

三亚湾秋、冬季浮游植物和细菌的生物量分布特征及其与环境因子的关系

周伟华^{1,2}, 王汉奎^{1,2}, 董俊德^{1,2}, 胡友木², 张建林^{1,2}, 张 颀^{1,2}

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 三亚 572000)

摘要: 分别于2004年10月(秋季)和2005年1月(冬季)对三亚湾进行了现场综合调查, 研究了海区浮游植物和细菌生物量的分布特征, 探讨了它们与 DIN、PO₄³⁻、DO、BOD₅ 等环境因子的关系。结果表明, 海区平均叶绿素 a 浓度秋、冬季分别为: (1.40 ± 0.78) mg/m³ 和 (2.25 ± 3.62) mg/m³; 浮游植物生物量秋季为: (70.36 ± 38.91) mg C/m³, 冬季为: (112.57 ± 181.38) mg C/m³。海区细菌的丰度秋、冬季分别为: (9.87 ± 5.90) × 10⁸ cells/L 和 (6.58 ± 2.43) × 10⁸ cells/L; 平均细菌生物量秋季为: (19.73 ± 11.81) mg C/m³, 冬季为: (13.15 ± 4.86) mg C/m³。表、底层浮游植物和细菌的生物量分布均呈现三亚河口最高, 离岸逐渐降低的态势, 三亚河的陆源物质输送及其入海扩散是引起此分布特征的主要原因。温度是造成秋季细菌的生物量高于冬季的原因之一。溶解无机氮为控制表层浮游植物和细菌分布的重要因子。秋季除表层 DIN 外各环境因子与浮游植物和细菌生物量都不存在明显的相关性; 冬季表层 DIN、PO₄³⁻、DO 和 BOD₅ 均在 $p < 0.01$ 水平下与二者呈非常显著相关, 底层仅 DIN 和 BOD₅ 在 $p < 0.01$ 水平下与二者呈非常显著正相关。三亚湾浮游细菌和浮游植物生物量间的相关性明显, 初级生产是水域浮游细菌分布的重要影响因素。

关键词: 三亚湾; 浮游植物; 细菌; 生物量

文章编号: 1000-0933(2006)08-2633-07 **中图分类号:** Q173, X172 **文献标识码:** A

Phytoplankton and bacterial biomass and their relationship with the environmental factors in autumn and winter in the Sanya Bay, China

ZHOU Wei-Hua^{1,2}, WANG Han-Kui^{1,2}, DONG Jun-De^{1,2}, HU You-Mu², ZHANG Jian-Lin^{1,2}, ZHANG Si^{1,2} (1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, CAS, Sanya 572000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2633 ~ 2639.

Abstract: Phytoplankton are the primary producer of the marine ecosystem, which utilize light and inorganic nutrients to synthesize organic matter. Phytoplankton are the basic link of the traditional food chain in the ocean. Bacteria are the primary component of the microbial loop, which subsist on dissolved organic compounds released by living plankton and decomposed from dead organisms. Sanya Bay is a typical tropical bay of China, located in the northern part of South China Sea in the south coast of Hainan Island. Based on the two cruises in Sanya Bay in October 2004 (autumn) and January 2005 (winter), the distribution patterns of phytoplankton and bacteria biomass were studied. The relationships between their biomass and environmental factors, such as DIN, phosphorus, DO and BOD₅, were also analyzed.

Phytoplankton biomass (PB) was determined from chlorophyll a concentration, and bacterial biomass (BB) was measured by DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) dying and SEM method. The results showed that the chlorophyll a was (1.40 ± 0.78) mg/

基金项目: 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室开放基金资助项目(MEL0502); 海南省自然科学基金资助项目(30518); 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室开放基金资助项目; 中国科学院南海海洋研究所博士启动基金资助项目

收稿日期: 2005-05-28; **修订日期:** 2006-03-10

作者简介: 周伟华(1976~), 男, 浙江东阳人, 博士, 主要从事海洋生态环境研究. E-mail: whzhou@scsio.ac.cn

Foundation item: The project was supported by The Open Fund of MEL, Xiamen University (No. MEL0502), the Natural Science Foundation of Hainan Province (No. 30518), the Open Fund of Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, CAS, and the Doctor's Initial Foundation of South China Sea Institute of Oceanology, CAS

Received date: 2005-05-28; **Accepted date:** 2006-03-10

Biography: ZHOU Wei-Hua, Ph.D., mainly engaged in marine ecology and environment research. E-mail: whzhou@scsio.ac.cn

m^3 in autumn and $(2.25 \pm 3.62) \text{mg}/\text{m}^3$ in winter in Sanya Bay. Bacterial abundance was $(9.87 \pm 5.90) \times 10^8$ and $(6.58 \pm 2.43) \times 10^8$ cells/L in autumn and winter, respectively. The mean phytoplankton biomass (PB) was $(70.36 \pm 38.91) \text{mg C}/\text{m}^3$ in autumn and $(112.57 \pm 181.38) \text{mg C}/\text{m}^3$ in winter. The mean bacterial biomass (BB) was $(19.73 \pm 11.81) \text{mg C}/\text{m}^3$ and $(13.15 \pm 4.86) \text{mg C}/\text{m}^3$ in autumn winter, respectively. The distribution of PB and BB at the surface and bottom layers in autumn and winter almost demonstrated the same pattern, which showed that the highest biomass appeared in the estuary of the Sanya River, and their abundance gradually declined offshore. The distribution feature mainly resulted from the terrestrial input from the Sanya River and invasion by the offshore oceanic sea water. Temperature was one of the main factors which led to higher BB in autumn than in winter. Dissolved inorganic nitrogen was another important factor to control the PB and BB distribution at the surface in Sanya Bay.

