

李汝伟, 徐大鹏, 刘强, 等. 浙江近海海域浮游病毒和异养细菌的时空分布[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 41-48.

LI Ru wei, XU Da peng, LIU Qiang, et al. The spatial and temporal distribution of virioplankton and heterotrophic bacteria in the coastal waters of Zhejiang[J]. Ecological Science, 2017, 36(5): 41-48.

浙江近海海域浮游病毒和异养细菌的时空分布

李汝伟^{1,2}, 徐大鹏^{3,4}, 刘强^{1,2}, 姚天舜^{1,2}, 赵淑江^{1,2,*}, 焦念志^{3,4}

1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022
2. 浙江海洋大学舟山海洋碳汇联合监测站, 舟山 316022
3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005
4. 厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所, 厦门 361005

【摘要】为了解浙江近海海域浮游病毒和异养细菌的时空生态分布,于2014年11月(秋)、2015年1月(冬)、2015年5月(春)和2015年7月(夏)连续4个季节采集了浙江近海海域表层海水样品,采用流式细胞仪技术对样品浮游病毒和异养细菌丰度进行了检测,对其时空分布特征及与环境因子的相关性做了分析。从水平分布来看,在4个季节中浮游病毒、异养细菌丰度均为宁波、沈家门、岱山等沿岸海域站位的丰度低,远陆海域东极和枸杞站位的丰度高。从季节变化来看,浮游病毒、异养细菌丰度的季节分布特征同为夏>春>秋>冬,相关性分析结果表明,春、夏、秋、冬4个季节,浮游病毒丰度与异养细菌丰度均为显著正相关。浮游病毒丰度在春、秋、冬季节均与病毒/细菌比值(VBR)显著正相关;夏、秋季节均与盐度显著正相关;春、夏季节均与总磷显著负相关;春季分别与溶解氧、pH、化学耗氧量(COD)显著正相关。异养细菌在春、秋、冬季节均与VBR显著正相关;春、夏季节与溶解氧显著正相关,冬季与溶解氧显著负相关;春、夏季节与总磷显著负相关;秋、冬季节均与温度、盐度显著正相关;春、冬季节均与COD显著正相关。

关键词: 浙江近海; 浮游病毒; 异养细菌; 环境因子; 流式细胞仪

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.05.006 中图分类号: Q938.1 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2017)05-041-08

The spatial and temporal distribution of virioplankton and heterotrophic bacteria in the coastal waters of Zhejiang

LI Ruwei^{1,2}, XU Dapeng^{3,4}, LIU Qiang^{1,2}, YAO Tianshun^{1,2}, ZHAO Shujiang^{1,2,*}, JIAO Nianzhi^{3,4}

1. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China
2. Carbon Sink Time Series Station at Zhoushan, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China
3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China
4. Institute of Marine Microbes and Ecospheres, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: In order to investigate the spatial and temporal distribution of virioplankton and heterotrophic bacteria in the coastal waters of Zhejiang, the representative samples of sea water were collected in the coastal waters of Zhejiang for 4 consecutive seasons in November 2014 (Autumn), January 2015 (winter), May 2015 (spring) and July 2015 (summer). The distribution of virioplankton and heterotrophic bacteria was studied by flow cytometry, and the correlations between the abundances of virioplankton, heterotrophic bacteria and environmental factors were also analyzed. From the horizontal distribution, in the four seasons low abundance of virioplankton and heterotrophic bacteria was in the stations of Ningbo, Shenjiamen, Daishan immediate offshore area; high-abundance was in the stations of Dongji and Gouqi offshore area. From the seasonal distribution, the abundance of the virioplankton and heterotrophic bacteria was the same as that of

收稿日期: 2016-11-04; 修订日期: 2017-03-14

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项, 201505003 号; 201505025 号

作者简介: 李汝伟(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生态学, E-mail: 1264837924@qq.com

*通信作者: 赵淑江, 男, 副教授, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: sjzhao@zjou.edu.cn

summer>spring>autumn>winter. The abundance of virioplankton and heterotrophic bacteria was significantly and positively correlated in the 4 seasons. The abundance of virioplankton was significantly and positively correlated with VBR in spring, autumn and winter. The abundance of virioplankton was significantly and positively correlated with salinity in summer and autumn. The abundance of virioplankton was significantly and negatively correlated with TP in spring and summer. The abundance of virioplankton was significantly and positively correlated with dissolved oxygen, pH, COD in spring. The heterotrophic bacteria were significantly and positively correlated with VBR in spring, autumn and winter. The heterotrophic bacteria were significantly and positively correlated with dissolved oxygen in spring and summer but were significantly and negatively correlated with TP in spring and summer. The heterotrophic bacteria were significantly and positively correlated with temperature and salinity in autumn and winter. The heterotrophic bacteria were significantly and positively correlated with COD in spring and winter.

