

春季与秋季渤海蓝细菌(聚球蓝细菌属)的分布特点

肖 天, 王 荣

(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)

摘要: 利用荧光显微镜技术研究渤海中蓝细菌(聚球蓝细菌属 *Synechococcus*) 的分布特点。发现春季(1999 年 4~5 月)蓝细菌生物量较低($0.86 \sim 0.01 \text{ mgC/m}^3$, 平均 $= 0.13$), 秋季(1998 年 9~10 月)较高($16.6 \sim 0.37 \text{ mgC/m}^3$, 平均 $= 3.27$)。秋季蓝细菌生物量的平均值(3.27)是春季的(0.13)25 倍。虽然不同水层蓝细菌的生物量与水温分布相反, 但水温仍是影响蓝细菌季节变化差异的主要原因。春秋季节蓝细菌生物量垂直变化都是 10 m 层 > 表层 > 底层。蓝细菌生物量在浮游植物总生物量中所占比例(CB/PB), 秋季是 $0.399 \sim 0.003$ (平均 0.064), 春季是 $0.047 \sim 0.000$ (平均 0.003), 两季相差达 21 倍(平均值)。小型浮游生物是渤海蓝细菌的主要捕食者, 蓝细菌在渤海微食物环中有重要作用。

关键词: 蓝细菌; 分布特点; 渤海

Distribution of *Synechococcus* in the Bohai Sea in Autumn and Spring

XIAO Tiao, WANG Rong (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Science Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (12): 2071~2078.

Abstract: Marine cyanobacteria (*Synechococcus* cells $< 2 \mu\text{m}$ in size) are a group of small unicellular autotrophic procaryotes. Since their discovery by Waterbury (1979), it has become evident that the cyanobacteria are abundant and widespread in the world's ocean. One of most significant recent advances in marine biogeochemistry has been the realisation that small organisms, such as microbes, are important in the cycling of organic matter in the ocean. In the microbial community, it is now known that picoplankton numerically dominates the phytoplankton in oceanic regions. A major component of the picoplankton are the chroococcoid cyanobacteria of the genus *Synechococcus*. These tiny autotrophs are characterised by the highly fluorescent photopigment, phycoerythrin, which readily allows to count them by *in vivo* fluorescence techniques. Cyanobacteria are considered to be significant contributors to primary producers in many different marine environments, particularly in oligotrophic oceanic waters, and they are a key component of the microbial food web. In contrast to the East China Sea and Jiao Zhou Bay, little is known about the cyanobacteria in the Bohai Sea. So, we studied the variations of cyanobacterial abundance and their contribution to phytoplankton biomass in the Bohai Sea, and studied the role of cyanobacteria in the marine microbial food loop.

Cyanobacteria (*Synechococcus*) in the Bohai Sea were measured by epifluorescence microscopy in autumn (1998-09~10) and spring (1999-04~05). Cyanobacterial biomass varied $0.37 \sim 16.6 \text{ mgC/m}^3$ (mean $= 3.27 \text{ mgC/m}^3$) in autumn and $0.01 \sim 0.86 \text{ mgC/m}^3$ (mean $= 0.13 \text{ mgC/m}^3$) in spring. It was

higher in autumn than that in spring . There was high value of cyanobacterial abundance at A4 and B2 stations of the Bohai Sea in spring and there was low value in the central area in autumn. Vertical distribution patterns were 10 m>surface>bottom in autumn and spring. The results at anchor stations showed it was evident that daily variations of cyanobacteria, but it was irregular. Seawater temperature was an important factor that affects the seasonal variations of cyanobacteria in the Bohai Sea. According to the Q_{10} formula, the Q_{10} value for chlorophyll a was 1.48 and for cyanobacteria was 2.54 in winter. This results showed the temperature influence on growth of cyanobacteria is larger than that on other phytoplankton. The ratio of cyanobacterial biomass to phytoplankton biomass (CB/PB) was 0.003~0.399 (mean=0.064) in autumn and 0.000~0.047 (mean=0.003) in spring. The high value of CB/PB was in oligotrophic waters, which was 0.399. Experimental investigations showed that cyanobacterial population was grazed by microzooplankton in the Bohai Sea, the grazing pressure by microzooplankton ranged from 36% to 42% of the cyanobacteria per day in spring and from 12% to 59% in autumn.

