

大亚湾表层水体可培养细菌分布特征及其与 环境因子相关性

胡慧娜^{1,2}, 陈炜婷^{1,2}, 黄盛^{1,2}, 田丰歌^{1,2},
王符菁^{1,2}, 邓伟^{1,2}

(1.自然资源部南海生态中心, 广东 广州 510300; 2.海南南沙珊瑚礁生态系统国家野外科学观测研究站, 广东 广州 510300)

摘要:本研究依托 2020 年 8 月大亚湾海域调查航次获得的表层可培养细菌总数 (culturable bacterial populations, CBP) 及温度、盐度、pH、营养盐、叶绿素 *a* (Chl *a*) 等海水水质参数, 开展大亚湾表层水体可培养细菌分布特征及其与环境因子相关性的研究。结果表明, 大亚湾海域表层水体可培养细菌总数为 100~1700 CFU/mL, 平均为 518 CFU/mL, 其在水平方向上由湾内至湾外呈逐渐减小趋势。大亚湾海域表层水体可培养细菌与盐度、pH 呈现极显著的负相关关系 ($P<0.01$, $n=16$), 而与活性磷酸盐 ($PO_4\text{-P}$)、硅酸盐 ($SiO_3\text{-Si}$)、亚硝酸盐 ($NO_2\text{-N}$)、氨氮 ($NH_4\text{-N}$) 及 Chl *a* 浓度呈极显著正相关关系 ($P<0.01$, $n=16$)。以上表明可培养细菌丰度很可能与陆源输入有关, 近岸高营养环境促进了细菌的生长繁殖。

关键词:大亚湾; 可培养细菌; 分布; 环境因子

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2025)04-0517-07

Distribution characteristics of culturable bacteria in surface water of Daya Bay and their correlation with environment factors

HU Huina^{1,2}, CHEN Weiting^{1,2}, HUANG Sheng^{1,2}, TIAN Fengge^{1,2},
WANG Fujing^{1,2}, DENG Wei^{1,2}

(1.South China Sea Ecological Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 2.Nansha Islands Coral Reef Ecosystem National Observation and Research Station, Hainan, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Based on the culturable bacteria populations (CBP), temperature, salinity, pH, nutrients, chlorophyll *a* (Chl *a*), and other parameters obtained in surface water of Daya Bay in August 2020, this study focused on the distribution characteristics of CBP and their correlation with environmental factors mentioned above. The results showed that the cultivable bacterial abundance ranged from 100 to 1700 CFU/mL, with an average of 518 CFU/mL. The CBP in the surface water of the Daya Bay showed a decreasing trend from the inner bay to the outer bay. The CBP in the surface water presented significant negative correlation with salinity and pH ($P<0.01$, $n=16$), while significant positive correlation with phosphate ($PO_4\text{-P}$), silicate ($SiO_3\text{-Si}$), nitrite ($NO_2\text{-N}$), ammonium ($NH_4\text{-N}$) and chl *a* ($P<0.01$, $n=16$), indicating that the CBP were probably related to terrigenous

收稿日期: 2024-09-10, 修订日期: 2024-12-18

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立研究课题青年人才项目 (MESTA-2021-D006); 自然资源部南海局科技战略研究项目 (23YD03); 2024 年度自然资源部南海局科技发展基金项目 (240104)

作者简介: 胡慧娜 (1991-), 女, 安徽东至人, 工程师, 从事海洋环境监测与评价, E-mail: hllfly@163.com

通信作者: 邓伟 (1984-), 男, 江西九江人, 高级工程师, 从事海洋环境监测与评价, E-mail: dw42968166@163.com

input, and the growth and reproduction of bacteria were promoted by high nutrients near shore.

Key words: Daya Bay; culturable bacteria; distribution; environment factor

海洋细菌被认为是初级生产力的重要组成部分,在食物链和生物地球化学循环中发挥着重要作用,特别是在在有机物降解和化学物质分解方面,由于其非常高的更替率,能对任何环境变化作出快速反应^[1]。在海洋环境中,细菌的可培养性(可培养细菌总数占基于显微镜计得的总细菌数的百分比)为0.001%~0.1%^[2]。可培养细菌总数可被用作指示有机质污染、海水富营养化的生物指标^[3]。海洋表层有机质积累、营养物质浓度较高,从而提高了异养细菌的碳源可用性,具有较高的细菌数量。海洋浮游植物是海洋生态系统中最重要初级生产者,其光合作用的生产力占海洋生物总生产力的95%左右^[2],它们与细菌之间传递营养物质的途径和机制较为复杂,但可以明确的是,细菌(主要为异养细菌)在很大程度上依赖浮游植物提供能量。对于上层海洋来说,绝大部分初级生产是由无机营养物质推动和维持的^[4]。因此,对于细菌总数、营养物质和初级生产力的综合分析在一定程度上可以反映区域上层海域水体健康状况,为近海海洋环境综合治理提供数据参考。

