

长江口低氧区异养细菌及氮磷细菌分布*

杜萍 刘晶晶 曾江宁 陈全震** 江志兵 朱旭宇

(国家海洋局第二海洋研究所国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012)

摘要 2009年8月15—28日,对长江口低氧高发海域的异养细菌、无机磷细菌、有机磷细菌、反硝化细菌和氨化细菌的空间分布特征进行初步研究.结果表明:氨化细菌数量最高,表层水、底层水和表层沉积物的数量均值分别为 307.52×10^4 个 $\cdot L^{-1}$ 、 184.50×10^4 个 $\cdot L^{-1}$ 和 199.97×10^2 个 $\cdot g^{-1}$;其次为异养细菌,数量均值分别为 87.35×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 、 86.85×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 和 64.26×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$;再次为有机磷细菌,数量均值分别为 19.26×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 、 18.82×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 和 19.56×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$;无机磷细菌只分布在长江口内和河口南槽至舟山海域,数量均值分别为 18.50×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 、 31.00×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$ 和 7.17×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$;反硝化细菌分布广,但数量较低,均值分别为 3.94×10^4 个 $\cdot L^{-1}$ 、 23.08×10^4 个 $\cdot L^{-1}$ 和 6.22×10^2 个 $\cdot g^{-1}$.相关性分析结果说明:盐度、硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐和 pH 是影响水体和表层沉积物异养细菌、磷细菌和反硝化细菌分布的主要因子;底层水和表层沉积物异养细菌、磷细菌与水温呈显著正相关;底层水异养细菌和有机磷细菌与溶解氧(DO)呈显著正相关;表层沉积物无机磷细菌与 DO 呈显著正相关,氨化细菌与 DO 呈显著负相关.聚类分析结果说明:低氧对表层沉积物的细菌群落结构产生影响.

关键词 长江口 低氧区 异养细菌 氮细菌 磷细菌

文章编号 1001-9332(2011)05-1316-9 **中图分类号** Q938 **文献标识码** A

Spatial distribution patterns of heterotrophic, nitrogen, and phosphate bacteria in hypoxic zone of Yangtze River Estuary. DU Ping, LIU Jing-jing, ZENG Jiang-ning, CHEN Quan-zhen, JIANG Zhi-bing, ZHU Xu-yu (Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(5): 1316-1324.

Abstract: In August 15-28, 2009, a preliminary study was conducted on the spatial distribution characteristics of heterotrophic bacteria (HB), inorganic phosphate bacteria (IPB), organic phosphate bacteria (OPB), denitrifying bacteria (DB), and ammonifying bacteria (AB) in the hypoxic zone of Yangtze River Estuary. In the water surface, water bottom, and sediment surface of the zone, the average quantity of AB was the largest, being 307.52×10^4 cells $\cdot L^{-1}$, 184.50×10^4 cells $\cdot L^{-1}$, 199.97×10^2 cells $\cdot g^{-1}$, followed by that of HB (87.35×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, 86.85×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, and 19.56×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$), and of OPB (19.26×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, 18.82×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, and 19.56×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$, respectively). IPB was only observed within the Yangtze Estuary, south passage of the Estuary, and Zhoushan inshore, and its average quantity in the water surface, water bottom, and sediment surface was 18.50×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, 31.00×10^4 cfu $\cdot L^{-1}$, and 7.17×10^2 cfu $\cdot g^{-1}$ respectively. DB had a wide distribution, but its average quantity was low, being 3.94×10^4 cells $\cdot L^{-1}$, 23.08×10^4 cells $\cdot L^{-1}$, and 6.22×10^2 cells $\cdot g^{-1}$ in the water surface, water bottom, and sediment surface, respectively. Salinity, NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P, SiO_3^{2-} -Si, and pH were the main factors affecting the distribution of HB, IPB, OPB, and DB in water body and sediment surface. The HB, IPB, and OPB in water bottom and sediment surface had significant positive correlation with water temperature; the HB and OPB in water bottom and the IPB in sediment surface were significantly positively correlated with dissolved oxygen (DO); while the AB in sediment surface

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428903)、国家“908”专项(908-01-BC06, 908-01-ST04)、浙江省自然科学基金项目(Y5100401)、国家海洋局青年海洋科学基金项目(2010125, 2011106)和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JG200819)资助.

** 通讯作者. E-mail: chenqz6509@126.com

2010-10-01 收稿, 2011-02-10 接受.

was significantly negatively correlated with DO. Cluster analysis showed that hypoxia affected the bacterial community structure in sediment surface.

Key words: Yangtze River Estuary; hypoxia zone; heterotrophic bacteria; nitrogen bacteria; phosphate bacteria.

全球许多大陆架、海岸及河口都有季节性水体缺氧现象,由于排污加剧和气候变化等原因,缺氧出现的频率、范围、持续时间和强度呈明显上升的趋势^[1-2],缺氧常伴随着氨、硫化氢和颗粒有机物的增加,并影响浮游、游泳和底栖生物的分布和生存^[3-6],最终影响整个海洋生态系统. 缺氧现象已引起多国科学家的重视^[7-10]. 1999 年 8 月我国长江口外(123°E 附近)发现面积达 13700 km²、平均厚度达 20 m 的底层低溶氧区(DO<2 mg·L⁻¹)^[2]. 此低氧区的产生与水体层化^[11]、底层化学氧化或微生物降解^[12]及富营养化有关^[13].

微生物因无处不在、代谢能力多样和酶活力高而在生物地球化学循环中扮演着重要角色^[14],有研究报道,低氧区的微生物数量丰富、种类和代谢多样^[15]. 海洋细菌与营养物质相互作用^[16],研究各功能类群的细菌对了解物质循环及环境变化具有重要作用^[17-19]. 近年来,通过氮、磷细菌和异养细菌分布对湖泊富营养化程度、物质循环水平和水体自净能力的研究较多^[20-22],海洋中也有少量报道^[23-24]. 李佳霖等^[24]研究长江口海域夏季沉积物反硝化细菌数量及反硝化作用时发现,反硝化细菌数量与反硝化速率相关性达到 0.95,反硝化作用产生的氮通量约为初级生产消耗无机氮量的 1/3. 长江口低氧区的存在和加重与长江冲淡水大量输入碳、氮、磷等营养物质密切相关,本文在低氧高发的 8 月对该区的异养细菌、无机磷、有机磷细菌及反硝化、氨化细菌的生态分布进行初步研究,以期为研究长江口海域细菌分布与物质循环的关系及解释低氧相关微生物的作用提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集于 2009 年 8 月 15—28 日,设置 17 个站位(图 1),按照《海洋生物生态调查技术规程》^[25]采集表层水、底层水和表层沉积物,立即回到试验室内进行细菌培养分析.

