

## 北部湾北部海域夏季浮游细菌空间分布特征及其影响因素

何伟东, 孙鹏飞, 张秋丰

### Distribution characteristics of bacterioplankton in seawater of the northern Beibu Gulf and its environmental influence factors

HE Weidong, SUN Pengfei, ZHANG Qiufeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203286>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

##### 杭州湾人工湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系

Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay  
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 757 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200202922>

##### 东海原甲藻和中肋骨条藻适宜生长条件及叶绿素荧光特性的对比

Comparision on the suitable growth conditions and chlorophyll fluorescence characteristics of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum*

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1034 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200603071>

##### 上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

##### 休闲渔船拖网标准化改造前后渔获物中游泳动物群落结构分析

Analysis of the community structure of nekton in the catch before and after the standardized transformation of the recreational fishing boat trawl

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1090 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203311>

##### 长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价

Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to water quality of Mingzhu Lake near the Yangtze River Estuary

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 699 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190502655>

文章编号: 1674-5566(2022)02-0433-12

DOI:10.12024/jsou.20210203286

## 北部湾北部海域夏季浮游细菌空间分布特征及其影响因素

何伟东<sup>1,2</sup>, 孙鹏飞<sup>2</sup>, 张秋丰<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 自然资源部第四海洋研究所, 广西 北海 536000)

**摘要:** 于 2020 年 7 月至 8 月在北部湾北部海域设立 50 个站位对浮游细菌和环境因子进行调查, 探讨浮游细菌空间分布以及对环境因子的响应。研究结果显示: 表层浮游细菌丰度变化范围为  $0.33 \times 10^5 \sim 91.47 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $12.61 \times 10^5$  cells/mL; 中层浮游细菌丰度变化范围为  $0.22 \times 10^5 \sim 7.48 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $2.15 \times 10^5$  cells/mL; 底层浮游细菌丰度的变化范围为  $1.76 \times 10^5 \sim 71.33 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $17.74 \times 10^5$  cells/mL。浮游细菌丰度在水平方向上呈近岸沿海向远岸深海区域逐渐降低的趋势; 垂直方向上浮游细菌丰度与深度相关性不显著 ( $P > 0.05$ ), 近岸海域浮游细菌丰度在垂直方向上没有明显的趋势, 但远岸海域表层和中层丰度接近, 底层丰度大于表层和中层的丰度。Pearson 相关性分析显示: 表层丰度与盐度、pH 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与硝酸盐、亚硝酸盐、硅酸盐呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 中层丰度与温度、磷酸盐呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与硝酸盐呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 底层与铵盐呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 这表明浮游细菌的空间分布受到温度、盐度、pH、营养盐等多个环境因子的共同影响。

**关键词:** 浮游细菌; 丰度; 分布特征; 环境因子

**中图分类号:** Q 178      **文献标志码:** A

浮游细菌是生态系统中极其微小的微生物之一, 也是整个浮游生物中最为活跃的类群<sup>[1]</sup>。相较于海洋生态系统中的其他水生生物, 海洋浮游细菌具有个体小、多样性高、数量大以及代谢活动旺盛等特点<sup>[2]</sup>。作为海洋生态系统中不可或缺的组成部分, 浮游细菌在生物地球化学循环、生态学进程以及生态系统功能中有着不可替代的作用<sup>[3]</sup>, 同时也是海洋微食物环的重要环节, 在宏观世界和微生物群落之间起着纽带作用<sup>[4]</sup>。

北部湾是我国南海西北部一个天然的海湾, 由三大水系组成, 分别为越南沿岸、广西沿岸江河入海的径流与海水混合而成的沿岸水, 海暖流余脉的外海水, 以及分布在雷州半岛东、西部的北部湾次高盐水系的琼州海峡过道水<sup>[5]</sup>。受这些水系的影响, 形成了北部湾复杂多变的水文环境, 海洋浮游生物数量丰富, 多样性高, 因此北部湾是我国研究海洋浮游生物的重要

区域之一<sup>[6]</sup>。

本研究以北部湾北部海域为研究区域, 研究该海域夏季浮游细菌分布特征以及对环境因子的响应关系, 对深入了解北部湾海水环境细菌的分布具有重要意义, 并对北部湾生态系统的保护具有重要价值, 也为北部湾细菌资源的开发与利用奠定基础。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样时间和采样站位

于 2020 年 7 到 8 月期间, 搭乘海科 1 号和粤霞渔指 20028 科考船在北部湾北部海域进行夏季自然资源调查。本次浮游细菌调查共设定 50 个站位采集样品, 其中: J1-J31 为近岸站位, 搭乘海科 1 号进行考察, 采样时间为 2020 年 7 月 26 日至 8 月 3 日; Y1-Y19 为远岸站位, 搭乘粤霞渔指 20028 进行考察, 采样时间为 2020 年 8 月 24 日至 8 月 28 日。站位布设如图 1。

收稿日期: 2021-02-02      修回日期: 2021-04-15

基金项目: 北部湾自然资源调查与评估项目(U20A20103)

作者简介: 何伟东(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋微生物生态学。E-mail: 1751940357@qq.com

通信作者: 张秋丰, E-mail: zhangqiufeng@ncs.mnr.gov.cn

北部湾北部海域面积为  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 采样站位覆盖了整个北部湾北部海域。近岸海域站位覆盖了整个北部湾北部沿岸, 包括北海、防城港、钦州等城市沿岸海域, 南流江、大风江、钦江、