Key words: cyanobacterial biomass; distribution; the Bohai Sea
文章编号:1000-0933(2002)12-2071-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Waterbury 在 1979 应用荧光显微技术(落射式荧光显微镜)发现在世界热带和温带海洋中广泛生存着属超微型光合原核生物(picopkaryotes)的蓝细菌 *Synechococcus* (聚球蓝细菌属,细胞粒径为 0.5~1.5 μm)^[1]。由于它们在海洋中数量大,能量转换效率高而受到海洋生态学家的重视。在热带和温带海洋中其丰度通常在 $10^3\sim10^5$ cells/ml^[2],在热带太平洋,它对浮游植物总生物量的贡献达 25%~90%,对总初级生产力的贡献达 20%~80%^[3]。而在世界大多数海区,它对浮游植物总生物量的贡献为 20%,对总初级生产力的贡献达 60%^[4]。近来发现这种数量占优势的超微型光合原核生物,其生物量通常比其消费者——微型浮游动物至少高一个数量级,足以作为微型浮游动物的食物源,充分显示其在海洋微型食物环中的重要性,被认为是世界海洋大多数海区光合浮游生物的一个重要组成部分^[5]。在我国长江口冲淡水区夏季可达 10^5 cells/ml^[6],但有关渤海蓝细菌的时空分布未见研究报道。本文结合国家自然科学基金“九五”重大项目“渤海海洋生态系统动力学和资源持续利用研究”,对渤海进行了秋、春两个航次的现场调查和实验室分析试验,获得了比较系统的渤海蓝细菌时空分布数据资料。

1 材料与方法

1.1 调查时间与取样站位

调查是乘“东方红 2 号”科学调查船于 1998 年 9~10 月和 1999 年 4~5 月在 37°45'~39°N, 118°30'~121°30'E 的渤海海区进行了两个航次的调查。调查共设 30 个大面站和 5 个连续站(图 1)。大面站和连续站均按表层(1m 层为表层),10m 和底层(近海底 5m 层为底层)取水样。1999 年 4~5 月对 30 个大面站进行了重复调查,既第 1 次大面站调查和第 2 次大面站调查。在实验结果中只涉及第 2 次大面站调查结果,第 1 次大面站调查结果仅进行了一些分析讨论。

取 100 ml 海水水样放入灭菌的 125 ml 棕色样品瓶中,用戊二醛固定(固定最终浓度为 1%)。样品在 4℃ 左右保存直至分析。在一个月之内分析完毕。

1.2 海洋蓝细菌计数和蓝细菌生物量的计算

取固定后的水样 10~50ml 用直径 25mm,孔径为 0.2 μm 的黑色核孔滤膜(black nuclepore filter)进行抽滤,抽滤负压不超过 267Pa。将滤膜取下放在载玻片上,滴一滴无菌水,盖上盖玻片,加专用油(immersion oil, Germany),用 OPTON 万能 II 型落射式荧光显微镜,在 HBO 50W 光源,BP450~490,FT510,LP520 组滤光片条件下,用 40 \times 物镜计数,蓝细菌(*Synechococcus*)显桔黄色。每张滤膜计数两行,每行计数 10~20 个视野,每个视野细胞数量控制在 10~100 个之间,每行至少计数 200~300 个细胞^[1, 7]。根据视野面积,滤膜过滤面积和计数计算每毫升海水中蓝细菌的细胞数量(cell/ml)。蓝细菌的生物量按海洋蓝细菌细胞碳含量按 294fgC/cell 换算^[8, 9]。

2 结果
2.1 蓝细菌生物量的分布特点

结果表明秋季(1998 年 9~10 月)蓝细菌生物量较高($16.6 \sim 0.37 \text{ mgC/m}^3$, $\text{mean} = 3.27$, $n = 158$),春季(1999 年 4~5 月)蓝细菌生物量较低($0.86 \sim 0.01 \text{ mgC/m}^3$, $\text{mean} = 0.13$, $n = 368$)。秋季蓝细菌生物量的最高值(16.6 mgC/m^3)是春季最高值(0.86 mgC/m^3)的 19 倍,秋季蓝细菌生物量的平均值是春季的 25 倍。