河口或湾口被认为是陆源污染物的主要存储库,通常是大气二氧化碳的源,细菌是降解河口有机碳的主要贡献者。污染物可通过陆地径流、管道排放、船舶排放、大气沉降等进入海洋,由此,河口或湾口向海不仅具有很强的生物化学环境梯度,也存在细菌总数的下降情况^[5]。大亚湾(22°30'N—22°50'N、114°29'E—114°49'E)是中国南海的重要海湾,位于广东省东部红海湾与大鹏湾之间,总面积650 km²,平均水深约10 m,湾口最深处有20 m。大亚湾属于典型的亚热带季风气候,湾内水产资源丰富,经大亚湾入海河流众多。大亚湾海域及周边地区分属深圳市和惠州市,是广东省重点经济发展区域,生产活动频繁,尤以石化工业、港口航运业、海水养殖业和旅游业最为发达,长期以来给大亚湾海域带来一定的生态环境压力。

大亚湾较高的生物生产力暗示水体可能存

在一个活跃的生物碳泵。微生物循环作为生物碳泵的重要组成部分,可以通过微生物的吸收利用或将有机物再矿化回无机相来改变碳输出效率^[6]。因此,探明影响细菌生长的因素是掌握区域碳转化和输出的前提条件。本文利用2020年自然资源部南海生态中心大亚湾海域夏季调查航次所采集的样品开展大亚湾海域可培养细菌及其环境影响因子的研究。通过分析大亚湾海域可培养细菌的丰度与空间分布,初步探索研究海域可培养细菌的空间变化规律及其蕴含的海洋学信息;分析可培养细菌与营养物质及初级生产力间可能存在的生物地球化学关系,探究导致其差异性分布的主要因素。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究样品采集于2020年自然资源部南海生态中心大亚湾海域调查航次,采样时间为8月18日至22日,采集大亚湾湾内至湾外16个站位共计16份表层(0.5 m以浅)海水样品(图1),每个水样体积约100 mL。采集的水样加入1 mL体积比为1:2000的吐温溶液,充分摇匀后立即以无菌操作完成后续实验分析。无法立即分析的样品置于4℃冰箱暂存,并在4 h内完成分析。

为便于后续讨论及区分,根据地理位置将大

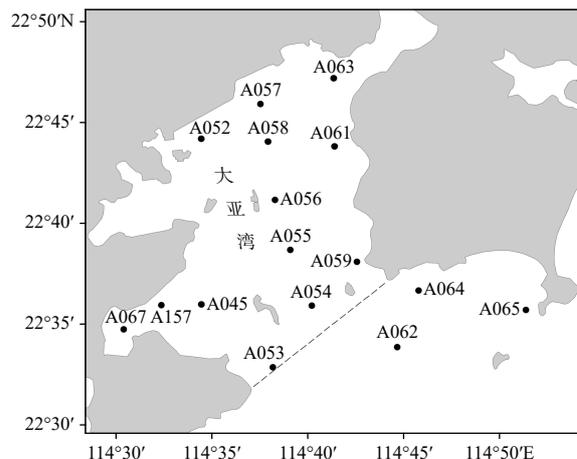


图1 大亚湾海域的采样站位

Fig. 1 Sampling stations in Daya Bay

亚湾海域调查站位划分为湾内(A052、A057、A063、A058、A061、A056、A055、A067、A157、A045、A059站)、湾口(A053、A054站)和湾外(A062、A064、A065站)三区域。

1.2 样品分析

表层水温采用 SBE-911 plus CTD(Sea-Bird Electronics Inc, USA) 现场测量, 测量精度为 ± 0.001 °C。盐度测定采用电极式盐度计法^[7]。pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)分别采用 pH 计法、碘量法和碱性高锰酸钾法进行现场分析, 其中, COD 的检出限为 0.15 mg/L ^[7]。用于营养盐分析的海水样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维膜过滤后, 保存于洁净的塑料瓶中, 于 -20 °C 冷冻保存, 尽快送回陆地实验室。NH₄-N 采用次溴酸盐氧化法分析测定^[7], NO₂-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si 采用流动分析法测定^[8]。NO₂-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si 的检出限分别为 $0.025 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.023 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.03 \mu\text{mol/L}$ 。将 500 mL 水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜过滤后, 收集滤膜置于洁净玻璃瓶中冷冻保存, 带回陆地实验室进行 Chl *a* 分析测定^[8]。

