

李鲜鲜,何文辉,董占营,等. 上海沿海岸海域微生物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):286-291.

上海沿海岸海域微生物的分布特征 及其与环境因子的关系

李鲜鲜,何文辉,董占营,崔丽香,蔡清洁,张 奥

(上海海洋大学水产与生命学院,上海 201306)

摘要:微生物在海洋生态系统中具有多种功能。芦潮港、洋山港、外高桥港作为上海近海岸的三大主要港口,有必要对其微生物的丰度及水环境进行研究。水文特征和化学特征分布表明,温度、盐度、溶解氧和营养盐等在表层水体中的分布大体呈现一定的季节性。相关性分析表明,微生物数量与表层水体温度呈正相关关系,但不显著($P > 0.05$);与盐度呈显著正相关关系;与溶解氧呈负相关关系。营养盐与微生物丰度的相关性较为复杂,但不显著($P > 0.05$)。

关键词:芦潮港;洋山港;外高桥港;细菌丰度;真菌丰度;放线菌丰度;相关性分析

中图分类号: Q917.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)01-0286-06

随着人口和经济的快速增长,人类活动的加强改变了近海岸生态环境的结构和功能,大量的工业废水和生活污水流入海流,包括海水养殖带来的污染,使得近海岸水域中营养盐量急剧升高,部分海域频频发生赤潮等生态危害,严重破坏了海洋的生态平衡,威胁人类身体健康。近年来,我国研究者对近海岸海域生态环境的研究相当广泛^[1-4]。张培玉以渤海湾近海岸海域和潮间带为研究区域,对海域底栖动物生态学与

环境质量作了评价研究^[5];朱广超以连云港近海岸海洋沉积物为研究对象,研究了不同采样点的污染物类型和污染程度,并对不同污染毒的沉积物进行微生物群落结构与功能的研究^[6]。海洋浮游细菌的生物量、生产力及其生长、分布的环境调控因子是海洋生物学关注的焦点,从海洋微生物中可以分离得到大量具有抗菌活性的药用化合物^[7],且微生物学参数的变化能够早期感应和预报海洋污染情况,是海洋污染检测的最好选择对象^[8],因此有必要对海洋微生物资源展开大量的研究工作。本试验对上海近海岸海域不同港口的海洋微生物数量和生态分布进行了研究,并分析了它们与环境因子的相关度,以期对近海海域生态结构、环境保护、水产养殖等提供理论依据。

收稿日期:2013-04-25

基金项目:上海市科学技术委员会社会发展基金(编号:09DZ120010C)。

作者简介:李鲜鲜(1989—),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为大型海藻对富营养化水体的修复。E-mail: xianxianli333@163.com。

通信作者:何文辉,副教授,硕士生导师,主要从事水体的生态修复研究。E-mail: whhe@shou.edu.cn。

析后建立了叶面积指数反演模型。植被指数能较好地反演提取同时期的叶面积指数,进行长势监测,但由于单产和经济系数与每公顷有效穗数、每穗粒数、千粒重、干物质重及品种有关,并且地块零散,对德阳地区抽穗期单时相中高分辨率遥感影像提取的植被指数反演单产和经济系数进行估产,还需要进一步研究。另外需说明的是,在利用遥感影像进行作物长势监测和产量预报时,影像时相至关重要。

参考文献:

- [1] 浦瑞良,宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000:127-131.
- [2] Martin R D, Heilman J L. Spectral reflectance patterns of flooded rice [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1986, 52 (12):1885-1890.
- [3] 田国良,项月琴. 遥感估算水稻产量Ⅱ. 用光谱数据和陆地卫星图像估算水稻产量[J]. 环境遥感,1989,4(1):73-80.
- [4] 王人潮,黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京:中国农业出版社,2002.

1 材料与方 法

1.1 样品采集

样品采自春(2012年4—5月)、夏(2012年7—8月)、秋

- [5] 王人潮,王 珂,沈掌泉,等. 水稻单产遥感估测建模研究[J]. 遥感学报,1998,2(2):119-124.
- [6] Le T T, Ribbes F, Wang L F, et al. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 41-56.
- [7] 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报,2004,28(1):47-52.
- [8] 田翠玲,李秉柏,郑有飞. 基于植被指数与叶面积指数的水稻生长状况监测[J]. 江苏农业科学,2005(6):13-15.
- [9] Fang H L, Liang S L. Retrieving leaf area index using a genetic algorithm with a canopy radiative transfer model[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3):257-270.
- [10] Shao Y, Liao J J, Wang C Z. Analysis of temporal radar backscatter of rice: a comparison of SAR observations with modeling results[J]. Can J Remote Sensing, 2002, 28(2):128-138.
- [11] 杨 燕,田庆久. 水稻 LAI 参数的 Hyperion 反演研究[J]. 遥感技术与应用,2007,22(3):345-350.