1.2 分析方法

异养细菌(heterotrophic bacteria, HB):采用 ZoBell 2216E 平板涂布培养法,25℃ 恒温条件下培

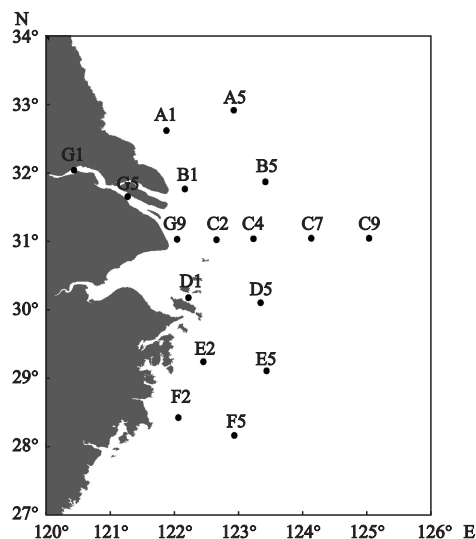


图 1 微生物调查站位图

Fig. 1 Sampling stations of microbe.

养 3 d,选取平均菌落数在 30~300 的平板计数菌落数(colony forming units, CFU)^[25],每个样品 3 个平行板.

磷细菌:有机磷细菌(organic phosphate bacteria, OPB)采用蒙金娜卵磷脂培养基,无机磷细菌(inorganic phosphate bacteria, IPB)采用蒙金娜磷酸钙培养基. 利用平板涂布法,25℃ 恒温条件下培养 4 d,计数菌落数^[26],每个样品 3 个平行板.

氮细菌:反硝化细菌(denitrifying bacteria, DB)和氨化细菌(ammonifying bacteria, AB)培养分别采用酒石酸钾钠硝酸盐培养基和氨化细菌培养基,5 梯度(1、10⁻¹、10⁻²、10⁻³、10⁻⁴)3 平行的 MPN 法,25℃ 培养 15 d,分别用蔡氏试剂(DB)和锌-碘-淀粉(AB)检测,查 MPN 表计算细菌数^[26].

盐度、水温、水深使用温盐深仪(conductivity-temperature-depth, CTD)直接测出. 化学因子,如溶解氧(dissolved oxygen, DO)、营养盐、pH 等按《海洋监测规范》海水分析部分^[27]测定.

1.3 数据处理

采用 Surfer 8 绘制站位和细菌水平分布图;采用 Statistica 6.0 软件进行各站位细菌的数量均值计算、方差分析及细菌数量与环境因子的相关性分析;采用 Primer 5 软件进行细菌群落的 Bray-Curtis 相似性聚类分析.

2 结果与分析

2.1 水体中溶解氧的分布

本次调查的表层水温为 24.2℃~31.0℃, 底层水温为 18.7℃~28.3℃. 调查海区内, 表层水的溶解氧为 3.9~9.5 mg·L⁻¹, 最高值出现在浙江近岸的 E2 站, 最低值出现在杭州湾舟山海域的 D1 和 D5 站; 底层水的溶解氧范围为 1.9~6.7 mg·L⁻¹, 最高值出现在 A1 站, 最低值出现在浙江沿海的 E2、F2 站(<2.0 mg·L⁻¹), 已形成底层氧亏损^[2], 溶解氧的水平分布如图 2.

2.2 水体中细菌的生态分布特征

2.2.1 异养细菌及氮、磷细菌的数量分布 调查海区水体中异养细菌的检出率为 100%, 表层水的数量均值为 87.35×10⁴ cfu·L⁻¹, 底层水的数量均值为 86.85×10⁴ cfu·L⁻¹. 异养细菌数量的水平分布如图 3A, 长江口内 G1、G5 站(盐度为 0.2)的数量明显高于其他站, 其表层异养细菌的数量分别为 588×10⁴ cfu·L⁻¹和 325×10⁴ cfu·L⁻¹, 底层分别为 566×10⁴ cfu·L⁻¹和 265×10⁴ cfu·L⁻¹.

水体中无机磷细菌的检出率较低, 表层仅在 C9、D1、D5、E5、G1、G5、G9 站检测到, 被检测到的 7 个站的数量均值为 18.50×10⁴ cfu·L⁻¹, 底层仅在 D1、D5、G1、G5、G9 站检测到, 被检测到的 5 个站的数量均值为 31.00×10⁴ cfu·L⁻¹. 由图 3B 可见, 无机磷细菌主要分布在长江口内和河口南槽至舟山海域.

有机磷细菌在调查海区水体除 C9 站外均被检测到, 表层水的数量均值为 19.26×10⁴ cfu·L⁻¹,

底层水的数量均值为 18.82×10⁴ cfu·L⁻¹. 由图 3C 可见, 有机磷细菌数量有沿长江河口向外逐渐减少的趋势.

水体中反硝化细菌的检出率较高, 仅表层 A5 站、底层 A5 和 D5 站未检测到, 但数量较少, 表层水均值为 3.94×10⁴ 个·L⁻¹, 底层水均值为 23.08×10⁴ 个·L⁻¹, 底层水在 G5 站出现 350×10⁴ 个·L⁻¹ 的高值, 其他站位的数量均值仅为 2.65×10⁴ 个·L⁻¹. 由图 4A 可见, 长江口内的反硝化细菌数量明显高于外侧海区.

氨化细菌在调查海区的水体中普遍存在, 表层水的数量均值为 307.52×10⁴ 个·L⁻¹, 底层水的数量均值为 184.50×10⁴ 个·L⁻¹. 由图 4B 可见, 氨化细菌呈斑块状分布, 表层水在长江口内的 G1 站和长江口北侧出海口的 B1 站出现 2500×10⁴ 个·L⁻¹ 的高值, 底层水在舟山海域的 D1 站出现 2500×10⁴ 个·L⁻¹ 的高值.