茅岭江、防城河、北仑河、红河等河口地区以及铁山港、钦州湾、廉州湾等海湾地区; 远岸站位相对均匀覆盖了整个远岸海域, 并在涠洲岛、斜阳岛邻近海域布设了站位。

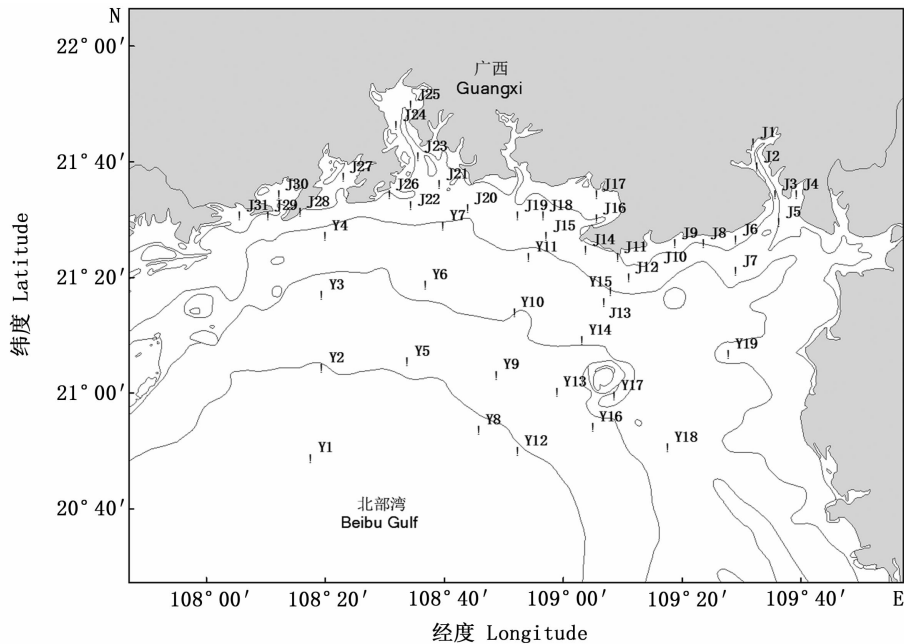


图 1 调查区域及站位

Fig. 1 Study area and sampling stations

## 1.2 样品采集与处理

依据水深确定海水样品的采样水层(表 1): 水深小于 5 m, 采集表层海水样品, 采集深度为 0~0.5 m; 水深处于 5~25 m, 采集表层和底层海水样品, 底层距离海底 2 m; 水深处于 25~50 m, 采集表层、中层和底层海水样品, 中层采集深度为 10 m。近岸海域使用有机玻璃采水器采集海水样品, 远岸海域使用 SBE 19 plus 温盐深剖面仪 (CTD) 采集海水样品。

浮游细菌样品采集与处理: 使用无菌枪头取 9 mL 采集的海水样品, 注入高压灭菌的 10 mL 冻存管中, 加入 1 mL 10% 浓度戊二醛溶液固定(终浓度 1%)<sup>[7]</sup>。将混合均匀后的样品避光处理 15 min, 然后放入液氮中冷冻保存, 待样品移至实验室后放入 -80 °C 冰箱保存, 用于海洋浮游细菌丰度的检测。每层水样均设置 3 个平行样。

营养盐样品采集与处理: 取 500 mL 采集的海水样品用 0.45  $\mu\text{mol/L}$  醋酸纤维滤膜过滤, 装入已经用 5% 稀盐酸浸泡处理的 250 mL 塑料瓶

中作为营养盐样品, -20 °C 冷冻保存<sup>[8]</sup>。营养盐样品的采集要求每 10 个站位采集 1 次水质原始双平行样, 每天至少采集 1 个站位的平行样。

表 1 采样水层  
Tab. 1 Sampling water layer

水深 Depth/m	采样层次 Sampling water layer	底层与相邻采样层 的最小距离/m Minimum distance between the near sampling water layer
<5	表层	-
5~25	表层、底层	-
25~50	表层、中层 (10 m)、底层	10

注: 表层系指海面以下 0.1~1.0 m。

Notes: Surface layer refers to 0.1-1.0 m below sea level.

## 1.3 样品测定

### 1.3.1 现场环境因子的测定

水深由船载声呐雷达直接测量。近岸站位的温度、盐度、pH、溶解氧由有机玻璃采水器采集后, 现场使用 YSI Professional Plus 手持多参数水质分析仪 (YSI INC, USA) 测量; 远岸站位的 pH、

溶解氧由 YSI 测量,温度、盐度由 SBE 19 plus 温盐剖面仪直接测定。

### 1.3.2 营养盐测定

营养盐由 BRAN + LUEBBE AA3 型全自动连续流动分析仪 (SEAL, GER) 测定,使用 AACE 7.10 软件获取营养盐数据。

### 1.3.3 浮游细菌丰度测定

参照贺成等<sup>[8]</sup>的方法,浮游细菌的丰度由 BD FACSVerser 流式细胞仪 (USA) 测定。将浮游细菌样品从  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱取出后,利用  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温水浴锅将样品融化,用涡旋振荡器振荡均匀后使用无菌枪头将样品用  $40\text{ }\mu\text{mol/L}$  筛绢过滤,用终浓度为  $1 \times 10^{-4}$  SYBR Green I 核酸试剂染色<sup>[7]</sup>,涡旋振荡器振荡均匀后避光  $15\text{ min}$ ,然后使用流式细胞仪进行测定,在最后获得的散点图上圈门以获取浮游细菌的丰度。

## 1.4 数据处理与分析

使用 ArcGis 10.2 软件作图分析北部湾海域浮游细菌不同水层的水平分布特征以及不同水

层浮游细菌的垂直分布规律;使用 Matlab R2020b 软件绘制温度、盐度、pH 以及溶解氧的分布图;使用 SPSS 19.0 软件分析北部湾海域浮游细菌丰度与温度、盐度、深度、pH、溶解氧以及磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、硅酸盐等 5 种营养盐之间的相关关系。

## 2 结果

### 2.1 环境因子的分布特征

#### 2.1.1 温度

夏季表层温度变化范围为  $29.00 \sim 33.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $31.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;中层温度变化范围为  $30.20 \sim 30.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $30.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;底层温度变化范围为  $29.50 \sim 32.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $30.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度在水平方向上呈现由沿岸向远海递减的趋势。在河口地区,由于南流江、大风江、钦江、茅岭江等河流的汇入,出现温度的低值。同时在研究海域的中部出现了明显的低值区(图 2)。温度在垂直方向上没有显著变化,分布比较均匀。

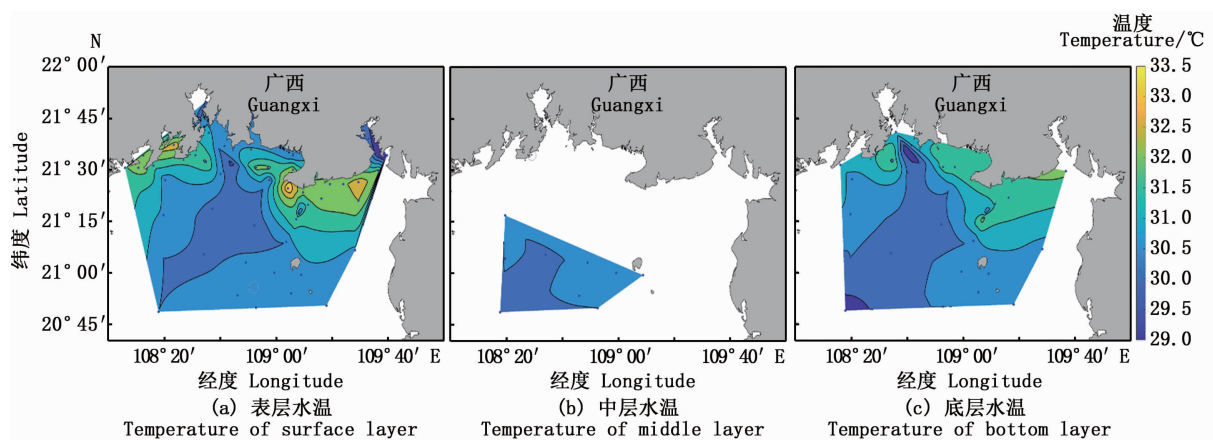


图 2 北部湾北部海域水温分布图

Fig. 2 Distribution of temperature in the northern Beibu Gulf

#### 2.1.2 盐度

夏季表层盐度变化范围为  $14.38 \sim 32.82$ ,平均值为  $28.49$ ;中层盐度变化范围为  $31.71 \sim 32.81$ ,平均值为  $32.29$ ;底层盐度变化范围为  $21.10 \sim 33.27$ ,平均值为  $30.74$ 。盐度水平上呈现由近岸向远海递增的趋势,河口处由于河流淡水的汇入而出现低值(图 3)。近岸垂直方向上的变化不大,分布比较均匀;远海地区水深越深,盐度越大。