蓝细菌的水平分布 秋季(1998 年 9~10 月)在 A4、G5 站附近和 G2 站附近蓝细菌生物量较高,最高达 16.6 mgC/m^3 ($5.65 \times 10^4 \text{ cells/ml}$) (图 2)。在 D1 站附近较低,最低是 0.37 mgC/m^3 ($1.27 \times 10^3 \text{ cells/ml}$)。高值是低值的 44 倍多。春季(1999 年 4~5 月)蓝细菌在 A4 和 B2 站附近数量较高,最高达 0.86 mgC/m^3 ($1.50 \times 10^4 \text{ cells/ml}$)。在 E1 站附近蓝细菌数量较低,最低是 0.01 mgC/m^3 ($0.50 \times 10^3 \text{ cells/ml}$)。蓝细菌生物量的最高值是最低值的 30 倍(图 3)。

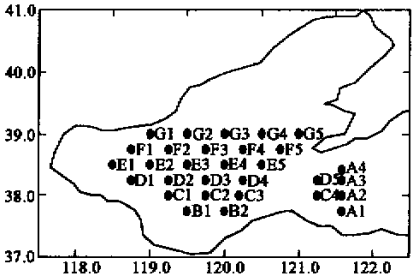


图 1 渤海聚球菌调查站位图(1998,1999)
Fig. 1 Map showing the location of *Synechococcus* sampling stations in the Bohai Sea

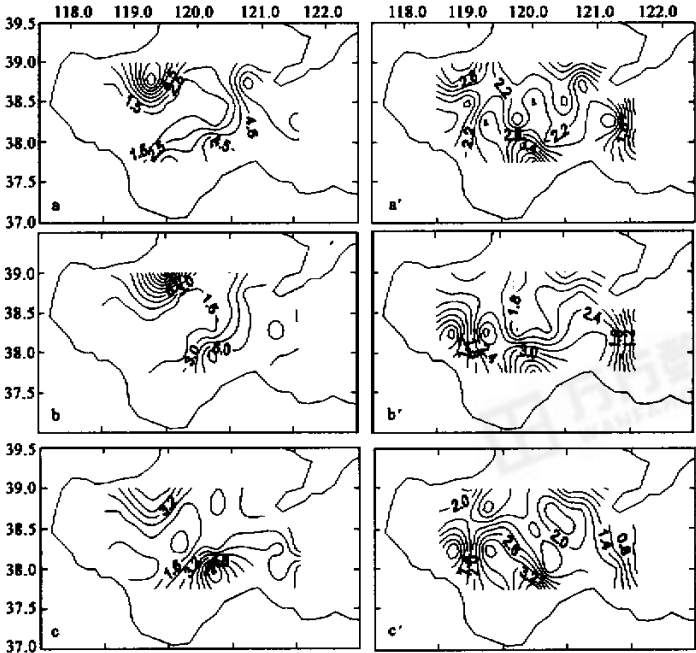


图 2 渤海秋季(1998-09~10)蓝细菌生物量(mgC/m^3)和叶绿素 a (mg/m^3)在各水层的水平分布
Fig. 2 Horizontal distributions of CB and Chl. a in the Bohai Sea in 1998-09~10

a: 表层蓝细菌 CB, surface b: 10m 层蓝细菌 CB, 10m c: 底层蓝细菌 CB, bottom a': 表层叶绿素 Chl. a, surface b': 10m 层叶绿素 Chl. a, 10m c': 底层叶绿素 Chl. a, bottom

蓝细菌的垂直分布 秋季(1998 年 9~10 月)表层、10m 层和底层蓝细菌生物量的平均值分别为 3.55 mgC/m^3 、 3.37 mgC/m^3 和 2.45 mgC/m^3 , 即 10m 层>表层>底层。春季(1999 年 4~5 月)表层、10m 层和底层蓝细菌生物量的平均值分别为 0.14 mgC/m^3 、 0.15 mgC/m^3 和 0.13 mgC/m^3 。没有明显的垂直分布变