Key words: Zhejiang coastal waters; virioplankton; heterotrophic bacteria; environmental factor; flow cytometer

1 前言

浮游病毒是指悬浮在水体中各类病毒的总称,主要为噬菌体和噬藻体病毒。异养细菌是海洋微生物群落的重要组成部分。微食物环理论的提出使异养细菌“二次生产力”的功能得到认识,异养细菌生产力相当于海区初级生产力的10%—80%^[1],足见异养细菌在海洋生态系统碳循环中的重要作用。“病毒环”(Viral loop)的发现使人们认识到浮游病毒在物质循环和能量流动中的重要作用^[2]。浮游病毒还通过对特定宿主进行侵染、裂解对微生物的群落结构以及多样性具有重要的调控作用^[3-4]。浮游病毒和异养细菌是生命和非生命系统之间联系的关键环节,也是生源要素循环的重要驱动力^[5-6]。鉴于浮游病毒和异养细菌对海洋生态系统有着重要的影响,因此了解它们的时空分布及变化特征对理解海洋生态环境变化和海洋物质循环具有重要意义。

浙江近海海域分布着众多渔场,其中以舟山渔场最为著名。舟山渔场南起29°30'N、北至31°N,西自长江口和杭州湾沿岸、东至125°E附近。面积约 5.3×10^4 km²。舟山渔场沿岸有长江、钱塘江、甬江等多条河流在此入海,大量淡水的注入带来了丰富的营养物质,优越的地理和水文环境造就了我国最大的渔场^[7]。近年舟山渔场渔业资源逐渐衰退,引起了人们对舟山渔场生态系统健康的关注^[8-9]。白晓歌等曾利用荧光显微技术对长江口、北黄海及青岛近岸等海域的浮游病毒丰度进行了调查^[10]。近年来也有对渤海、南黄海、厦门及台湾北部沿海等海域浮游病毒的调查^[11-14]。从上世纪90年代起,先后对长江口及其附近海域、广东大鹏湾、东海等海域水体的浮游细菌数量、生物量或细菌生产力的分布特征等进行了研究^[15-17]。但目前专门关于浙江近海舟山渔场海域浮游病毒和异养细菌的报道还不多。本文

利用流式细胞仪技术对浙江近海海域浮游病毒和异养细菌的动态变化及其与环境因子之间的相关性进行了分析,以期为该海域生态环境变化和海洋生态系统健康机制研究提供一些基础资料。

2 材料与方法

2.1 采样时间与站位设定

本研究采样站点位于浙江近海舟山渔场海域,分别于2014年11月(秋季)、2015年1月(冬季)、2015年5月(春季)、2015年7月(夏季)4个季节进行调查研究。根据距离大陆海岸由近到远共设置5个站位,分别为宁波站位(121°59'31.5"E, 29°53'22.5"N)、沈家门站位(122°18'47.6"E, 29°56'22.2"N)、岱山站位(122°11'20.2"E, 30°14'34.3"N)、东极站位(122°41'52.1"E, 30°12'26.1"N)、枸杞站位(122°47'21.0"E, 30°43'9.0"N)(图1)。

2.2 样品的采集与保存

根据国标GB17378.3-2007海洋监测规范样品采集部分^[18]规定,确定采样水层为表层海水,采样深度为0.5 m。样品采用20 μm筛绢预过滤至小烧杯中,润洗2—3次;吸取适量预过滤水样至2 mL冻存管中,加入戊二醛(终浓度为0.5%)固定,在室温下避光放置20 min,放入液氮中速冻,后转入-80 °C超低温冰箱保存。

2.3 环境理化参数的测定

pH由Thermo A221 pH计现场测得,温度、溶解氧由YSI-550A溶氧仪现场测得,COD(化学耗氧量)、总磷、氨氮等营养盐指标按照国标GB17378.3—2007海洋监测规范样品采集部分^[18]规定,采集表层海水(深度0.5 m)500 mL,用Whatman公司产孔径为0.45 μm滤膜过滤水样至事先清洗干净的塑料瓶中,后放入冷藏保温箱中运回实验室,采用兰州连华科技多参数水质分析仪(5B-2H)测定。