#### 2.1.3 pH

夏季表层 pH 变化范围为  $7.51 \sim 8.42$ ,平均值为  $8.08$ ;中层 pH 变化范围为  $8.11 \sim 8.27$ ,平均值为  $8.21$ ;底层 pH 变化范围  $7.59 \sim 8.24$ ,平均值为  $8.09$ 。pH 水平方向上呈现由近岸向远海递增的趋势,研究海域的中部表层出现了 pH 的高值(图 4)。垂直方向上,除中部随深度降低外,其他地区变化不大,分布均匀。

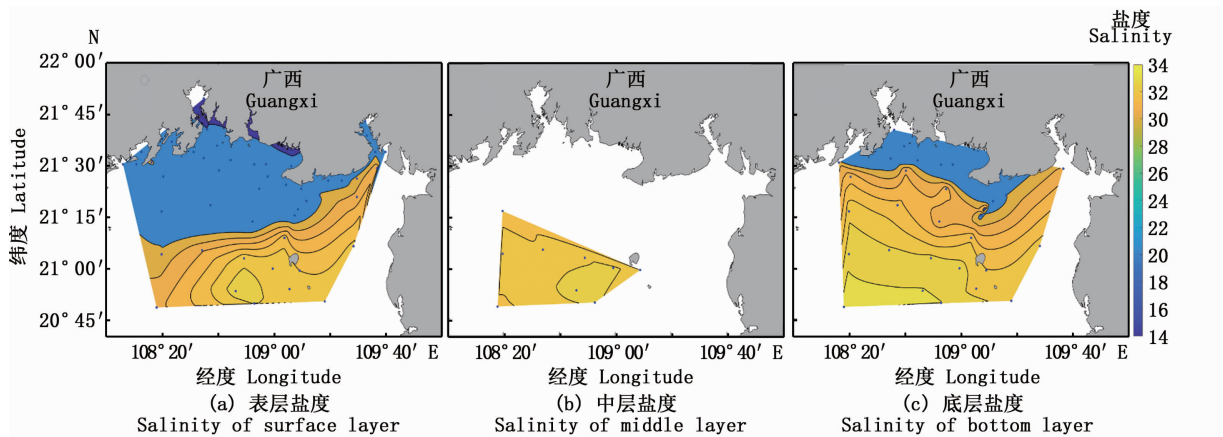


图 3 北部湾北部海域盐度分布图  
 Fig. 3 Distribution of salinity in the northern Beibu Gulf

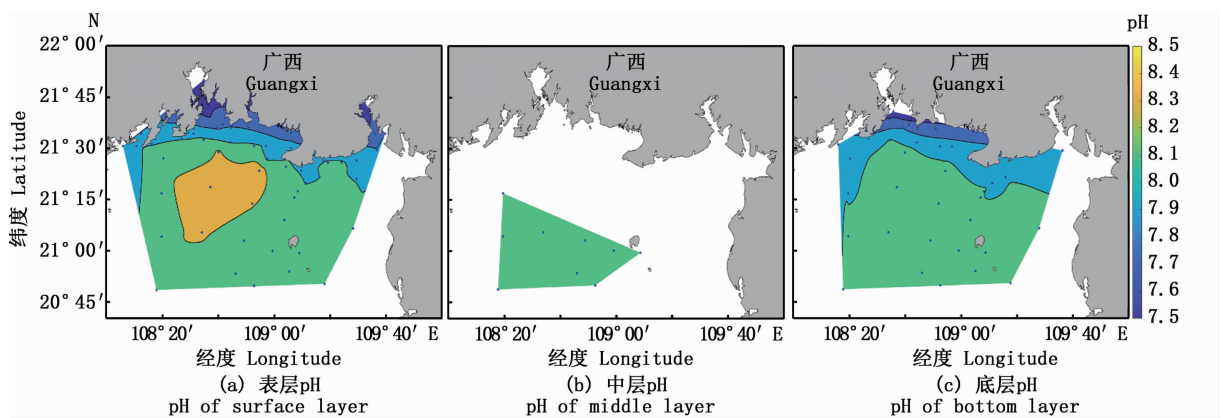


图 4 北部湾北部海域 pH 分布图  
 Fig. 4 Distribution of pH in the northern Beibu Gulf

2.1.4 溶解氧

夏季表层溶解氧浓度变化范围为 3.76 ~ 7.34 mg/L, 平均值为 5.82 mg/L; 中层溶解氧浓度变化范围为 4.30 ~ 6.26 mg/L, 平均值为 5.79 mg/L; 底层溶解氧浓度变化范围 3.40 ~ 6.31

mg/L, 平均值为 5.30 mg/L。表层和中层溶解氧含量都由近岸向远岸增加, 研究海域的中部表层出现了溶解氧的高值, 底层溶解氧含量则由近岸向远岸减少(图 5)。垂直方向上, 溶解氧含量随深度的增加而降低。

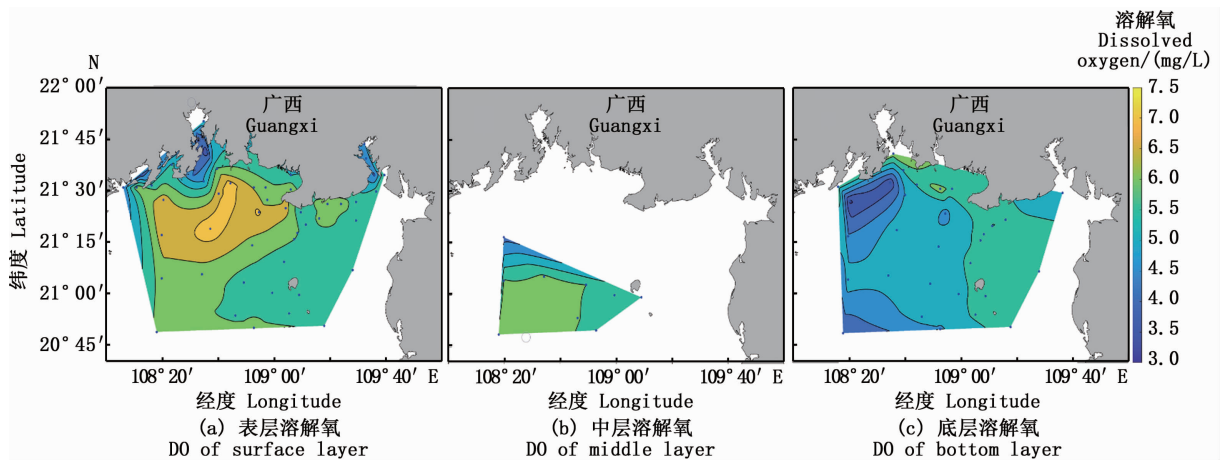


图 5 北部湾北部海域溶解氧分布图  
 Fig. 5 Distribution of DO in the northern Beibu Gulf

### 2.1.5 营养盐

北部湾北部夏季营养盐的变化范围和平均值见表 2。调查结果显示,5 种营养盐含量都呈现由近岸向远岸递减的趋势。5 种营养盐在近岸垂直方向上分布没有明显的趋势,而在远岸普遍都呈现底层含量大于中层含量,中层含量接近表层含量的趋势。