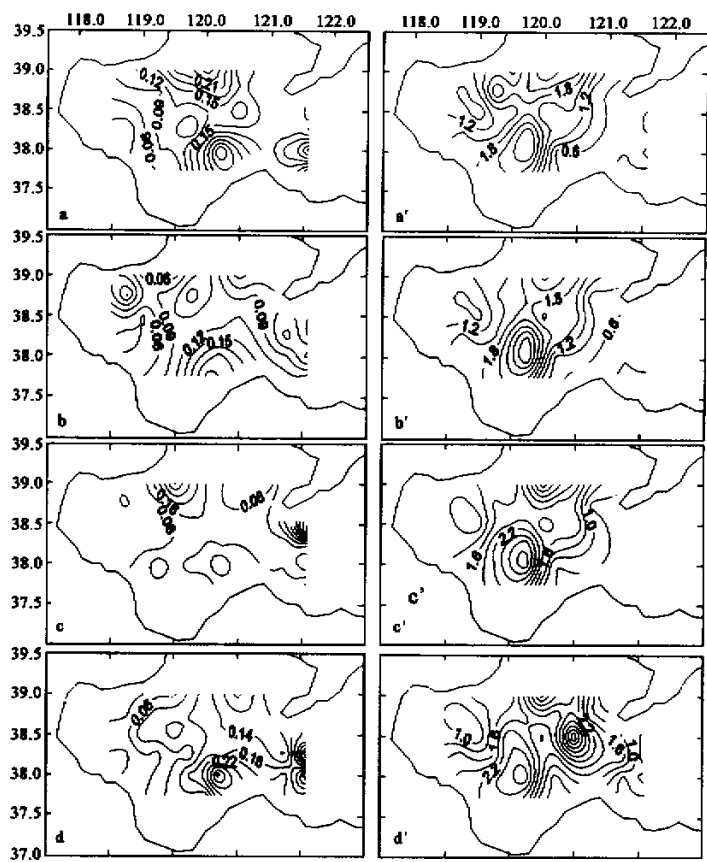


图3 渤海春季(1999-04~05)蓝细菌生物量(mgC/m^3)和叶绿素a (mg/m^3)在各水层的水平分布

Fig. 3 Horizontal distributions of CB and Chl. a in the Bohai Sea in 1999-04~05

a:表层蓝细菌 CB, surface b:5m 层蓝细菌 CB, 5m c:10m 层蓝细菌 CB, 10m d:底层蓝细菌 CB, bottom
a':表层叶绿素 Chl. a, surface b':5m 层叶绿素 Chl. a, 5m c':10m 层叶绿素 Chl. a, 10m d':底层叶绿素 Chl. a, bottom

化趋势,但仍然是 10m 层>表层>底层。

在连续站(24h 为 1 个周期,每隔 3h 取样 1 次)取样观测发现,秋季东部的 A2 和 A4 站蓝细菌的垂直分布是 10m 层>底层>表层,10m 层和底层的生物量明显大于表层的生物量。在中部的 E3 站垂直分布是 10m 层>表层>底层,且 10m 层和表层的生物量明显大于底层的生物量(图 6),这与大面站蓝细菌的垂直分布变化有所不同。春季 5 个连续站(A2、A4、B1 和 E3)的蓝细菌垂直分布没有明显的变化趋势(图 7)。这与大面站蓝细菌的垂直分布变化一致。

在连续站取样观测还发现蓝细菌,秋季昼夜变化规律不明显,春季有两个高峰期,一个在中午时分,一个在午夜。秋季蓝细菌的昼夜变化最高值与最低值相差 8 倍,春季日变化最高值与最低值相差 5 倍。

2.2 蓝细菌与叶绿素-a 及浮游植物生物量

秋季和春季蓝细菌生物量的分布变化与叶绿素-a 的不一致。如果按 C:Chla 为 43 计算浮游植物生物量^[10],蓝细菌生物量在总浮游植物生物量(cyanobacterial biomass/phytoplankton biomass or CB/PB)中占

的比例秋季是 0.399~0.003 (平均 0.064, $n=116$),春季是 0.047~0.000(平均 0.003, $n=235$),秋季是春季的 21 倍(平均值)。 CB/PB 在秋季的分布是表层和 10m 层东部深水区长,底层是西部近岸浅水区较高。这与叶绿素-a 和硝酸盐(NO_3)的分布规律基本相反(图 4)。

