

仿刺参养殖池塘浮游病毒丰度与环境因子的相关性分析*

姜 北 周遵春** 董 颖 邓 欢 杨爱馥 陈 仲 汪笑宇 关晓燕

(辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁省海洋环境监测总站, 辽宁省海洋水产分子生物学重点实验室, 大连 116023)

摘 要 为了揭示仿刺参养殖池塘生态系统中浮游病毒与环境因子的关系, 于 2008 年 3—11 月对大连市谢屯地区的仿刺参养殖池塘中的浮游病毒丰度进行了定期检测, 同时对水温、pH、溶解氧、盐度、叶绿素 a 含量、化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐、异养细菌等因子进行了监测, 对浮游病毒丰度与这些环境因子之间的相关性进行了分析。结果表明: 仿刺参养殖池塘中浮游病毒的平均丰度为 8.32×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$ (最高值为 4 月的 18.2×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$, 最低值为 11 月的 1.31×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$), 外海水中浮游病毒平均丰度为 6.45×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$ (最高值为 4 月的 12.6×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$, 最低值为 6 月的 2.02×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$), 仿刺参养殖池塘中营养盐、水温、pH 及盐度对浮游病毒丰度的影响较大, 而外海水中叶绿素 a 和异养细菌对浮游病毒丰度的影响较大。

关键词 仿刺参养殖池塘; 浮游病毒丰度; 环境因子

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0702-09

Correlation analysis on virioplankton abundance and its environmental factors in *Apostichopus japonicus* culture pond. JIANG Bei, ZHOU Zun-chun, DONG Ying, DENG Huan, YANG Ai-fu, CHEN Zhong, WANG Xiao-yu, GUAN Xiao-yan (Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Liaoning Marine Environmental Monitoring General Station, Liaoning Key Lab of Marine Fishery Molecular Biology, Dalian 116023, Liaoning, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 702–710.

Abstract: To reveal the relationships between virioplankton abundance and environmental factors in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) culture pond ecosystem, the virioplankton abundance in an *A. japonicus* culture pond of Xietun near Dalian City was determined from March to November 2008. In the meantime, the environmental factors such as water temperature, pH, dissolved oxygen, salinity, chlorophyll a, chemical oxygen demand, inorganic nitrogen and phosphorus, and heterotrophic bacterioplankton were monitored, with the relationships between the virioplankton abundance and these environmental factors analyzed. In the *A. japonicus* culture pond, the virioplankton abundance was the highest (18.2×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$) in April and the lowest (1.31×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$) in November, with an average of 8.32×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$; while in outer sea, the virioplankton abundance was the highest (12.6×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$) in April and the lowest (2.02×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$) in June, with an average of 6.45×10^{10} VLPs \cdot L $^{-1}$. The main environmental factors affecting the virioplankton abundance in the *A. japonicus* culture pond were nutrients, water temperature, pH, and salinity; while those affecting the abundance in outer sea were chlorophyll a and heterotrophic bacterioplankton.

Key words: *Apostichopus japonicus* culture pond; virioplankton abundance; environmental factors.

* 国家海洋公益性行业科研专项(200705007)和辽宁省科技计划资助项目(2008203002)。

** 通讯作者 E-mail: zunchunz@hotmail.com

收稿日期: 2009-07-27 接受日期: 2009-12-17

浮游病毒是水体微生物群落中丰度最高的生物因素,其丰度范围从贫营养水体的 10^4 VLPs · ml⁻¹ 到富营养水体 10^8 VLPs · ml⁻¹ (Wommack & Colwell, 2000)。浮游病毒的数量巨大,具有重要的生态功能,可有效控制宿主种群的大小,改变种群的遗传结构,甚至影响整个生物圈的物质循环 (Wommack *et al.*, 1999)。由于浮游病毒在生态学研究中所具有的特殊价值,国内外已有大量关于海洋和湖泊中浮游病毒及其丰度的研究 (Noble & Fuhrman, 1997; 白晓歌等, 2008)。本研究以仿刺参 (*Apostichopus japonicus*) 养殖池塘为研究对象,通过对养殖池塘中浮游病毒丰度的季节变化与环境因子之间的相关性进行研究,为揭示仿刺参养殖池塘生态系统中浮游病毒与环境因子的相互关系提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