表 2 北部湾北部夏季营养盐的变化范围和平均值  
Tab.2 Variable range and average of nutrients in northern Beibu Gulf in summer

营养盐 Nutrients	变化范围 Variable range/ ( $\mu\text{mol/L}$ )	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD/ ( $\mu\text{mol/L}$ )
$\text{PO}_4^{3-}$	0.01 ~ 0.19	0.05 $\pm$ 0.03
$\text{NO}_3^-$	0.15 ~ 28.03	3.52 $\pm$ 5.62
$\text{NO}_2^-$	0.01 ~ 5.41	0.41 $\pm$ 0.89
$\text{NH}_4^+$	0.14 ~ 3.85	0.90 $\pm$ 0.53
$\text{SiO}_3^{2-}$	1.83 ~ 45.84	10.02 $\pm$ 7.94

## 2.2 浮游细菌丰度的分布特征

### 2.2.1 浮游细菌丰度的水平分布特征

北部湾北部海域夏季各站位浮游细菌平均丰度的变化范围为  $1.79 \times 10^5 \sim 91.47 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $15.40 \times 10^5$  cells/mL。平均丰度的高值主要集中在防城港、钦州以及北海的沿岸海域,涠洲岛和斜阳岛附近也出现高值,最高值出现在近岸的 J17 站位;平均丰度的低值主要集中在远岸海域,最低丰度出现在远岸的 Y5 站位。见图 6(a)。

表层浮游细菌的丰度变化范围为  $0.33 \times 10^5 \sim 91.47 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $12.61 \times 10^5$  cells/mL。近岸表层浮游细菌的变化范围为  $3.30 \times 10^5 \sim 91.47 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $17.86 \times 10^5$  cells/mL;远岸表层浮游细菌的变化范围为  $0.33 \times 10^5 \sim 26.14 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $4.04 \times 10^5$  cells/mL。近岸表层浮游细菌丰

度大于远岸表层浮游细菌丰度。各水层浮游细菌丰度与经纬度的相关性分析见表 3,结果表明,表层丰度与纬度的相关系数为 0.396,呈显著正相关( $P < 0.05$ ),丰度随纬度降低而降低。表层丰度的高值主要集中在防城港、钦州以及北海的沿岸海域,涠洲岛和斜阳岛附近站位的丰度也较高,最高值出现在 J17 站位;丰度的低值主要集中在远岸海域,最低丰度出现在 Y2 站位。见图 6(b)。

依据水样采集方案,水深超过 25 m 时采集中层水样,本研究采集中层水样的站位都处于远岸区域。中层浮游细菌的丰度变化范围为  $0.22 \times 10^5 \sim 7.48 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $2.15 \times 10^5$  cells/mL。相关性分析显示,中层丰度与经度的相关系数为 0.703,呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。远岸站位的中层丰度变化范围较小,高值主要出现在涠洲岛和斜阳岛附近,最高丰度出现在 Y17 站位,其余站位丰度相对变化不大,最低丰度出现在 Y1 站位。见图 6(c)。

底层浮游细菌的丰度变化范围为  $1.76 \times 10^5 \sim 71.33 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $17.74 \times 10^5$  cells/mL。近岸底层浮游细菌的变化范围为  $1.76 \times 10^5 \sim 71.33 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $22.30 \times 10^5$  cells/mL;远岸底层浮游细菌的变化范围为  $4.26 \times 10^5 \sim 45.72 \times 10^5$  cells/mL,平均值为  $15.10 \times 10^5$  cells/mL。近岸底层浮游细菌丰度大于远岸底层浮游细菌丰度。相关性分析显示,底层丰度与经度、纬度的相关性都不显著( $P > 0.05$ )。底层丰度的高值主要集中在防城港、钦州以及北海的沿岸海域,涠洲岛和斜阳岛附近站位的丰度也较高,最高丰度出现在 J21 站位;丰度的低值主要集中在远岸海域,最低丰度出现在 J13 站位。见图 6(d)。

