
- [11] 肖天, 王荣. 春季与秋季渤海蓝细菌(聚球蓝细菌属)的分布特点. 生态学报, 2002, **22**(12): 2071~2078.
- [17] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 1985, **16**(6): 451~459.
- [18] 汤毓祥, 郑义芳. 关于黄、东海海洋锋的研究. 海洋通报, 1990, **9**(5): 89~96.
- [19] 赵保仁. 黄海潮生陆架锋的分布. 黄渤海海洋, 1987, **5**(2): 16~23.