

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

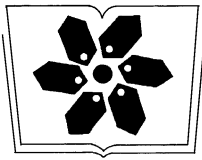
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 14 期 Vol.31 No.14 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 14 期

2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

厦门市三个产业土地利用变化的敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (3863)
黄河源区沙漠化及其景观格局的变化·····	胡光印,董治宝,逯军峰,等 (3872)
岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例·····	罗光杰,李阳兵,王世杰,等 (3882)
基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析·····	徐涵秋 (3890)
北京市土地利用生态分类方法·····	唐秀美,陈百明,路庆斌,等 (3902)
长白山红松臭冷杉光谱反射随海拔的变化·····	范秀华,刘伟国,卢文敏,等 (3910)
臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型·····	汪金松,张春雨,范秀华,等 (3918)
渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位·····	焦海峰,施慧雄,尤仲杰,等 (3928)
食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响·····	杨志宏,邵淑丽 (3937)
桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征·····	张明阳,王克林,刘会玉,等 (3947)
隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布·····	李彩霞,孙景生,周新国,等 (3956)
不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用·····	周宝利,陈志霞,杜 亮,等 (3964)
镉在草-菇-土系统中的循环与生物富集效应·····	翁伯琦,姜照伟,王义祥,等 (3973)
鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估·····	余进祥,郑博福,刘娅菲,等 (3980)
柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系·····	史建伟,王孟本,陈建文,等 (3990)
土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响·····	梁 飞,田长彦 (3999)
象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素·····	杨季芳,王海丽,陈福生,等 (4007)
近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响·····	吴芳芳,郑有飞,吴荣军,等 (4019)
抑制剂和安全剂对高羊茅根中酶活性和菲代谢的影响·····	龚帅帅,韩 进,高彦征,等 (4027)
南苜蓿高效共生根瘤菌土壤的筛选·····	刘晓云,郭振国,李乔仙,等 (4034)
汉江上游金水河流域土壤常量元素迁移模式·····	何文鸣,周 杰,张昌盛,等 (4042)
基于地理和气象要素的春玉米生育期栅格化方法·····	刘 勤,严昌荣,梅旭荣,等 (4056)
日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型·····	李 刚,陈亚茹,戴剑锋,等 (4062)
冀西北坝上旱干区南瓜油葵间作的水分效应·····	黄 伟,张俊花,李文红,等 (4072)
专论与综述	
鸟类分子系统地理学研究进展·····	董 路,张雁云 (4082)
自然保护区空间特征和地块最优选择方法·····	王宜成 (4094)
人类活动是导致生物均质化的主要因素·····	陈国奇,强 胜 (4107)
冬虫夏草发生的影响因子·····	张古忍,余俊锋,吴光国,等 (4117)
自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测·····	余晨兴,全 川 (4126)
研究简报	
塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价·····	贡 璐,张海峰,吕光辉,等 (4136)
高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态·····	周晓庆,吴福忠,杨万勤,等 (4144)
生物结皮粗糙特征——以古尔班通古特沙漠为例·····	王雪芹,张元明,张伟民,等 (4153)
不同海拔茶园害虫、天敌种群及其群落结构差异·····	柯胜兵,党凤花,毕守东,等 (4161)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说:内地多呈灌木状的沙棘,在青藏高原就表现为高大的乔木,在拉萨河以及雅鲁藏布江沿岸常常可以看到高大的沙棘林和沼泽塔头湿地相映成趣的美丽景观。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

杨季芳,王海丽,陈福生,屠霄霞,陈吉刚,冯辉强.象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素.生态学报,2011,31(14):4007-4018.

Yang J F, Wang H L, Chen F S, Tu X X, Chen J G, FENG H Q. Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 4007-4018.

象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素

杨季芳^{1,2,3,*}, 王海丽^{2,3}, 陈福生¹, 屠霄霞^{2,3}, 陈吉刚^{2,3}, 冯辉强⁴

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北, 武汉 430070; 2. 宁波市微生物与环境工程重点实验室, 宁波 315100;

3. 浙江万里学院生物与环境学院, 宁波 315100; 4. 宁波市象山港海洋环境监测站, 宁波 315141)

摘要:于 2007 年的 7 月(夏季)、11 月(秋季)与 2008 年的 1 月(冬季)、4 月(春季)用高保真、无扰动重力柱状取样器替代常规抓斗式采样,首次系统研究了象山港海域的水样(表层海水和上覆水)及沉积物中细菌丰度的时空分布特征,并采用主成分分析及多元逐步回归分析方法研究了影响细菌丰度时空分布的主要环境因素,结果表明:调查期间象山港海域的细菌的丰度较高,象山港海域的富营养化较严重。调查期间象山港海域水样及沉积物样品中细菌丰度实测值的变化范围为 1.50×10^5 — 9.78×10^{10} 个/mL (个/g),总均值为 2.76×10^9 个/mL (个/g);季节分布特征为夏季(7 月)极显著高于其他季节,赤潮的暴发导致春季(4 月)的调查结果最低。浮游细菌丰度表现为底层均大于表层的垂直分布特征;平面分布特征均为从港顶到港口递减、养殖区高于非养殖区、电厂附近海域出现较高值的趋势,近岸人类的工农业活动造成的陆源污染及海水增养殖活动造成的养殖污染是造成此分布特征的主要原因。多元统计结果表明:溶解氧、水温、营养盐(N、P)、pH 以及有机质污染等是影响该海域细菌丰度的最主要因素。

关键词:象山港; 海洋细菌; 丰度; 环境因素

Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay

YANG Jifang^{1,2,3,*}, WANG Haili^{2,3}, CHEN Fusheng¹, TU Xiaoxia^{2,3}, CHEN Jigang^{2,3}, FENG Huiqiang⁴

1 College of Foods Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Municipal Key Laboratory of Microorganism and Environmental Engineering, Ningbo 315100, China

3 Faculty of Biological and Environmental Science, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China

4 Marine environment monitoring station of Xiangshan Bay, Ningbo 315141, China

Abstract: Marine bacteria in water or sediment are often closely linked to environmental conditions in their surrounding, thus influencing their distribution and abundance. In order to estimate the distribution of marine bacteria in Xiangshan Bay, undisturbed overlying seawater, sediment and surface seawater bacteria were analysed by staining with 4, 6-Diamidino-2-Phenylindole and observed with Epifluorescence Microscope (EFM). Environmental parameters such as seawater temperature (ST), salinity (SS), pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD) as well as NO_3^- -N, NO_2^- -N, DIN, NH_4^+ -N, DIP, TN, PO_4^{3-} -P and chlorophyll a (Chla) values were measured at the same time. Samples were collected with a cylindrical high fidelity gravity sampler instead of the conventional grab sampler.

Bacteria abundance in July 2007, October 2007, January 2008 and April 2008, representing the situation for summer, autumn, winter and spring, ranged from 1.50×10^5 to 9.78×10^{10} cells/mL (cells/g), with a mean of 2.76×10^9 cells/mL (cells/g). Significantly high values could be observed for bacteria abundance in July (summer) compared to other sampling time. A red tide outbreak during the sampling event in April 2008 could have contributed to the lowest bacteria

基金项目:国家海洋公益性项目(200705014);宁波市科技局重大科技攻关项目(2006C100030);浙江省海洋环保和生态建设项目(浙海渔计[2009]214号)

收稿日期:2010-06-22; 修订日期:2011-03-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jfkwq@163.com

abundance value observed for the whole study period. In vertical direction, the number of bacteria in the overlying water or in the sediment was higher than that in the surface seawater. The mean number of bacteria abundance in overlying water, in the sediment and in surface seawater was 9.70×10^7 cells/mL, 7.40×10^9 cells/mL and 4.61×10^9 cells/mL respectively. In horizontal direction, we draw the contour maps of the number of bacteria with the software 'surfer 8.0'. According to the contour map we found that the number of bacteria decreased from the top to the mouth of the bay with higher abundance near the breeding areas. Very high values of bacteria abundance was also observed near power plant; sample from station S25 showed higher bacteria abundance than other stations during all the cruises. Seawater temperature, the nutrients (NO_3^- -N, DIN), pH, Chla and COD of the surface seawater were significantly positive ($P < 0.01$) correlated with the bacteria abundance of the surface seawater while DO and the nutrients (NH_4^+ -N) of the surface seawater were significant negative correlated ($P < 0.01$) with the bacteria abundance of the surface seawater. Bacteria abundance of overlying seawater were significant positive correlated ($P < 0.01$) to seawater temperature, the nutrients (NO_2^- -N, DIP) and the pH of bottom seawater whereas DO was significant negative correlated ($P < 0.01$). The results of multivariate statistical analysis showed that dissolved oxygen, seawater temperature, the nutrients (N, P), pH and organic pollution were the main factors influencing the abundance and distribution of marine bacteria in Xiangshan Bay.