取样池塘设在大连市瓦房店地区谢屯,位于渤海东部区的普兰店湾沿岸。地理坐标 121°29'43.2" E, 39°23'38.1"N, 养殖池塘总面积约 66670 m²。池塘内的进水口、中部、出水口分别设 3 个站位,池塘附近外海水 1 个站位 (图 1)。2008 年 3—11 月,每 10 ~ 20 d 分别于 10:00—12:00 采集各站位的表层海水。

1.2 浮游病毒检测

海水中的浮游病毒 (virio plankton abundance, VA) 检测采用 SYBR Green I 直接计数法,引用 Noble 等 (1998) 和 Chen 等 (2001) 的方法并稍加改进:水样用孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,再经无

菌去离子水稀释,取 1 ml (含样品量 50 μl) 经孔径为 0.02 μm 氧化铝滤膜 (Whatman 公司) 过滤,在负压 (15 ~ 20 kPa) 条件下把样品抽滤至干,将病毒滤于膜上,用 10% 的 SYBR Green I 染色剂工作液置冰浴、避光染色 15 min。干燥后,制片。在荧光显微镜蓝色激发光道,油镜下观察计数,病毒粒子呈针孔状、亮绿色。随机取 10 ~ 20 个视野,计算病毒颗粒数,每个样品至少计数 200 个病毒。

计算样品中含病毒颗粒数的套用公式:

$$VA = \frac{Na \cdot S}{S_f \cdot (1 - 0.05) \cdot V}$$

式中:VA 为样品含病毒数 (VLPs · L⁻¹); Na 为各视野平均病毒数 (VLPs); S 为滤膜实际过滤面积 (mm²); S_f 为显微镜视野面积 (mm²); V 为过滤样品量 (式中 0.05 为加入 37% ~ 40% 甲醛占固定样品总体积的比例) (L)。

1.3 环境因子测定

水温、盐度、pH 和溶解氧使用美国 YSI650 MDS 多参数水质分析仪于采样现场测定。可溶性无机氮、可溶性无机磷、化学需氧量、叶绿素 a、异养细菌等的测定均引用《海洋监测规范》中的方法 (国家海洋局, 2007)。

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 13.0 软件进行数据分析,利用主成分分析 (PCA) 中的因子分析方法,对 9 个环境因子进行主成分分析。采用多元逐步回归分析方法,以主成分得分解释变量,研究环境因子对浮游病毒丰度的影响。

1.4.1 主成分分析 设 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ 是 p

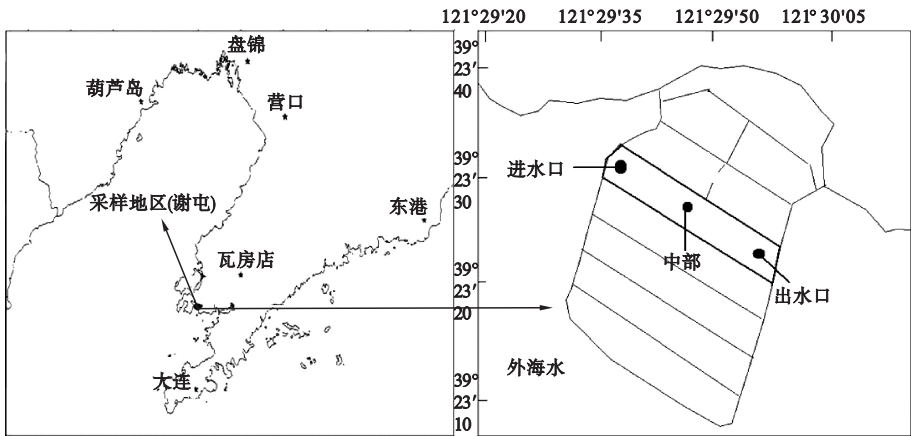


图 1 采样地区及站位示意图
Fig. 1 Location of survey and sampling sites

维随机向量,它的主成分为

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \cdots + a_{p1}X_p \\ Y_2 &= a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{p2}X_p, \\ &\vdots \\ Y_p &= a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \cdots + a_{pp}X_p \\ (p &= 1, 2, \cdots, 9) \end{aligned}$$