本研究可培养细菌总数的确定严格遵照无菌操作。吸取 1 mL 水样注入盛有 9 mL 灭菌陈海水的试管内混匀(此时稀释度为 10 倍), 取混匀后的 1 mL 水样注入盛有 9 mL 灭菌陈海水的

试管内混匀(此时稀释度为 100 倍)。取两个稀释度的水样 0.1 mL 均匀涂布于预先制备好的 2216E 培养基上, 待菌液渗入培养基后转至 25 °C 恒温箱内培养 7 d 取出计数。本研究的两种稀释度各设有三个平行样。菌落形成计数法(colony forming unit method, CFU)按《海洋监测规范 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7-2007)执行。制板及涂板等操作均于超净台中完成。

2 结果与讨论

2.1 环境因子及 Chl *a* 的分布

研究海域表层海水各环境因子监测结果见表 1。研究水域表层水温为 28.82 °C ~ 31.62 °C, 平均为 30.34 °C; 表层海水盐度为 28.036 ~ 31.678 , 平均为 30.788 。表层水温总体呈现由北向南、由湾内向湾外逐步降低的特点(图 2A), 这与大亚湾近岸水温的空间分布规律相符^[9]。尤其是靠近大亚湾核电站和岭澳核电站排水口附近的西部站位(A067、A157 和 A045 站), 呈现明显的表层水温高值信号, 表明核电站温排水对此产生影响。表层海水盐度分布与温度相反, 由湾顶沿湾外方向逐渐升高, 其中, 淡澳河口附近站位(A052 站)盐度最低(图 2B)。

表 1 研究海域表层海水各环境因子监测结果

Tab.1 Results of environmental factors in the surface water of the studied area

环境因子	温度/°C	盐度	pH	DO/ mg·L ⁻¹	COD/ mg·L ⁻¹	NO ₂ -N/ μmol·L ⁻¹	NH ₄ -N/ μmol·L ⁻¹	PO ₄ -P/ μmol·L ⁻¹	SiO ₃ -Si/ μmol·L ⁻¹	Chl <i>a</i> / μg·L ⁻¹
监测结果	28.82 ~ 31.62	28.036 ~ 31.678	8.13 ~ 8.37	6.20 ~ 7.72	0.17 ~ 0.76	0.55 ~ 4.98	1.16 ~ 9.92	0.05 ~ 0.17	3.10 ~ 31.55	0.06 ~ 5.40
平均值	30.34	30.788	8.30	7.00	0.41	1.34	3.13	0.09	13.23	1.26

陆地径流和外海水进入导致研究海域表层水体 pH 自北部近岸至湾中再到湾口、湾外逐渐升高(图 2C)。与之类似的是 DO 浓度, 其值为 6.20 ~ 7.72 mg/L , 最低值出现在近岸 A052 站(图 2D)。通常对于近岸水体, DO 浓度低于 3 mg/L 时称为低氧水体, 低于 2 mg/L 时称为缺氧水体, 本研究区域不属于低氧水体。COD 浓度为 0.17 ~ 0.76 mg/L , 其在近岸表层水体中较高(图 2E), 表明沿岸水域可能存在更为旺盛的

物生产活动。

营养盐是海洋生态系统主要的生源物质, 也是影响海洋初级生产力的重要因素。研究海域 NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si 的浓度分别为 0.55 ~ $4.98 \mu\text{mol/L}$ 、 1.16 ~ $9.92 \mu\text{mol/L}$ 、 0.05 ~ $0.17 \mu\text{mol/L}$ 、 3.10 ~ $31.55 \mu\text{mol/L}$ 。海水中的 NO₂-N 是 NH₄-N 氧化成为 NO₃-N 的中间形态。NO₂-N 浓度的表层分布呈湾顶高、湾中至湾外海域较低的现象(图 3F)。NH₄-N 是有机氮被氧化分解