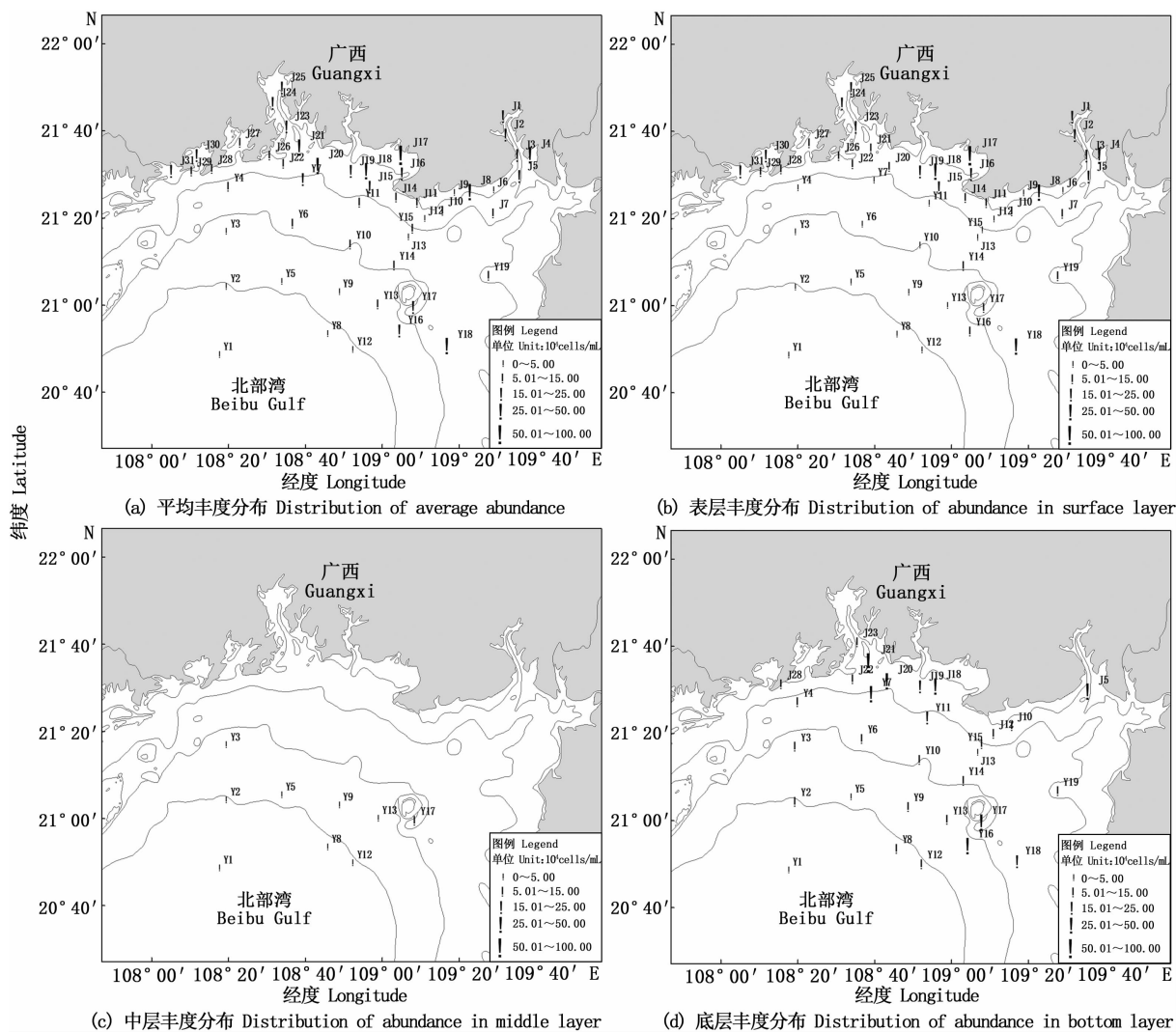


图6 北部湾北部海域夏季浮游细菌平均丰度和不同水层丰度的分布  
 Fig. 6 Distribution of average abundance of bacterioplankton and abundance of different layers in the northern Beibu Gulf in summer

### 2.2.2 浮游细菌丰度的垂直分布特征

近岸同时采集表层和底层水样的站位其表层丰度的变化范围为  $3.30 \times 10^5 \sim 31.26 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $13.38 \times 10^5$  cells/mL; 底层丰度的变化范围为  $1.76 \times 10^5 \sim 71.33 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $22.30 \times 10^5$  cells/mL。表、底层丰度没有表现出明显的趋势。

远岸采集三层水样站位的表层丰度变化范围为  $0.33 \times 10^5 \sim 9.29 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $2.11 \times 10^5$  cells/mL; 中层丰度变化范围为  $0.22 \times 10^5 \sim 7.48 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $2.15 \times$

$10^5$  cells/mL; 底层丰度变化范围为  $4.26 \times 10^5 \sim 45.72 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $11.91 \times 10^5$  cells/mL。表层和中层丰度数值相差不大, 底层丰度大于表层和中层丰度。采集表层和底层的站位表层丰度的变化范围为  $0.70 \times 10^5 \sim 26.14 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $5.78 \times 10^5$  cells/mL; 底层丰度变化范围为  $10.24 \times 10^5 \sim 32.51 \times 10^5$  cells/mL, 平均值为  $17.98 \times 10^5$  cells/mL。底层丰度大于表层丰度。远岸海域表层和中层丰度在垂直方向上的分布差异不明显; 底层丰度大于表层和中层丰度, 分布差异明显。见图7。



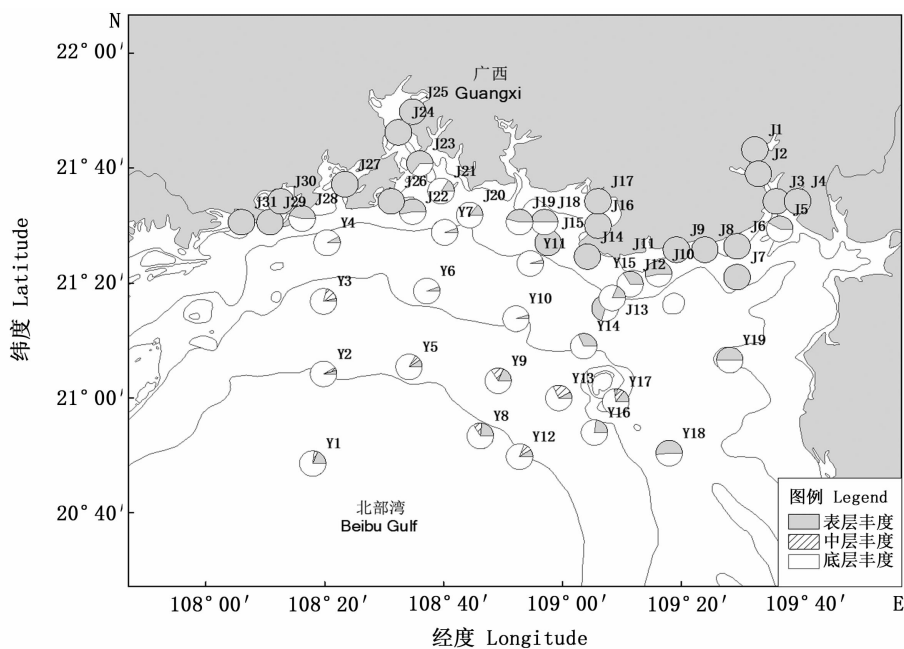


图7 各站位浮游细菌丰度垂直分布图

Fig.7 Vertical distribution of abundance of bacterioplankton at each station

### 2.3 浮游细菌丰度与环境因子的关系

基于 SPSS 19.0 软件,使用 Pearson 相关性分析方法研究不同水层浮游细菌丰度与主要环境因子之间的相关性,相关性分析结果见表 3。表层浮游细菌丰度与盐度的相关系数为  $-0.521$ ,与 pH 的相关系数为  $-0.527$ ,呈现显著负相关 ( $P < 0.05$ );与硝酸盐的相关系数为  $0.551$ ,与亚硝酸盐的相关系数为  $0.597$ ,与硅酸盐的相关系

数为  $0.593$ ,呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。中层浮游细菌丰度与温度的相关系数为  $0.702$ ,与磷酸盐的相关系数为  $0.818$ ,呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ );与硝酸盐的相关系数为  $0.457$ ,呈现显著正相关 ( $P < 0.01$ )。底层浮游细菌丰度与铵盐的相关系数为  $-0.391$ ,呈现显著负相关 ( $P < 0.05$ )。

表 3 浮游细菌丰度与环境因子相关性系数 (Pearson 相关性分析, 双侧检验)  
Tab.3 Correlation coefficients between environmental factors and abundance of bacterioplankton (Pearson correlation analysis, two-sided test)

水层 Layer	经度 Longitude	纬度 Latitude	温度 Temperature	盐度 Salinity	pH	DO	$PO_4^{3-}$	$NO_3^-$	$NO_2^-$	$NH_4^+$	$SiO_3^{2-}$
表层 Surface	0.210	0.396 *	-0.030	-0.521 *	-0.527 *	-0.293	0.313	0.551 **	0.597 **	0.206	0.593 **
中层 Middle	0.703 **	0.173	0.702 **	-0.130	-0.250	-0.232	0.818 **	0.457 *	0.373	-0.348	0.034
底层 Bottom	0.083	0.326	-0.316	-0.263	-0.224	0.180	-0.088	0.283	0.012	-0.391 *	-0.161

注: \*  $P < 0.05$  水平下显著相关; \*\*  $P < 0.01$  水平下极显著相关。

Notes: \* Significant correlation at significance level of  $P < 0.01$ ; \*\* extremely significant correlation at significance level of  $P < 0.01$ .