(2012年10—11月)、冬(2012年12月至2013年1月)4个季节,采样站位如图1所示。水样采集使用有机玻璃采水器。

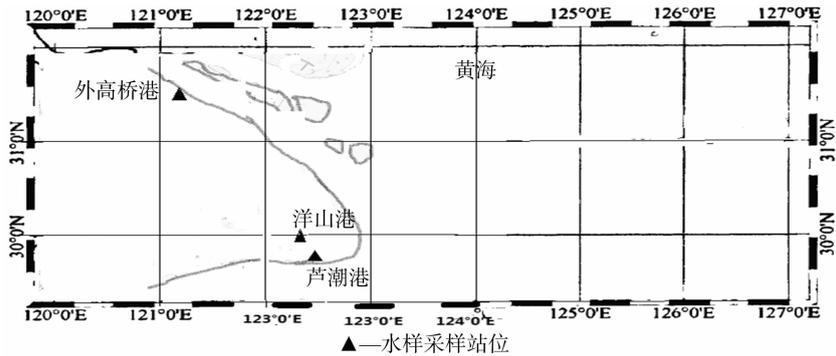


图1 上海沿海岸三大港口采样站位

1.2 水样微生物计数

每个采样点取50 mL水样(微生物计数用水样)置于预先灭菌的采样瓶中,取500 mL水样(测量环境参数用水样)置于预先用硫酸洗过的采样瓶中。

1.2.1 平板计数法 适用于水深小于200 m海区的微生物活菌数计数。按10 ml/L的量加灭菌的Tween 80工作溶液。

(1)稀释。用高压灭菌海水制成梯度稀释液(10^{-1} 、 10^{-2} 、...、 10^{-6})。(2)接种。根据不同计数对象,取适当稀释梯度(10^{-3} 、 10^{-4})样品0.1 mL(以平板上出现30~300个菌落为宜),接种于相应的平板培养基上,并涂布均匀,每个稀释度重复3个平板。(3)培养。将平板倒置于接近现场温度的恒温箱,培养4~15 d。(4)计数。在放大镜下,按菌落形态,分别计算各种培养基中四大菌类的菌落数(必要时,用显微镜观察确证)。(5)计算样品含菌数。

$$N = \frac{N_a \times D}{(1 - 0.01) \times V}$$

式中: N 为样品含菌落数,单位为CFU/L; N_a 为3个平板平均菌落数,单位为CFU; D 为样品稀释倍数; V 为接种量,单位为L。

1.2.2 培养计数用的培养基 细菌培养基:自制2216 E培养基;放线菌培养基:高氏1号合成培养基;真菌培养基:自制

水样取自5 m深的海水。

PDA庆大霉素培养基。

1.2.3 人工海水 人工海水成分^[9]为22.0 g NaCl、9.7 g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 、3.7 g Na_2SO_4 (无水)、1.0 g $CaCl_2$ (无水)、0.65 g KCl、0.20 g $NaHCO_3$ 、0.230 g H_3BO_3 。

制备方法:将各成分溶解,用蒸馏水定容至1 000 mL,海水的盐度基本为3.3‰。

1.3 环境参数测定

温度、盐度、溶解氧数据采用JPBJ-608便携式溶氧测定仪测定。营养盐、pH值、硬度、总氮、总磷等水化学参数根据GB/T 12763.2—2007《海洋调查规范》进行分析。

2 结果与分析

2.1 上海近海岸海域的基本环境特征

2.1.1 水文特征

2.1.1.1 表层水温的季节变化和分布特征 本研究三大港口近海岸表层水域温度呈现明显的季节变化,夏季的表层水温最高,其次是秋季,再次是春季,冬季水温最低(图2-A)。