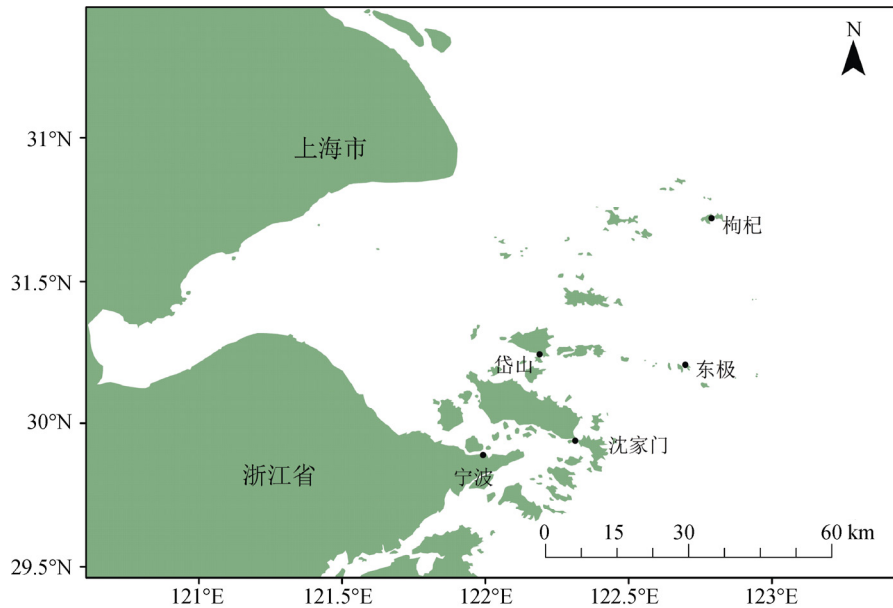


图 1 浙江近海海域采样站位

Fig. 1 Sampling stations in the coastal waters of Zhejiang

2.4 浮游病毒、异养细菌丰度检测

浮游病毒丰度检测, 将冻存水样置于37 °C水浴中避光解冻, 吸取1 mL的样品(用0.02 μm过滤的Tris-EDTA缓冲液稀释)至专用的流式分析试管中, 加入终浓度为0.5×的SYBR Green I, 混合均匀, 然后在80 °C水浴锅中, 避光染色10 min。从80 °C水浴锅中取出样品在室温下避光培养5 min, 加入1 μm的标准荧光小球作为内参, 混合均匀, 并将其浓度控制在样品总浓度的1%左右, 以获得较好的显示效果。上样至流式细胞仪(BC Epics Altra II)分析, 记录实验结果。

异养细菌丰度检测, 同样将冻存水样37 °C水浴中避光解冻, 吸取1 mL的样品至专用的流式分析试管中, 加入终浓度为1×的SYBR Green I, 混合均匀, 然后在黑暗条件下培养15 min。然后加入1 μm的标准荧光小球作为内参, 混合均匀, 并将其浓度控制在样品总浓度的1%左右, 继而上样分析。

2.5 数据分析

运用FCS Express V3软件读取浮游病毒、异养细菌丰度数据。采用arcGIS10.0地理信息系统软件制作浮游病毒、异养细菌4个季节的丰度分布图以及采样站位分布图。利用SPSS18.0软件对4个季节不同站位浮游病毒、异养细菌丰度的差异性进行分析, 并用Pearson相关系数法综合分析浮游病毒与异养细菌丰度及环境因子之间4个季节的相关性。

3 结果

3.1 浮游病毒的分布特征

春季, 浮游病毒丰度范围为 1.19×10^6 — 2.12×10^7 个·mL⁻¹之间, 平均值为 8.87×10^6 个·mL⁻¹。夏季, 浮游病毒丰度范围为 1.16×10^6 — 2.97×10^7 个·mL⁻¹之间, 平均值为 1.15×10^7 个·mL⁻¹。秋季, 浮游病毒丰度范围为 1.03×10^5 — 1.71×10^6 个·mL⁻¹之间, 平均值为 7.29×10^5 个·mL⁻¹。冬季, 浮游病毒丰度范围为 5.80×10^4 — 1.24×10^6 个·mL⁻¹之间, 平均值为 4.26×10^5 个·mL⁻¹。春、夏、秋、冬4个季节浮游病毒丰度均表现为东极和枸杞站位高, 宁波、沈家门、岱山站位低。春、秋季节浮游病毒丰度最高值出现在东极站位, 夏、冬季节最高值出现在枸杞站位; 春、夏季节浮游病毒丰度最低值均为岱山站位, 秋季浮游病毒丰度最低值为沈家门站位, 冬季浮游病毒丰度最低值为宁波站位(图2)。

通过对4个季节浮游病毒丰度独立样本均值的检验发现, 5个站位夏季浮游病毒丰度最高, 春季次之, 冬季最低。夏季与冬季浮游病毒丰度差异性显著($P < 0.05$), 与秋季浮游病毒丰度差异性显著($P < 0.05$), 与春季浮游病毒丰度差异性不显著($P > 0.05$)。