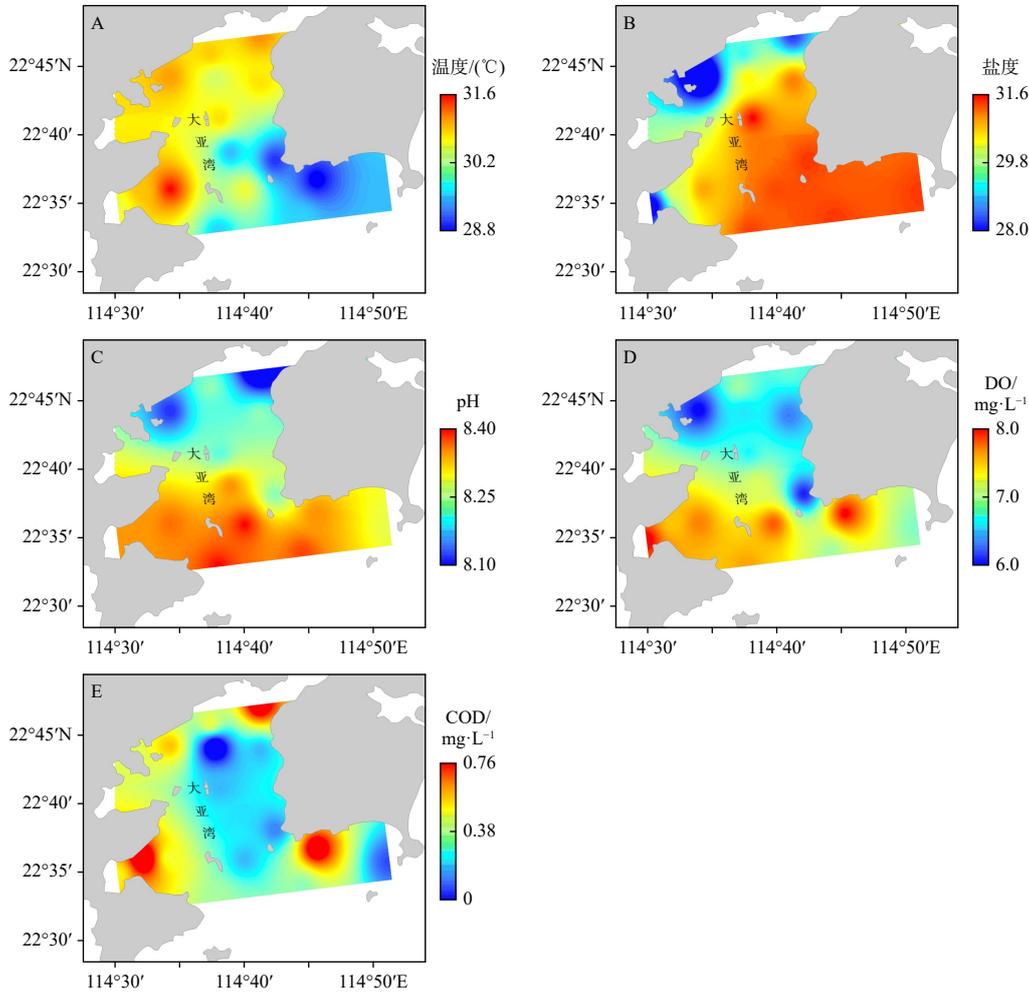


图2 研究海域表层海水温度、盐度、pH、DO和COD的平面分布

Fig. 2 The horizontal distribution of temperature, salinity, pH, DO and COD in the surface water of the studied area

为无机氮的最初产物,在海水中较不稳定,它可被氧化为 $\text{NO}_2\text{-N}$,后被进一步氧化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。表层 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 较为类似,北部近岸站位表层水体 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度普遍高于湾中以外(图3G)。表层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 分布类似,即湾顶浓度最高,沿岸站位次之,湾中向湾外海域浓度较低(图3H、图3I)。

Chl *a* 是指示浮游植物现存量的重要指标。研究海域表层 Chl *a* 浓度为 $0.06 \sim 5.40 \mu\text{g/L}$, 其中,湾顶 A052 站存在极大值。在空间分布上,近岸表层 Chl *a* 浓度较高,且湾内西部略高于东部(图3J)。

2.2 CBP 的分布

研究海域表层水体可培养细菌总数为 $100 \sim 1700 \text{ CFU/mL}$, 平均为 518 CFU/mL 。其值

与夏季渤海湾天津海域^[10]、长江口海域^[11]、南海北部海域^[12]等研究结果接近,低于夏季东山湾^[13]、辽河口海域^[14]和春季大亚湾海域的研究结果^[15],处于北黄海夏季研究结果范围内^[16],远低于李和阳等^[3]于夏季大亚湾的调查结果(表2)。