芦潮港和洋山港各个季节的平均水温相差不大,春季平均表层水温变化范围为11~14℃,夏季变化范围为23~26℃,秋季变化范围为18~22℃,冬季变化范围为4~

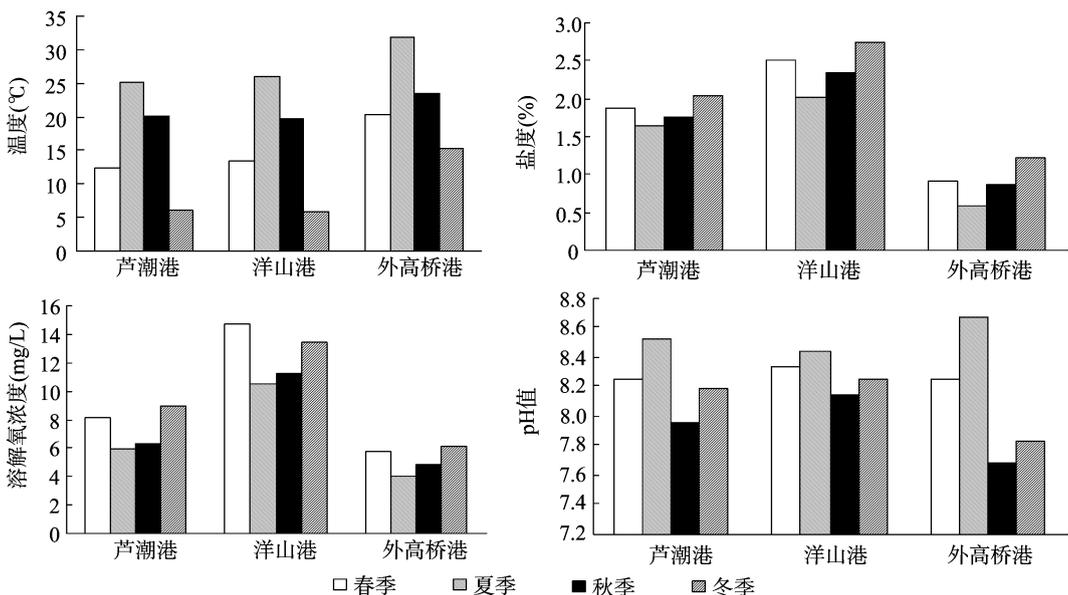


图2 上海近海岸海域表层水体的水文特征

8℃。外高桥港是长江入海口与东海的交汇处,与芦潮港和洋山港表层水温有明显差异,春季平均表层水温为20.3℃,

夏季为31.8℃,秋季为23.4℃,冬季为15.3℃,明显高于另外两大港口(表1)。

表1 芦潮港、洋山港、外高桥港的水文特征、化学特征变化

港口	季节	温度(℃)	盐度(%)	溶解氧浓度(mg/L)	pH值	总氮量(μmol/L)	亚硝酸盐量(μmol/L)	总磷量(μmol/L)	总有机碳量(mg/L)
芦潮港	春	12.3 ± 1.0	1.873 ± 0.100	8.14 ± 0.5	8.26 ± 0.02	20.025 ± 0.2	3.065 ± 0.02	3.218 ± 0.02	4.68 ± 0.01
	夏	25.2 ± 2.0	1.649 ± 0.100	5.98 ± 0.5	8.53 ± 0.02	22.176 ± 0.2	2.014 ± 0.02	3.765 ± 0.02	6.96 ± 0.01
	秋	20.1 ± 1.0	1.756 ± 0.100	6.35 ± 0.5	7.96 ± 0.02	12.785 ± 0.2	2.420 ± 0.02	4.023 ± 0.02	7.87 ± 0.01
	冬	6.1 ± 2.0	2.035 ± 0.100	9.00 ± 0.5	8.19 ± 0.02	15.342 ± 0.2	3.594 ± 0.02	4.331 ± 0.2	5.91 ± 0.01
洋山港	春	13.5 ± 1.0	2.498 ± 0.100	12.73 ± 0.5	8.34 ± 0.02	16.122 ± 0.2	5.002 ± 0.02	2.001 ± 0.2	9.02 ± 0.01
	夏	25.9 ± 2.0	2.012 ± 0.100	10.47 ± 0.5	8.45 ± 0.02	20.607 ± 0.2	4.240 ± 0.02	2.342 ± 0.2	12.86 ± 0.01
	秋	19.6 ± 1.0	2.345 ± 0.100	11.24 ± 0.5	8.15 ± 0.02	10.778 ± 0.2	4.681 ± 0.02	2.890 ± 0.2	14.67 ± 0.01
	冬	5.8 ± 2.0	2.753 ± 0.100	13.40 ± 0.5	8.26 ± 0.02	12.053 ± 0.2	5.488 ± 0.02	3.264 ± 0.2	10.42 ± 0.01
外高桥港	春	20.3 ± 1.0	0.923 ± 0.100	5.73 ± 0.5	8.25 ± 0.02	30.233 ± 0.2	8.795 ± 0.02	8.005 ± 0.2	5.02 ± 0.01
	夏	31.8 ± 2.0	0.578 ± 0.100	3.98 ± 0.5	8.67 ± 0.02	32.065 ± 0.2	7.102 ± 0.02	8.734 ± 0.2	6.99 ± 0.01
	秋	23.4 ± 1.0	0.876 ± 0.100	4.86 ± 0.5	7.69 ± 0.02	25.897 ± 0.2	7.910 ± 0.02	10.023 ± 0.2	7.83 ± 0.01
	冬	15.3 ± 2.0	1.221 ± 0.100	6.15 ± 0.5	7.83 ± 0.02	29.509 ± 0.2	10.428 ± 0.02	10.917 ± 0.2	5.93 ± 0.01