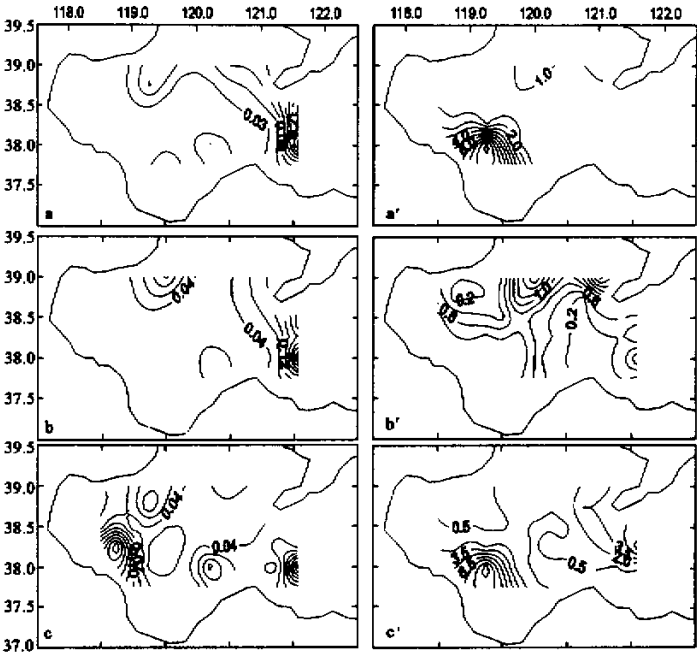


图 4 渤海秋季(1998-09~10) CB/PB 和硝酸盐 (NO_3 , $\mu M/L$)在各水层的水平分布

Fig. 4 Horizontal distributions of CB/PB and NO_3 in the Bohai Sea in 1998-09~10

a:表层 CB/PB CB/PB , surface b:10m 层 CB/PB CB/PB , 10m c:底层 CB/PB CB/PB , bottom a':表层 NO_3 NO_3 , surface b':10m 层 NO_3 NO_3 , 10m c':底层 NO_3 NO_3 , bottom

3 分析与讨论

3.1 渤海秋季蓝细菌生物量较春季高 21 倍的主要原因可能与海水温度有关,秋季调查时的海水温度是 23.9~12.4℃(平均 22.3℃, $n=81$),春季水温是 12.1~6.0℃(平均 8.8℃, $n=230$),秋季平均水温是春季平均水温的 2.5 倍。1997 年 6 月在渤海几个定点站位调查发现蓝细菌生物量是 11.2~0.63 mgC/m^3 ,海水温度是 18.6~14.3℃。Waterbury 1986 年研究认为海洋蓝细菌的最适生长温度是 18~25℃,5℃以下不适合蓝细菌生长^[11]。在胶州湾的调查中也发现蓝细菌的季节生长变化与海水温度呈正相关^[12]。但渤海春秋两季各层蓝细菌生物量变化与水温变化不一致,没有较明显的相关性(图 8)。在季节变化中温度可能是影响蓝细菌生长的主要原因,而在某一海区的某一时段温度可能不是影响蓝细菌分布变化的主要原因。通过世界不同海区平均水温与蓝细菌平均生物量的关系比较,也可以看到这一现象的存在^[13]。

3.2 对于渤海春季两次大面站叶绿素-a、蓝细菌生物量和海水温度变化的调查结果进行计算发现,第一次大面站叶绿素-a 的平均值是 1.42 mg/m^3 ,蓝细菌生物量平均值是 0.063 mgC/m^3 ,海水温度平均值是 8.13℃,第二次大面站分别是 1.93 mg/m^3 、0.129 mgC/m^3 和 9.42℃,当海水温度增加了 1.29℃,叶绿素增加 35%,而蓝细菌生物量增加了 105%。如果用 Q_{10} 进行计算它们的变化,发现叶绿素-a 的 Q_{10} 值是 1.48,而蓝细菌的 Q_{10} 值为 1.45^[14,15]。这表明渤海春季海水温度对蓝细菌生长的影响较其他浮游植物大。