There was no correlation between other environmental factors and the PB or BB except for the surface DIN in autumn. While in winter, DIN, Phosphorus, DO and BOD_5 all had highly significant correlations with the surface PB and BB ($p < 0.01$), and only DIN and BOD_5 had significant correlation with bottom PB and BB ($p < 0.01$). The correlation was significant between phosphorus, DO and bottom BB ($p < 0.05$) in winter. As to PB and BB, the correlation coefficient was 0.870, correlation was significant for the surface layer ($p < 0.01$), while the correlation coefficient was 0.582 for the bottom layer ($p < 0.05$) in autumn. In winter, PB and BB all had significant correlation with environmental factors ($p < 0.01$) both for the surface and bottom layers. Primary production was an important factor in controlling the distribution of bacteria.

Key words: the Sanya Bay; phytoplankton; bacteria; biomass

三亚湾位于 $18^\circ 11' \sim 18^\circ 18' \text{N}$, $109^\circ 20' \sim 109^\circ 30' \text{E}$ 之间的海域,面积约 120km^2 ,是我国典型的热带海湾,三亚河为其主要的入海河流,陆地径流流域面积为 337km^2 ,三亚湾是目前受人类活动影响相对较小的热带海湾之一^[1],但是近 10a 来,由于三亚市经济的高速发展,人为活动的加剧,特别是旅游业的迅猛发展,生活污水的排放与日俱增,港口和海湾中的船只及网箱养殖是直接的污染源,海域生态环境受到了前所未有的压力。

海洋浮游植物利用光能合成有机物质,是海域的初级生产者,是海洋传统食物链的基础环节。叶绿素 a 的含量反映了海区浮游植物生物量的多寡,它也是浮游植物进行光合作用的主要色素^[2]。海洋中有机物最初来源是初级生产力,而进入溶解态的有机物质主要靠海洋浮游细菌来利用转化^[3]。细菌在海域生态系统中扮演的角色很特殊,一方面它分解有机物释放能量,是异养的;另一方面,细菌能利用真核藻类所不能利用的可溶性有机物,将之转化为颗粒有机物,进行二次生产,所以又是生产者^[4]。浮游细菌能积累从大气中固定的碳,通过微食物网进入传统食物链,直至海洋深处,从而参与生物泵过程,促进碳循环的进行^[5]。浮游细菌在海洋生物生产和生源要素循环中起着不可替代的作用,因此各种海区浮游细菌生物量的状况成为生物海洋学家所关注的焦点之一^[6]。20 世纪 80 年代开始,我国也陆续开展了浮游细菌生态动力学方面的研究^[6],以前的研究主要采样培养法,随着一些新方法和手段(如:荧光计数、流式细胞计数等)开展,海洋浮游细菌在微食物环乃至整个海洋生态系统中的作用日益受到重视。本文通过分析 2004 年 10 月(秋季)和 2005 年 1 月(冬季)航次浮游植物和浮游细菌的分布特征及其与环境因子的关系,以期为我国典型的热带海湾——三亚湾的生态系统食物网和微食物环的能流和物质流提供理论基础和科学依据,为深入了解热带海湾的生态系统结构和功能、生物多样性及珊瑚礁生态系的保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查与样品采集

分别于 2004 年 10 月 22~23 日(秋季),2005 年 1 月 12~13 日(冬季)对三亚湾 11 个站位进行综合调查。为了解三亚湾污染状况,其中 2005 年冬季增加了三亚

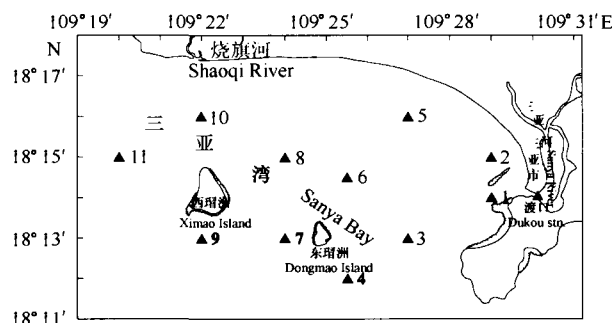


图 1 三亚湾调查站位图

Fig.1 Survey stations in the Sanya Bay

河口的渡口站, 站位分布见图 1, 各站位水深除了 4 号站和 9 号站分别为 26m 和 28m 外, 其它均小于 20m。

用 5L 有机玻璃采水器分表(离水面约 0.5m)、底(离底约 1m)层采水。使用美国产的 Quanta 水质监测系统现场测定各水层的温度、盐度等基本水质参数。细菌样品的采集用 15ml 螺口灭菌管, 用无颗粒福尔马林固定(最终浓度体积分数为 3.7%), 固定后的样品在 4℃ 的冰箱中避光保存至分析完毕^[7]。将 250ml 水样用直径为 25mm 的 whatman GF/F 滤膜过滤, 加入饱和 $MgCO_3$, 滤膜在 -20℃ 冰箱内避光冷冻干燥保存, 半月内分析叶绿素 a 浓度。