3.2 异养细菌的分布特征

春季, 异养细菌丰度范围为 1.68×10^5 — 1.85×10^6

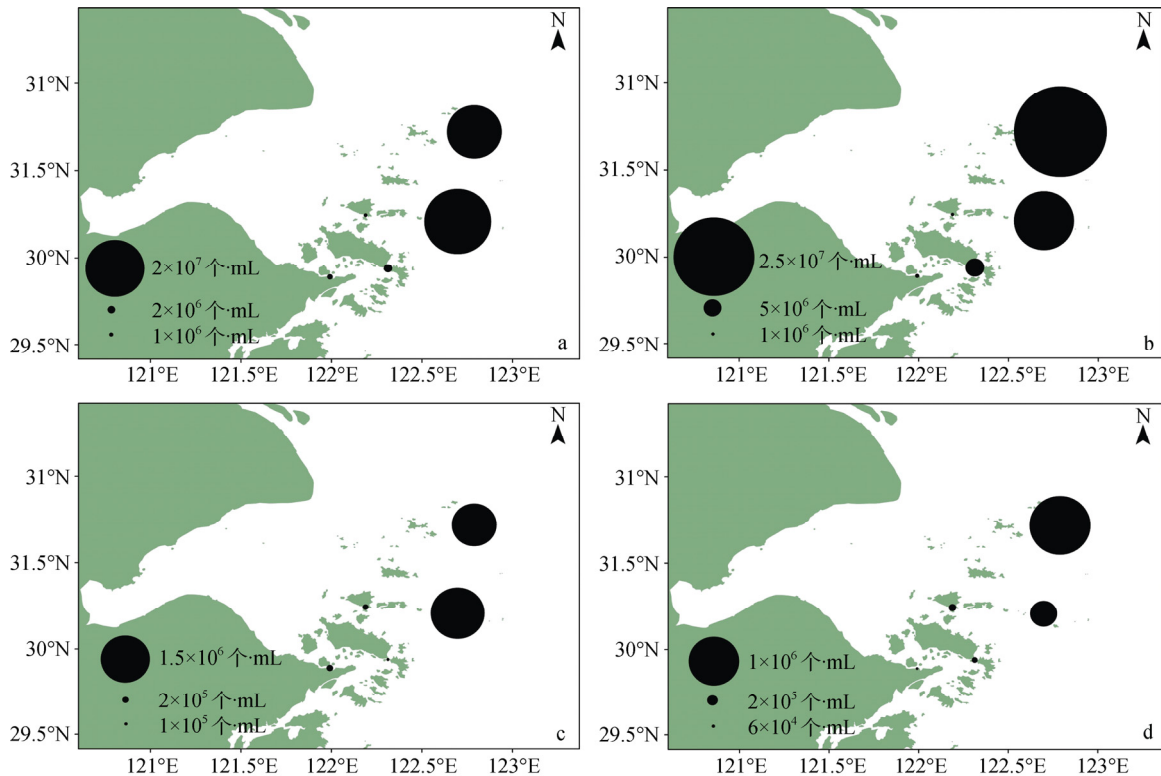


图2 浙江近海海域浮游病毒丰度的分布

注: a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季(下同)。

Fig. 2 Distribution of virioplankton abundance in the coastal waters of Zhejiang

个·mL⁻¹之间, 平均值为 8.55×10^5 个·mL⁻¹。夏季, 异养细菌丰度范围为 6.36×10^4 — 2.36×10^6 个·mL⁻¹之间, 平均值为 1.12×10^6 个·mL⁻¹。秋季, 异养细菌丰度范围为 2.15×10^5 — 1.09×10^6 个·mL⁻¹之间, 平均值为 5.58×10^5 个·mL⁻¹。冬季, 异养细菌丰度范围为 1.87×10^5 — 5.09×10^5 个·mL⁻¹之间, 平均值为 3.43×10^5 个·mL⁻¹。春、夏、秋、冬4个季节异养细菌丰度均表现为东极和枸杞站位高, 宁波、沈家门、岱山站位低。春、夏季异养细菌丰度最高值均为东极站位, 秋、冬季节异养细菌丰度最高值均为枸杞站位; 春、夏、冬季节异养细菌丰度最低值均为岱山站位, 秋季异养细菌丰度最低值为沈家门站位。(图3)。

通过对4个季节异养细菌丰度独立样本均值的检验发现, 夏季细菌丰度最高, 春季次之, 冬季细菌丰度最低。夏季与冬季细菌丰度差异性显著($P < 0.05$), 与其它季节差异性不显著($P > 0.05$)。

3.3 浮游病毒丰度与异养细菌丰度及其与环境因子的相关性

春季, 浮游病毒丰度与细菌丰度显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.995$), 与COD显著正相关($P < 0.05$,

$r = 0.654$), 与VBR、DO、pH显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.777$, $r = 0.802$, $r = 0.916$), 与总磷、氨氮显著负相关($P < 0.05$, $r = -0.652$, $r = -0.728$)。细菌丰度与pH显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.909$), 与VBR、DO、COD显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.723$, $r = 0.749$, $r = 0.720$), 与总磷、氨氮显著负相关($P < 0.05$, $r = -0.701$, $r = -0.739$)(表1)。

夏季, 浮游病毒丰度与细菌丰度、氨氮显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.880$, $r = 0.772$), 与盐度显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.755$), 与总磷显著负相关($P < 0.05$, $r = -0.700$)。细菌丰度与DO显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.825$), 与总磷显著负相关($P < 0.01$, $r = -0.787$)(表1)。