主成分个数的选取,以累计解释方差百分率在 80% 以上为选取特征值个数的标准;主成分 y_j 与变量 x_k 之间的相关系数(或因子载荷量)为

$$r(y_i, x_k) = a_{jk} \sqrt{\frac{\lambda_j}{Dx_k}}, Dx_k = \sum_{j=1}^p a_{jk}^2$$
$$(j = k = 1, 2, \cdots, p)$$

式中, λ_j 为相关矩阵第 j 个主成分的特征值; a_{jk} 为主成分系数。

1.4.2 多元回归分析

多元逐步回归的模型为

$$Y = b + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_px_p$$

式中: b 为常数; b_1, b_2, \cdots, b_p 为回归参数, $p = 1, 2, \cdots, 9$ 。

逐步回归方程的复相关系数及显著性检验的公式为

$$r = \sqrt{\frac{U}{S_{yy}}}, F = \frac{U/l}{Q/(n-l-1)}$$
$$= \frac{r^2/l}{(1-r^2)/(n-l-1)}$$

式中, U 为回归二次方和; S_{yy} 为总离差的二次方和; l 为引进的因子数; Q 为残差二次方和; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 仿刺参养殖池塘的浮游病毒丰度

由图 2 可见,2008 年仿刺参养殖池塘内海水浮游病毒丰度(VA)的时间分布特征是全年出现 2 个高峰期,分别是 4 月和 8 月,最高值为 18.2×10^{10} VLPs · L⁻¹;外海水中 VA 的时间分布特征是 4 月和

7 月最高,6 月最低;多数时间池塘内的 VA 高于附近外海水。与 2007 年的调查数据相比(姜北等, 2008),2008 年池塘内的浮游病毒的平均丰度为 8.32×10^{10} VLPs · L⁻¹,略高于 2007 年的 8.86×10^9 VLPs · L⁻¹。2 年 VA 的空间分布相似,但时间分布上有所不同;2007 年池塘中 VA 的高峰期出现在 8 月中旬至 10 月中旬,最高值为 2.96×10^{10} VLPs · L⁻¹,而 2008 年则出现 2 个 VA 的高峰期,高峰期的出现也比 2007 年稍早一些。

2.2 环境因子分析

2.2.1 环境因子的时空分布 由图 3—图 11 可知,仿刺参养殖池塘水温的季节性变化比较明显,夏季明显高于春、秋两季;pH 随时间的波动较小,春季偏高;溶解氧是夏季高;春、秋两季池塘水的盐度高于夏季,池塘内稍高于外海水;无机氮和无机磷的季节性变化较小,无机磷的含量较低,且外海水中的无机氮、无机磷水平多数高于池塘内,差异明显;化学需氧量的分布特征是上半年较平稳,下半年逐渐升高且平均值稍高于上半年;海水中的叶绿素 a 的分布规律是秋季稍高于春、夏两季;异养细菌的数量基本上是下半年高于上半年,池塘内高于外海水。

2.2.2 主成分分析 为了深入分析仿刺参养殖池塘中环境因子的变化情况,找到池塘中影响 VA 的主要环境因子,对监测的环境因子进行主成分分析,提取关键因子。主成分分析可以在不损失原数据主要信息的同时,使数据更加集中,更典型地显示出研究对象的特征。

对各采样点每月的 9 个环境因子数据进行主成分分析,为了明显区分每个主成分的系数(载荷),采用 Varimax 最大方差法对因子进行旋转,使系数向 0 和 1 两级分化,按照特征值>1 的原则提取出 3 个主成分。