## 3 讨论

### 3.1 北部湾北部海域夏季浮游细菌丰度的分布规律

#### 3.1.1 水平分布规律

夏季北部湾北部海域浮游细菌丰度在水平方向上呈现出由近岸沿海向远岸深海区域逐渐

降低的趋势。丰度的高值主要集中在防城港、钦州以及北海的沿岸海域。此外,涠洲岛、斜阳岛附近海域的丰度也相对较高。本实验的研究结果与贺成的研究结果相一致<sup>[8]</sup>,原因可能是沿岸地区有着丰富的浮游细菌生长所需的物质,这些物质的来源主要包括陆源径流、垂直混合、再悬浮等<sup>[9]</sup>。北部湾沿岸大量的工农业废水和生活



污水被直接排放到沿岸海域,以及地表径流汇入带来大量的陆源性营养物质,形成了沿岸海域高营养的环境条件,为浮游细菌的生长繁殖提供了有利的条件<sup>[10-11]</sup>。调查还发现,在沿岸海域中丰度相对更高的站位都处于钦州湾、廉州湾、铁山港等地区,这可能与这些地区的水体相对比较封闭有关。封闭海域的水体交换、更新和自净能力都比较差,导致营养物质长期堆积,丰富的营养物质促进了浮游细菌的生长繁殖<sup>[12]</sup>。相关性结果显示:研究海域内表层丰度随纬度降低而降低,受陆源输入物质影响较大;中层丰度在研究海域内随经度增加而增大,原因可能是随着经度的增加,站位越来越靠近涠洲岛和斜阳岛,陆源输入的营养物质丰富,导致丰度的增加;底层丰度与经度和纬度都不显著相关,原因是采集底层水样的近岸站位较少,而远岸底层的营养盐相比其表层含量更高,导致了站位底层浮游细菌的丰度整体的变化范围相对不大,表现为与经度和纬度的相关性不显著,但近岸陆源输入的营养物质的影响相对更大,所以仍然呈现由近岸沿海向南远岸深海区域逐渐降低的趋势。

### 3.1.2 垂直分布规律

海水深度的增加会引起环境因子的变化,从而影响浮游细菌的丰度。近岸海域浮游细菌丰度在垂直方向上分层不明显,表层和底层丰度没有表现出显著的差异,原因可能是夏季近岸的水温较高,水深较浅,垂直混合作用较强,水层交换所需时间不长,导致近岸海域的温度、盐度、营养盐等环境因子在垂直方向上的分布极为均匀,从而浮游细菌丰度在垂直方向上的变化不显著。远岸海域垂直方向上有明显的分层,表现为表层和中层丰度接近,底层丰度大于表层和中层。许多研究表明,随着水深的增加,阳光变弱,水温降低,溶解有机物质也减少,细菌的生长繁殖受到限制,丰度也逐渐降低<sup>[13]</sup>,但在以往的研究中也有发现表层浮游细菌丰度低于底层丰度的现象<sup>[14]</sup>。张喆等<sup>[7,15]</sup>研究发现浮游细菌丰度随着深度增加呈现先升高后下降的趋势,25 m 层丰度大于 5 m 层的丰度,这与本研究的结果相符。本研究中远岸海域温度在垂直方向上变化并不明显,分布相对均匀;盐度在底层相对较高,但变化范围不大,这表明远岸海域丰度的垂直变化并非是由温度和盐度控制;研究过程中发现表层和中

层营养盐含量相差不大,底层比表层和中层有更高的营养盐含量,这可能是远岸海域表层丰度和中层丰度接近,底层浮游细菌丰度相对较高的原因。

## 3.2 北部湾北部海域浮游细菌丰度分布的影响因素分析

### 3.2.1 温度

温度是影响细菌生长繁殖的重要环境因子。细菌内部酶的活性决定了其新陈代谢的能力,在一定温度范围内酶的活性与温度成正比,海水温度与浮游细菌的生物量呈正相关关系<sup>[14,16]</sup>。LI 等<sup>[17]</sup>研究发现当水温低于 14 °C 时,温度对浮游细菌的调控作用超过了其他影响因素,是影响细菌分布的主要因素;水温高于 14 °C 时,温度对浮游细菌的调控作用逐步降低,底质供应、营养盐等成为影响浮游细菌分布的重要因素。北部湾北部海域夏季河口和海湾地区由于地表径流汇入形成低值,远岸海域受到低温琼州海峡过道水影响温度较低<sup>[18]</sup>。整体水温为 29.00 ~ 33.50 °C,与贺成等<sup>[8]</sup>所测量的数据存在差异,本研究中温度的高值相比更高。相关性分析显示,表层和底层丰度与温度的相关性不显著,温度的变化对浮游细菌丰度没有显著的影响,这与 GAO 等<sup>[4]</sup>在北欧海域的研究结果一致,这可能是研究只涉及了一个季节,各站位之间的温度差异不大。但在中层却与温度呈现极显著的正相关,这可能是由于中层采样站位较少,温度变化相对较大,同时受其他环境因子的影响也较为明显,所以丰度在中层随温度的增加而呈现极显著的上升趋势。

### 3.2.2 盐度

海洋中大部分细菌具有嗜盐性,海水含有浮游细菌生长所需要的多种盐类,例如钠在输送物质进入细胞的过程中起着不可取代的作用<sup>[19]</sup>。现有的许多研究都表明,浮游细菌的生物量随盐度的增高而呈现下降的趋势<sup>[20-21]</sup>。张霞等<sup>[22]</sup>认为海水中细菌的主要来源是陆源的输入,陆源输入的细菌被海水稀释后细菌丰度降低,从而导致丰度与盐度呈负相关;而季风云等<sup>[11]</sup>则认为海水稀释了外源输入的营养物质,较低浓度的营养物质限制了细菌的生长繁殖,进而导致丰度与盐度呈负相关。由于夏季西南季风的作用,海南岛西侧近岸南海高盐水自南向北的侵入加剧<sup>[18]</sup>导致

远岸海域盐度较高。盐度为 14.38 ~ 32.82, 与贺成等<sup>[8]</sup>所测数据一致。相关性分析显示:表层丰度与盐度呈现显著负相关,丰度随盐度增加而显著下降,原因可能是近岸海域受陆源输入的浮游细菌和营养物质丰富,同时远岸海域较高的盐度抑制了表层浮游细菌的生长繁殖,导致表层丰度受盐度的影响而变化幅度较大;中层和底层相关性不显著,主要是受采样层次的限制,近岸水层较浅,多数站位未采集中、底层样品,因此中层和底层丰度受陆源的影响较小,受盐度影响也较小。

### 3.2.3 pH

海水 pH 作为海洋酸化的指标,是海洋研究的重要参数之一。pH 的变化与浮游植物有着密切的联系,在浮游植物生长旺盛的时期,其光合作用会降低海水中无机碳的浓度,无机碳浓度的降低导致海水 pH 上升,进而消除了部分 pH 耐受度较低的细菌<sup>[23]</sup>。此外,pH 能引起微生物细胞膜电荷变化从而影响微生物的酶活性以及对营养物质的吸收<sup>[24]</sup>。本研究海域的 pH 为 7.51 ~ 8.42。从不同水层的 pH 的相关性分析来看,表层丰度与 pH 呈显著负相关,丰度随 pH 的增加而显著降低,而中层和底层的相关性不显著。猜测原因是表层海水中的浮游植物受光照等因素的影响,光合作用比较旺盛,导致表层海水的 pH 变化幅度比中层和底层大。