2.1.1.2 盐度的季节变化和分布特征 本研究港口水域冬季和春季的表层盐度较高,夏季和秋季的较低(图2-B)。外高桥港作为长江入海口和东海的交汇处,盐度明显低于另外两大港口。芦潮港海拔4.56 m,洋山港海拔4.15 m,相对于芦潮港,洋山港在近海岸属于比较深的海港区,其平均盐度要高于芦潮港。

2.1.1.3 溶解氧浓度的季节变化和分布特征 本研究海域溶解氧浓度具有明显的季节变化,三大港口表层的溶解氧浓度变化趋势一致,均为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,其中夏季溶解氧浓度有明显的下降趋势(图2-C)。芦潮港春、夏、秋、冬四季平均溶解氧浓度分别为8.14、5.98、6.35、9.00 mg/L,洋山港四季平均溶解氧浓度分别为12.73、10.47、11.24、13.40 mg/L,外高桥港四季平均溶解氧浓度分别为5.73、3.98、4.86、6.15 mg/L(表1)。洋山港的溶解氧浓度明显高于芦潮港;外高桥港的溶解氧浓度明显低于洋山港和芦潮港,可能与其河口水流量大有关。

2.1.1.4 pH值的季节变化 本研究海域的酸碱度也存在明显的季节变化,夏季pH值明显最高(图2-D)。外高桥港的表层水体pH值变化较大,变化范围在7.69~8.67(表1),未受污染的海水pH值在8.0~8.3,考察外高桥港周边环境,分析可能有大量工业废水进入该海域。

2.1.2 化学特征

2.1.2.1 总氮含量的季节变化和分布特征 表层水体总氮量的季节变化一致,均为夏季最高,春季其次,冬季再次,秋季最低(表1),高值区出现在外高桥港(图3-A),即为长江口岸交汇处。芦潮港和洋山港的总氮含量相差不大,前者要高于后者。

2.1.2.2 亚硝酸盐含量的季节变化和分布特征 亚硝酸盐量作为水质测定的其中一个重要指标,决定着水体中生物的生长和健康状况。本研究三大港口亚硝酸盐含量的季节变化呈现相同的趋势:冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,外高桥港的亚硝酸盐含量明显高于另外2个港口(图3-B)。

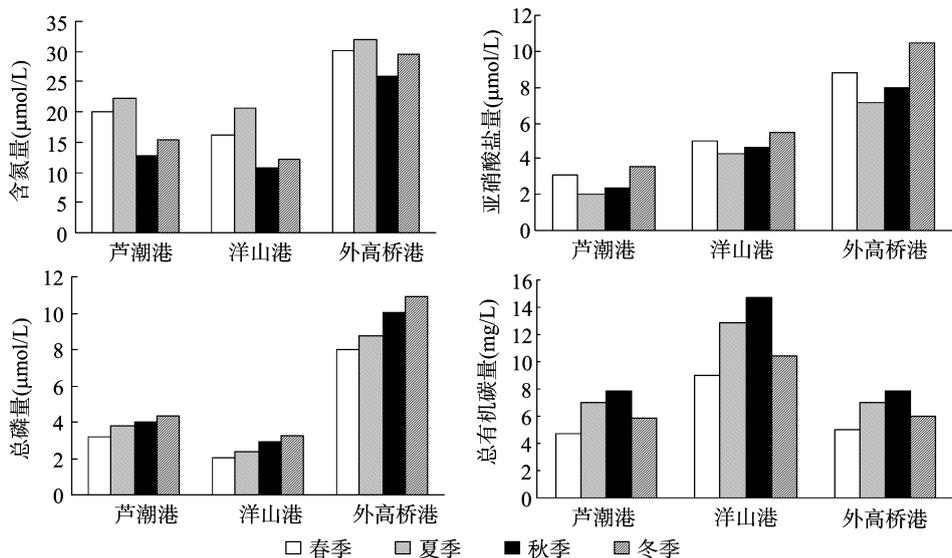


图3 上海近海岸海域表层水体的化学特征

2.1.2.3 总磷含量的季节变化和分布特征 本研究表层水体总磷含量季节变化一致,冬季最高,秋季其次,夏季再次,春季最低(表1)。外高桥港总体要比芦潮港和洋山港高(图3-C)。总磷含量季节变化总体范围较小,芦潮港在3.218~4.331 μmol/L,洋山港在2.001~3.264 μmol/L,外高桥港8.005~10.917 μmol/L。