表 1 列出了换转后提取出的前 3 个主成分的因

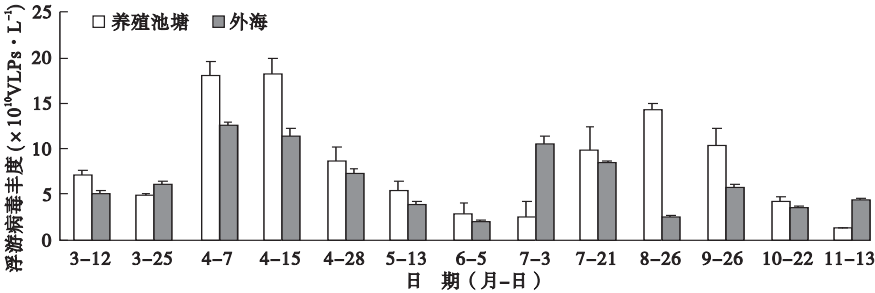


图 2 仿刺参养殖池塘中的浮游病毒丰度
Fig.2 Viroplankton abundance in *Apostichopus japonicus* culture pond

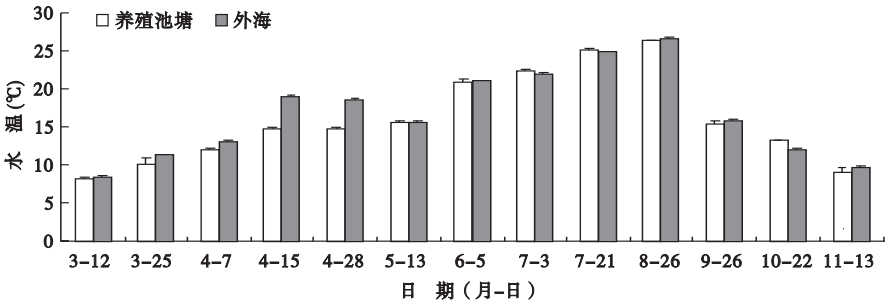


图3 仿刺参养殖池塘中的水温
Fig.3 Water temperature in *Apostichopus japonicus* culture pond

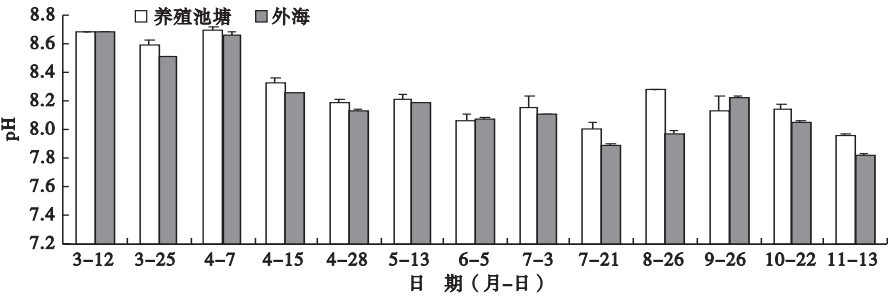


图4 仿刺参养殖池塘中的pH
Fig.4 pH in *Apostichopus japonicus* culture pond

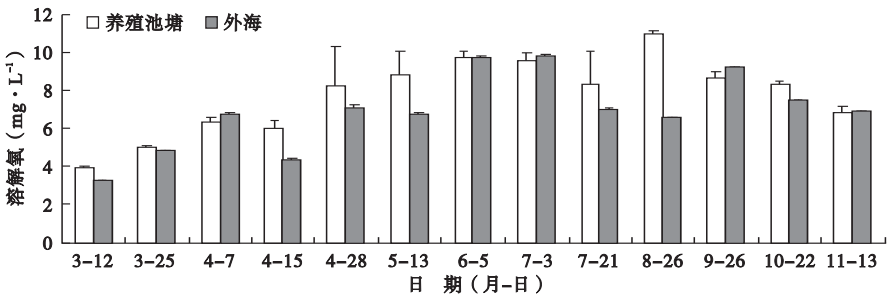


图5 仿刺参养殖池塘中的溶解氧
Fig.5 Dissolved oxygen in *Apostichopus japonicus* culture pond

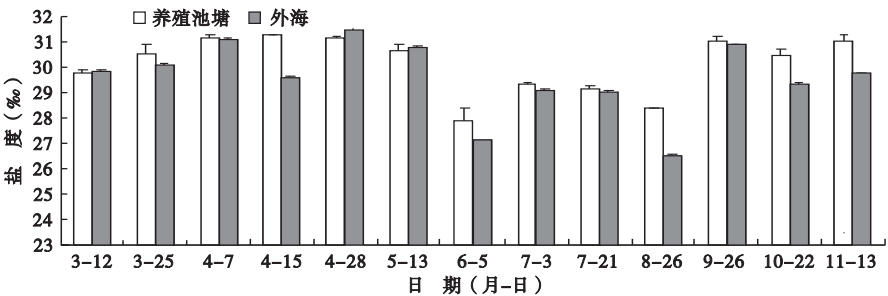


图6 仿刺参养殖池塘中的盐度