3.3 蓝细菌生物量在浮游植物中所占的比例(CB/PB)在秋季是与浮游植物粒级分布结果一致的^[16]。如

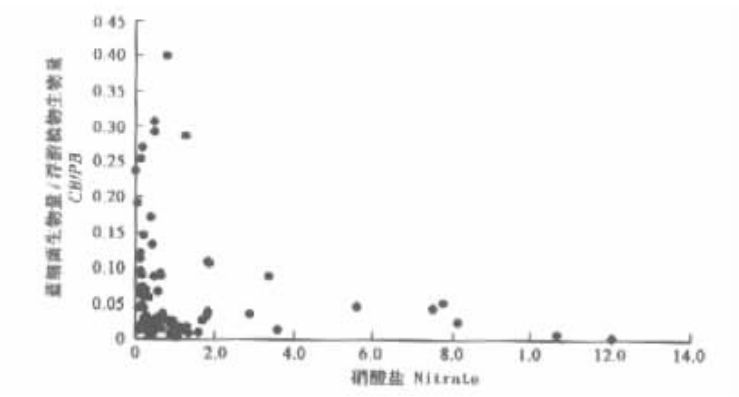


图 5 渤海秋季(1998-09~10)CB/PB 和硝酸盐 (NO₃,μm/L)之间的变化关系

Fig. 5 The relationship of CB/PB with nitrate (NO₃,μm/L) in the Bohai Sea in 1998-09~10

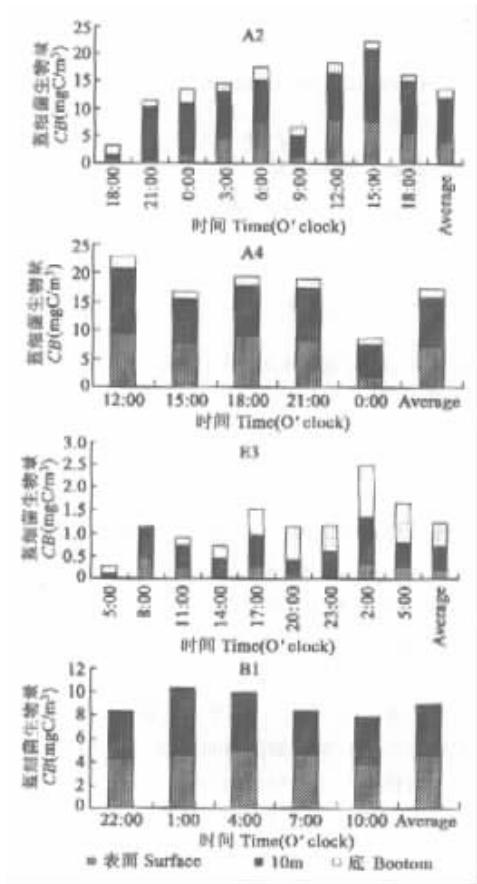


图 6 渤海秋季连续站蓝细菌生物量(mgC/m³)的日变化(1998-09~10)
Fig. 6 Daily variations of cyanobacterial biomass at anchor station in the Bohai Sea (1998-09~10)

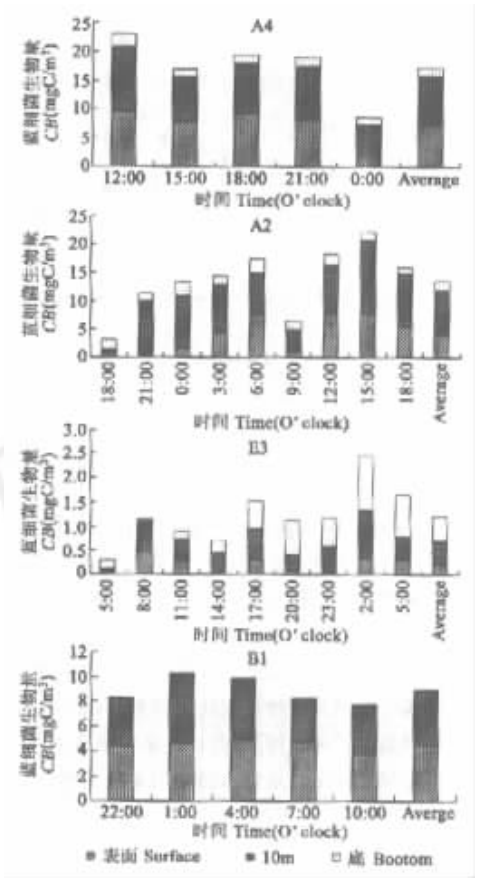


图 7 渤海春季连续站蓝细菌生物量(mgC/m³)的日变化(1999-04~05)
Fig. 7 Daily variations of cyanobacterial biomass at anchor station in the Bohai Sea (1999-04~05)