2.2.2 各类群细菌与环境因子的相关性 对表、底层水体的各类群细菌与环境因子分别做相关性分析(表 1). 由表 1 可见, 表、底层水异养细菌、无机磷细菌、有机磷细菌和反硝化细菌均与盐度呈显著负相关, 与 SiO₃²⁻-Si、NO₃⁻-N 呈显著正相关; 异养细菌、无机磷细菌与 PO₄³⁻-P 呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关. 表层水反硝化细菌也与 PO₄³⁻-P 呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关; 底层水异养细菌、无机磷细菌、有机磷细菌与温度呈显著正相关, 异养细菌、有机磷细菌与 DO 呈显著正相关.

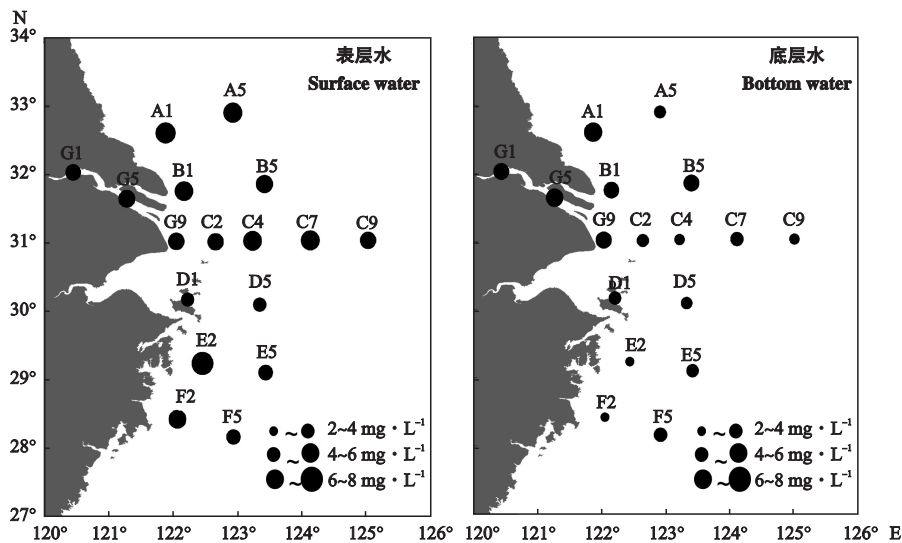


图 2 水体中溶解氧的水平分布
Fig. 2 Horizontal distribution of DO in water.

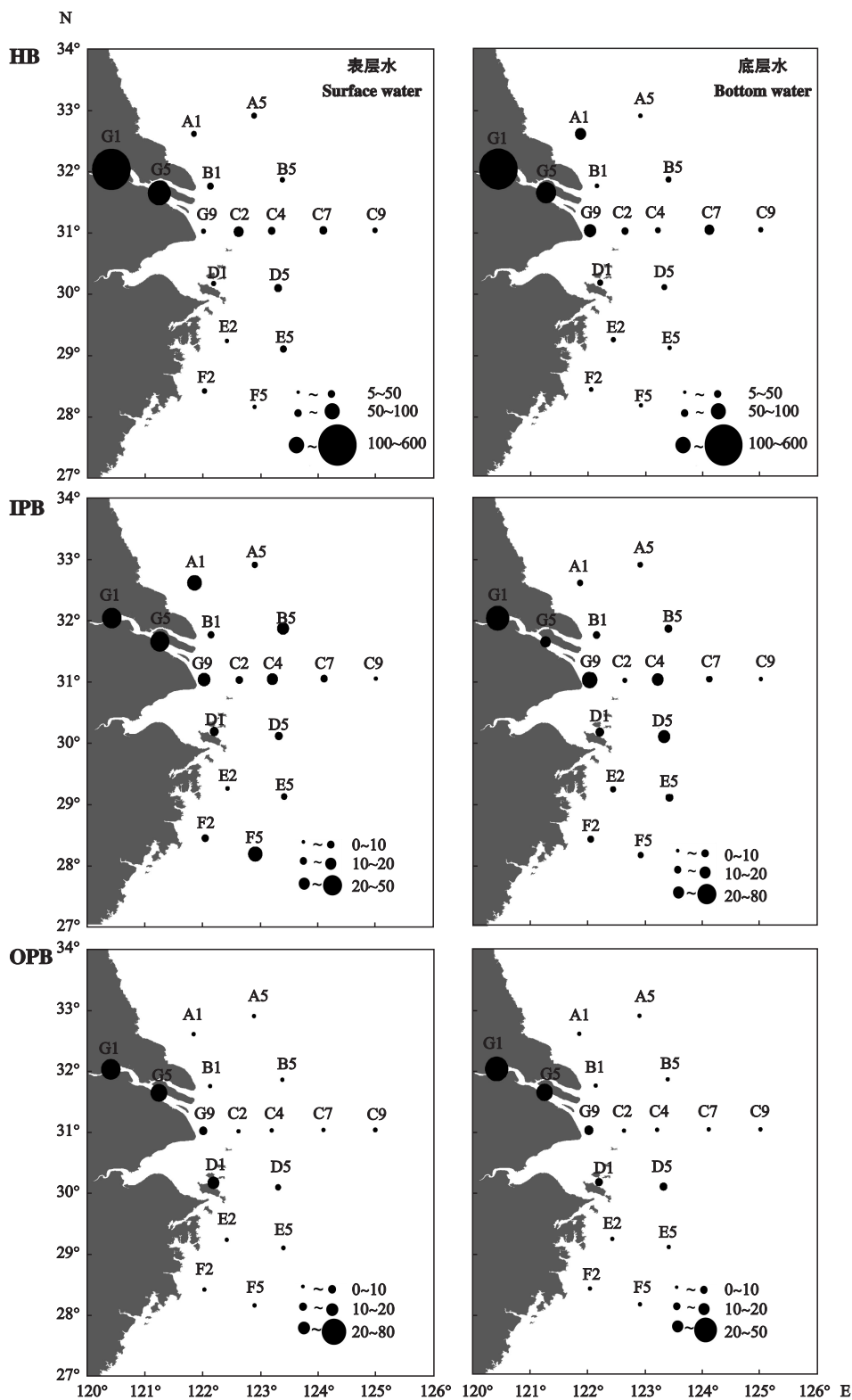


图3 水体异养细菌(HB)、无机磷细菌(IPB)和有机磷细菌(OPB)数量水平分布

Fig. 3 Horizontal distribution of heterotrophic bacteria (HB), inorganic phosphate bacteria (IPB), organic phosphate bacteria (OPB) in water ($\times 10^4$ cfu \cdot L $^{-1}$).