秋季, 浮游病毒丰度与细菌丰度、VBR显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.871$, $r = 0.939$), 与盐度显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.725$)。细菌丰度与VBR、温度、盐度显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.657$, $r = 0.744$, $r = 0.675$)(表1)。

冬季, 浮游病毒与细菌丰度、VBR、温度显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.857$, $r = 0.981$, $r = 0.944$), 与DO显著负相关($P < 0.01$, $r = -0.945$), 与氨氮显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.719$)。细菌丰度与VBR、盐度、温度、COD显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.768$, $r = 0.899$, $r = 0.957$, $r = 0.800$), 与DO显著负相关($P < 0.01$, $r = -0.831$)(表1)。

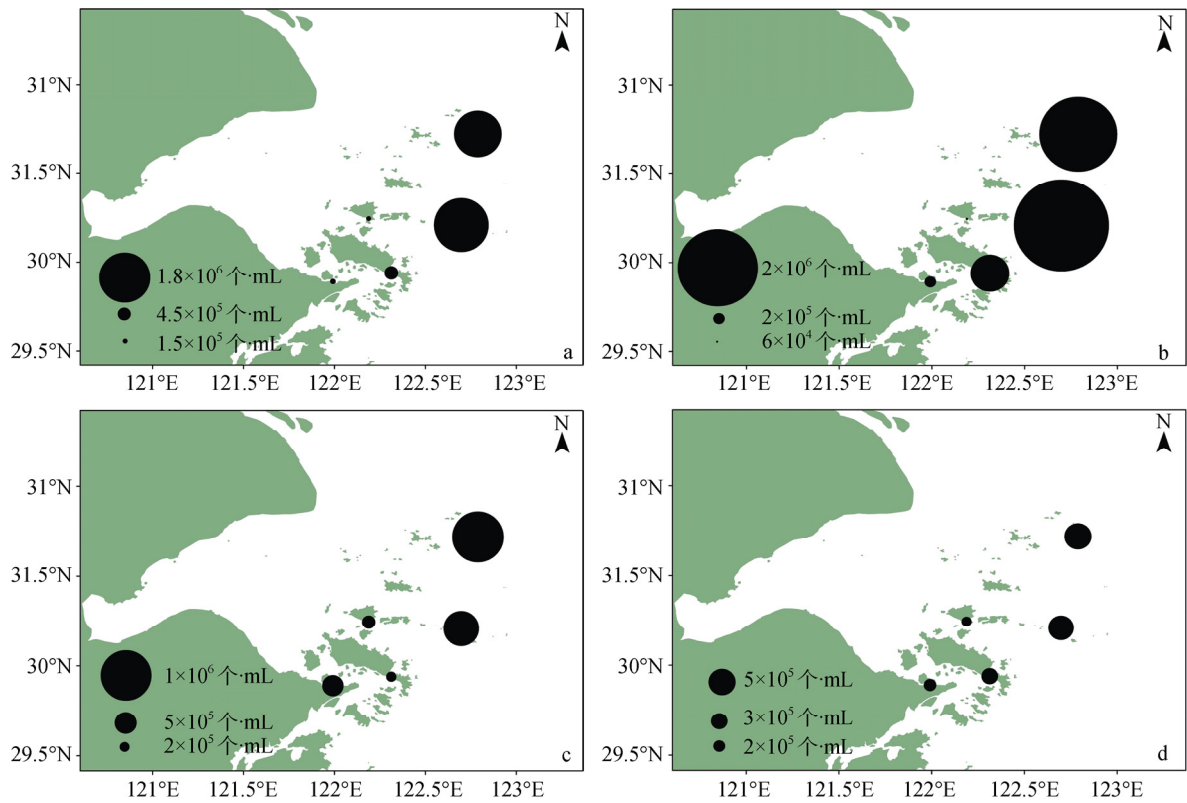


图 3 浙江近海海域异养细菌丰度的分布

Fig. 3 Distribution of Heterotrophic bacteria abundance in the coastal waters of Zhejiang

表 1 浮游病毒丰度与异养细菌丰度、环境因子间 4 个季节的 Pearson 相关系数

Tab. 1 Pearson correlation coefficients among virioplankton abundance, heterotrophic bacteria abundance and environmental factors in the four seasons

相关影响因子	Vir				Hb			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
Hb	.995**	.880**	.871**	.857**				
VBR	.777**	0.251	.939**	.981**	.723*	-0.071	.657*	.768**
Sal	0.55	.755*	.725*	0.607	0.629	0.526	.675*	.899**
DO	.802**	0.558	0.147	-.945**	.749*	.825**	-0.201	-.831**
pH	.916**	-0.239	0.366	0.363	.909**	0.231	0.355	0.509
Tem	0.082	0.298	0.567	.944**	0.155	0.234	.744*	.957**
COD	.654*	0.211	0.432	0.521	.720*	0.087	0.319	.800**
TP	-.652*	-.700*	-0.457	0.011	-.701*	-.787**	-0.432	-0.148
NH ₄ ⁺ -N	-.728*	.772**	-0.121	.719*	-.739*	0.619	-0.041	0.28