为了更直观地呈现不同站位之间可培养细菌总数的差异,将其进行对数取值并作于图4中($2.00 \sim 3.23 \lg \text{ CFU/mL}$)。由图4可知,研究海域表层水体可培养细菌由北向南、由湾内向湾外有逐渐减小的趋势,离岸近的站位丰度较高,这与早年春季大亚湾海域表层水体的研究一致^[15]。其中,A052、A063、A067 站位呈现表层海水 $\lg \text{ CBP}$ 高值,而上述三站位皆位于大亚湾主要陆地径流入口,表明陆源输入对 CBP 丰度的影响十分重要,其中 A067 站处于大鹏澳,是大亚湾重

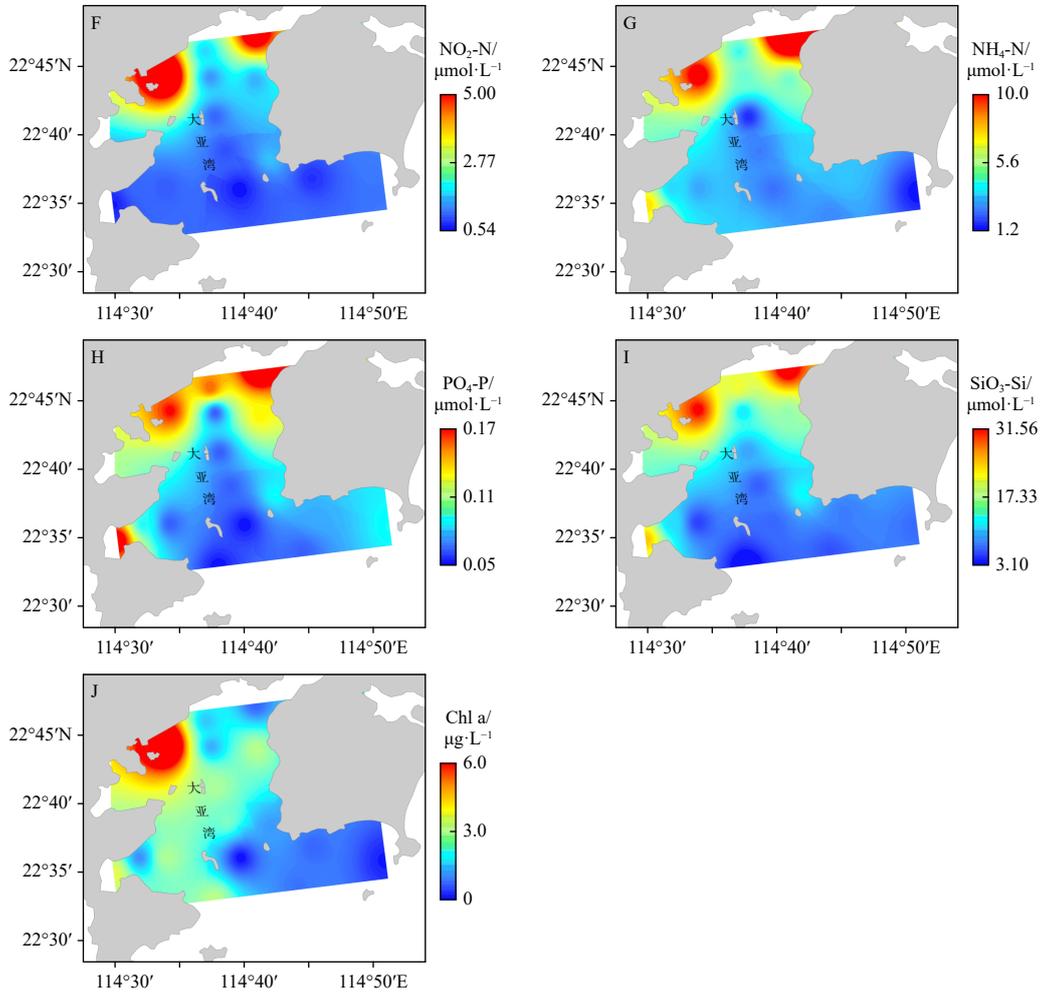


图 3 研究海域表层海水营养盐和 Chl a 浓度的平面分布

Fig. 3 The horizontal distribution of nutrients and chl a in the surface water of the studied area