2.3 表层沉积物中细菌的分布特征

2.3.1 异养细菌及氮、磷细菌的数量分布 调查海区表层沉积物中异养细菌、有机磷细菌和氨化细菌

的检出率都为 100%, 数量均值依次为 64.26×10^2 cfu \cdot g $^{-1}$ 、 19.56×10^2 cfu \cdot g $^{-1}$ 、 199.97×10^2 个 \cdot g $^{-1}$. 无机磷细菌在 A1、A5、B5、C4、C7、C9、D5、E2 8 个站

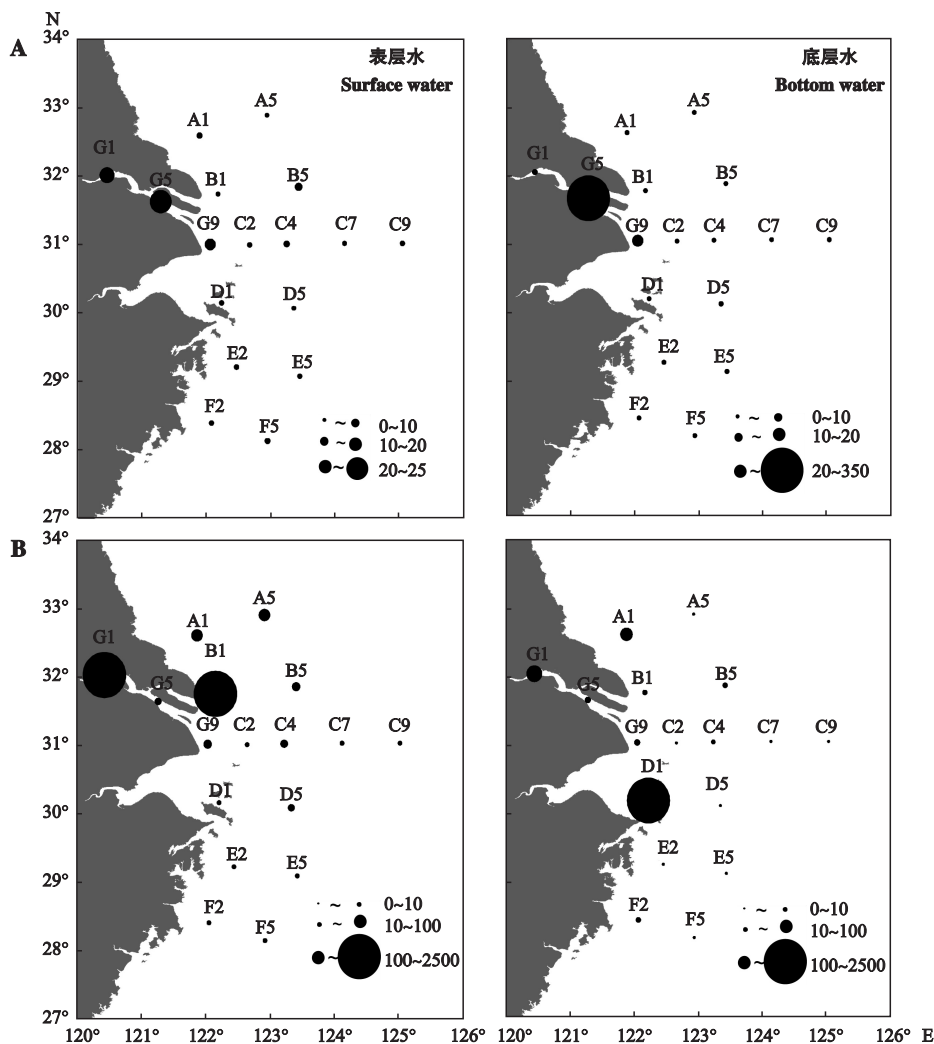


图4 水体反硝化细菌(A)和氨化细菌(B)数量水平分布
Fig.4 Horizontal distribution of denitrifying bacteria (A) and ammonifying bacteria (B) in water ($\times 10^4$ cells \cdot L $^{-1}$).

未检出,被检出站位的细菌数量均值为 7.17×10^2 cfu \cdot g $^{-1}$,反硝化细菌在 A5、B5、D5 3 个站未检出,被检出站位的细菌数量均值为 6.22×10^2 个 \cdot g $^{-1}$. 各类群细菌数量的水平分布如图 5. 由图 5 可见,异养细菌、无机磷细菌和反硝化细菌数量都呈现长江口内高于口外的特征;有机磷细菌数量除河口内高

表1 水体中各类群细菌与环境因子的相关性
Table 1 Correlation between various groups of bacteria and environmental factors in water

细菌类群 Bacteria group	水层 Water layer	温度 Temperature	盐度 Salinity	溶解氧 DO	SiO ₃ ²⁻ -Si	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P	pH
HB	s	0.10	-0.83 *	-0.16	0.75 *	0.69 *	-0.20	-0.26	0.75 *	-0.71 *
	b	0.61 *	-0.88 *	0.50 *	0.86 *	0.84 *	-0.26	-0.34	0.57 *	-0.61 *
IPB	s	0.09	-0.85 *	-0.35	0.80 *	0.71 *	-0.26	-0.27	0.86 *	-0.80 *
	b	0.55 *	-0.92 *	0.43	0.92 *	0.87 *	-0.37	-0.25	0.72 *	-0.60 *
OPB	s	0.10	-0.68 *	-0.29	0.59 *	0.51 *	-0.06	0.06	0.43	-0.48
	b	0.53 *	-0.77 *	0.72 *	0.73 *	0.75 *	-0.19	-0.24	0.45	-0.38
DB	s	0.10	-0.87 *	-0.10	0.80 *	0.74 *	-0.19	-0.21	0.84 *	-0.80 *
	b	0.38	-0.65 *	0.39	0.65 *	0.66 *	-0.25	-0.16	0.39	-0.46
AB	s	-0.11	-0.37	0.02	0.40	0.37	-0.06	-0.40	0.25	-0.42
	b	0.30	-0.08	0.00	0.03	0.04	-0.09	-0.19	0.27	-0.04

HB; 异养细菌 Heterotrophic bacteria; IPB; 无机磷细菌 Inorganic phosphate bacteria; OPB; 有机磷细菌 Organic phosphate bacteria; DB; 反硝化细菌 Denitrifying bacteria; AB; 氨化细菌 Ammonifying bacteria. s; 表层水 Surface water;b; 底层水 Bottom water. * P<0.05. 下同 The same below.