2.1.2.4 总有机碳含量的季节变化和分布特征 洋山港表层水体的总有机碳含量明显高于另外2个港口,3个港口总有机碳含量的季节变化也呈现一致的 trends:秋季>夏季>冬季>春季(图2-D)。

2.2 水体微生物数量的分布

2.2.1 细菌的季节变化和水平分布 上海近海岸三大港口表层水体细菌丰度的季节变化特征均为夏季>春季>秋季>冬季(表2),春季和秋季的细菌平均丰度接近,分别为 $11.5 \times 10^8 \sim 19.5 \times 10^8$ 、 $9 \times 10^8 \sim 18 \times 10^8$ CFU/L,冬季表层水体的细菌丰度明显降低,仅为其他季节的1/4~1/3。三大港口表层水体细菌含量在整个微生物群体中的比例并没有随季节的变化发生改变,芦潮港表层水体细菌所占比例为79%~84%(图4),洋山港表层水体细菌所占比例为75%~84%(图5),外高桥港表层水体细菌所占比例为87%~90%(图6)。细菌为三大港口表层水体中重要的微生物群落。

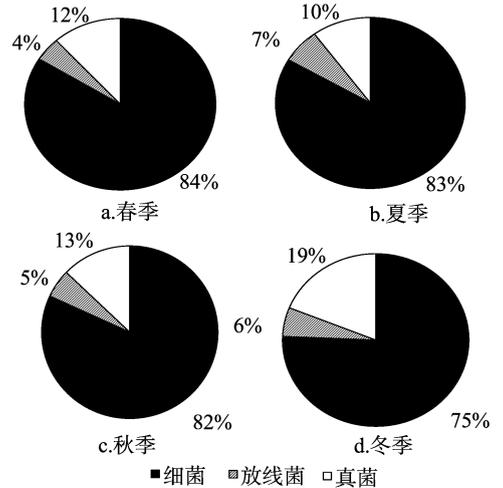


图5 洋山港微生物的季节变化

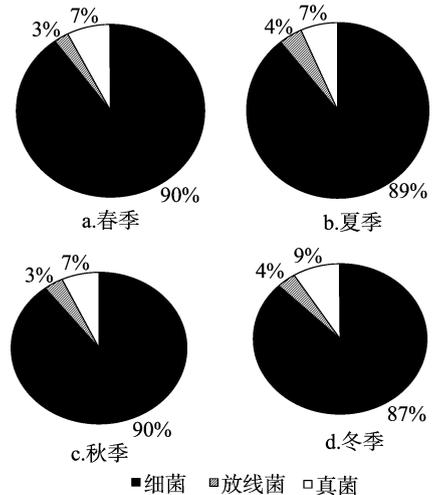


图6 外高桥港微生物的季节变化

表2 表层水域细菌、放线菌、真菌丰度的季节变化

港口	季节	细菌丰度 ($\times 10^8$ CFU/L)	放线菌丰度 ($\times 10^7$ CFU/L)	真菌丰度 ($\times 10^7$ CFU/L)
芦潮港	春	9~15	5~9	14~21
	夏	14~25	12~17	19~25
	秋	7~14	6~8	14~19
	冬	3~7	3~4	8~12
洋山港	春	8~15	4~8	13~19
	夏	13~20	12~15	17~23
	秋	6~12	3~9	12~16
	冬	2~6	2~4	9~11
外高桥港	春	16~23	3~9	14~17
	夏	25~32	12~16	18~24
	秋	15~21	5~10	11~17
	冬	10~14	4~6	10~14

2.2.2 放线菌的季节变化和水平分布 三大港口表层水体放线菌丰度的季节变化特征均为夏季>秋季>春季>冬季(表2),春季和秋季的放线菌平均丰度接近,分别为 $6 \times 10^7 \sim 7 \times 10^7$ 、 $6 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$ CFU/L,冬季表层水体的放线菌丰度明显降低,仅为其他季节的1/3~1/2。表层水体放线菌含量在整个微生物群体中的比例并没有随季节的变化发生改变,芦潮港表层水体放线菌所占比例为5%~6%(图4),洋山港表层水体放线菌所占比例为4%~7%(图5),外高桥港表层水体放线菌所占比例为3%~4%(图6)。放线菌为三大港口表层水体中所占比例最小的微生物群落。