1.2 分析方法

细菌生物量的测定用 DAPI(联脒基苯吡啶)染色法及 SEM 法^[7,8]。取 1ml 固定的海水样品, 加入 100 μ l 的 0.01M 抗絮凝剂焦磷酸四钠溶液, 培养 15min。随后, 加入 100 μ g/ml 的 DAPI 溶液 200 μ l, 在黑暗下染色 5min。染色结束后, 在小于 100mm Hg 的低压下真空抽滤到 0.22 μ m 的黑色聚碳酸酯滤膜(Millipore, 25 mm diameter)上。水样抽干后, 将滤膜置于滴有镜油的载玻片上, 滴加镜油, 盖上盖玻片, 用 Olympus BX-41 荧光显微镜在放大倍数为 10 $\times$ 100 下进行荧光显微计数, 随机均匀选取 10 个视野计数被染色的细菌个体。细菌丰度的计算为^[9]:

$$\text{细菌丰度 (cells/ml)} = A \times S_1 / (S_2 \times V)$$

式中, A 为 10 个视野的平均细菌数; S_1 为滤膜的有效过滤面积; S_2 为视野面积; V 为过滤水样体积。细菌的生物量以 20 fgC/cell 为转换系数, 将细菌丰度转换为以碳表示的细菌生物量^[10]。

叶绿素 a 的测定用荧光法^[11], 具体操作步骤参见文献^[12], 叶绿素 a 与浮游植物生物量之间的转换关系按照 1 单位重量的叶绿素 a 等于 50 单位重量的碳含量来换算^[13,14]。无机氮、磷, 溶解氧 DO 和 5d 生物耗氧量 BOD₅ 的测定均采用海洋调查规范中的方法^[15]。

2 结果

2.1 海区水文和化学状况

两个季节表、底层的温度和盐度情况见表 1。秋季, 三亚湾表层平均水温为 $(27.21 \pm 0.19)^\circ\text{C}$, 比底层高出 0.1℃。冬季水温下降, 比秋季低约 4.5℃, 且表、底层海水平均温度完全一致, 表明冬季水体处于高度混合状态。冬季三亚河的径流量为年度最低, 受到外海水的影响更明显, 调查海区的平均盐度比秋季高出约 0.5。由于受较小的陆地径流量的影响, 冬季渡口站的表层盐度仍然达到 32.92。

从表 1 可知海区的营养盐浓度并不高, 秋、冬季三亚湾海区溶解性无机氮(DIN)较为接近, 分别为 1.70 μ mol/L 和 1.80 μ mol/L, 但是无机磷酸盐却相差较大, 秋季为 0.17 μ mol/L, 冬季为 0.27 μ mol/L。秋、冬季三亚湾海区平均溶解氧(DO)浓度分别为: 6.54mg/L 和 7.19mg/L, BOD₅ 分别为 0.30mg/L 和 0.29mg/L。但是渡口的污染相对较为严重, 表层 DIN 达到 21.59 μ mol/L, 无机磷酸盐为 2.05 μ mol/L, 远超过海区平均水平。

2.2 浮游植物生物量的分布

从表 1 可以看出, 浮游植物叶绿素 a 浓度冬季高于秋季, 表层略高于底层。秋、冬季海区平均叶绿素 a 浓度为: $(1.40 \pm 0.78)\text{mg/m}^3$ 和 $(2.25 \pm 3.62)\text{mg/m}^3$; 海区平均浮游植物生物量秋季为: $(70.36 \pm 38.91)\text{mg C/m}^3$, 冬季为: $(112.57 \pm 181.38)\text{mg C/m}^3$ 。冬季表、底层平均叶绿素 a 浓度和浮游植物生物量均约为秋季表、底层叶绿素 a 浓度和浮游植物生物量的 1.6 倍。冬季渡口站表层叶绿素 a 浓度高达 37.77mg/m³。

图 2 是两个季节表、底层叶绿素 a 浓度的平面分布(为了便于比较, 冬季渡口站位数据未进行作图, 下同), 很明显, 其分布趋势都为从三亚河口往西边的外海逐步降低, 越接近河口, 等值线越密。两个季节表、底层叶绿素 a 的最大值均出现在 1 号站(渡口站除外), 秋季, 表层最低值出现在 6 号站, 底层最低值在 10 号站, 而冬季表、底层最低值均出现于 10 号站。