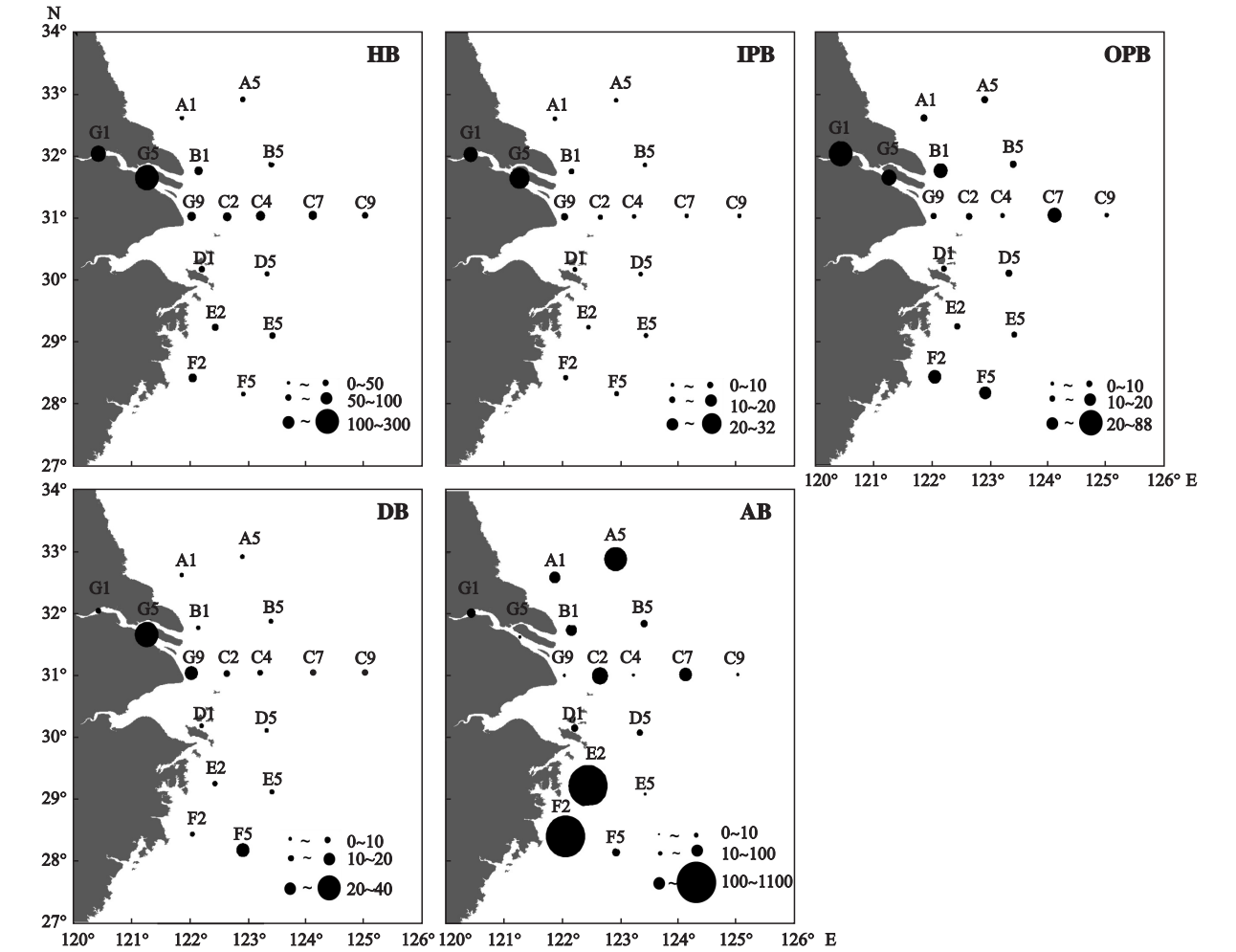


图5 表层沉积物中各类群细菌数量水平分布

Fig.5 Horizontal distribution of various groups of bacteria in surface of sediment.

HB: 异养细菌 Heterotrophic bacteria ($\times 10^2$ cfu \cdot g $^{-1}$); IPB: 无机磷细菌 Inorganic phosphate bacteria ($\times 10^2$ cfu \cdot g $^{-1}$); OPB: 有机磷细菌 Organic phosphate bacteria ($\times 10^2$ cfu \cdot g $^{-1}$); DB: 反硝化细菌 Denitrifying bacteria (cells \cdot g $^{-1}$); AB: 氨化细菌 Ammonifying bacteria (cells \cdot g $^{-1}$).

外,在浙南沿海的F2和F5站也较高;氨化细菌数量则呈现浙江近岸(E2、F2)最高,其次为长江冲淡水区及北侧海域(31°—33°N,122°—124°E).