Such spatial distribution of bacteria demonstrated that anthropogenic coastal land pollution from industrial and agricultural activities and from maricultures played the key roles in the occurrence of marine benthic bacteria.

Key Words: Xiangshan Bay; marine bacteria; abundance; environmental factors

海洋细菌是海洋微食物链的重要组成部分,对海洋生态系的物质循环、能量流动以及维持海洋生态系统多样性好稳定性方面均有重要作用^[1-11]。细菌指标可以反映海水水质和富营养化状况,研究细菌在近岸海域的动态分布和数量变动及其与生态环境的相互关系,具有重要意义。有关海洋浮游细菌生态研究在国内外的其他海域已经有较多报道^[3,12-20],但作为浙江省重要的增殖养殖基地之一的象山港海域尚未开展较系统研究。本文首次系统地研究了象山港海域的细菌丰度的时空分布特征,并选取同期测定的该调查海区的理化环境因子进行主成分分析和多元线性逐步回归分析,确定影响该海域细菌丰度时空分布的主要因素,并通过分析其与环境因素的关系,了解该海域细菌二次生产的主要控制过程,为象山港海洋环境保护和修复提供了重要的数据资料。

1 材料与方法

1.1 调查海区及站位设置

象山港北面紧邻杭州湾,南邻三门湾,东侧为舟山群岛,通过青龙门、双屿门和牛鼻山水道与外海相连,是一个由宁波东部沿海沿西南方向楔入内陆的一个半封闭狭长型港湾,港内有西沪港、黄墩港和铁港三大支港,是浙江省乃至全国重要的海水增殖养殖基地和多种经济鱼类洄游、索饵和繁育场所以及菲律宾蛤仔等经济贝类苗种自然产区,是宁波市发展海洋经济最重要的天然资源之一^[21]。本次调查在象山港大面站点布设 13 个,其分布兼顾湾口、湾中和湾顶部,兼顾主水道和 3 个支港(图 1)。站位定点采用 Garmin GPS12 全球卫星定位系统。

1.3 样品的采集及分析方法

调查时间为 2007 年的 7 月(夏季)、11 月(秋季)以及 2008 年的 1 月(冬季)、4 月(春季)。每次调查均

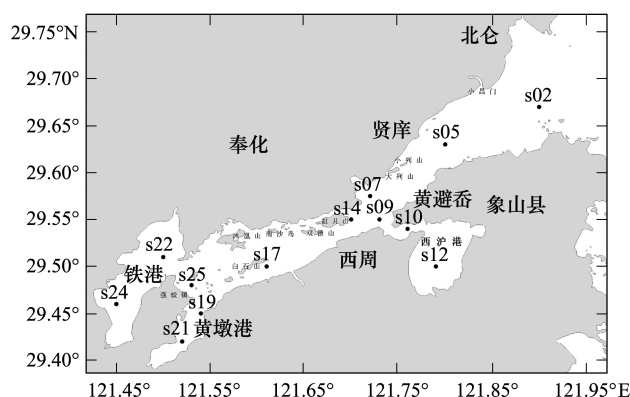


图 1 监测站位示意

Fig. 1 Map of station

位于小潮前后。采用重力无扰动柱状采样器采集沉积物,无菌取上覆水及表层泥样作为供试样本。采用灭菌有机玻璃采水器采集表层海水(离水面 0.5 m 左右的)样品。水样采集后立即加入终浓度为 5% 的甲醛,沉积物样品也按体积比加入终浓度为 5% 的甲醛,混匀固定,置于 4℃ 冰箱保存,一周内进行细菌计数。细菌计数采用 DAPI 荧光直接镜检计数法^[5]。DAPI 染料(购自 Sigma 公司)。染色液工作浓度 5 μg/ml,使用前进行过滤除菌。采用 Olympus BX51 荧光显微镜在油镜下观察并拍照计数(拍照面积为定值)。按照以下公式进行细菌计数:每毫升水样细菌总数=拍照面积细菌总数×滤膜有效滤过面积/(拍照面积×加样体积)。沉积物样品处理参考文献^[22]方法进行处理,通过测定沉积物悬液中细菌丰度换算成每克湿泥样品细菌丰度。以上样品计算细菌数量时需按比例扣除甲醛体积。

表(底层)层海水的水温(ST)、盐度(SS)、pH、溶解氧(DO)、叶绿素 a 含量(Chla)、硝酸态氮浓度(NO_3^- -N)、亚硝态氮浓度(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、无机氮(DIN)、无机磷(DIP)、化学需氧量(COD)等 11 个环境指标由项目参加单位——宁波市象山港海洋环境监测站同期测定提供。上覆水的总氮(TN)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、活性磷酸盐(PO_4^{3-} -P)等环境指标由作者单位完成,标准溶液购自国家海洋局第二海洋研究所。样品的采集及分析均按照海洋监测规范 GB1273.6—1991 和海洋调查规范 GB17378—1998^[23-24]有关要求进行。

1.4 数据处理

细菌所有数据均为实测数据。对以上可能影响细菌数量的表(底)层海水的 11 个环境因子及上覆水的 4 个理化因子,采用 SPSS for Windows 11.5(USA, SPSS Inc.) 软件进行主成分分析因子分析(PCA),同时采用多元线性逐步回归分析方法,以主成分得分为解释变量,研究环境因子对细菌丰度的影响,以筛选影响该海区细菌丰度的重要环境因子。表层海水中的细菌数量与相应的表层海水理化因子进行多元回归分析;上覆水中的细菌数量与相应的上覆水中的理化因子进行相关性分析,并与底层海水的理化因子进行多元回归分析。

2 结果与分析

2.1 象山港海域细菌丰度的时空分布

2.1.1 象山港海域细菌丰度的总体分布

调查期间象山港海域细菌丰度实测值的变化范围为 1.50×10^5 — 9.78×10^{10} 个/mL,总均值为 2.76×10^9 个/mL。表层海水中细菌丰度为 1.14×10^5 — 8.72×10^8 个/mL,总均值为 9.70×10^7 个/mL;上覆水中细菌丰度在 2.13×10^5 — 1.35×10^{10} 个/mL,总均值为 7.40×10^9 个/mL;沉积物中细菌丰度为 2.16×10^5 — 9.78×10^{10} 个/g,总平均值为 4.61×10^9 个/g。上覆水、表层沉积物中细菌丰度显著高于表层海水细菌丰度($P < 0.05$),上覆水及沉积物样品无显著差异($P > 0.05$)。

2.1.2 空间分布

由图 2 可知,调查期间象山港海域表层海水中细菌丰度在不同季节表现不同。冬季、春季表层海水中细菌丰度在西沪港与主港汇合后的区域出现明显的高值区(S07、S09 站点附近,靠近奉化小狮子口港口),以此为中心向四周依次递减;冬季、春季、秋季在西沪港港顶的表层海水中浮游细菌丰度也较高;夏季在铁港汇入主港的港口西北方向海域表层海水细菌丰度出现明显高值区(S22 附近)。

由图 3 可知:不同季节的象山港上覆水中细菌丰度的水平分布特征不同,但基本上呈现由港顶到港口等值线由密集变稀疏的趋势,2007 年夏季在铁港汇入主港象山港的位置(靠近宁海强蛟国华电厂)出现明显高值区;2007 年秋季在铁港、西沪港及主港的交汇处,靠近宁海强蛟国华电厂海区上覆水中细菌丰度出现明显高值区,在黄墩港、西沪港的港内上覆水中浮游细菌丰度也明显较高;2008 年冬季上覆水中细菌丰度在铁港向西北方向红胜海塘方向的海域、以及由铁港、黄墩港及主港交汇处靠近宁海强蛟国华电厂海区向东北方向海域(向桐照渔港建设区及奉化凤凰山悬山渡假旅游区方向)出现明显高值区增加趋势,由港顶一直到缸爿山象山港中部海域的上覆水中细菌丰度均较高;2008 年春季,上覆水中浮游细菌丰度在西沪港及铁港港顶的等值线较密集,且呈现由主港向铁港、西沪港港内增加的趋势,在大嵩江入海口、象山港跨海桥横山西泽航道