2.3 细菌生物量的分布

秋季表层平均细菌丰度达到 $(11.32 \pm 7.26) \times 10^8 \text{ cells/L}$, 细菌的生物量为: $(22.64 \pm 14.53)\text{mgC/m}^3$, 比底层高出约 1.4 倍, 且高于冬季(表 1)。冬季表、底层细菌丰度非常接近, 表层稍高于底层。秋、冬季海区平均细菌丰度分别为: $(9.87 \pm 5.90) \times 10^8 \text{ cells/L}$ 和 $(6.58 \pm 2.43) \times 10^8 \text{ cells/L}$; 海区平均细菌生物量秋季为: $(19.73 \pm$

11.81)mgC/m³, 冬季为:(13.15 ± 4.86)mgC/m³。冬季渡口站位表层细菌丰度高达(37.53 × 10⁸)cells/L, 渡口的水体污染相当严重。

表 1 秋、冬季三亚湾表、底层温度、盐度、无机氮、无机磷酸盐、溶解氧、生物耗氧量、叶绿素 a 浓度、浮游植物生物量、细菌丰度和细菌生物量的平均值及其变化范围*

Table 1 Means and variation ranges of temperature, salinity, DIN, phosphorus, DO, BOD₅, chl a, phytoplankton biomass (PB), bacteria abundance (BA) and biomass (BB) at autumn and winter in the Sanya Bay

参数 Parameter	秋季 Autumn		冬季 Winter	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
温度 Temperature (°C)	27.21 ± 0.19 27.02 ~ 27.62	27.11 ± 0.17 26.96 ~ 27.42	22.75 ± 0.17 22.41 ~ 22.95	22.75 ± 0.13 22.41 ~ 22.87
盐度 Salinity	34.00 ± 0.07 33.93 ~ 34.10	34.02 ± 0.07 33.93 ~ 34.15	34.54 ± 0.07 34.37 ~ 34.66	34.58 ± 0.04 34.52 ~ 34.66
溶解无机氮 DIN (μmol/L)	1.71 ± 0.47 1.29 ~ 2.73	1.70 ± 0.26 1.36 ~ 2.12	1.93 ± 1.89 1.10 ~ 7.62	1.66 ± 0.81 1.14 ~ 4.05
无机磷酸盐 PO ₄ ³⁻ (μmol/L)	0.19 ± 0.06 0.09 ~ 0.25	0.18 ± 0.06 0.09 ~ 0.25	0.28 ± 0.12 0.14 ~ 0.61	0.27 ± 0.12 0.04 ~ 0.45
溶解氧 DO (mg/L)	6.67 ± 0.18 6.38 ~ 7.05	6.41 ± 0.35 5.73 ~ 6.83	7.20 ± 0.31 6.62 ~ 7.91	7.18 ± 0.23 6.90 ~ 7.81
生物耗氧量 BOD ₅ (mg/L)	0.37 ± 0.20 0.07 ~ 0.64	0.22 ± 0.14 0.10 ~ 0.58	0.37 ± 0.35 0.02 ~ 1.06	0.21 ± 0.13 0.08 ~ 0.50
叶绿素 a Chl a (mg/m ³)	1.50 ± 0.85 0.70 ~ 3.49	1.30 ± 0.71 0.69 ~ 2.95	2.44 ± 4.36 0.74 ~ 15.46	2.05 ± 2.84 0.82 ~ 10.02
浮游植物生物量 PB (mg C/m ³)	75.13 ± 42.73 34.89 ~ 174.46	65.11 ± 35.73 34.48 ~ 147.46	121.95 ± 217.97 36.83 ~ 772.95	102.26 ± 141.78 40.90 ~ 501.02
细菌丰度 BA (× 10 ⁸ cells/L)	11.32 ± 7.26 6.66 ~ 31.69	8.26 ± 3.66 4.35 ~ 14.75	6.70 ± 2.49 4.28 ~ 13.72	6.45 ± 2.47 3.46 ~ 12.95
细菌生物量 BB (mg C/m ³)	22.64 ± 14.53 13.31 ~ 63.39	16.53 ± 7.32 8.70 ~ 29.49	13.40 ± 4.99 8.55 ~ 27.44	12.91 ± 4.95 6.91 ~ 25.91

* 为了便于比较, 冬季渡口站位的数据未统计于本表中 The data of Dukou station is not included in this table for comparison

三亚湾浮游细菌的丰度平面分布与叶绿素 a 有些相似(见图 3), 以三亚河口最高, 离岸逐渐降低, 高值出现于靠近河口的 1 号站, 秋季表、底层细菌丰度最低值分别出现于 7 号站和 3 号站, 而冬季表、底层细菌丰