Fig.6 Salinity in *Apostichopus japonicus* culture pond

子载荷量,从表1可以看出,对主成分1(PCA1)影响最大的环境因子是水温、pH 和盐度,反映了养殖水体的物理特征;对主成分2(PCA2)影响最大的环境因子是

叶绿素 a、异养细菌,反映了养殖水体中浮游生物的生长状况;对主成分3(PCA3)影响最大的环境因子是无机氮和无机磷,反映了养殖水体的营养盐状况。

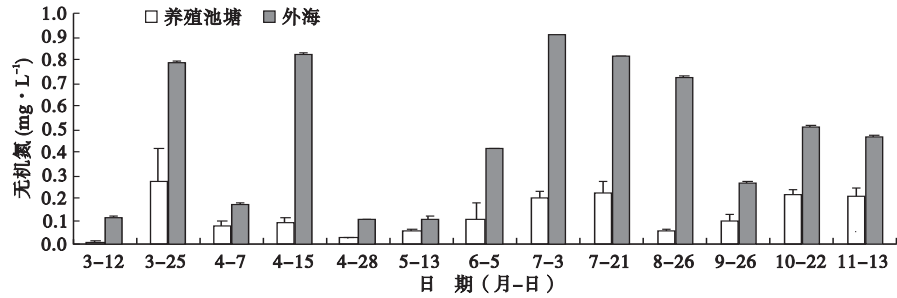


图 7 仿刺参养殖池塘中的无机氮
Fig. 7 Dissolved inorganic nitrogen in *Apostichopus japonicus* culture pond

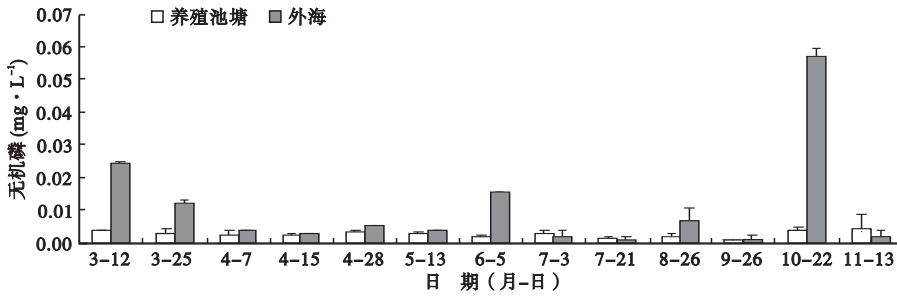


图 8 仿刺参养殖池塘中的无机磷
Fig. 8 Dissolved inorganic phosphate in *Apostichopus japonicus* culture pond

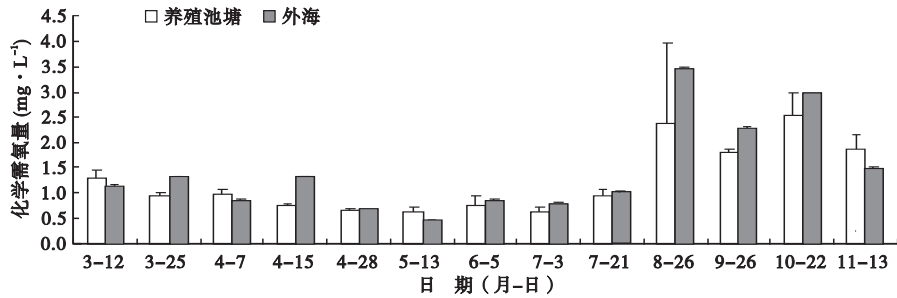


图 9 仿刺参养殖池塘中的化学需氧量
Fig. 9 Chemical oxygen demand in *Apostichopus japonicus* culture pond