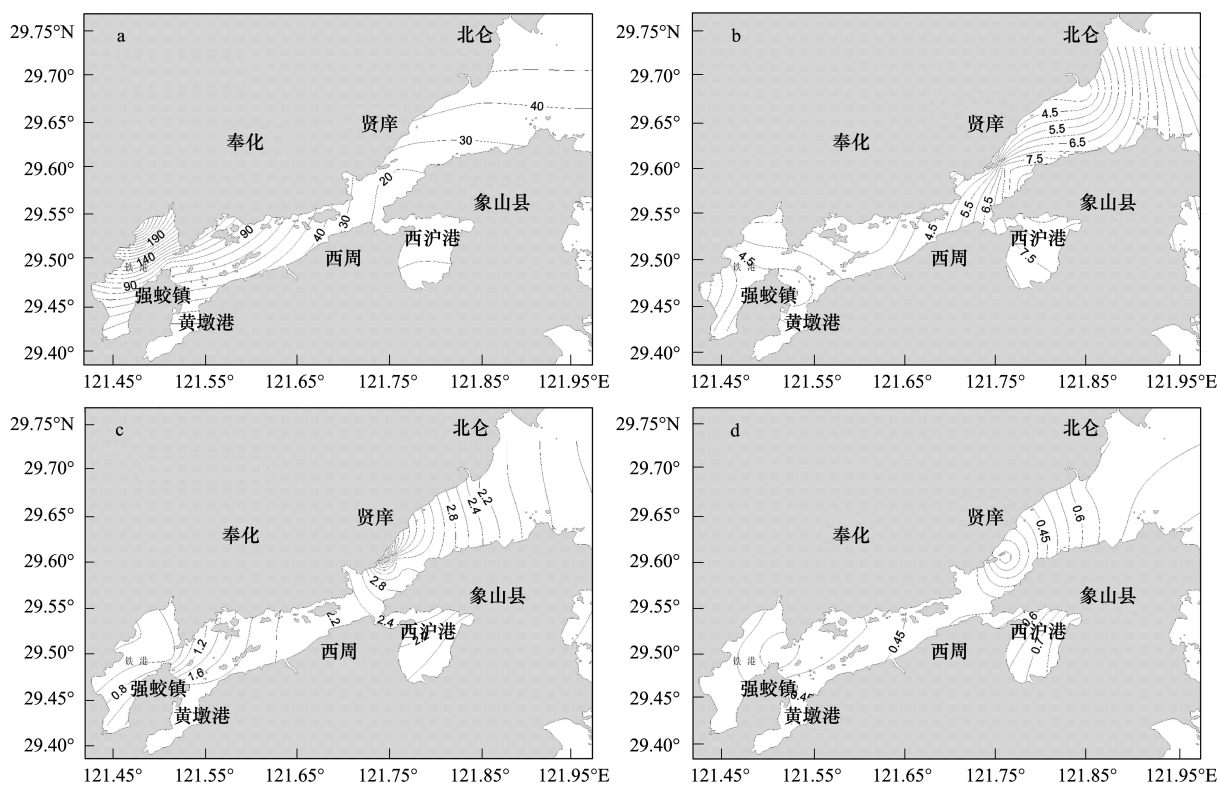


图2 表层海水中细菌丰度的平面分布图($\times 10^6$ 个/mL)

Fig. 2 Distribution of bacterioplankton in surface seawater in the horizontal direction

a, 200707 航次; b, 200711 航次; c, 200801 航次; d, 200804 航次. 以下各图均相同

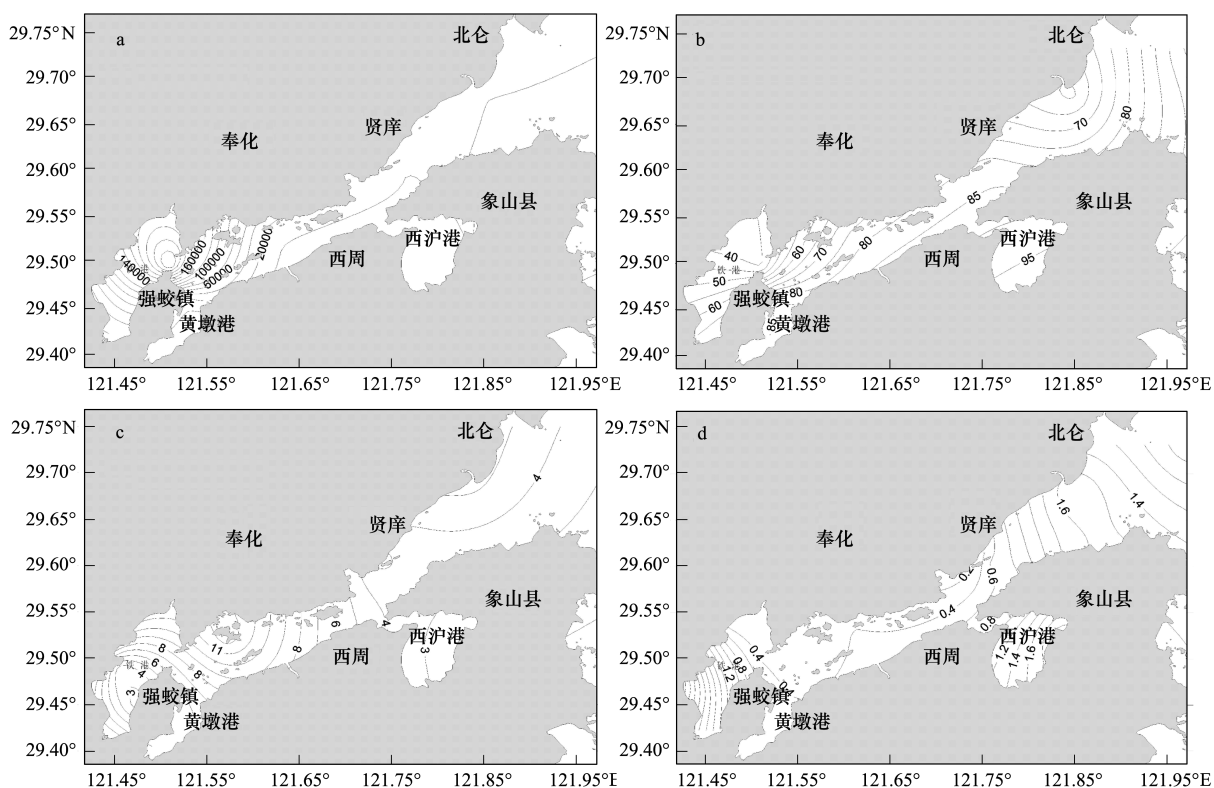


图3 上覆水中细菌丰度的平面分布图($\times 10^6$ 个/mL)

Fig. 3 Distribution of bacterioplankton in overlying water in the horizontal direction

及小昌门附近也出现一个明显高值区。

由图 4 可知:夏季表层沉积物中细菌丰度在铁港及黄墩港港顶等值线较密集,且越靠近港顶底栖细菌丰度越高,另外,2007 年夏季在大嵩江入海口处有一明显高值区域,表层沉积物中细菌丰度以此为中心向周边逐渐降低;2007 年秋季在铁港、西沪港港内等值线密集,且越靠近港顶表层沉积物中底栖细菌丰度越高,越靠近港口等值线越稀疏,另外,表层沉积物中细菌丰度在象山港中部的白石山附近(S17)也有一个明显高值区,以此为中心向周边逐渐降低;2008 年冬季在铁港、黄墩港港顶等值线密集,且越靠近港顶细菌丰度越高,另外,在大小列山附近有一低值区域,以此为中心底栖细菌丰度向周边有增多趋势,港口等值线稀疏。2008 年春季在表层沉积物中底栖细菌丰度在铁港、黄墩港及主港交汇处靠近宁海强蛟国华电厂附近的象山港顶部海区,以及大小列山及黄避岙附近的象山港中部海域均有一个明显高值区,以此为中心向周边逐渐降低,港口处细菌丰度最低。