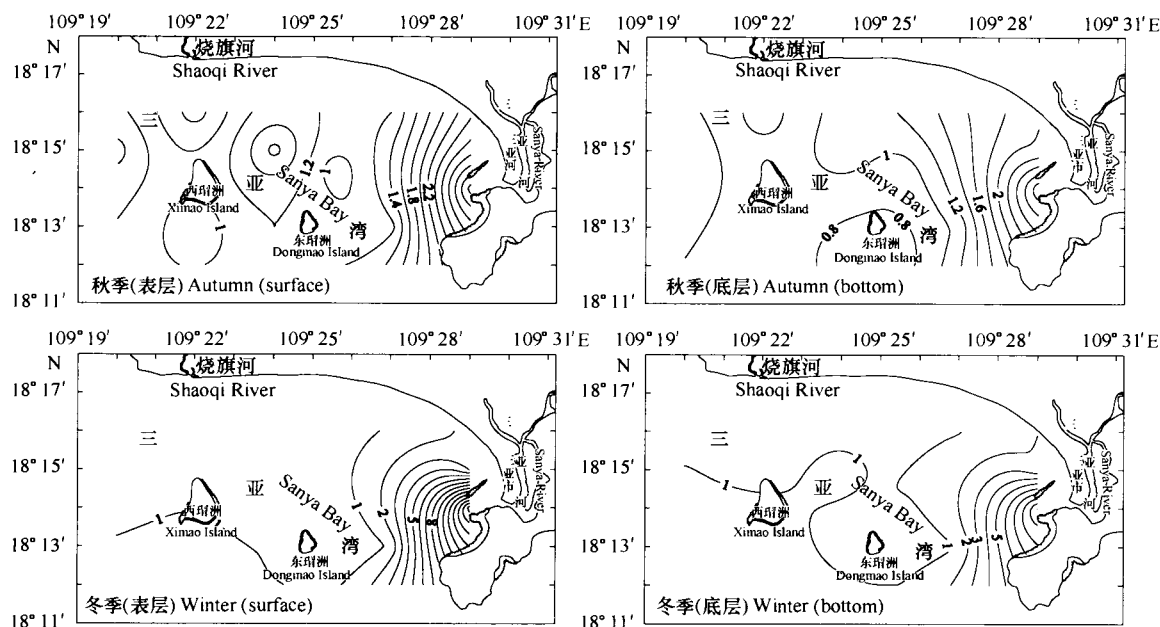
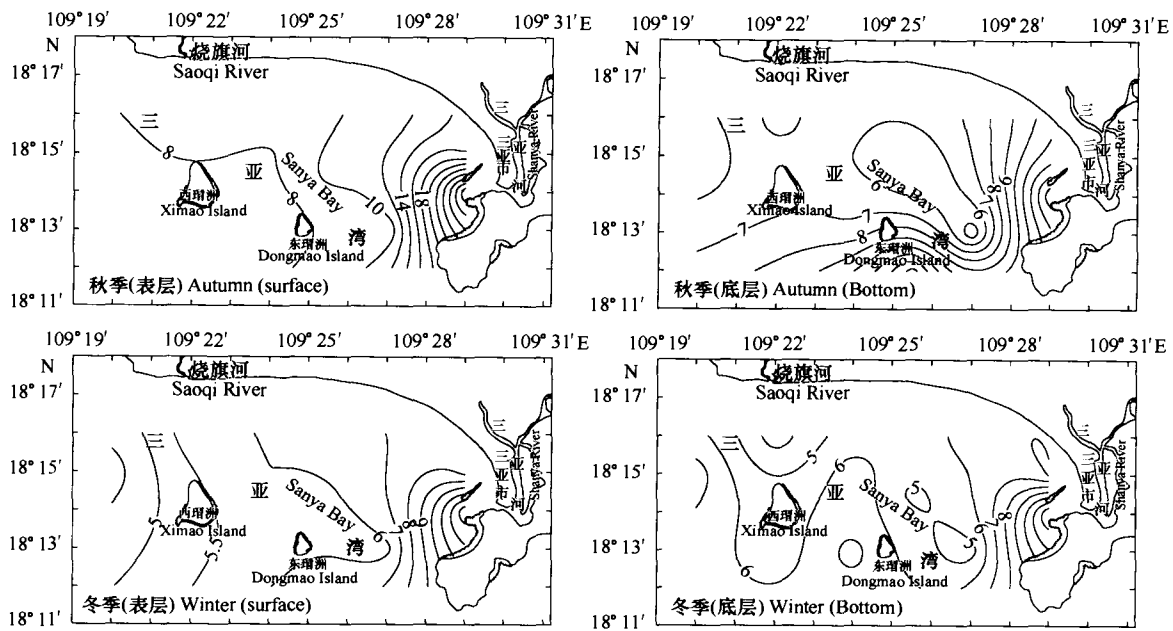


图 2 三亚湾表、底层浮游植物叶绿素 a (mg/m³) 水平分布

Fig. 2 Distribution patterns of chl. a (mg/m³) of surface and bottom layer in the Sanya Bay

图 3 三亚湾表、底层细菌丰度 ($\times 10^8$ cells/L) 水平分布Fig. 3 Distribution patterns of bacterial abundance ($\times 10^8$ cells/L) of surface and bottom layer in the Sanya Bay

度最低值均出现在 10 号站。

3 讨论

3.1 浮游植物和细菌生物量分布特征

受表层高温和底层外海冷水上升流的影响,夏季三亚湾水体层化^[16]。从表 1 中的各项参数可以看出,冬季表、底层各参数都较为接近,而秋季却有一定的差别,说明秋季水体处于从夏季的明显层化向冬季混合剧烈过渡期,冬季水体受东北季风的影响,水体处于高度的混合状态。董俊德等^[16]也发现 9 月开始三亚湾温跃层逐步减弱并消失,冬季水温最低,水体混合最为剧烈。