果大于 $5\mu\text{M NO}_3$ 的海域为富营养(eutrophic)区, $0.5\sim 5\mu\text{M NO}_3$ 的为中营养(mesotrophic)区,而小于 $0.5\mu\text{M NO}_3$ 的为寡营养(oligotrophic)区的话^[17],那么蓝细菌在浮游植物中的百分比在富营养水体中是 $5.1\%\sim 0.3\%$ (平均 3% , $n=6$),在中营养水体中是 $39.9\%\sim 0.4\%$ (平均 5.5% , $n=38$),在寡营养水体中是 $27.7\%\sim 0.8\%$ (平均 7.6% , $n=42$)(图 5)。虽然蓝细菌在个别站位个别水层占浮游植物的比例较高可达 $40\%\sim 30\%$,但在渤海秋季浮游植物中蓝细菌占有量不足 10% 。

3.4 将渤海的蓝细菌生物量与我国其它海区的蓝细菌生物量进行比较发现(表 1),春季渤海蓝细菌生物量较胶州湾和黄海低,秋季渤海蓝细菌生物量较胶州湾高^[12]。

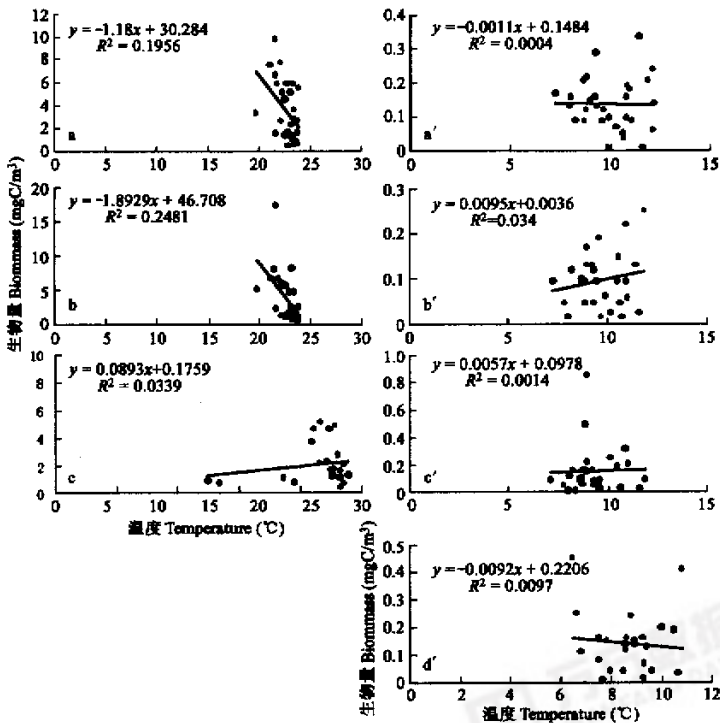


图 8 秋季和春季渤海各水层蓝细菌生物量和温度之间的变化关系

Fig. 8 The relationship of CB with $T(^{\circ}\text{C})$ in the Bohai Sea in spring and autumn

a:秋季表层 autumn surface b:秋季 10m 层 autumn 10m c:秋季底层 autumn bottom a':春季表层 spring surface b':春季 5m 层 spring 5m c':春季 10m 层 spring 10m d':春季底层 spring bottom

表 1 蓝细菌生物量(CB mgC/m³)在渤海、胶州湾、黄海和东海的季节变化

海区 Area	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
渤海 Bohai Sea		0.13(0.86~0.01)		3.27(16.6~0.37)
胶州湾 ^[1] Jiaozhou Bay	0.03(0.17~0.08)	1.15(2.37~0.15)	7.19(11.4~4.03)	1.37(3.20~0.81)
黄海 ^① Yellow Sea		0.43(2.36~0.10)		
东海 ^② East China Sea	0.86(7.21~0.01)		1.94(46.7~0.46)	

①肖天,张武,王荣.蓝细菌在黄海生态系统中的作用. 研究报告,973 项目 G19990437 研究专集 2001 ②肖天,王荣. 东海蓝细菌的生态作用特点. 海洋与湖沼.