2.3.2 各类群细菌与环境因子的相关性 表层沉积物中细菌的分布可能受底层水中化学成分的影响,对表层沉积物中的各类群细菌与底层水体的环境因子做相关性分析,结果如表2.综合表1和表2可

见,表层沉积物与水体相同的相关性是:异养细菌、无机磷细菌、有机磷细菌和反硝化细菌与盐度呈显著负相关,与SiO $_3^{2-}$ -Si、NO $_3^-$ -N呈显著正相关,异养细菌和无机磷细菌与PO $_4^{3-}$ -P呈显著正相关,与pH呈显著负相关;仅与底层水体相同的相关性是:异养细菌、无机磷细菌、有机磷细菌与温度呈显著正相关.与水体不同的相关性是:无机磷细菌与DO呈显著

表2 表层沉积物中各类群细菌与底层水中环境因子的相关性

Table 2 Correlation between various groups of bacteria in surface of sediment and environmental factors in bottom water

细菌类群 Bacteria group	温度 Temperature	盐度 Salinity	溶解氧 DO	SiO $_3^{2-}$ -Si	NO $_3^-$ -N	NO $_2^-$ -N	NH $_4^+$ -N	PO $_4^{3-}$ -P	pH
HB	0.56 *	-0.85 *	0.36	0.87 *	0.85 *	-0.26	-0.33	0.52 *	-0.71 *
IPB	0.58 *	-0.93 *	0.49 *	0.93 *	0.92 *	-0.31	-0.30	0.61 *	-0.66 *
OPB	0.49 *	-0.66 *	0.35	0.63 *	0.62 *	-0.04	-0.30	0.42	-0.54 *
DB	0.30	-0.64 *	0.42	0.64 *	0.63 *	-0.35	-0.18	0.39	-0.32
AB	-0.10	0.26	-0.60 *	-0.22	-0.26	0.04	0.04	-0.03	-0.24

* P<0.05.

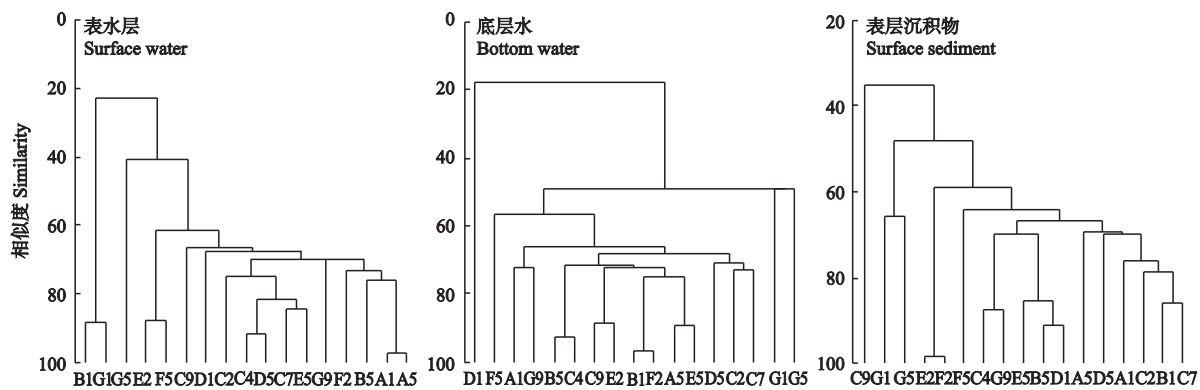


图6 根据细菌群落对站位的聚类分析
Fig. 6 Cluster analysis of the stations according to the bacterial community.

正相关,氨化细菌与 DO 呈显著负相关,有机磷细菌与 pH 呈显著负相关。

2.4 细菌群落的聚类分析

分别根据表、底层水体和表层沉积物中的细菌群落对站位进行聚类分析,结果如图 6。以相似度 60% 为界,表层水调查站位可分为 3 类: B1 和 G1 站聚为一类, G5 站单独一类, 其余站位为一类; 底层水调查站位可分为 5 类: D1、F5、G1、G5 站分别为一类, 其余站位为一类; 表层沉积物调查站位可分为 4 类: G1 和 G5 站聚为一类, E2 和 F2 站聚为一类, C9 站单独一类, 其余站位为一类。可见, 122°—124° E, 28°—33° N 海域水体和表层沉积物中的微生物生境都较相近。此外, 底层氧亏损的 E2 和 F2 站细菌群落只在沉积物中表现出与其他站位的聚类不同。

3 讨 论

3.1 细菌分布与溶解氧的关系

从各类群细菌与 DO 的相关性看, 由于表层水中的 DO 浓度较高, 各类群细菌的生长都未受到 DO 的限制, 而底层水中的 DO 浓度下降, 影响了底层水和表层沉积物中某些细菌的分布。底层水中异养细菌和有机磷细菌数量随 DO 浓度的升高而增加, 表层沉积物中异养细菌数量随 DO 升高而增加, 氨化细菌数量随 DO 升高而减少。此分布规律可能与各类细菌的代谢类型有关, 李捍东等^[28]用异养细菌和氮循环菌研究底质-水界面耗氧特性时发现, 异养细菌是主要的耗氧细菌, 当 DO 浓度低于 1 mg · L⁻¹ 时, 基本为兼氧或厌氧微生物作用, 由此可推断, 本研究中的异养细菌和磷细菌以好氧代谢为主, 在 DO 较高的环境中数量和活性较高, 而氨化细菌为兼氧或厌氧代谢, 在低氧环境中占优势, 出现底层氧亏损的 E2、F2 站沉积物中的氨化细菌数量远高于

其他站位也验证了这一点。很多关于最低含氧区 (oxygen minimum zone, OMZ) 的研究显示, OMZ 的反硝化和厌氧氨氧化作用强^[29-31], 与本研究中的 N 循环活跃的结果一致。

从聚类分析结果看, 底层氧亏损的 E2 和 F2 站细菌群落在沉积物中表现出与其他站位聚类不同, 说明水体中的细菌群落结构未因 DO 影响而出现明显变化, 但表层沉积物中的细菌群落已发生变化。

3.2 细菌分布与盐度、营养盐和 pH 的关系

长江口外的营养盐由长江冲淡水带来^[32], 本调查海区水体的营养盐浓度随盐度升高而降低, pH 随盐度升高而升高, 即盐度、营养盐和 pH 同步变化。水体层化和高浓度的营养盐是低氧区的理化成因, 本研究结果显示, 盐度、NO₃⁻-N、SiO₃²⁻-Si、PO₄³⁻-P 营养盐和 pH 是长江口低氧高发区水体和表层沉积物中异养细菌、磷细菌和反硝化细菌分布的主要影响因子。细菌数量与盐度、pH 呈负相关, 与 NO₃⁻-N、SiO₃²⁻-Si、PO₄³⁻-P 营养盐呈正相关。