河口和近岸水团含有丰富的陆源性有机营养物质,为浮游植物大量繁殖提供物质基础,致使三亚河口浮游植物生物量最高。而浮游植物生物量在离岸的区域逐渐降低,显示了陆源营养物质的入海稀释扩散对它的影响。冬季,渡口浮游植物叶绿素 a 浓度远远超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$,表明三亚河口入海口的水体污染已经达到了富营养化程度,而且比较严重。

细菌丰度是反应水质状况的另一项重要指标,细菌通过分解海水中的有机质而获得能量,在受有机污染较严重的海域,细菌丰度总是较高^[17]。三亚河口的细菌丰度平面分布(图 3)同样也表明河流带来的陆源有机污染物通过河流向河口的输送,并造成河口口门细菌生物量最高,向外海逐渐被稀释下降的分布特征^[17]。

本文三亚湾秋、冬季浮游细菌丰度比 1996 年夏季有了较大幅度的下降^[17],原因可能有二:首先可能是季节的差异导致的细菌生存环境的不同;其次是由于近年来政府治理力度的加强,特别是对停泊在三亚河的船只的管理,海区环境得到了一定程度的改善。与我国别的海区相比,三亚湾的细菌丰度要低于污染严重的长江口和杭州湾及其邻近水域^[18],低于珠江口海域,高于南海北部(周伟华,未发表资料),与大亚湾水平较为接近^[19],高于北方的渤海海域^[20]。

3.2 浮游植物和细菌生物量与环境因子间的关系

温度是影响细菌生长的重要环境因子。细菌新陈代谢能力主要取决于酶的活性,在一定温度范围酶活性与温度成正比,海水温度与海洋浮游细菌的生物量和生产力呈正相关关系^[21,22]。秋季三亚湾平均温度比冬季高约 4.5°C ,秋季细菌生物量比冬季高 1.5 倍。白洁等^[20]在渤海海域,郑天凌^[9]在台湾海峡也发现了同样的结果。研究发现,在美国的切萨皮克湾,除了夏季,温度是调节该海湾浮游细菌生长和生产的主要因素^[23]。

秋、冬季三亚湾无机磷酸盐相差较大,这是由于冬季水体混合剧烈,把底层沉积物释放的无机磷酸盐带到表层,为浮游植物生长提供了基础物质,导致冬季浮游植物生物量高于秋季。同航次的透明度资料表明,除河口的1号站,三亚湾调查海区水底仍有光照,几乎整个水柱都为真光层,底层浮游植物仍可进行光合作用,导致底层浮游植物叶绿素a浓度仅仅是略低于表层。浮游植物光合作用产出氧气,细菌在繁殖生长过程中降解有机物并消耗氧气,秋季浮游植物生物量高于冬季,而细菌生物量却低于冬季,同时加上冬季水体混合,几种因素的共同作用导致秋季海区平均DO浓度比冬季低0.65mg/L。

分别对两个季节表、底层浮游植物和细菌生物量的分布与DIN, PO_4^{3-} , DO, BOD_5 等环境因子间的相关关系进行分析(检验结果见表2)。结果显示,秋季表层浮游植物和细菌生物量除与DIN呈非常显著正相关($p < 0.01$)外,二者与其它环境因子均不存在相关性,底层各环境因子与浮游植物和细菌生物量均无显著相关性,DIN为秋季表层浮游植物和细菌生物量分布的重要控制因子。冬季,表、底层浮游植物和细菌生物量与DIN、 BOD_5 均在 $p < 0.01$ 的水平下呈非常显著正相关。冬季表层浮游植物生物量和 PO_4^{3-} 存在非常显著正相关($p < 0.01$),而底层则没有明显的相关性;表层细菌和 PO_4^{3-} 在 $p < 0.01$ 的水平下呈非常显著正相关,底层则在 $p < 0.05$ 的水平下显著相关。冬季表层DO受浮游植物呼吸作用和细菌的分解有机质耗氧作用影响明显,底层则主要受细菌耗氧的影响。

表2 秋、冬季三亚湾浮游植物和细菌生物量与环境因子的相关性

Table 2 The correlation coefficient R of the phytoplankton biomass (PB) and bacterial biomass (BB) with the environmental factors at autumn and winter in the Sanya Bay

参数 Parameter	秋季 Autumn 浮游植物生物量 PB		冬季 Winter 浮游植物生物量 PB		秋季 Autumn 细菌生物量 BB		冬季 Winter 细菌生物量 BB	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
溶解无机氮 DIN	0.787**	0.251	0.995**	0.956**	0.818**	0.357	0.994**	0.927**
无机磷酸盐 PO_4^{3-}	0.302	0.143	0.977**	0.504	0.170	0.488	0.989**	0.534*
溶解氧 DO	-0.418	0.090	-0.926**	-0.420	-0.457	0.336	-0.925**	-0.627*
生化需氧量 BOD_5	0.325	-0.134	0.908**	0.820**	0.489	-0.191	0.888**	0.703**