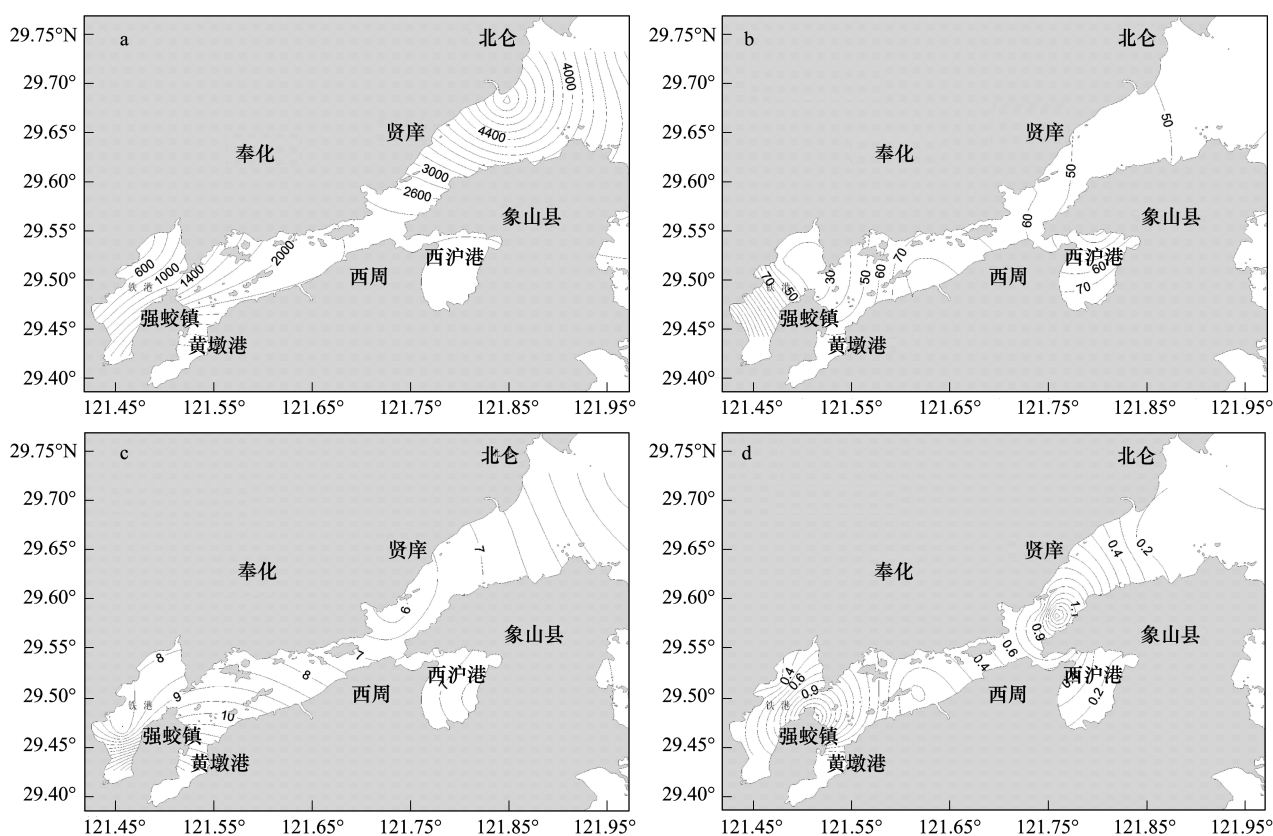


图 4 沉积物中细菌丰度的平面分布图($\times 10^6$ 个/g)

Fig. 4 Distribution of benthic bacteria in the sediment in the horizontal direction

综上所述,调查期间象山港海域细菌丰度较高的区域基本上位于人类活动影响较高的区域,如增养殖区附近、河流入海口、电厂温排水口附近、港顶等。象山港海域细菌的水平分布特征是该海域有机质污染(COD)、营养盐污染(富营养化)及电厂温排水的热效应的集中突出体现。支港内高度密集的人类的增养殖活动使支港内水体及表层沉积物中的有机污染物较高,最终导致支港港内高的细菌丰度;另外 3 个支港与主港汇合后的象山港中部仍然保持较高的浮游细菌丰度,有机污染物随着入海稀释,港口部分细菌降低;西沪港与主港汇合后的大小列山及奉化狮子口、黄避岙附近因周边密集的增养殖活动产生较多有机污染物以及较多的工业源产生的陆源污染物等,为细菌繁殖提供了丰富的基质,此处细菌丰度总是出现高值。国华电厂长时间运行产生的温排水使周围海域的水温升高,再加上周边增养殖活动产生的有机污染物及陆源污染物使铁港、黄墩港与主港交汇处尤其是宁海强蛟国华电厂附近存在丰富的有机质,上述 2 个诱因使国华电厂附近海

域浮游细菌丰度出现明显的高值区。

2.1.3 季节分布

调查期间象山港海域细菌丰度的季节变化趋势基本一致(图2—图4),夏季(7月)最高,远远高于其他季节;秋季(11月)略高于冬季(1月),二者无显著差异($P > 0.05$);2008年的春季(4月)的细菌丰度远远低于其他3个航次,该特殊现象与当时的赤潮暴发有关,同期的海区理化因子调查结果发现营养指数也最低。

2.3 细菌丰度与环境因子的关系

2.3.1 调查海区的理化化学环境

调查期间象山港海域表层、底层海水及上覆水中的理化因子监测结果如表1所示。

表1 象山港海域4个季度中表层海水及上覆水的各项指标参数的平均值及其变化范围

Table 1 Mean values and range of all parameters in the surface seawater and the overlying water in Xiangshan Bay during 4 seasons

季节 Seasons	因子 Factors	表层海水 Surface seawater		底层海水 Bottom seawater		上覆水 The overlying water	
		均值±SD Mean±SD	范围 Range	均值±SD Mean±SD	范围 Range	均值±SD Mean±SD	范围 Range
夏季 Summer	ST/°C	31.5±1.11	28.5—33.0	30.3±1.20	27.8—31.5	—	—
	SS/(mg/L)	28.54±0.719	27.47—29.38	28.76±0.484	27.91—29.27	—	—
	pH	8.09±0.04	8.04—8.14	8.08±0.03	8.03—8.11	—	—
	DO/(mg/L)	5.38±0.27	5.13—6.00	4.93±0.25	4.56—5.37	—	—
	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.544±0.087	0.391—0.697	0.577±0.037	0.528—0.632	—	—
	DIN/(mg/L)	0.626±0.110	0.469—0.880	0.645±0.0313	0.614—0.695	—	—
	NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.046±0.036	未检出—0.106	0.027±0.032	0.006—0.100	0.025±0.020	0.003—0.053
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.039±0.022	0.012—0.077	0.041±0.026	0.021—0.102	—	—
	DIP/(mg/L)	0.0542±0.0304	0.0183—0.1204	0.0489±0.0221	0.0208—0.0871	—	—
	Chla/(μg/L)	6.561±3.082	3.040—12.662	3.781±2.087	1.678—7.765	—	—
	COD/(mg/L)	1.37±0.38	0.67—1.86	1.22±0.33	0.94—1.84	—	—
	TN/(mg/L)	—	—	—	—	9.109±2.787	5.48—15.38
	PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	—	—	—	—	0.036±0.021	0.02—0.10
秋季 Autumn	ST/°C	19.8±0.98	18.1—20.8	20.1±0.62	18.7—20.6	—	—
	SS/(mg/L)	22.3±0.905	21.11—24.30	22.89±0.741	21.68—24.35	—	—
	pH	8.04±0.03	7.98—8.09	8.05±0.03	7.99—8.08	—	—
	DO/(mg/L)	6.98±0.13	6.80—7.15	6.62±0.10	6.50—6.82	—	—
	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.766±0.110	0.653—0.971	0.742±0.065	0.676—0.846	—	—
	DIN/(mg/L)	0.820±0.1126	0.643—1.008	0.787±0.069	0.712—0.879	—	—
	NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.006±0.005	0.002—0.017	0.003±0.002	0.001—0.006	0.013±0.021	0.000—0.065
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.0474±0.0225	0.019—0.086	0.041±0.018	0.023—0.074	0.100±0.144	0.000—0.481
	DIP/(mg/L)	0.0757±0.0339	0.0366—0.1640	0.0571±0.0145	0.0351—0.0864	—	—
	Chla/(μg/L)	1.512±0.864	0.872—3.506	0.891±0.302	—1.233	—	—
	COD/(mg/L)	0.85±0.17	0.68—1.34	0.80±0.15	0.473—1.02	—	—
	TN/(mg/L)	—	—	—	—	—	—
	PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	—	—	—	—	0.074±0.047	1.630—3.010
冬季 Winter	ST/°C	10.27±1.69	6.73—11.42	10.48±0.80	8.73—11.01	—	—
	SS/(mg/L)	25.20±0.803	23.25—26.12	25.70±0.53	24.56—26.16	—	—
	pH	7.99±0.14	7.64—8.12	8.04±0.09	7.85—8.09	—	—
	DO/(mg/L)	8.75±0.40	7.73—9.32	8.38±0.26	8.28—8.81	—	—
	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.694±0.092	0.592—0.889	0.627±0.072	0.549—0.752	—	—
	DIN/(mg/L)	0.760±0.161	0.618—1.179	0.674±0.106	0.565—0.894	—	—
	NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.013±0.014	0.001—0.051	0.006±0.007	0.001—0.022	0.038±0.024	0.007—0.063