异养细菌分解有机物, 使营养盐再生, 同时也可以吸收利用营养盐^[33], 在水体和沉积物中, 异养细菌常与 N、P 营养盐呈正相关^[34-37]。李云和李道季^[38]研究长江口邻近海域细菌时发现, 表层硝酸盐浓度高于 1 μmol · L⁻¹ 的海域, 陆源输入的硝酸盐对异养细菌的生长和分布具有重要影响, 也验证了本文的结果。pH 能引起微生物细胞膜电荷的变化而影响微生物对营养物质的吸收和酶活性^[39], 本研究海域异养细菌数量与 pH 呈负相关, 已有的试验和调查也得到相同结果^[20, 40]。在河口区, 异养细菌分布还受到盐度的影响^[40], 长江口亦有此特点。

无机磷细菌和有机磷细菌可分别将难溶的无机磷和有机磷转化为可溶性磷酸盐, 促进磷的再生。由于不同水域中磷元素的存在形式和浓度不同, 磷细

菌的分布及与磷浓度的相关性水平也不同^[20,22],而本研究海域的无机磷细菌数量与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度呈显著正相关。此外,磷细菌的生长也受到其他营养盐的影响,本研究中,两类磷细菌与 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 也呈显著正相关,Wu 等^[41]在研究细菌对氮磷释放的影响时也得到类似的结论。

反硝化细菌能将硝酸盐转化为 N_2O 和 N_2 ,促进氮素释放,故反硝化细菌常与 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 呈显著正相关^[20,41],本研究海域的反硝化细菌数量符合此规律。氨化细菌可将有机氮转化为铵和氨,促进氨以气态形式挥发,通常在有机物较多的底质中生长较好^[21,42],而本文无机化学因子对氨化细菌的影响不显著。

3.3 细菌分布与温度的关系

本研究中底层水和表层沉积物中的细菌分布受温度影响,相关性分析显示异养细菌和磷细菌与温度呈显著正相关。长江口氧亏损的研究中发现,低氧区的形成明显受等温线的影响,夏季水温的垂直分层是导致低氧区形成的主要物理因素之一,且水温的增加可加快生物的代谢作用^[2],由此可理解,本研究海区的底层水温影响到底层水和表层沉积物中某些细菌的数量。李云和李道季^[38]也发现,温度是长江口及邻近海域夏季水体中异养细菌数量的重要调节因素。氮细菌的数量与温度的相关性不显著,说明本海区氮细菌的活动受温度的限制较小。

3.4 影响细菌分布的其他因素

关于 OMZ 的研究报道,低氧区附近的水体和沉积物中有机物含量较高、有机物降解活动强^[43-44],而本研究海域水体和沉积物中的细菌类群分布特征(以有机物为底物的氨化细菌、异养细菌和有机磷细菌较以无机物为底物的反硝化细菌和无机磷细菌数量高)与以上报道相符,因此有机物的含量可能也是该低氧海区各类细菌的重要影响因素,可在今后的研究中深入讨论。

致 谢 感谢国家海洋局第二海洋研究所陈建芳老师为本文润色英文摘要,高生泉、李宏亮、王奎等老师提供化学数据,高爱根和宣明亮老师提供采样和实验室分析的帮助,感谢北斗号调查船各位船员。

参考文献

[1] Feng X-W (冯旭文), Yu X-G (于晓果), Chen J-F (陈建芳), *et al.* A review on the study progress of sediment records for the seasonal hypoxia in estuaries. *Journal of Marine Sciences* (海洋学研究), 2006, **24** (1): 50-61 (in Chinese)

[2] Li D-J (李道季), Zhang J (张 经), Huang D-J (黄大吉), *et al.* Loss of oxygen in the Yangtze River estuary. *Science in China Series D* (中国科学 D), 2002, **32**(8): 686-694 (in Chinese)

[3] Wu RSS. Hypoxia: From molecular responses to ecosystem responses. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **45**: 35-45

[4] Chen C-H (陈春辉), Wang C-S (王春生), Xu X-W (许学伟), *et al.* Advances in studies on biological effect of estuary hypoxia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(5): 2595-2602 (in Chinese)

[5] Weissberger EJ, Coiro LL, Davey EW. Effects of hypoxia on animal burrow construction and consequent effects on sediment redox profiles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **371**: 60-67

[6] Hua E, Zhang ZN, Zhang Y. Meiofauna distributions at the oxygen minimum zone in Changjiang (Yangtze) River Estuary waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, **25**: 120-134

[7] Thomas P, Rahman MS. Biomarkers of hypoxia exposure and reproductive function in Atlantic croaker: A review with some preliminary findings from the northern Gulf of Mexico hypoxic zone. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **381**: 38-50

[8] Nezhlin NP, Kamer K, Hyde J, *et al.* Dissolved oxygen dynamics in a eutrophic estuary, Upper Newport Bay, California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **82**: 139-151

[9] O'Boyle S, McDermott G, Wilkes R. Dissolved oxygen levels in estuarine and coastal waters around Ireland. *Marine Pollution Bulletin*, **58**:1657-1663

[10] Brownlee EF, Sellner SG, Sellner KG. *Prorocentrum minimum* blooms: Potential impacts on dissolved oxygen and Chesapeake Bay oyster settlement and growth. *Harmful Algae*, 2005, **4**: 593-602

[11] Beardsley RC, Limeburner R, Yu H, *et al.* Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 1985, **4**: 57-76

[12] Tian RC, Hu FX, Martin JM. Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1993, **37**: 27-41

[13] Zou J-J (邹建军), Yang G (杨 刚), Liu J-H (刘季花), *et al.* Distribution characteristics of dissolved oxygen in the sea area adjacent to the Changjiang River Estuary in September. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), 2008, **25**(1): 65-73 (in Chinese)

[14] Chi Z-M (池振明). *Modern Microbial Ecology*. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)

[15] Ulloa O, Pantoja S. The oxygen minimum zone of the eastern South Pacific. *Deep-Sea Research II*, 2009, **56**: 987-991

[16] Zhao C-X (赵春霞). Interaction between heterotrophic bacteria and organic carbon and nutrients. Qingdao: Ocean University of China, 2006 (in Chinese)

[17] Chen Z-Y (陈中云), Min H (闵 航), Wu W-X (吴伟祥), *et al.* Effects of pesticide-contamination on population size and denitrification activity of denitrifying bacteria in paddy soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(10): 1765-1769 (in Chinese)