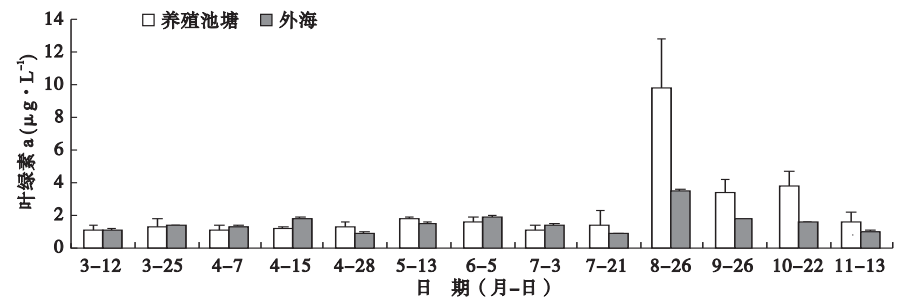


图 10 仿刺参养殖池塘中的叶绿素 a
Fig. 10 Chlorophyll a in *Apostichopus japonicus* culture pond

表 2 反映了各主要环境因子的得分系数,根据主成分得分的数学模型得出方程:

$$Y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n$$
$$Y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n$$

$Y_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \cdots + a_{3n}x_n$
式中, $Y_1 \sim Y_3$ 为各主成分得分, $x_1 \sim x_n$ 为各采样点经过无量纲化处理后的标准化值(由 SPSS 软件自动执行)。将各因子的得分系数和对应的各采样点

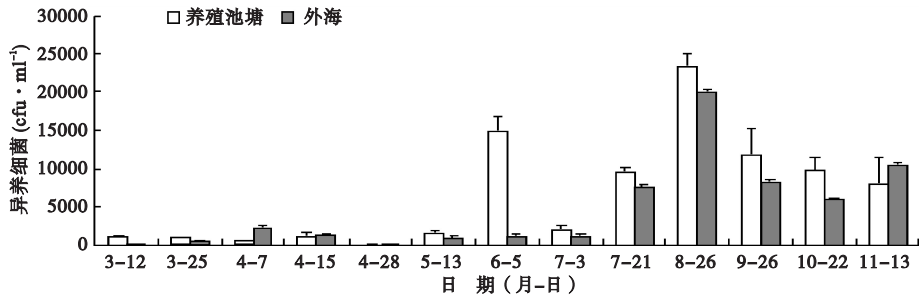


图 11 仿刺参养殖池塘中的异养细菌

Fig. 11 Heterotrophic bacterioplankton in *Apostichopus japonicus* culture pond

表 1 Varimax 转轴后的因子载荷量

Tab. 1 Rotated component matrix^a

环境因子	PCA1	PCA2	PCA3
无机磷	-0.117	0.047	0.766
无机氮	0.436	-0.253	0.710
化学需氧量	0.006	0.706	0.533
叶绿素 a	0.195	0.857	-0.144
pH	-0.750	-0.066	-0.075
异养细菌	0.487	0.793	-0.039
水温	0.837	0.283	-0.186
盐度	-0.688	-0.289	-0.262
溶解氧	0.562	0.519	-0.365
特征值	3.669	1.660	1.205
贡献率(%)	40.77	18.44	13.39
累计贡献率(%)	40.77	59.21	72.60

表 2 因子得分系数

Tab. 2 Component score coefficient matrix

环境因子	PCA1	PCA2	PCA3
无机磷	-0.098	0.087	0.475
无机氮	0.277	-0.235	0.412
化学需氧量	-0.205	0.417	0.353
叶绿素 a	-0.126	0.426	-0.062
pH	-0.375	0.165	-0.025
异养细菌	0.042	0.313	-0.009
水温	0.370	-0.075	-0.129
盐度	-0.276	0.015	-0.151
溶解氧	0.166	0.126	-0.222