2.2.3 真菌的季节变化和水平分布 三大港口表层水体真菌丰度的季节变化特征均为夏季>春季>秋季>冬季(表2),春季和秋季的真菌平均丰度接近,分别为 $10.5 \times 10^7 \sim 17.5 \times 10^7$ 、 $14 \times 10^7 \sim 16.5 \times 10^7$ CFU/L,冬季表层水体的真

菌丰度明显降低,约为其他季节的1/2。表层水体真菌含量在整个微生物群体中的比例并没有随季节的变化发生改变,芦潮港表层水体真菌所占比例为10%~16%(图4),洋山港表层水体真菌所占比例为10%~19%(图5),外高桥港表层水体真菌所占范围为7%~9%(图6)。真菌是三大港口表层水体中处于中间地位的微生物群落。

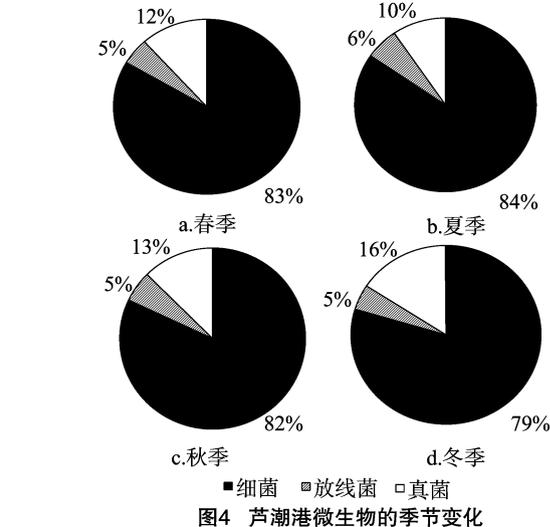


图4 芦潮港微生物的季节变化

3 讨论

3.1 上海近海岸水域微生物的时空变化以及与其他海洋环境的比较

海岸带是我国经济最为发达的地区,自20世纪80年代以来,我国学者在东海、渤海等主要临海岸线开展了大量的研究工作。本研究结果表明,在微生物群体中,细菌丰度处于较高的水平,特别是外高桥港表层水体,处于长江入海口和东海海流的交汇区,营养丰富。有研究表明,长江冲淡水控制的海域细菌丰度明显高于陆架区^[10]。

与其他近海海域细菌丰度相比,本研究细菌丰度以外高桥港口较高,与山东半岛等近海岸海域比较相似(表3),可能是它们都处于污染较严重的海域。在全球范围内,河口和近海岸等环境的微生物数量都要高于远海和极地等开放性海洋^[11],这也说明营养条件是影响微生物数量和生长的重要因素。

表3 几个海岸细菌丰度比较

时间 (年-月)	细菌丰度 ($\times 10^8$ CFU/L)	海区	参考文献
2000-10	5.28	东海	[26]
2004-10	4.11~25.3	长江口、东海	[11]
2007-10	13.8	山东半岛东南近海	[25]
2012-10	12~15	上海近海岸三大港口	本文

3.2 环境因子对三大港口表层水体微生物分布的影响

微生物在海洋生态系统中扮演很重要的角色,作为分解者能够分解有机物释放能量,作为生产者能够利用浮游植物所不能利用的可溶性有机物,将之转化为颗粒有机物,进行二次生成^[12],因此微生物在海洋生物生成和生源要素循环中起着不可替代的作用。本研究对微生物数量与环境因子作了相关性分析。

3.2.1 温度 温度是影响海洋微生物生长的重要环境因子,微生物活动能力取决于酶活性,一定温度范围内酶活性与温度成正比,海水温度与海洋微生物的数量和生产力呈正相关关系^[13]。本研究探讨的海水中微生物的含量与温度具有一定的相关性,芦潮港和洋山港不显著,外高桥港表层海水微生物数量与温度具显著相关性(图7)。李云等认为长江口邻近海域细菌垂直分布与温度具有显著的相关性^[14]。白洁等发现在黄海西北部细菌数量与温度之间并没有明显的相关关系,他们认为原生动物的捕食及病毒活动有可能是削弱其相关性的重要原因之一^[13]。