注: Vir: 浮游病毒; Hb: 异养细菌; Sal: 盐度; Do: 溶解氧; Tem: 温度; TP: 总磷; NH₄⁺-N: 氨氮; * $P < 0.05$ 水平的显著相关性(双尾 t 检验), ** $P < 0.01$ 水平的显著相关性(双尾 t 检验)。

4 讨论

4.1 浮游病毒和异养细菌的时空分布差异

4.1.1 浮游病毒丰度的时空分布差异

本文调查海域浮游病毒丰度在春、夏、秋、冬 4

个季节均表现为宁波、沈家门、岱山站位丰度低, 东极和枸杞站位丰度高。其原因可能是宁波、沈家门、岱山站位离沿岸较近, 沿岸多条河流冲淡水的影响, 每年长江携带大量泥沙入海, 超过 50% 的悬浮泥沙进入杭州湾以及向南沿浙闽海岸输送^[19]。这些泥沙

使得水层透光度下降,致使水体中初级生产力降低,生物量减少。水体中含沙量增加本身对病毒丰度的检测也是有一定影响的,所以病毒丰度较低。东极和枸杞站位全年丰度较高,其位置处于长江入海口附近,长江等其它河流在此入海,带来了大量营养盐和有机物。杭州湾沿岸是我国经济发达的长三角工业区,大量的工业污水和生活污水流入,浮游植物和异养细菌大量繁殖,同时有利于浮游病毒的繁殖和释放,所以浮游病毒丰度高。

夏季浮游病毒丰度在4个季节中最高,原因可能是杭州湾及附近海域属于大陆架海底地貌,水深浅,夏季太阳辐射强烈,光合作用强,异养细菌和超微型浮游植物等宿主的数量增加,浮游病毒大量繁殖和释放,导致水体中浮游病毒丰度增加。这与已发现的许多水域浮游病毒丰度有明显的季节变化,夏季浮游病毒丰度高,冬季浮游病毒丰度低^[20]的结果相一致。

4.1.2 异养细菌丰度的时空分布差异

异养细菌丰度在4个季节的分布也表现为宁波、沈家门、岱山站位丰度普遍较低,这3个站位距离海岸较近,长江每年带来大量的泥沙^[19],水体浊度很高,水色和透明度全年沿岸低于外海^[21],临近人类活动密集区,水深浅,透光性差,初级生产力较低,生物量比较少。东极和枸杞站位细菌丰度全年较其它3个站位丰度高。东极和枸杞站位相对其它3个站位距离海岸要远得多,但从东海海底地貌来看,东极和枸杞正处于现代河口水下三角洲之上^[22],水深较浅,但透光性更强。其特殊的地理位置使其深受长江冲淡水影响,长江等其它河流带来了大量营养盐和有机物,初级生产力较高,异养细菌的丰度也很高,丰度最高值基本在 10^6 个·mL⁻¹。最近对日本相模湾沿海水域细菌生长的研究表明,细菌很大程度上受到溶解有机碳的影响^[23]。推测东极和枸杞站位受外源性溶解有机碳输入影响可能是支持东海陆架区异养细菌丰度较高的因素。

夏季异养细菌丰度在4个季节中也最高,7月正处于长江丰水期,充沛的长江水量入海,此时长江冲淡水对该海区影响最强烈。这可能与夏季浮游植物丰度高产生的溶解有机碳外,陆源人为的溶解有机碳输入也有很大关系。Tsai等最近发现夏季东海细菌的丰度范围为 $(1.1—15.7) \times 10^5$ 个·mL⁻¹^[24],本文也表现出类似的调查结果。

4.2 浮游病毒和异养细菌丰度及其与环境因子的相关性

4.2.1 浮游病毒与异养细菌的相关性

VBR (Virus-to-Bacterium Ratio)是研究浮游病毒和异养细菌相互关系的一个常用指标,通常情况下为3—10。Wommack等认为高的VBR可能代表高的病毒生产力和细菌裂解量,在营养盐丰富、初级生产力高的海域,细菌生长迅速,使病毒与细菌的碰撞几率提高,病毒释放量增加,从而可产生更多的病毒颗粒,会使VBR有所提高^[25]。本文浮游病毒丰度全年除夏季外均与VBR显著正相关,VBR值春季5.84—11.47之间,均值为8.97;夏季为6.24—18.21之间,均值为10.55;秋季为0.48—2.28之间,均值为1.04;冬季为0.40—1.39,均值为1.02。全年为1.02—10.55,均值为5.39。VBR春、夏两季明显高于秋、冬两季。李洪波等检测到北戴河和天津沿海岸域的VBR为1.75—26.51,平均值为6.22^[11]。