续表

季节 Seasons	因子 Factors	表层海水 Surface seawater		底层海水 Bottom seawater		上覆水 The overlying water	
		均值±SD	范围	均值±SD	范围	均值±SD	范围
		Mean±SD	Range	Mean±SD	Range	Mean±SD	Range
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.054±0.078	0.007—0.289	0.042±0.043	0.011—0.120	—	—
	DIP/(mg/L)	0.069±0.039	0.0347—0.179	0.0467±0.0132	0.0334—0.0746	—	—
	Chla/(μg/L)	0.362±0.102	0.207—0.540	0.425±0.111	0.292—0.629	—	—
	COD/(mg/L)	0.837±0.321	0.59—1.83	1.18±0.60	0.66—2.42	—	—
	TN/(mg/L)	—	—	—	—	23.99±1.301	22.90—26.70
	PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	—	—	—	—	0.203±0.049	1.630—3.010
春季	ST/℃	14.90±0.940	13.60—16.20	13.99±0.840	12.80—15.60	—	—
Spring	SS/(mg/L)	25.74±0.902	23.51—26.47	26.32±0.540	25.22—27.04	—	—
	pH	7.91±0.08	7.69—7.98	7.93±0.03	7.97—7.96	—	—
	DO/(mg/L)	7.01±1.19	5.25—8.29	7.67±1.01	5.73—8.47	—	—
	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.491±0.063	0.327—0.597	0.496±0.039	0.407—0.535	—	—
	DIN/(mg/L)	0.563±0.144	0.363—0.925	0.531±0.065	0.423—0.631	—	—
	NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.018±0.017	0.003—0.065	0.009±0.009	0.001—0.026	0.017±0.017	0.001—0.050
	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.053±0.090	0.003—0.310	0.026±0.033	0.002—0.097	—	—
	DIP/(mg/L)	0.0513±0.0317	0.0292—0.137	0.0345±0.0097	0.0263—0.0539	—	—
	Chla/(μg/L)	1.525±0.534	0.960—2.701	1.03±0.39	0.501—1.772	—	—
	COD/(mg/L)	0.659±0.219	0.27—1.09	0.67±0.08	0.53—0.78	—	—
	TN/(mg/L)	—	—	—	—	11.06±1.357	9.347—14.08
	PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	—	—	—	—	0.060±0.035	0.021—0.136

—:未检测;表中表、底层海水理化指标数据为项目参加单位——宁波市象山港海洋环境监测站的同期实测数据;上覆水理化指标数据由本单位自行测定

2.4.2 环境因子的主成分分析及多元线性逐步回归分析

表2、表3分别为方差极大旋转后提取出的表层和底层海水的6个主成分的因子载荷量及各因子与主成分的相关性。表层海水的11个环境因子中提取出6个主成分(PCA),对方差的累计贡献率可达95.31%,能比较全面的反映原来11个环境因子的所有信息,其中,第一、二个主成分(PCA1,PCA2)的方差贡献率较高,

表2 表层海水主成分分析结果——因子载荷和解释方差(表层水)

Table 2 Results of principal component analysis of environmental factors-Various factors loading and explained variance (surface water)

变量 Variables	主成分1 PCA1	主成分2 PCA2	主成分3 PCA3	主成分4 PCA4	主成分5 PCA5	主成分6 PCA6
ST	0.870 ***	-0.062	-0.253	0.249	-0.111	0.240
SS	0.242	-0.491 ***	-0.154	0.591 ***	-0.456 **	0.156
pH	0.271	0.057	-0.848 ***	-0.043	-0.269	0.229
DO	-0.949 ***	0.124	-0.115	-0.098	0.007	-0.147
NO ₃ ⁻ -N	-0.147	0.955 ***	-0.056	-0.140	0.170	-0.025
DIN	-0.033	0.918 ***	0.330 *	-0.030	0.198	0.087
NO ₂ ⁻ -N	0.355 **	-0.067	0.334 *	0.660 ***	0.341 *	0.379 **
NH ₄ ⁺ -N	0.109	0.308 *	0.906 ***	-0.027	0.001	0.143
DIP	-0.014	0.362 **	0.167	0.091	0.872 ***	0.052
Chla	0.631 ***	-0.135	-0.148	0.621 ***	0.148	0.337 *
COD	0.373 **	0.058	-0.043	0.265	0.020	0.874 ***
特征值	2.488	2.269	1.915	1.345	1.259	1.208
方差贡献率/%	22.620	20.626	17.409	12.224	11.446	10.984

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.000$

在 20.63%—22.62%。从各因子的载荷矩阵可以看出, DO、ST、Chla 在第一主成分 (PCA1) 上有较高载荷, 其中 DO 的相关系数最高 0.949; NO_3^- -N、DIN 在第二主成分 (PCA2) 上有较高载荷, 其相关系数均高于 0.91; NH_4^+ -N、pH 在第三主成分 (PCA3) 上有较高载荷 (0.906、0.848); NO_2^- -N、Chla 在第四主成分 (PCA4) 上有较高载荷; DIP 在第五主成分 (PCA5) 上有较高载荷 (0.872); COD 在第六主成分 (PCA6) 上有较高载荷 (0.874)。底层海水的 11 个环境因子中提取出 6 个主成分 (PCA), 对方差的累计贡献率达 95.41%, 能比较全面地反映原来 11 个环境因子的所有信息。其中, 第一、二个主成分 (PCA1, PCA2) 的方差贡献率较高, 在 20.82%—27.30%。SS、 NO_3^- -N、DIN、DIP 在第一主成分 (PCA1) 上有较高载荷, SS、 NO_3^- -N、DIN 的相关系数高于 0.87 以上; DO、ST 在第二主成分 (PCA2) 上有较高载荷, 相关系数均高于 0.9; NO_2^- -N、Chla 在第三主成分 (PCA3) 上有较高载荷 (相关系数分别为 0.845、0.683); NH_4^+ -N 在第四主成分 (PCA4) 上有较高载荷, 相关系数为 0.953; pH 在第五主成分上有较高载荷, 相关系数为 0.920; COD 在第六主成分上有较高载荷, 相关系数为 0.979。

表 3 底层海水主成分分析结果——因子载荷和解释方差 (底层水)