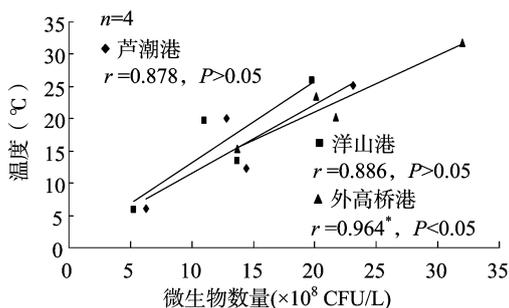


图7 温度与微生物数量的相关性分析

3.2.2 盐度 相关性分析结果表明,海水中微生物数量与盐度呈显著的负相关关系(图8),在营养充足的条件下,盐度可能是影响微生物分布的主要因素。在河口与海流交汇处,由于盐度发生巨大的变化,可能会导致水体整个微生物数量和群落结构的改变^[15]。

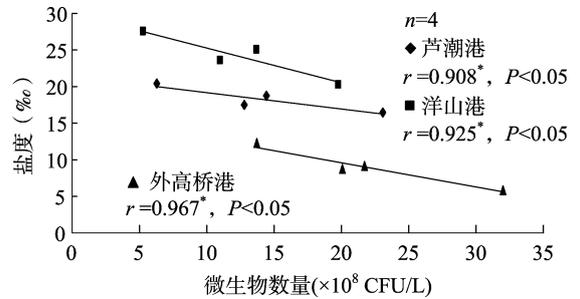


图8 盐度与微生物数量的相关性分析

3.2.3 溶解氧 相关性分析结果表明,溶解氧浓度与微生物数量呈负相关关系,相关性不显著(图9)。表层水体相对底层属于高氧区,而河口与海流交汇处由于污染严重,其溶氧处于劣势。低氧对海洋微生物、浮游动物等具有很大危害,生物缺氧导致大量死亡,引起生态系统营养途径的改变^[16]。本研究说明低氧对微生物的生长有很强的抑制作用。

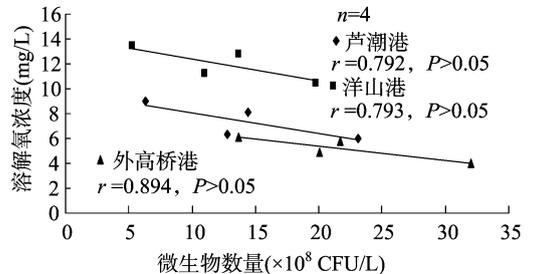


图9 溶解氧浓度与微生物数量的相关性分析

3.2.4 营养盐 在海洋生态系统中,海洋微生物可以利用氮源、碳源和磷源进行生长和繁殖,它们在营养盐的循环中起着非常重要的作用。本试验结果表明,三大港口的总磷(TP)含量与微生物数量呈负相关关系,总氮(TN)和总有机碳(TOC)含量与微生物数量呈正相关关系(图10)。有研究表明,磷酸盐是异养浮游细菌生物量和生产的重要限制因子^[17];周伟华等研究发现在三亚湾冬季水体溶解无机氮和磷酸盐与细菌生

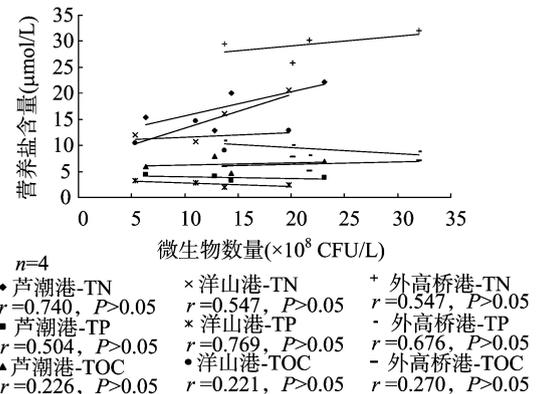


图10 营养盐与微生物数量的相关性分析

物量有显著正相关关系^[18];外国学者在海洋异养浮游细菌培养室试验过程中发现,DIN作为主要的氮源,提供55%~99%的总氮吸收,极大地促进了细菌的生长和新陈代谢^[19]。由于人为因素,N、P在近海岸区呈现高富集状态,现阶段N、P在海洋中影响生物生存和发展的问題已成为研究的热门。