表 2 不同海域表层水体可培养细菌总数

Tab.2 Culturable bacterial populations in different sea areas

研究海域	调查时间	可培养细菌总数 /CFU·mL ⁻¹	数据来源
渤海湾天津海域	2003年7月	200 ~ 1900	[10]
长江口海域	2009年8月	873.5 ^a	[11]
北黄海海域	2010年6月、8月 和2011年7月	100 ~ 1.7×10 ⁶	[16]
东山湾海域	2011年8月	760 ~ 5470	[13]
南海北部海域	2014年8月	370 ~ 1420	[12]
辽河口海域	2018年6月	(6.93 ~ 87.8)×10 ³	[14]
大亚湾海域	2004年3月	(7.15 ~ 91.0)×10 ²	[15]
大亚湾海域	2008年4月、9月	(2.93 ~ 3.70)×10 ⁶	[3]
大亚湾海域	2020年8月	100 ~ 1700	本研究

注: a表示平均值

要的水产养殖区。近岸水体封闭性较强、自净

能力较差,丰富的陆源有机物和营养盐被微生物利用繁殖生长可能是造成近岸海域可培养细菌丰度高值的主要原因^[17]。研究表明,细菌总数高于可培养细菌总数 1~3 个数量级^[3, 12]。根据异养细菌总数评价等级表^[18],可将大亚湾海域划分为近岸中污染区、离岸轻污染区(轻污染: 2.00 < lg CBP < 3.00; 中污染: 3.00 < lg CBP < 4.00)。

2.3 CBP 与环境因子、Chl a 的相关性关系

为定性分析影响大亚湾海域表层水体 CBP 的主要环境因子,使用 SPSS 23.0 软件对 CBP 与相关环境因子(温度、盐度、pH、DO、COD、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P、SiO₃-Si)进行 Pearson 相关性分析(表 3)。由表可知,大亚湾表层海水可培养细菌总数与盐度、pH 呈现极显著的负相关关系($P < 0.01, n = 16$),与 DO 的负相关

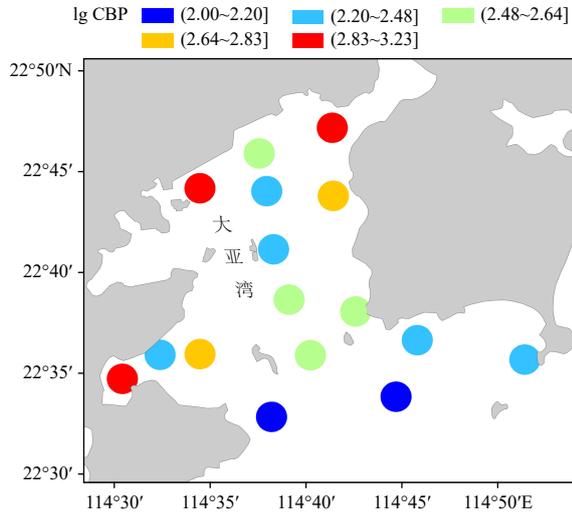


图4 研究海域表层海水 lg CBP 的平面分布

Fig. 4 The horizontal distribution of CBP and lg CBP in the surface water of the studied area

关系不明显,而与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$, $n=16$),与温度、COD 的正相关不明显,这与珠江口海域的研究结果较为一致^[19-20]。

盐度对细菌的影响主要体现在其对细菌的

渗透压调节上。一般来说,过高的盐度会导致大多数细菌细胞因为渗透压失衡而破裂。研究表明,伴随着近岸丰富的营养物质输入和远海高盐度水体的抑制作用,使得 CBP 随盐度增加而显著下降^[19, 21]。研究海域盐度与 CBP 的相关性表明, CBP 中低盐度细菌可能占具主导地位。表层海水 pH 通常稳定在 8.2 左右,调查海域表层海水 pH 变化不大,其与可培养细菌的相关性结果表明:一方面,细菌分解可能产生更多的酸性物质使得海水 pH 降低;另一方面,不同细菌类群有不同的最适宜 pH^[22-23],大亚湾海域近岸较低的 pH 更适宜细菌的生长繁殖。营养盐的输送、循环与更新是构成生命资源的物质与环境基础。在营养盐水平较高的情况下,细菌通过对有机物的分解可以再生氮、磷等营养物质,而营养盐的比例又在一定程度上对细菌丰度产生影响^[24]。研究海域 CBP 与营养盐的相关关系表明,大亚湾海域营养物质与细菌生长的互促进作用可能强于抑制作用。研究海域温度、DO、COD 与 CBP 的相关关系不明显。

表3 表层海水 CBP 与环境因子的 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson's correlation coefficient between CBP and other environment parameters in the surface water

环境因子	温度	盐度	pH	DO	COD	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$
相关系数	0.481	-0.881**	-0.644**	-0.32	0.311	0.850**	0.824**	0.803**	0.869**