[18] Huang F-L (黄凤莲), Xia B-C (夏北成), Dai X (戴欣), *et al.* Bacteria ecology in planting-culturing sys-

- tem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1030–1034 (in Chinese)
- [19] Feng Z-F (冯振飞), Wang G-L (王国良), Qian D (钱冬), *et al.* Microbial flora and quantitative distribution of bacteria in culture ponds of mud crab *Scylla serrata*. *Fisheries Science* (水产科学), 2008, **27**(11): 574–577 (in Chinese)
- [20] Gao K-Q (高坤乾). Ecology of Bacterial Physiological Groups of Dajingshan Reservoir, Zhuhai. Guangzhou: University of Jinan, 2006 (in Chinese)
- [21] Liu D-S (刘东山), Luo Q-F (罗启芳). Distribution and role of denitrifying, nitrifying, nitrosation and ammonifying bacteria in East Lake. *Environmental Science* (环境科学), 2002, **23**(3): 29–35 (in Chinese)
- [22] Feng S (冯胜), Qin B-Q (秦伯强), Gao G (高光). The relationships between phosphorus-transmuting bacteria and phosphorus forms in Lake Taihu. *Journal of Lake Science* (湖泊科学), 2008, **20**(4): 428–43 (in Chinese)
- [23] Chen L-G (陈立广), Fan J-F (樊景凤), Guan D-M (关道明), *et al.* Analysis of temporal and spatial distribution of nitro bacteria in sediment of Liaohu Estuary. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2010, **29**(2): 174–178 (in Chinese)
- [24] Li J-L (李佳霖), Bai J (白洁), Gao H-W (高会旺), *et al.* Quantification of denitrifying bacteria and denitrification process in surface sediment at adjacent sea area of the Yangtze River Estuary in summer. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2009, **29**(7): 756–761 (in Chinese)
- [25] Liang Y-B (梁玉波). Technical Specification for Marine Ecological Investigation. Beijing: Ocean Press, 2006 (in Chinese)
- [26] Chen S-M (陈绍铭), Zheng F-S (郑福寿). Aquatic Microbiology Experiment. Beijing: Ocean Press, 1985 (in Chinese)
- [27] State Bureau of Quality and Technical Supervision (国家质量技术监督局). Marine Monitoring: Water Analysis (GB 17378.4–2007). Beijing: China Standards Press, 2007 (in Chinese)
- [28] Li H-D (李捍东), Meng W (孟伟), Zheng B-H (郑丙辉), *et al.* Oxygen Consumption Characteristics of the Sediment-Water Interface in Dagu River Estuary of Bohai Bay. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2004, **17**(5): 19–22 (in Chinese)
- [29] Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 2009, **80**: 113–128
- [30] Gala'n A, Molina V, Thamdrup B, *et al.* Anammox bacteria and the anaerobic oxidation of ammonium in the oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep-Sea Research II*, 2009, **56**: 1021–1031
- [31] Morrison JM, Codispoti LA, Smith SL, *et al.* The oxygen minimum zone in the Arabian Sea during 1995. *Deep-Sea Research II*, 1999, **46**: 1903–1931
- [32] Zhu J-R (朱建荣), Wang J-H (王金辉), Shen H-T (沈焕庭), *et al.* Observation and analysis on diluted water and red tide of the Yangtze River estuary during mid-to-late June 2003. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2005, **50**(1): 59–65 (in Chinese)
- [33] Wang Q-L (王秋璐), Zhou Y-X (周燕遐), Wang J-T (王江涛), *et al.* Research of the assimilation of inorganic nitrogen by marine heterobacteria. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), 2010, **29**(2): 231–235 (in Chinese)
- [34] Zhang J-X (张进兴), Li R-X (李瑞香), Sun X-Q (孙修勤), *et al.* Study on relation of heterotrophic bacteria to environmental nitrogen and phosphorus in mesocosm. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), 2007, **25**(1): 95–100 (in Chinese)
- [35] Zhang Z (张喆), Xiao H (肖慧), Cai H-J (蔡恒江), *et al.* Distribution characteristics of bacterioplankton in coastal waters from Weihai to Rizhao of Shandong. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2010, **29**(2): 184–188 (in Chinese)
- [36] Bai J (白洁), Zhang H-F (张昊飞), Li G-R (李岚然), *et al.* Distribution and relationship between bacterioplankton and inorganic nutrients in Jiaozhou Bay in winter. *Marine Science* (海洋科学), 2004, **28**(12): 31–34 (in Chinese)
- [37] Liu C-C (刘材材), Xiang L-Y (项凌云), Zhang H-F (张昊飞), *et al.* Distribution and relationship between heterotrophic bacteria and environmental factors in Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2009, **28**(Suppl.): 1–4 (in Chinese)
- [38] Li Y (李云), Li D-J (李道季). Correlation between the distribution of bacterioplankton and the environmental factors in the Yangtze River Estuary and its adjacent Sea. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), 2007, **26**(6): 9–18 (in Chinese)
- [39] Ren N-Q (任南琪), Ma F (马放), Yang J-X (杨基先), *et al.* Microbiological Pollution Control. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003 (in Chinese)
- [40] Bacelar-Nicohu P, Nicohau LB, Marques JC, *et al.* Bacterioplankton dynamics in the Mondego estuary (Portugal). *Acta Oecologica*, 2003, **24**: 67–75
- [41] Wu Q, Zhang R, Huang S, *et al.* Effects of bacteria on nitrogen and phosphorus release from river sediment. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**: 404–412
- [42] Liu H-H (刘慧慧), Xue C-B (薛超波). The bacteria distribution on the culture environment of intertidal shellfish. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(1): 436–444 (in Chinese)
- [43] Woulds C, Andersson JH, Cowie GL, *et al.* The short-term fate of organic carbon in marine sediments: Comparing the Pakistan margin to other regions. *Deep-Sea Research II*, 2009, **56**: 393–402
- [44] Vandewiele S, Cowie G, Soetaert K, *et al.* Amino acid biogeochemistry and organic matter degradation state across the Pakistan margin oxygen minimum zone. *Deep-Sea Research II*, 2009, **56**: 318–334

作者简介 杜萍,女,1985年生,硕士研究生。主要从事海洋生态学研究。发表论文5篇。E-mail: duping816@163.com

责任编辑 肖红