### 3.2.4 溶解氧

溶解氧是海洋生物生命活动不可缺少的物质,为海洋生物提供了生存的环境。海洋中的溶解氧主要来源于大气中的游离氧以及浮游植物和水生植物的光合作用,蓝细菌和一些光合细菌也起一定作用<sup>[25]</sup>。溶解氧含量为 3.40 ~ 7.34 mg/L。相关性分析结果显示,表层、中层和底层的浮游细菌丰度与溶解氧的相关性都不显著,这与张喆等<sup>[7]</sup>的结果相符。细菌的分布规律与其代谢类型有关。已有研究<sup>[26]</sup>表明:溶解氧含量低于 1 mg/L 时,主要为兼氧或厌氧微生物作用<sup>[24]</sup>;溶解氧含量高于 2 mg/L 就能够满足细菌生长繁殖的需求。

### 3.2.5 营养盐

营养盐是海洋生物生长繁殖必需的物质,影响着海洋生物的生命活动。营养盐不仅与浮游细菌的生长繁殖密切相关,同时也是影响浮游细

菌分布的重要因素。浮游细菌能够有效地吸收海洋环境中的各种有机和无机物营养物质,它对无机盐的吸收利用在营养盐的循环中扮演着非常重要的角色<sup>[25]</sup>。北部湾北部海域夏季盛行西南风,沿岸入海径流量剧增,导致营养盐大量输入研究海域。与王符菁等<sup>[18]</sup>的测量数据相比,研究区测量的硅酸盐含量相对较高,其余营养盐含量相一致,原因是近岸采样点水层浅,泥沙含量较多。现有的研究<sup>[22,25,27]</sup>表明,水体中的细菌生物量与氮、磷营养盐的含量呈正相关的关系。由于近岸工农业、生活废水的输入以及地表径流的汇入,导致营养物质含量增加,促使了异养浮游细菌生物量的增加。异养浮游细菌生物量的增加使得更多的大分子的有机物被分解成简单的无机物,释放出更多的氮、磷营养盐。氮、磷营养盐的增加又促进了浮游植物生物量的增加,从而产生了更多的溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC),为浮游细菌提供了更多的营养来源,提高了浮游细菌生物量<sup>[28-29]</sup>。此外,浮游植物的生长繁殖也会消耗水体中的硅酸盐,同时释出的溶解有机碳也会促进浮游细菌的生长<sup>[8]</sup>。不同海域、不同水层由于环境条件等一系列因素存在差异,调控浮游细菌的营养盐种类也不同。本研究中,表层丰度受到磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐和硅酸盐的影响,中层受到硝酸盐、磷酸盐影响,底层受到铵盐影响。相关性分析结果表明,研究海域浮游细菌的分布(表层、中层和底层)均受到 N、P 元素的限制。这主要是因为细菌细胞微小,具有较高的比表面积,细菌内构成 DNA 与膜结构的 N、P 含量远高于其他元素,进而使得海水中 N、P 元素的含量对浮游细菌的分布起到决定性作用。

## 4 结论

夏季北部湾北部海域浮游细菌丰度在水平方向上表现出由近岸沿海向远岸深海区域逐渐降低的趋势。近岸海域浮游细菌丰度在垂直方向上分层不明显,表层和底层丰度没有表现出显著的差异;远岸海域垂直方向上有明显的分层,表现为表层和中层丰度接近,底层丰度大于表层和中层。

浮游细菌丰度受到物理化学参数以及营养盐等环境因子之间的累积相互作用控制,而不是由单一因子控制。不同水层丰度控制因子不同,

表层受盐度、pH、硝酸盐、亚硝酸盐、硅酸盐影响,中层主要受温度、硝酸盐、磷酸盐影响,底层主要受铵盐影响。

### 参考文献:

- [1] SIEBURTH J M, SMETACEK V, LENZ J. Pelagic ecosystem structure; heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions[J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1256-1263.
- [2] 莫媛媛. 中国三个亚热带海湾浮游细菌群落多样性及生物地理格局[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- MO Y Y. Diversity and biogeographical patterns of bacterioplankton community in three subtropical bays from China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [3] 白洁, 刘小沙, 侯瑞, 等. 南海南部海域浮游细菌群落特征及影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(11): 2950-2957.
- BAI J, LIU X S, HOU R, et al. Community structure and influencing factors of bacterioplankton in the southern South China Sea [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11): 2950-2957.
- [4] GAO Y, HE J F, CHEN M, et al. Factors dominating bacterioplankton abundance and production in the Nordic seas and the Chukchi Sea in summer 2012[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 153-162.
- [5] 陈波. 北部湾水系形成及其性质的初步探讨[J]. *广西科学院学报*, 1986(2): 92-95.
- CHEN B. Preliminary study on the formation and nature of Beibu Gulf water system[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 1986(2): 92-95.
- [6] 潘非斐. 2011年春、夏季广西近海浮游动物群落特征研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- PAN F F. Characteristics of zooplankton community in Guangxi coastal waters in spring and summer 2011 [D]. Xiamen: Xiamen University, 2012.
- [7] 张喆, 巩秀玉, 胡莹, 等. 南海中北部海域秋季浮游细菌和病毒丰度及其影响因子[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(4): 9-16.
- ZHANG Z, GONG X Y, HU Y, et al. Abundance of bacterioplankton and virioplankton in the central and northern South China Sea in autumn [J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(4): 9-16.
- [8] 贺成, 徐沙, 宋书群, 等. 北部湾北部海域水体异养细菌的时空分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(4): 94-108.
- HE C, XU S, SONG S Q, et al. The spatial-temporal distributions of heterotrophic bacteria in seawater of the northern Beibu Gulf [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(4): 94-108.
- [9] SHIAH F K, DUCKLOW H W. Regulation of bacterial abundance and production by substrate supply and bacterivory; amesocosm study [J]. *Microbial Ecology*, 1995, 30(3): 239-255.
- [10] 周伟华, 王汉奎, 董俊德, 等. 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[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2633-2639.
- ZHOU W H, WANG H K, DONG J D, et al. Phytoplankton and bacterial biomass and their relationship with the environmental factors in autumn and winter in the Sanya Bay, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2633-2639.
- [11] 季凤云, 郭立梅, 李洪波, 等. 南海北部细菌丰度和细菌生产力分布及其与环境因子相关性[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(3): 354-359.
- JI F Y, GUO L M, LI H B, et al. Abundance and production of bacteria and their correlations with environmental factor [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(3): 354-359.
- [12] 赵海萍, 李清雪, 陶建华. 渤海湾浮游细菌分布特征及环境影响因素[J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 88-94.
- ZHAO H P, LI Q X, TAO J H. Distribution characteristics of bacterioplankton in Bohai Bay and its environmental influence factors [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 88-94.
- [13] DELONG E F, PRESTON C M, MINCER T, et al. Community genomics among stratified microbial assemblages in the ocean's interior [J]. *Science*, 2006, 311(5760): 496-503.
- [14] SHISH F K, DUCKLOW H W. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(6): 1243-1258.
- [15] 张喆, 王晓红, 巩秀玉, 等. 南海北部海域春季浮游细菌和病毒空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1639-1649.
- ZHANG Z, WANG X H, GONG X Y, et al. Ecological distribution of bacterioplankton and virioplankton in the north of South China Sea in spring [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1639-1649.
- [16] KIRCHMAN D L, RICH J H, BARBER R T. Biomass and biomass production of heterotrophic bacteria along 140°W in the equatorial Pacific; effect of temperature on the microbial loop [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1995, 42(2-3): 603-619.
- [17] LI W K W. Annual average abundance of heterotrophic bacteria and *Synechococcus* in surface ocean waters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(7): 1746-1753.
- [18] 王符菁, 林元烧, 曹文清, 等. 北部湾北部浮游植物群落结构及其与营养盐的关系[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(6): 73-85.
- WANG F J, LIN Y S, CAO W Q, et al. The relationship between nutrients and phytoplankton community structure in northern Beibu Gulf [J]. *Journal of Tropical Oceanography*,