变量 Variables	主成分 1 PCA1	主成分 2 PCA2	主成分 3 PCA3	主成分 4 PCA4	主成分 5 PCA5	主成分 6 PCA6
ST	-0.056	0.924 ***	0.241	0.045	0.164	0.035
SS	-0.916 ***	0.119	0.112	0.027	0.099	0.182
pH	0.148	0.044	-0.259	-0.012	0.920 ***	0.185
DO	-0.082	-0.936 ***	-0.188	-0.164	0.076	-0.004
Chla	-0.202	0.581 ***	0.683 ***	-0.158	-0.155	0.017
COD	0.002	0.027	-0.074	0.035	0.158	0.979 ***
NO_3^- -N	0.894 ***	-0.037	-0.172	0.134	0.283	0.156
NO_2^- -N	-0.177	0.398 *	0.845 ***	0.089	-0.248	-0.098
NH_4^+ -N	0.241	0.129	0.039	0.953 ***	-0.017	0.033
DIN	0.871 ***	0.074	0.012	0.368 *	0.216	0.137
DIP	0.666 ***	0.153	0.626 ***	0.196	-0.178	-0.131
特征值	3.003	2.290	1.782	1.164	1.158	1.097
方差贡献率/%	27.302	20.820	16.203	10.580	10.526	9.975

表层海水与上覆水中浮游细菌数量 (取 10 的对数) 分别与表层海水、底层海水的主成分 (PCAs) 得分进行多元逐步回归分析, 结果如表 4 所示。

表 4 表层海水细菌丰度与表层海水主成分的逐步回归分析结果

变量 Variable	表层海水中细菌丰度 The abundance of bacteriaoplankton in surface seawater		上覆水中细菌丰度 The abundance of bacteriaoplankton in the overlying water	
	回归系数 Coefficient	P	回归系数 Coefficient	P
常数	6.537	0.000	7.414	0.000
PCA1	0.488	0.000	0.167	0.231
PCA2	0.118	0.046	1.139	0.000
PCA3	-0.259	0.000	0.597	0.001
PCA4	0.158	0.008	0.034	0.799
PCA5	-0.113	0.054	0.449	0.002
PCA6	0.328	0.000	0.254	0.067

对表层海水,经逐步回归筛选后有 5 个主成分 PCA1、PCA2、PCA3、PCA4、PCA6 进入回归模型,且线性关系极显著($P < 0.000$)。回归方程为 $PBAS(\text{表层海水细菌丰度}) = 6.537 + 0.488 \times PCA1 + 0.118 \times PCA2 - 0.259 \times PCA3 + 0.158 \times PCA4 + 0.328 \times PCA6$ ($P < 0.000$),回归方程中细菌丰度的实际结果需作 10 的对数转换进行复原,该模型的决定系数为 0.759。通过以上回归方程以及 PCA1 (DO, -0.949; ST, 0.870; Chla, 0.631)、PCA2 (NO_3^- -N, 0.955; DIN, 0.918)、PCA3 (NH_4^+ -N, 0.906; pH, -0.848)、PCA4 (NO_3^- -N, 0.660; Chla, 0.621)、PCA6 (COD, 0.874) 的环境因子载荷量分析表明:调查期间象山港海域表层海水中细菌丰度与表层海水主成分 PCA1、PCA4、PCA6 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 PCA2 呈显著正相关($P < 0.05$),与 PCA3 呈极显著负相关($P < 0.01$)。

对上覆水,经逐步回归筛选后底层海水中有 3 个主成分 PCA2、PCA3、PCA5 进入回归模型,且线性关系极显著($P < 0.01$)。回归方程 $PBAO(\text{上覆水中细菌丰度}) = 7.414 + 1.139 \times PCA2 + 0.597 \times PCA3 + 0.449 \times PCA5$ ($P < 0.000$),回归方程中细菌丰度的实际结果需作 10 的对数转换进行复原,该模型的决定系数为 0.851。通过以上回归方程以及 PCA2 (DO, -0.936; ST, 0.924)、PCA3 (NO_2^- -N, 0.845; Chla, 0.683; DIP, 0.626)、PCA5 (pH, 0.920) 的环境因子载荷量分析表明:象山港海域上覆水中细菌丰度与底层海水主成分 PCA2、PCA3、PCA5 均呈极显著正相关($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 细菌丰度与 DO、水温的关系

通过回归方程 $PBAS(\text{表层海水细菌丰度}) = 6.537 + 0.488 \times PCA1 + 0.118 \times PCA2 - 0.259 \times PCA3 + 0.158 \times PCA4 + 0.328 \times PCA6$ ($P < 0.000$),以及 PCA1 (DO, -0.949; ST, 0.870; Chla, 0.631) 的环境因子载荷量分析表明:溶解氧 DO 是影响象山港海域表层海水中细菌丰度的最主要因素,次之为水温;象山港海域表层海水中细菌丰度与表层海水的 DO 呈极显著负相关($P < 0.01$),与水温呈极显著正相关($P < 0.01$),与表层海水的叶绿素 a 含量具有一定的正相关性。通过回归方程 $PBAO(\text{上覆水中细菌丰度}) = 7.414 + 1.139 \times PCA2 + 0.597 \times PCA3 + 0.449 \times PCA5$ ($P < 0.000$),以及 PCA2 (DO, -0.936; ST, 0.924) 的环境因子载荷量分析表明:溶解氧、水温也是影响象山港海域上覆水中细菌分布的最主要因素,且上覆水中细菌丰度与 DO 也呈极显著负相关,与水温也呈极显著正相关($P < 0.01$)。

水体中的溶解氧与细菌呈极显著负相关的现象可以做如下解释:溶氧的降低可能为一些专性或兼性厌氧细菌创造了良好的条件,导致水体浮游细菌的增多^[25]。海水温度直接影响着细菌的新陈代谢能力,对细菌种群具有强烈的选择作用;同时水温也会影响海区的初级生产能力,导致海区的有机质含量发生改变,从而间接影响细菌生产力。本调查海区细菌丰度的季节变化与水温呈显著意义的正相关关系均充分说明了水温对浮游细菌丰度的重要调节作用。

3.2 细菌丰度与氮、磷的关系

通过回归方程 $PBAS(\text{表层海水细菌丰度}) = 6.537 + 0.488 \times PCA1 + 0.118 \times PCA2 - 0.259 \times PCA3 + 0.158 \times PCA4 + 0.328 \times PCA6$ ($P < 0.000$),以及 PCA2 (NO_3^- -N, 0.955; DIN, 0.918)、PCA3 (NH_4^+ -N, 0.906; pH, -0.848)、PCA4 (NO_2^- -N, 0.660; Chla, 0.621) 的环境因子载荷量分析表明:表层海水中的氮营养盐(NO_3^- -N, DIN, NH_4^+ -N)是象山港海域表层海水中细菌丰度的主要的限制性因素,水体的 pH 也是限制性因素之一,且表层海水中细菌丰度与营养盐(NO_2^- -N)、pH 呈极显著正相关($P < 0.01$),与营养盐(NO_3^- -N、DIN)呈显著正相关($p < 0.05$),与 NH_4^+ -N 呈极显著负相关($P < 0.01$)。通过回归方程 $PBAO(\text{上覆水中浮游细菌丰度}) = 7.414 + 1.139 \times PCA2 + 0.597 \times PCA3 + 0.449 \times PCA5$ ($P < 0.000$),以及 PCA3 (NO_2^- -N, 0.845; Chla, 0.683; DIP, 0.626)、PCA5 (pH, 0.920) 的环境因子载荷量分析表明:pH、无机氮是上覆水中细菌丰度分布的主要限制性因素,细菌丰度与水体的叶绿素 a 含量、无机磷 DIP 也有一定的相关性,且上覆水中细菌丰度与氮、磷营养盐(NO_2^- -N、DIP)均呈极显著正相关($P < 0.01$)。

细菌的生长除了利用溶解有机质外,也需要利用溶解无机氮和溶解无机磷等营养盐作为氮源和磷源,只

有在充分的无机氮和无机磷存在的情况下,细菌才能有效的利用溶解有机质^[26]。除此之外,细菌可与浮游植物形成对无机磷酸盐的竞争,从而抑制浮游植物的生长^[27-29]。象山港海域水体中的溶解性无机氮与细菌丰度呈极显著正相关的现象说明了氮、磷作为营养底物对细菌生长的调控作用。