4 小结

本试验采样的地点选自30°51'N、12150'E,30°52'N、121°52'E,31°21'N、121°35'E。采集地点均位于潮间带以内,靠近海岸线。由于采集地点靠近陆地,试验结果所测得的微生物有一部分肯定来自陆地;另外对海水的化学分析数据偏差,有部分也是人为因素造成的。近年来,以细菌检测海洋环境质量的研究已成为热点^[20-24]。海岸带生境退化的主要特征就是水质和沉积物质量的下降。随着水质指标BOD、COD、铵态氮、透明度等化学因子的变化,水体中的微生物种类、数量及种群结构等也会呈现有规律的变化。有些细菌的指标变化能够直接反映出海水质量的变化,从而对环境变化起到指示作用^[25]。

本试验中微生物生物量与环境因子的相关分析结果表明,温度与微生物生物量的相关性不是很大,但是呈现一定的正相关,可能是因为温度对酶活性有影响;微生物生物量与盐度的相关性很高,主要是由海岸带与河口交汇处盐度层次的剧烈变化引起;微生物生物量与溶解氧浓度呈负相关,因为表层水体生长的主要是好氧和兼氧微生物;微生物生物量与营养盐的相关性比较复杂,与以往的研究^[17-19]相比较,不尽相同,可能与海域的地理环境和周边生态环境有很大的关系。本试验还存在很多的缺点:在水体层次结构上没有进行研究(在后续的试验中作为主要方向);微生物的分离不够全面,相对较宏观;没有进行微生物纯化和活性研究等。这在后续的研究中有待解决。

参考文献:

[1]刘敏.我国黄、东海典型生态过程中的微生物群落结构[D].北京:中国科学院研究生院,2011.

[2]王晓.南黄海浮游动物群落及环境因子对其分布影响的研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[3]朱大奎.深圳海岸海洋环境与空间规划研究[J].第四纪研究,2005,25(1):45-53.

[4]刘材材,项凌云,张昊飞,等.长江口异养细菌生态分布特征及其与环境因子的关系[J].海洋环境科学,2009,28(增刊):1-4.

[5]张培玉.渤海湾近岸海域底栖动物生态学与环境质量评价研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.

[6]朱广超.连云港近岸海洋沉积物中微生物群落结构与功能的初步研究[D].无锡:江南大学,2009.

[7]Blunt J W, Copp B R, Keyzers R A, et al. Marine natural products [J]. Nat Prod Rep, 2004, 29: 144-222.

[8]Tegler B, Sharp M, Johnson M A. Ecological monitoring and assessment network's proposed core monitoring variables: an early warning of

environmental change [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(1/2): 29-56.

[9]ISO 10253:2006 Water quality: marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricoratum* [EB/OL]. [2013-03-30]. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=34811.

[10]陈春辉,王春生,许学伟,等.河口缺氧生物效应研究进展[J].生态学报,2009,29(5):2595-2602.

[11]张东声.长江口及其邻近海域微生物的多样性和生态分布特征研究[D].杭州:浙江大学,2011.

[12]肖天.海洋浮游细菌的生态学研究[J].地球科学进展,2001,16(1):60-64.

[13]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:自然科学版,2009,39(4):592-596.

[14]李云,李道季.长江口邻近海域浮游细菌分布与环境因子的关系[J].海洋通报,2007,26(6):9-18.

[15]刘镇盛.长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[16]Riedel G F, Sanders J G, Breitburg D L. Seasonal variability in response of estuarine phytoplankton communities to stress: linkages between toxic trace elements and nutrient enrichment [J]. Estuaries, 26(2): 323-338.

[17]Cotner J B, Sada R H, Bootsma H, et al. Nutrient limitation of heterotrophic bacteria in Florida Bay [J]. Estuaries, 2000, 23(5): 611-620.

[18]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.

[19]Tupas L M, Koike I, Karl D M, et al. Nitrogen metabolism by heterotrophic bacterial assemblages in Antarctic coastal waters [J]. Polar Biology, 1994, 14(3): 195-204.

[20]黄邦钦,洪华生.海洋微藻作为海洋生态环境的指示初探[J].海洋环境科学,1998,17(3):24-28.

[21]白树猛,田黎.指示生物在海洋污染监测中的应用[J].海洋科学,2010,34(1):80-83.

[22]姜勇.胶州湾浮游纤毛虫群落的时空分布特征及与环境间的关系[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[23]Li C Q, Liu W C, Zhu P, et al. Phylogenetic diversity of bacteria associated with the marine sponge *Gelliodes carnosa* collected from the Hainan Island coastal waters of the South China Sea [J]. Microbial Ecology, 2011, 62(4): 800-812.

[24]Wei B. Diversity and distribution of proteorhodopsin-containing microorganisms in marine environments [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(1): 98-106.

[25]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.

[26]赵海军,纪力强.大尺度生物多样性评价[J].生物多样性,2003,11(1):78-85.