- 2015, 34(6): 73-85.
- [19] 白洁, 时瑶, 宋亮, 等. 黄海西北部浮游细菌生物量分布特征及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(4): 592-596.
- BAI J, SHI Y, SONG L, et al. Distribution character of bacterioplankton biomass and their relationship with environmental factors in the northwest of the Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(4): 592-596.
- [20] DEL GIORGIO P A, BOUVIER T C. Linking the physiologic and phylogenetic successions in free-living bacterial communities along an estuarine salinity gradient [J]. Limnology and Oceanography, 2002, 47(2): 471-486.
- [21] ZHANG Y, JIAO N Z, COTTRELL M T, et al. Contribution of major bacterial groups to bacterial biomass production along a salinity gradient in the South China Sea [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2006, 43(3): 233-241.
- [22] 张霞, 黄小平, 施震, 等. 珠江口异养细菌丰度与环境因子的耦合关系[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 228-237.
- ZHANG X, HUANG X P, SHI Z, et al. Coupling of heterotrophic bacteria abundance and environmental variables of the Zhujiang ( Pearl ) River Estuary [ J ]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(6): 228-237.
- [23] 刘晓曦. 抚仙湖浮游植物和浮游细菌群落的时空变化特征及其影响因子[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- LIU X X. Spatiotemporal variation of phytoplankton and bacterioplankton communities and their relationship with environmental factors in Fuxian Lake[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020.
- [24] 杜萍, 刘晶晶, 曾江宁, 等. 长江口低氧区异养细菌及氮磷细菌分布[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1316-1324.
- DU P, LIU J J, ZENG J N, et al. Spatial distribution patterns of heterotrophic, nitrogen, and phosphate bacteria in hypoxic zone of Yangtze River Estuary [ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1316-1324.
- [25] 姜发军, 胡章立, 胡超群. 大鹏湾浮游细菌时空分布与环境因子的关系[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 96-100.
- JIANG F J, HU Z L, HU C Q. Correlation between spatial-temporal distribution of bacterioplankton and environmental factors in the Dapeng Bay [ J ]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(1): 96-100.
- [26] 李捍东, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海大沽河口底质-水界面耗氧特性[J]. 环境科学研究, 2004, 17(5): 19-22.
- LI H D, MENG W, ZHENG B H, et al. Oxygen consumption characteristics of the sediment-water interface in Dagu River Estuary of Bohai Bay [ J ]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(5): 19-22.
- [27] 李祥付, 徐杰, 施震, 等. 珠江口异养细菌时空分布特征及其调控机制[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(1): 27-36.
- LI X F, XU J, SHI Z, et al. Spatial and temporal variation in heterotrophic bacteria and their regulators in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(1): 27-36.
- [28] 周凯, 章洁香, 张瑜斌, 等. 深圳湾浮游细菌生物量的时空分布及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(3): 65-71.
- ZHOU K, ZHANG J X, ZHANG Y B, et al. Temporal and spatial distributions of bacterioplankton biomass and the influenced factors in Shenzhen Bay [ J ]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(3): 65-71.
- [29] 陈淑文, 宋俊廷, 类成龙, 等. 深圳湾浮游细菌生物量的时空动态及影响因素[J]. 海洋学研究, 2016, 34(4): 84-91.
- CHEN S W, SONG J T, LEI C L, et al. Temporal and spatial dynamics of bacterioplankton biomass and the influenced factors in Shenzhen Bay [ J ]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(4): 84-91.

## Distribution characteristics of bacterioplankton in seawater of the northern Beibu Gulf and its environmental influence factors

HE Weidong<sup>1,2</sup>, SUN Pengfei<sup>2</sup>, ZHANG Qiufeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fourth Institute of Oceanography, MNR, Beihai 536000, Guangxi, China)

**Abstract:** From July 2020 to August 2020, 50 stations were set up in the northern Beibu Gulf to investigate bacterioplankton and environmental factors. Spatial distribution of bacterioplankton and the correlation between bacterioplankton abundance and environmental factors were also analyzed. The bacterioplankton abundance in surface layer ranged from  $0.33 \times 10^5$  cells/mL to  $91.47 \times 10^5$  cells/mL, with an average of  $12.61 \times 10^5$  cells/mL; the abundance in middle layer ranged from  $0.22 \times 10^5$  cells/mL to  $7.48 \times 10^5$  cells/mL, with an average of  $2.15 \times 10^5$  cells/mL; the abundance in bottom layer ranged from  $1.76 \times 10^5$  cells/mL to  $71.33 \times 10^5$  cells/mL, with an average of  $17.74 \times 10^5$  cells/mL. The bacterioplankton abundance in the horizontal direction showed a decreasing trend from coastal areas to deep sea areas. There was no significant correlation between the bacterioplankton abundance and the depth in the vertical direction ( $P > 0.05$ ). There was no obvious vertical trend in the bacterioplankton abundance in the coastal waters, but the abundance in surface layer and middle layer and in the offshore water was close, and the abundance in bottom layer was higher than that in surface layer and middle layer. Pearson correlation analysis showed that: the abundance in surface layer had significantly negative correlations with salinity and pH ( $P < 0.05$ ), and had very significantly positive correlations with nitrate, nitrite and silicate ( $P < 0.01$ ); the abundance in middle layer had very significantly positive correlations with temperature and phosphate ( $P < 0.01$ ), and had significantly positive correlations with nitrate ( $P < 0.05$ ); the abundance in bottom layer had significantly negative correlation with ammonium ( $P < 0.05$ ). This indicated that the spatial distribution of bacterioplankton was affected by multiple environmental factors such as temperature, salinity, pH and nutrients.

**Key words:** bacterioplankton; abundance; distribution characteristics; environmental factor