春、夏、秋、冬4个季节,浮游病毒丰度与异养细菌丰度显著正相关。这与最近报道的在台湾北部沿海、大堡礁等海域微生物调查结果相一致^[26-27]。有研究表明,长江口海域绝大多数浮游病毒为噬菌体^[28],浮游病毒对异养细菌的裂解使浮游病毒大量复制繁殖。最近发现桡足类等浮游动物会作为病毒的载体提高病毒对宿主的接触率,加速对宿主的裂解^[29]。这也是浮游病毒丰度与异养细菌丰度显著正相关的重要原因。

4.2.2 浮游病毒、异养细菌与环境因子的相关性

结果表明,浮游病毒丰度仅在冬季与温度显著正相关。有研究表明,随水温的降低,浮游病毒丰度也会随之降低^[14]。春季,浮游病毒与COD、溶解氧显著正相关。本文研究海域受杭州湾沿岸大量生产生活污水排放以及河流影响,该海域富营养化程度高,浮游病毒的宿主细菌、藻类大量繁殖,间接上使病毒丰度增加;由于水体中含氧量较高,有利于藻类和异养细菌的生长,这也会导致浮游病毒丰度升高。

本文夏、冬季节浮游病毒与氨氮显著正相关,张喆也发现夏、冬季节山东近岸浮游病毒丰度与海水中硝酸盐含量呈显著正相关关系^[30]。产生该现象的原因可能是超微型自养生物含有较丰富的N和P^[31],病毒裂解细菌和藻类宿主细胞后,释放了大量的胞内物质到水环境中,造成氨氮含量较高。

春季,浮游病毒丰度、异养细菌丰度均与pH、

溶解氧显著正相关; 异养细菌丰度与氨氮、总磷均为显著负相关。王小平等对广东红海湾水域溶解氧、pH分布特征的研究发现, 光合作用是导致溶解氧含量和pH值升高的主要原因^[32]。石晓勇等对东海溶解氧和pH分布的调查中发现, 海水pH与溶解氧间呈显著正相关^[33]。说明海水相对较高的pH和溶解氧值更有利于水生生物的生存。刘卫云等在枸杞岛的研究结果显示, 异养细菌丰度与铵盐呈负相关, 说明异养细菌利用铵盐作为氮源促进生长繁殖, 表明氨氮是调节细菌丰度的重要因子^[34]。本文东极和枸杞站位处于距离海岸较远的位置, 也表现出类似的调查结果。近岸河口区域颗粒物的沉积速率大^[35], 附着在这些颗粒物上的异养细菌也会沉降于海底, 造成海水中异养细菌数量的减少, 而本文距离海岸较近的宁波、岱山、沈家门调查区域正处于杭州湾和长江入海口影响范围内。这也可能是造成异养细菌与氨氮、总磷显著负相关的原因。

异养细菌对无机氮和无机磷的利用, 会使氨氮、总磷浓度降低^[36]。Parvathi等对印度西南沿海的微生物研究中发现, 浮游病毒与硝酸盐和磷酸盐呈负相关^[37]。Tsiola等发现超微型光合浮游生物光合作用会对N、P进行吸收^[38]。因此春季浮游病毒丰度与氨氮、总磷呈显著负相关关系与其宿主对环境因子的利用也是密不可分的。