3.5 在渤海春季和秋季(1997-06,1998-09)进行小型浮游动物对蓝细菌的捕食压力现场培养实验,实验表明小型浮游动物(microzooplankton,20~200μm)对蓝细菌具有明显的捕食压力,小型浮游动物对蓝细菌捕食率春季是 0.36~0.42/d,秋季是 0.12~0.59/d^[18]。这表明小型浮游动物(特别是纤毛虫)可能是渤海春秋季节蓝细菌的主要捕食者(控制者 top down control)。这就说明海洋蓝细菌在渤海微食物环中有重要作用。

4 结论

渤海蓝细菌生物量秋季较春季高的主要原因之一是海水温度变化的影响。在春季蓝细菌生物量的变化较其他浮游植物对温度敏感。但在春季和秋季各水层的蓝细菌分布变化均与水温分布相反。渤海秋季蓝细菌在浮游植物中占有的比例平均在 10% 以下,在中营养和寡营养的区域所占比例较高,最高可达 40%。纤毛虫等小型浮游动物是渤海蓝细菌(聚球蓝细菌属 *Synechococcus*)的主要捕食者,蓝细菌在渤海微食物环中有重要作用。

参考文献

[1] Waterbury J B, Watson S W, Gullard R R L. Wide-spread occurrence of a unicellular, marine planktonic, cyanobacterium. *Nature*, 1979, **277**:293~294.

[2] Murphy L S and Haugen E M. The distribution and abundance of phytotrophic ultraplankton in the North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 1985,**30**: 47~58.

[3] Li W K W, Subba R D V, Harrison J C. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. *Science*,1983,**219**:292~295.

[4] Caron D A, Lim E L, Miceli G. Grazing and utilization of chroococcoid cyanobacteria and heterotrophic bacteria by protozoa in laboratory cultures and a coastal plankton community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*,1991,**76**:205~217.

[5] Iturrilaga R and Mtthcell BG. Chroococcoid cyanobacteria:A significant component in the food web dynamics of the open ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1986,**28**:291~297.

[6] Ning X R (宁修仁) and Vault D. Biological and ecological characterization of the marine cyanobacteria and its environmental factors in the estuary of Changjiang River and the adjacent East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*(in Chinese) (海洋学报),1991,**13** (4):552~559.

[7] Wood B W. Discrimination between types of pigments in marine *Synechococcus* spp. by scanning spectroscopy, epifluoresence microscopy and flow cytometry. *Limnol. Oceanogr.*, 1985,**30**:1303~1315.

[8] Cuhel R and Waterbury J B. Biochemical composition and short term nutrient incorporation patterns in unicellular marine cyanobacterium, *Synechococcus* (WH7803). *Limnol. Oceanogr.*,1984,**29**:370~374.

[9] 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 mercenaria*. *Mar. Biol.*,1994,**119**:251~259.

[10] Wang R (王荣) and Fan C L (范春雷). Copepods feeding activities and its contribution to downwards vertical flux of carbon in the East China Sea. *Oceanologia Et Limnologia Sinica* (in Chinese)(海洋与湖沼),1997,**28**(6):479~586.

[11] Waterbury J B, Watson S W, Valois F W. Biological and ecological characterization of the marine unicellular cyanobacterium *Synechococcus*. *Can. Bull. Fish Aquat. Sci.*,1986,**214**: 71~120.

[12] Xiao T(肖天), Jiao N Z(焦念志), Wang R(王荣). Quantitative distribution of cyanobacteria and bacteria in Jiaozhou Bay. *Marine Ecology in Jiaozhou Bay*(in Chinese) Beijing: Science Press,1995. 118~124.

[13] Li W K W. Annual average abundance of hetertrophic bacteria and *Synechococcus* in surface ocean waters. *Limnol. Oceanogr.*,1998,**43**(7):1746~1753.

[14] Shen G Y(沈国英)and Shi P Z(施井章). *Marine Ecology*(in Chinese). Xiamen:Xiamen University Press,1996.

[15] Shiah F K,Liu K K,Kao S J,*et al.* The coupling of bacterial production and hydrgraphy in the southern East China Sea; Spatial patterns in spring and fall. *Continental Shell Research*,2000,**20**:459~477.

[16] Sun J, Liu D Y, Wei H, *et al.* Phytoplankton community and its dynamic in the Bohai Sea. *Esuar. Coast. Shelf Sci.*

[17] Burkill P H,Leakey R J G,Owens N J P,*et al.* *Synechococcus* and its importance to the microbial foodweb of the northwestern Indian Ocean. *Deep-Sea Res. II*,1993,**40**(3):773~782.

[18] Xiao T(肖天),Zhang W C(张武昌),Wang R(王荣). Elementary studies on the roles of cyanobacteria in marine microplankton community. *Marine Science*(in Chinese)(海洋科学),1999,**5**:48~51.