** 表示 $p < 0.01$ 水平下非常显著相关; * 表示 $p < 0.05$ 水平下显著相关; 其它均为 $p > 0.05$, 相关性不明显 The symbol ** means correlation is highly significant at the 0.01 level; The symbol * means correlation is significant at the 0.05 level; other correlation p larger than 0.05

3.3 细菌生物量与浮游植物生物量的关系

海洋浮游细菌的生长和增殖主要依靠浮游植物溶出以及浮游动物捕食过程中的溶解有机物作为碳源^[24]。Shiah 等在 Chesapeake 湾的研究表明^[23], 浮游植物现存量和细菌现存量间有较明显的相关性, 并且把这种现象作为判断细菌控制机制的依据之一。三亚湾浮游细菌和浮游植物生物量间的相关性明显, 秋季表层在 $p < 0.01$ 的水平下二者呈现非常显著正相关, 相关系数为 0.870, 秋季底层在 $p < 0.05$ 的水平下呈显著正相关(相关系数为 0.582); 而冬季表、底层细菌和浮游植物生物量均在 $p < 0.01$ 水平下呈非常显著正相关, 相关系数分别为: 0.988 和 0.896。白洁等^[20]在渤海也发现浮游细菌数量与浮游植物的生长关系密切, 浮游植物产生的 DOC 和 POC 是浮游细菌的主要营养来源之一, 因此初级生产是水域浮游细菌分布的重要影响因素。

通常将细菌生物量与浮游植物生物量的比值 BB(PB 来衡量初级生产与细菌二次生产之间数量大小关系, 从而体现了细菌在海洋生物地球化学循环以及微食物环中的重要性^[24]。秋、冬季三亚湾 BB:PB 分别为 0.28、0.12, 秋季细菌在物质循环中扮演更重要的角色。三亚湾 BB:PB 值远低于东海和黄海^[25], 这主要是在近岸的海湾生态系统中, 特别是三亚湾, 海水透明度高, 浮游植物几乎在整个水柱都处于真光层, 能进行光合作用, 进行生长和繁殖, 而在东海, 浮游植物在真光层以下, 随水深减少明显; 同时, 细菌的捕食者以及细菌噬菌体在近岸生态系统远高于离岸的海区^[26]。

4 结论

秋、冬季三亚湾浮游植物和细菌生物量分布特征明显, 表、底层浮游植物和细菌生物量均呈现三亚河口最高, 离岸逐渐下降的趋势。三亚河陆源物质的输运和入海扩散对其分布有较大的影响。温度是引起三亚湾浮

游细菌季节差异的主要原因之一。溶解无机氮为控制本海区浮游植物和细菌生物量分布的最重要环境因子。三亚湾细菌和浮游植物生物量间相关性明显, 初级生产是引起水域浮游细菌分布差异的重要影响因素之一。

References:

- [1] Wang H K, Dong J D, Zhang S, *et al.* Distribution of N/P ratio and its limitation to growth of phytoplankton in Sanya Bay. *J. of Tropical Oceanogr.*, 2002, 21(1): 33 ~ 39.
- [2] Zhou W H, Huo W Y, Yuan X C, *et al.* Distribution features of chlorophyll a and productivity in high frequency area of red tide in East China Sea during spring. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(7): 1055 ~ 1059.
- [3] Fuhrman J A. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, and California. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1980, 39(6): 1085 ~ 1095.
- [4] Fukami K, Muriyuki N, Morio Y, *et al.* Distribution of heterotrophic nanoflagellates and their importance as the bacterial consumer in a eutrophic coastal seawater. *J. of Oceanogr.*, 1996, 52: 399 ~ 407.
- [5] Ducklow H W. Bacterioplankton distribution and production in the northwestern Indian Ocean and gulf of Oman, September 1986. *Deep-sea Res. II*, 1993, 40(3): 753 ~ 771.
- [6] Xiao T. The study on marine bacterioplankton ecology. *Advance in Earth Sci.*, 2001, 16(1): 60 ~ 64.
- [7] Velji M I, Albright L J. Microscopic enumeration of attached marine bacteria of seawater, marine sediment, fecal matter, and kelp blade samples following pyrophosphate and ultrasound treatments. *Can. J. Microbiol.*, 1986, 32: 121 ~ 126.
- [8] Zheng T L, Cai L Z. The role of marine bacteria in upwelling ecosystem. *Acta Oceanologica Sin.*, 1993, 12(2): 261 ~ 267.
- [9] Zheng T L, Wang F, Xu M Z, *et al.* Bacterial production, biomass and role in microbial loop in Taiwan Strait. *Oceanologia Et Limnologia Sin.*, 2002, 33(4): 415 ~ 423.
- [10] Lee S, Fuhrman J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1987, 53(6): 1298 ~ 1303.
- [11] Parsons T R, Maita Y, Lalli C M. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. New York: Pergamon Press, 1984. 1 ~ 73.
- [12] Zhou W H, Yuan X C, Huo W Y, *et al.* Distribution of chlorophyll a and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River estuary. *Acta Oceanologica Sin.*, 2004, 26(3): 143 ~ 150.
- [13] 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.
- [14] Harris G P. *Picoplankton Ecology, Function and Fluctuations*. Chapman and Hall, London, England, UK, 1986, 221 ~ 235.
- [15] National Technology Supervision Bureau. The Specification for Oceanographic Survey: Observation of Chemical Parameters in Sea Water. GB12763.4-91, Beijing: China Standards Press, 1991. 4 ~ 20.
- [16] Dong J D, Wang H K, Zhang S, *et al.* Vertical distribution characteristics of sea water temperature and DIN in Sanya Bay. *J. of Tropical Oceanogr.*, 2002, 21(1): 40 ~ 47.
- [17] Ning X R, Chen J Z, Liu Z L. Distribution of chlorophyll a concentration and abundances of total bacteria and coliform in the waters of Sanya Bay and Yulin Bay, Hainan. *Donghai Mar. Sci.*, 1999, 17(4): 51 ~ 57.
- [18] Shi J X, Chen Z Y, Ning X R, *et al.* The distribution patterns of bacteria and ATP in the Changjiang River estuary and its adjacent East China Sea. *Oceanologia Et Limnologia Sin.*, 1992, 23(3): 288 ~ 296.
- [19] Lin Y S, Zeng H S, Ni C Z, *et al.* The distribution of microbial biomass in the sea water of the Daya Bay. In: *Marine Ecology Corpus of the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990. 261 ~ 265.
- [20] Bai J, Li K R, Li Z Y, *et al.* Relationship between the environmental factors and distribution of bacterioplankton in the Bohai Sea. *J. of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(6): 841 ~ 846.
- [21] Bai J, Zhang H F, Li K R, *et al.* Limiting factors of biomass and production of marine heterotrophic bacterioplankton. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 594 ~ 602.
- [22] Kirchman D L, James H R, Richard T B. Biomass and biomass production of heterotrophic bacteria along 140° W in the equatorial Pacific: Effect of temperature on the microbial loop. *Deep Sea Res.*, 1995, 42(2-3): 603 ~ 619.
- [23] Shiah F K, Ducklow H W. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production and specific growth rate in Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 1994, 39: 1243 ~ 1258.
- [24] Jennifer C, James A A E, Ellen T M. Utilization and turnover of labile dissolved organic matter by bacterial heterotrophs in eastern North Pacific surface waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1996, 139: 267 ~ 279.
- [25] Zhao S J, Xiao T, Yue H D. The distribution of heterotrophic bacteria and some related factors in the East China and Yellow Seas during fall. *Oceanologia Et Limnologia Sin.*, 2003, 34(3): 295 ~ 305.
- [26] Suttle C A, Chen F. Mechanisms and rates of decay of marine viruses in seawater. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1992, 58: 3721 ~ 3729.

参考文献:

- [1] 王汉奎, 董俊德, 张偲, 等. 三亚湾氮磷比值分布及其对浮游植物生长的限制. *热带海洋学报*, 2002, 21(1): 33 ~ 39.
- [2] 周伟华, 霍文毅, 袁翔城, 等. 东海赤潮高发区春季叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1055 ~ 1059.
- [6] 肖天. 海洋浮游细菌的生态学研究. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 60 ~ 64.
- [9] 郑天凌, 王斐, 徐美珠, 等. 台湾海峡海域细菌产量、生物量及其在微食物环中的作用. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4): 415 ~ 423.
- [12] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布. *海洋学报*, 2004, 26(3): 143 ~ 150.
- [15] 国家技术监督局. 海洋调查规范: 海水化学要素观测, GB 12763.4-91. 北京: 中国标准出版社, 1991, 4 ~ 20.
- [16] 董俊德, 王汉奎, 张偲, 等. 三亚湾海水温度季节变化及溶解无机氮的垂直分布特征. *热带海洋学报*, 2002, 21(1): 40 ~ 47.
- [17] 宁修仁, 陈介中, 刘子琳. 海南省三亚湾和榆林湾海水中叶绿素 a 浓度、总细菌和大肠杆菌的丰度与分布. *东海海洋*, 1999, 17(4): 51 ~ 57.
- [18] 史君贤, 陈中元, 宁修仁, 等. 长江口及其附近海域细菌和三磷酸腺苷的分布特征. *海洋与湖沼*, 1992, 23(3): 288 ~ 296.
- [19] 林燕顺, 曾活水, 倪纯治, 等. 大亚湾水体中微生物量的分布特征. *大亚湾海洋生态文集(II)*, 北京: 海洋出版社, 1990. 261 ~ 265.
- [20] 白洁, 李蔚然, 李正炎, 等. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(6): 841 ~ 846.
- [21] 白洁, 张昊飞, 李蔚然, 等. 海洋异养细菌生物量及生产力的制约因素. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(4): 594 ~ 602.
- [25] 赵三军, 肖天, 岳海东. 秋季东、黄海异养细菌(Heterotrophic Bacteria)的分布特点. *海洋与湖沼*, 2003, 34(3): 295 ~ 305.