参考文献

- [1] AZAM F, FENCHEL T, FIELD J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10(3): 257–264.
- [2] FUHRMAN J A. Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects[J]. *Nature*, 1999, 399(6736): 541–548.
- [3] MILLER R V. Environmental bacteriophage-host interactions: factors contributing to natural transduction[J]. *Antonie Leeuwenhoek*, 2001, 79(2): 141–147.
- [4] BENCH S R, HANSON T E, WILLIAMSON K E. Metagenomic characterization of Chesapeake Bay viroplankton[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(23): 7629–7641.
- [5] ZUBKOV M V, QUARTLY G D. Ultraplankton distribution in surface waters of the Mozambique Channel—flow cytometry and satellite imagery[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 33(2): 155–161.
- [6] LABONTE J M, SWAN B K, POULOS B, et al. Single-cell genomics-based analysis of virus-host interactions in marine surface bacterioplankton[J]. *International Society for Microbial Ecology*, 2015, 9(11): 2386–2399.
- [7] 俞存根. 舟山渔场渔业生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] 俞存根, 陈全震, 陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域鱼类种类组成和数量分布[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 410–417.
- [9] ZHAO Shujiang, LV Baoqiang, Li Ruwei, et al. A preliminary analysis of fishery resource exhaustion in the context of biodiversity decline[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 223–235.
- [10] 白晓歌, 汪岷, 马晶晶, 等. 冬季和春季长江口及其近海水域浮游病毒丰度的分析[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(4): 367–372.
- [11] 李洪波, 崔向阳, 林凤翔, 等. 河北近岸海域浮游细菌与病毒的关系[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(2): 187–190.
- [12] 王艳, 汪岷, 杨琳, 等. 南黄海秋季浮游病毒丰度分布及其与宿主和环境因子的相关性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 198–204.
- [13] 蔡兰兰, 殷思博, 杨芸兰, 等. 厦门海域春季浮游病毒的丰度及形态多样性分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(6): 829–836.
- [14] TSAI A Y, GONG G C, HUNG J. Seasonal variations of virus-and nanoflagellate-mediated mortality of heterotrophic bacteria in the coastal ecosystem of subtropical western Pacific[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(5): 3055–3065.
- [15] 宁修仁, 库蒂 C. 长江口及冲淡水区叶绿素 a、细菌、ATP、POC 及微生物呼吸作用速率之间的关系[J]. *海洋学报*, 1991, 13(6): 831–837.
- [16] 姜发军, 胡章立, 胡超群. 大鹏湾浮游细菌时空分布与环境因子的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, 3(1): 96–100.
- [17] 卢龙飞, 汪岷, 梁彦韬, 等. 东海、黄海浮游病毒及异养细菌的分布研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(5): 1339–1346.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB17378.3-2007 海洋监测规范. 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [19] 刘红, 何青, GERT J W, 等. 长江入海泥沙的交换和输移过程——兼论泥质区的“泥库”效应[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 291–304.
- [20] 王健, 汪岷, 刘哲, 等. 渤海浮游病毒的时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1597–1603.
- [21] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [22] 陈中原, 周长振, 杨文达, 等. 长江口外现代水下地貌与沉积[J]. 海洋学研究, 1986, 4(2): 28–37.
- [23] SUGAI Y, TSUCHIYA K, KUWAHARA V S, et al. Bacterial growth rate and the relative abundance of bacteria to heterotrophic nanoflagellates in the euphotic and disphotic layers in temperate coastal waters of Sagami Bay[J]. Japan Journal of Oceanography, 2016, 72(4): 577–587.
- [24] TSAI A Y, GONG G C, SANDERS R W, et al. Heterotrophic bacterial and *Synechococcus* spp. growth and mortality along the inshore-offshore in the East China Sea in summer[J]. Journal of Oceanography, 2012, 68(1): 151–162.
- [25] WOMMACK K E, COLWELL R R. Virioplankton: viruses in aquatic ecosystems[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2000, 64(1): 69–114.
- [26] TSAI A Y, GONG G C, HUNG J. Seasonal variations of virus-and nanoflagellate-mediated mortality of heterotrophic bacteria in the coastal ecosystem of subtropical western Pacific[J]. Biogeosciences, 2013, 10(5): 3055–3065.
- [27] ALONGI D M, PATTEN N L, MCKINNON D, et al. Phytoplankton, bacterioplankton and virioplankton structure and function across the southern Great Barrier Reef shelf[J]. Journal of Marine Systems, 2015, 142(142): 25–39.
- [28] JIAO Nianzhi, ZHAO Yulin, LUO Tingwei, et al. Natural and anthropogenic forcing on the dynamics of virioplankton in the Yangtze river estuary[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2006, 86(3): 543–550.
- [29] FRADA M J, SCHATZ D, FARSTEY V, et al. Zooplankton may serve as transmission vectors for viruses infecting algal blooms in the ocean[J]. Current Biology, 2014, 24(21): 2592–2597.
- [30] 张喆. 山东近岸海域浮游细菌、病毒生态学调查及沉积物细菌多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008, 84–85.
- [31] 李升康, 李传标. 海洋病毒在海洋微生物群落及生物地球化学循环中的作用研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(3): 117–121.
- [32] 王小平, 贾晓平, 林钦, 等. 红海湾水域溶解氧、pH值、盐度和营养盐分布特征及相互关系研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 35–40.
- [33] 石晓勇, 王修林, 陆茸, 等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 404–412.
- [34] 刘卫云, 章守宇, 王凯, 等. 枸杞岛海域春季异养浮游细菌和生态环境因子关系初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(3): 437–444.
- [35] 黄德坤. 基于核素示踪的长江口、东海和海南东部近海泥沙的沉降过程[D]. 上海: 华东师范大学, 2012, 52–53.
- [36] 姜学霞, 焦念志. 海洋异养细菌硝酸盐同化研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 2(46): 199–206.
- [37] PARVATHI A, JASNA V, JINA S, et al. Effects of hydrography on the distribution of bacteria and virus in Cochin estuary, India[J]. Ecological Research, 2015, 30(1): 85–92.
- [38] TSIOLA A, PITTA P, FODELIANAKIS S, et al. Nutrient limitation in surface waters of the oligotrophic eastern Mediterranean sea: an enrichment microcosm experiment[J]. Microbial Ecology, 2016, 71(3): 575–588.