的标准化数据代入方程,即可得出各采样点的主成分得分。

2.2.3 主成分与浮游病毒丰度的多元逐步回归分析 逐步回归分析可以筛选出影响因变量最大的自变量因子,给出最优模型并通过回归方程很好地解释因变量的变化。但在利用逐步回归分析时,常由于自变量间(各个环境因子之间)可能存在多重共线性而给回归方程带来很多影响。主成分分析得出的 3 个主成分之间的相关性极小,而且系统地反映了池塘养殖水质状况。因此利用主成分分析结果,以主成分得分为解释变量,可以解决多重共线性问题,很好地说明环境因子对养殖池塘 VA 的影响。

表 3 主成分与浮游病毒丰度之间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between principal component and viroplankton abundance

地点	主成分	相关系数	P
养殖池塘	PCA1	-0.139	0.210
	PCA2	0.094	0.292
	PCA3	-0.419	0.006
外海	PCA1	-0.285	0.185
	PCA2	-0.505	0.047
	PCA3	-0.359	0.126

表 4 浮游病毒丰度与主成分的逐步回归分析

Tab. 4 Regression analysis between principal component and viroplankton abundance

地点	项目	回归系数	F	P
养殖池塘	常数	10.701	175.339	0.000
	PCA3	-0.366	-3.576	0.001
	PCA1	-0.137	-2.346	0.025
外海	常数	10.672	152.138	0.000
	PCA2	-0.152	-1.849	0.094

将主成分 PCA1、PCA2、PCA3 的得分与 VA(经对数转换处理)进行逐步回归分析(表 3),结果表明,养殖池塘中的 PCA3 与 VA 的线性关系显著($P < 0.01$),外海水中的 PCA2 与 VA 的线性关系显著($P < 0.05$)。根据表 4 得出回归方程:池塘内浮游病毒丰度(CVA) = $10.701 - 0.366PCA3 - 0.137PCA1$, $P < 0.05$;外海水中浮游病毒丰度(WVA) = $10.672 - 0.152PCA2$, $P < 0.1$ (回归方程中浮游病毒丰度的实际结果需做对数转换进行复原)。

3 讨论

3.1 浮游病毒丰度与无机氮、无机磷的关系

通过回归方程($CVA = 10.701 - 0.366PCA3 - 0.137PCA1$, $P < 0.05$),以及 PCA3 的环境因子载荷量(无机磷 0.766,无机氮 0.710)分析表明:池塘中的 VA 与 PCA3 负相关,营养盐无机氮和无机磷是仿

刺参养殖池塘中 VA 的限制性因素,并且无机磷又是池塘中 VA 最主要的限制性营养元素。

浮游病毒可以通过减少宿主种群数量或防止宿主种群数量达到高峰的方式来控制浮游植物动力学指标(刘静雯等,2009)。氮和磷是浮游植物生长最重要的营养物质,又是常见的限制营养元素,本研究池塘中的无机氮和无机磷在全年的大部分时期都低于浮游植物生长所需最低阈值(无机氮 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、无机磷 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)(Justic *et al.*, 1995)。并且氮、磷比为 $40.67 > 10$,无机磷成为主要限制因子(Boyer *et al.*, 1993; Horne & Goldman, 1994)。另外,也有报道指出,在磷酸盐的胁迫下,病毒粒子的释放量会有所减少,当磷酸盐耗尽时,病毒滴度会减少 60%(Jacquet *et al.*, 2002)。这些原因都可能使仿刺参养殖池塘中 VA 与无机氮和无机磷呈负相关关系。

3.2 浮游病毒丰度与水温、pH、盐度的关系

通过回归方程($\text{CVA} = 10.701 - 0.366\text{PCA3} - 0.137\text{PCA1}$, $P < 0.05$),以及 PCA1 的环境因子载荷量(水温 0.837 、pH -0.750 、盐度 -0.688)分析表明:仿刺参养殖池塘中的 VA 与 PCA1 负相关,水温为 PCA1 中影响养殖池塘中 VA 的最主要因素,养殖池塘中的 VA 与水温呈负相关,也与 pH 和盐度呈一定的正相关关系。