3.3 细菌丰度与叶绿素 a、COD 的关系

通过回归方程 PBAS(表层海水细菌丰度) = $6.537 + 0.488 \times \text{PCA1} + 0.118 \times \text{PCA2} - 0.259 \times \text{PCA3} + 0.158 \times \text{PCA4} + 0.328 \times \text{PCA6}$ ($P < 0.000$) 及 PCA4 ($\text{NO}_2\text{-N}$, 0.660; Chla, 0.621) 的环境因子载荷量,以及回归方程 PBAO(上覆水中细菌丰度) = $7.414 + 1.139 \times \text{PCA2} + 0.597 \times \text{PCA3} + 0.449 \times \text{PCA5}$ ($P < 0.000$) 及 PCA3 ($\text{NO}_2\text{-N}$, 0.845; Chla, 0.683; DIP, 0.626) 的环境因子载荷量分析说明:象山港海域浮游细菌丰度与叶绿素 a 浓度有一定的相关性。叶绿素浓度的高低反映着海洋中的浮游植物现存量的高低,而水生细菌与浮游植物的生长繁殖也有着相对密切的关系:水生细菌能够吸收浮游植物所产生的有机物质,促进微生物的二次生长,同时为浮游植物的生长提供必要的营养和生长因子,并调节浮游植物的微生长环境;细菌也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^[30-31]。本研究结果表明象山港海域表层海水与上覆水中的浮游细菌丰度与叶绿素 a 正相关性明显,说明由浮游植物产生的有机物是象山港细菌的主要营养来源之一,因此推测初级生产是影响象山港水域浮游细菌分布的重要因素。

由回归方程 PBAS(表层海水细菌丰度) = $6.537 + 0.488 \times \text{PCA1} + 0.118 \times \text{PCA2} - 0.259 \times \text{PCA3} + 0.158 \times \text{PCA4} + 0.328 \times \text{PCA6}$ ($P < 0.000$) 及 PCA6(COD, 0.874) 的环境因子载荷量分析表明:表层海水中细菌丰度与水体的 COD 呈极显著正相关($P < 0.01$)。COD 是衡量水体中有机质含量的重要指标。水体的有机质含量也是细菌丰度的重要影响因素。水体中的溶解有机物是异养细菌维持生命活动、进行生长繁殖最基本的营养源。海水增殖渔业产生的残饵碎屑和养殖生物的排泄物与分泌物含有丰富的有机质,均可成为细菌大量繁殖的温床,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^[32-36]。

3.4 细菌丰度与水体 pH 的关系

通过回归方程 PBAS(表层海水细菌丰度) = $6.537 + 0.488 \times \text{PCA1} + 0.118 \times \text{PCA2} - 0.259 \times \text{PCA3} + 0.158 \times \text{PCA4} + 0.328 \times \text{PCA6}$ ($P < 0.000$),以及 PCA3($\text{NH}_4^+\text{-N}$, 0.906; pH, -0.848) 的环境因子载荷量分析表明表层海水的 pH 也是影响表层海水浮游细菌丰度的主要因素,二者呈极显著正相关($P < 0.01$)。通过回归方程 PBAO(上覆水中细菌丰度) = $7.414 + 1.139 \times \text{PCA2} + 0.597 \times \text{PCA3} + 0.449 \times \text{PCA5}$ ($P < 0.000$),以及 PCA5(pH, 0.920) 的环境因子载荷量分析表明:pH 也是影响上覆水中细菌丰度的主要因素,二者也呈极显著正相关。陆源工业污水及电厂温排水的排放、港内养殖污水排放及网箱养殖活动、频繁发生的赤潮等区域生态灾害直接影响了该海域水体的 pH,从而直接影响细菌的生长繁殖。过低的 pH 不利于细菌的繁殖。

References:

- [1] Azam F, Fenchel T, Field J G, Gray J S, Meyer-Reil L A, Thingstad F. The ecological role of water\column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10: 257-263.
- [2] Xiao T. The study on marine bacterioplankton ecology. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 60-64.
- [3] Šestanović S, Šolić M, Krstulović N, Bogner D. Volume, abundance and biomass of sediment bacteria in the eastern mid Adriatic Sea. *Acta Adriatica*, 2005, 46(2): 177-191.
- [4] Cowan J L W, Pennock J R, Boynton W R. Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA): regulating factors and ecological significance. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 141: 229-245.
- [5] Kuwae T, Hosokawa Y. Determination of abundance and biovolume of bacteria in sediments by dual staining with 4', 6-diamidino-2-phenylindole and acridine orange: relationship to dispersion treatment and sediment characteristics. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(8): 3407-3412.
- [6] Billen G, Joiris C, Meyer-Reil L, Linderboom H. Role of bacteria in the North Sea ecosystem. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1990, 26(2/4): 265-293.
- [7] Schallenberg M, Kalff J. The ecology of sediment bacteria in lakes and comparisons with other aquatic ecosystems. *Ecology*, 1993, 74(3):

919-934.

- [8] Pace M L. Bacterial mortality and the fate of bacterial production. *Hydrobiologia*, 1988, 159(1): 41-49.
- [9] Bak R P M, Nieuwland G. Seasonal variation in bacterial and flagellate communities of deep-sea sediments in a monsoonal upwelling system. *Deep Sea Research*, 1997, 44: 1281-1292.
- [10] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. *Microbial Ecology*, 1997, 34(3): 199-209.
- [11] Van Duyl F C, Kop A J. Bacterial production in North Sea sediments: clues to seasonal and spatial variations. *Marine Biology*, 1994, 120(2): 323-337.
- [12] Li H B, Xiao T, Lu R H. The distribution of bacterioplankton in the Yellow Sea cold water Mass (YSCWM). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1012-1020.
- [13] Zhang Z, Meng X H, Xiao H, Tan H L, Teng H B, Tang X X. Distribution characteristics of viruses and bacteria and their relationships with environmental factors in summer and winter in coastal waters of Qingdao. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2008, 54(2): 209-214.
- [14] Zhou W H, Wang H K, Dong J D, Hu Y M, Zhang J L, Zhang S. Phytoplankton and bacterial biomass and their relationship with the environmental factors in autumn and winter in the Sanya Bay, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2633-2639.
- [15] Wang N. The Research on Bacterioplankton Ecology in Coastal Water of Qingdao in Shandong. Qingdao: Master thesis of Ocean University of China, 2008.
- [16] Ma J B, Dong Q X, Huang C J. The temporal and spatial distribution of bacterioplankton in a large scale mariculture located in Zhelin Bay, Eastern Guangdong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 477-485.
- [17] Bai X G. Analysis of Virioplankton Abundance and Correlation with Picoplankton and Heterotrophic Bacteria in the Northern Yellow Sea. Qingdao: Master thesis of Ocean University of China, 2007.
- [18] Lee C W, Bong C W. Bacterial abundance and production, and their relation to primary production in tropical coastal waters of Peninsular Malaysia. *Marine and Freshwater Research*, 2008, 59(1): 10-21.
- [19] Bong C W, Lee C W. Microbial abundance and nutrient concentration in riverine and coastal waters of North-East Langkawi. *Malaysian Journal of Science*, 2005, 24: 29-35.
- [20] Naganuma T, Kimura H, Karimoto R, V Pimenov N V. Abundance of planktonic thraustochytrids and bacteria and the concentration of particulate ATP in the Greenland and Norwegian Seas. *Polar Bioscience*, 2006, 20: 37-45.
- [21] Zhai B. Distribution Characteristics, Influential Factors and Pollution Assessment of Nitrogen and Phosphorus in Surface Sediments of Xiangshan Bay. Qingdao: Master thesis of Ocean University of China, 2006.
- [22] Helton R R, Liu L, Eric Wommack K. Assessment of factors influencing direct enumeration of viruses within estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(7): 4767-4774.
- [23] Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the Standardization Administration of China. PRC National standard-specifications for oceanographic survey (marine biological survey), GB 12763.6-1991. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [24] Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the Standardization Administration of China. PRC National standard-marine monitoring, GB17378-1998. Beijing: China Standard Press, 1998.
- [25] Fisher M M, Klug J L, Lauster G, Newton M, Triplett E W. Effects of resources and trophic interactions on freshwater bacterioplankton diversity. *Microbial Ecology*, 2000, 40(2): 125-138.
- [26] Donachie S P, Christian J R, Karl D M. Nutrient regulation of bacterial production and ectoenzyme activities in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II*, 2001, 48(8/9): 1719-1732.
- [27] Tupas L M, Koike I. Amino acid and ammonium utilization by heterotrophic marine bacteria grown in enriched seawater. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(5): 1145-1155.
- [28] Kirchman D L, Ducklow H W, McCarthy J J, Garside C. Biomass and nitrogen uptake by heterotrophic bacteria during the spring phytoplankton bloom in the North Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I*, 1994, 41(5/6): 879-895.
- [29] Bai J, Li K R, Zhang H F, Zhang J, Wei H, Liu D Y, Gao D M. Characters of variation and impacting factors of biomass of heterotrophic bacterioplankton in Jiaozhou Bay in summer. *Marine Sciences*, 2005, 29(11): 58-62.
- [30] Tanaka T, Rassoulzadegan F, Thingstad T F. Orthophosphate uptake by heterotrophic bacteria, cyanobacteria, and autotrophic nanoflagellates in Villefranche Bay, northwestern Mediterranean: vertical, seasonal, and short-term variations of the competitive relationship for phosphorus. *Limnology Oceanography*, 2004, 49(4): 1063-1072.
- [31] Zhou Y H, Pan J M, Ye Y, Zhou H Y. Relationship between bacterium, virus and phytoplankton and their effects to geochemical cycling in ocean.

Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(3): 340-345.

- [32] Ducklow H W. Factors regulating bottom-up control of bacteria biomass in open ocean plankton communities. Archiv für Hydrobiologie Beihefte Ergebnisse der Limnologie, 1992, 37: 207-217.
- [33] 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 Marine Science, 1999, 17(4): 51-57.
- [34] Liu C G, Ning X R, Cai Y M, Hao Q, Le F F. Bacterioplankton production in the Zhujiang River Estuary and the adjacent northern South China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2): 112-122.
- [35] Shi J X, Courties C, Chen Z Y, Hermin M N, Ning X R. The distribution patterns of bacteria and ATP in the Changjiang River estuary and its adjacent East China Sea. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(3): 288-296.
- [36] Goulden R. Attached and free bacteria in an estuary with abundant suspended solids. Journal of Applied Microbiology, 1977, 43(3): 399-405.

参考文献:

- [2] 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.
- [12] 李洪波, 肖天, 丁涛, 吕瑞华. 浮游细菌在黄海冷水团中的分布. 生态学报, 2006, 26(4): 1012-1020.
- [13] 张喆, 孟祥红, 肖慧, 谭海丽, 滕海波, 唐学玺. 青岛近岸水体夏冬季浮游病毒、细菌分布特征及其与环境因子的关系. 武汉大学学报: 理学版, 2008, 54(2): 209-214.
- [14] 周伟华, 王汉奎, 董俊德, 胡友木, 张建林, 张恩. 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. 生态学报, 2006, 26(8): 2633-2639.
- [15] 王娜. 山东青岛近岸海域浮游细菌的生态学研究. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [16] 马继波, 董巧香, 黄长江. 粤东大规模海水增养殖区柘林湾浮游细菌的时空分布. 生态学报, 2007, 27(2): 477-485.
- [17] 白晓歌. 北黄海浮游病毒的丰度变化及与微微型浮游植物、异养细菌相关性研究. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [21] 翟滨. 象山港表层沉积物中氮和磷的分布特征、影响因素及其污染评价. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [23] 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. 海洋调查规范 (GB 12763. 6—1991). 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [24] 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 (GB 17378—1998). 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [29] 白洁, 李岩然, 张昊飞, 张经, 魏皓, 刘东艳, 高冬梅. 胶州湾夏季异养浮游细菌的时空变化规律及影响因素. 海洋科学, 2005, 29(11): 58-62.
- [31] 周玉航, 潘建明, 叶瑛, 周怀阳. 细菌、病毒与浮游植物相互关系及其对海洋地球化学循环的作用. 台湾海峡, 2001, 20(3): 340-345.
- [34] 刘诚刚, 宁修仁, 蔡昱明, 郝镛, 乐凤凤. 南海北部及珠江口细菌生产力研究. 海洋学报, 2007, 29(2): 112-122.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 14 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The sensitivity of Xiamen's three industrial sectors to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (3863)
Desertification and change of landscape pattern in the Source Region of Yellow River	 HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al (3872)
Comparison of ecological significance of landscape diversity changes in karst mountains: a case study of 4 typical karst area in Guizhou Province	 LUO Guangjie, LI Yangbing, WANG Shijie, et al (3882)
Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors	 XU Hanqiu (3890)
Primary exploration on the ecological land use classification in Beijing	TANG Xiumei, CHEN Baiming, LU Qingbin, et al (3902)
Changes of spectral reflectance of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Abies nephrolepis</i> along altitudinal gradients in Changbai Mountain	 FAN Xiuhua, LIU Weiguo, LU Wenmin, et al (3910)
Biomass allocation patterns and allometric models of <i>Abies nephrolepis</i> Maxim	 WANG Jinsong, ZHANG Chunyu, FAN Xiuhua, et al (3918)
Niche analysis of dominant species of macrobenthic community at a tidal flat of Yushan Island	 JIAO Haifeng, SHI Huixiong, YOU Zhongjie, et al (3928)
The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows <i>passer montanus</i>	 YANG Zhihong, SHAO Shuli (3937)
The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China	 ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al (3947)
Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation	LI Caixia, SUN Jingsheng, ZHOU Xinguo, et al (3956)
Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to verticillium wilt (<i>Verticillium dahliae</i> Kleb.)	 ZHOU Baoli, CHEN Zhixia, DU Liang, et al (3964)
Biological cycle and accumulation of lanthanum in the forage-mushroom-soil system	 WENG Boqi, JIANG Zhaowei, WANG Yixiang, et al (3973)
Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed	 YU Jinxiang, ZHENG Bofu, LIU Yafei, et al (3980)
Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a <i>Caragana korshinskii</i> plantation	 SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (3990)
Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate	 LIANG Fei, TIAN Changyan (3999)
Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay	 YANG Jifang, WANG Haili, CHEN Fusheng, et al (4007)
Concentration of O ₃ at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in <i>Triticum aestivum</i>	 WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (4019)
Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue	 GONG Shuaishuai, HAN Jin, GAO Yanzheng, et al (4027)
Screening of highly-effective rhizobial strains on Alfalfa (<i>Medicago polymorpha</i>) in soil	 LIU Xiaoyun, GUO Zhenguo, LI Qiaoxian, et al (4034)
Geochemical evolution processes of soil major elements in the forest-dominated Jinshui River Basin, the upper Hanjiang River	 HE Wenming, ZHOU Jie, ZHANG Changsheng, et al (4042)
Integrating geographic features and weather data for methodology of rasterizing spring maize growth stages	 LIU Qin, YAN Changrong, MEI Xurong, et al (4056)
A model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse	 LI Gang, CHEN Yaru, DAI Jianfeng, et al (4062)
Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province	 HUANG Wei, ZHANG Junhua, LI Wenhong, et al (4072)
Review and Monograph	
Theoretical backgrounds and recent advances in avian molecular phylogeography	DONG Lu, ZHANG Yanyun (4082)
A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods	WANG Yicheng (4094)
Human activities are the principle cause of biotic homogenization	CHEN Guoqi, QIANG Sheng (4107)
Factors influencing the occurrence of <i>Ophiocordyceps sinensis</i>	ZHANG Guren, YU Junfeng, WU Guangguo, et al (4117)
Molecular detection of diversity of methanogens and methanotrophs in natural wetland soil	SHE Chenxing, TONG Chuan (4126)
Scientific Note	
Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River	GONG Lu, ZHANG Haifeng, LÜ Guanghui, et al (4136)
Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest	 ZHOU Xiaoqing, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4144)
The aerodynamic roughness length of biological soil crusts: a case study of Gurbantunggut Desert	 WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weimin, et al (4153)
Differences among population quantities and community structures of pests and their natural enemies in tea gardens of different altitudes	KE Shengbing, DANG Fenghua, BI Shoudong, et al (4161)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 14 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 14 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元