注: “**”表示双尾检验在0.01水平下显著相关

杜萍等^[11]于长江口海域的研究结果表明,表层水可培养细菌与盐度、pH 呈显著负相关,与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈显著正相关。张霞等^[19]于珠江口的研究表明,异养细菌丰度与盐度呈负相关。李祥付等^[20]调查显示,珠江口异养细菌丰度与盐度呈负相关,与营养盐 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$) 浓度呈正相关。季风云等^[12]研究表明,南海北部海域细菌总数与营养盐浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与温度和盐度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。李清雪等^[25]、肖慧^[26]通过对渤海湾近岸海域丰水期可培养细菌的研究发现,其数量与 DO 有较显著的负相关性 ($P < 0.05$),与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、无机磷均为显著正相关 ($P < 0.05$),与 pH 呈极显著的负相关 ($P < 0.01$)。

何伟东等^[21]对北部湾北部海域夏季浮游细菌的研究表明,表层浮游细菌丰度与盐度、pH 呈现显著负相关 ($P < 0.05$),与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 呈现极显著正相关 ($P < 0.01$)。以上研究结果与本研究结果较为一致,表明可培养细菌丰度可能与陆源输入有关,近岸高营养环境导致有机质聚集进而促进细菌生长繁殖,后在与海水逐步混合过程中,细菌被稀释或抑制,丰度逐渐下降,因此呈现与盐度、pH 的负相关关系,与多种营养盐的显著正相关关系。

Chl a 浓度的高低反映着海洋中的浮游植物现存量的多少。海洋细菌与浮游植物的生长繁殖也有着密切的关系:细菌能吸收浮游植物产生的有机物质,促进自身生长繁殖,同时也为浮游

植物生长提供必要的营养物质;细菌还可以通过参与生物竞争、分泌特殊物质等途径抑制浮游植物的细胞生长,甚至裂解其细胞^[27]。由Pearson相关性分析可知,本研究CBP与Chl *a*的相关性系数为0.694,呈极显著正相关($P < 0.01$, $n=16$),表明夏季大亚湾海域浮游植物生物量增加有利于细菌生长。

不同季节大亚湾海域盐度、pH、营养盐、Chl *a* 等因子存在差异。调查表明,春季大亚湾海水pH略高于秋季,而秋季的氮、磷营养物质浓度高于春季^[28],夏、秋两季大亚湾海水盐度则明显低于春、冬两季,这与Chl *a* 的季节变化刚好相反^[29-30],参考相关性分析结果可推测夏、秋两季大亚湾海域海水CBP极大可能高于春、冬两季,这一猜想有待于进一步调查研究。

3 结论

大亚湾海域表层水体可培养细菌总数为100~1700 CFU/mL,平均为518 CFU/mL。其平面分布具有近岸湾内高于湾中的特点,并由湾内至湾外呈逐渐减小趋势。大亚湾近岸海域为中污染区,湾中至湾外为轻污染区。

大亚湾海域表层水体可培养细菌与盐度、pH呈现极显著的负相关关系($P < 0.01$, $n=16$),而与NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P、SiO₃-Si及Chl *a* 浓度呈极显著正相关关系($P < 0.01$, $n=16$),表明可培养细菌丰度很可能与陆源输入有关,近岸高营养环境导致浮游植物旺发、有机质聚集进而促进细菌生长繁殖后,再与海水逐步混合的过程中细菌被稀释或抑制,丰度逐渐下降。

致谢:感谢余威的作图指导。

参考文献:

- [1] ÇARDAK M, ÖZGÜR ÖZBEK E, KEBAPÇIOĞLU T. Seasonal abundance and diversity of culturable heterotrophic bacteria in relation to environmental factors in the Gulf of Antalya, Eastern Mediterranean, Turkey[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 31(4): 569-582.
- [2] RAMOS I. Culturable bacterial community of the estuarine surface microlayer[D]. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009: 26.
- [3] 李和阳,陈明霞,李刚,等.深圳海域细菌总数及可培养细菌总数的分布及其在环境评价中的应用研究[J].海洋环境科学,2011,30(4):487-491.
- [4] MENEZES L D, FERNANDES G L, MULLA A B, et al. Diversity of culturable Sulphur-oxidising bacteria in the oxygen minimum zones of the northern Indian Ocean[J]. Journal of Marine Systems, 2020, 209: 103085.
- [5] PINET P R. Invitation to oceanography[M]. 2nd ed. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, 2000: 18.
- [6] ROBINSON C, RAMAIAH N. Microbial heterotrophic metabolic rates constrain the microbial carbon pump[Z]//JIAO N Z, AZAM F, SANDERS S. Microbial Carbon Pump in the Ocean. The American Association for the Advancement of Science, USA, 2011: 52-53.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海洋监测规范第4部分:海水分析:GB 17378.4—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [8] 国家海洋局.海洋监测技术规程第1部分:海水:HY/T 147.1—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [9] 李禹辉,邱云,杨龙奇,等.大亚湾及其邻近海域夏季温度、盐度的分布特征[J].应用海洋学学报,2021,40(2):284-292.
- [10] 乔旭东.渤海湾天津海域的细菌学研究[D].青岛:中国海洋大学,2005:24.
- [11] 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.
- [12] 季风云,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.
- [13] 陈宇锋,陈小红,陈月忠,等.春、夏两季东山湾不同区域异养细菌的分布及其影响因子[J].福建水产,2014,36(2):110-118.
- [14] 黄慧玲,明红霞,李梦飞,等.基于指示细菌动态分布评价辽河口水质污染状况[J].海洋湖沼通报,2023,45(4):128-136.
- [15] 古小莉,李纯厚.大亚湾海洋异养细菌的初步研究[J].南方水产,2009,5(4):64-68.
- [16] 樊景凤,明红霞,王小慧,等.北黄海微表层细菌丰度与可培养细菌群落结构分析[J].海洋学报,2015,37(10):123-132.
- [17] 杨季芳,王海丽,陈福生,等.象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素[J].生态学报,2011,31(14):4007-4018.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海洋监测规范第7部分:近海污染生态调查和生物监测:GB 17378.7—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [19] 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.
- [20] 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.

- ments[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(1): 54-71.
- [17] BAILEY E, SAMMONDS P R, FELTHAM D L. The consolidation and bond strength of rafted sea ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 83/84: 37-48.
- [18] 陈晓东. 海冰与海水间热力作用过程及海冰单轴压缩强度特性的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [19] NI B Y, WANG Y T, XU Y, et al. Numerical simulation of ship collision with rafted ice based on cohesive element method[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2024, 23(1): 127-136.
- [20] HUANG J Y, DIAO F, DING S F, et al. A study on the ice resistance characteristics of ships in rafted ice based on the circumferential crack method[J]. *Water*, 2024, 16(6): 854.
- [21] 张行初, 冯国庆, 朱文博, 等. 基于 LS-DYNA 的冰材料模型二次开发及重叠冰应用 [J]. *江苏科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 37(1): 9-14.
- [22] 李伟, 尹汉军, 付殿福, 等. 中国海洋平台结构抗冰设计关键问题及研究建议 [J]. *中国海上油气*, 2024, 36(4): 199-211.
- [23] 陈晓东, 王安良, 季顺迎. 海冰在单轴压缩下的韧-脆转化机理及破坏模式 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(12): 20-31.

(本文编辑: 胡莹莹)



(上接第 523 页)

- [21] 何伟东, 孙鹏飞, 张秋丰. 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 [J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(2): 433-444.
- [22] YANNARELL A C, TRIPLETT E W. Geographic and environmental sources of variation in lake bacterial community composition[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(1): 227-239.
- [23] 刘乐冕, 杨军, 余小青, 等. 厦门后溪流域沿城乡梯度浮游细菌多样性及其与环境因子的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(4): 591-598.
- [24] SEYMOUR J R, AMIN S A, RAINA J B, et al. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2(7): 17065.
- [25] 李清雪, 赵海萍, 陶建华. 渤海湾海域浮游细菌的生态研究 [J]. *海洋技术*, 2005, 24(4): 50-53,56.
- [26] 肖慧. 渤海湾近岸海域的细菌学研究及其在海岸带环境质量评价中的应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 117-118.
- [27] SCHREIER J E. Dynamics of bacteria and phytoplankton in the surface ocean[J]. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2019, 1: 546-552.
- [28] 马玉, 王翔, 许欣, 等. 大亚湾水体营养盐分布特征及其生态环境效应 [J]. *中国环境监测*, 2023, 39(6): 110-122.
- [29] SONG X Y, LI Y, HUANG Y D, et al. Nitrogen and phosphorus enrichments alter the dynamics of the plankton community in Daya Bay, northern South China Sea: results of mesocosm studies[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2021, 72(11): 1632-1642.
- [30] 奚琛, 林宗轩, 萨如拉, 等. 基于双浮标连续监测资料分析大亚湾西南部海域水体环境变化特征及其影响因素 [J]. *热带海洋学报*, 2024, 43(4): 153-164.

(本文编辑: 曲丽梅)