温度是影响浮游病毒分布的重要因素,浮游病毒丰度具有明显的季节性变化(Weinbauer *et al.*, 1995; Cochran & Paul, 1998),浮游病毒是由大量的噬菌体和藻类病毒等组成(Boehme *et al.*, 1993),其宿主主要是浮游植物,浮游植物具有温度选择性(Wommack *et al.*, 1999; Agawin *et al.*, 2000; Lehman, 2000),部分温带近岸的物种在 15°C 左右会成为优势种,这与研究池塘中的 VA 在 4 月达到全年的最高峰相一致。另外,一些较低的温度水平也可以通过改变宿主的生长状态和感染性而影响浮游病毒的增殖(Nagasaki, 2001; Chibani-Chennoufi *et al.*, 2004),温度升高也会使病毒的繁殖力迅速下降(Nagasaki & Yamaguchi, 1998),这些都可能是养殖池塘中 VA 与水温呈负相关的原因。仿刺参养殖池塘作为一个相对封闭的小生态系统,许多其它因素的作用也可能影响到 VA 与水温的正负相关性。

池塘内的 pH 全年变化趋势不明显,基本维持在 8.3 左右,但 VA 却与 pH 有一定的正相关关系,其原因可能跟浮游病毒的宿主(浮游植物)与 pH 的密切关系有关。pH 的微小变化就会对藻类产生显

著的影响(茅华等,2007),另外,光合作用对 pH 的变化也比较敏感,pH 降低至一定范围,光合速率就会大幅度下降。反过来浮游植物的大量繁殖会通过光和作用吸收 CO_2 ,也会导致 pH 的升高。

池塘内的盐度基本在 30‰ 上下变化,同 VA 的变化规律基本一致,有报道指出浮游植物在这个盐度范围内的同化速率最高(王宪和李文权,1991),盐度的变化与其他环境因素协同作用可能是养殖池塘中 VA 与盐度正相关的主要原因。在调查过程中发现,池塘内海水的盐度变化与 pH 的变化一致,夏季光照强、水温高、盐度适宜,异养细菌和浮游植物生长旺盛,病毒释放量多。有报道指出,温度、盐度及光照强度对浮游病毒宿主藻类的繁殖均具有较大影响(Goldman & Mann, 1980; Darley, 1982)。也有报道指出,VA 与盐度呈一定的负相关性,这有可能跟大洋中的盐度变化有关,过高的盐度将会直接导致浮游病毒的完整性被破坏,导致浮游病毒的数量下降(Auguet *et al.*, 2005; 白晓歌等,2008)。

3.3 浮游病毒丰度与叶绿素 a、异养细菌的关系

回归方程($\text{WVA} = 10.672 - 0.152\text{PCA2}$, $P < 0.1$)表明养殖池塘附近外海水中的 VA 与 PCA2 呈负相关关系,而养殖池塘中的 VA 与 PCA2 并没有明显的相关关系。结合 PCA2 中各环境因子的载荷量(叶绿素 a 0.857 , 异养细菌 0.793)分析表明:叶绿素 a 和异养细菌是影响外海水中 VA 的主要因素且它们之间呈负相关关系,即浮游病毒会抑制外海水中叶绿素 a 的含量和异养细菌的繁殖。

有文献报道,VA 与叶绿素 a 无显著相关性,而与细菌丰度具有显著相关性(Cochlan *et al.*, 1993; Wommack & Colwell, 2000),但 Boehme 等(1993)却指出,VA 与海水中叶绿素 a 含量及细菌数量都具有很好的相关性。浮游病毒主要通过裂解浮游植物细胞来进行大量繁殖,而叶绿素 a 含量又是浮游植物数量的重要指标,当海水中的浮游病毒进行大量增值时,必然就会导致浮游病毒的宿主浮游植物的裂解从而降低了叶绿素 a 的含量。这可能是本研究春季外海水 VA 较高,而叶绿素 a 的含量却较低的原因。仿刺参养殖池塘是一个相对封闭的生态系统,相对于外海水来说富营养化更严重些,Weinbauer 等(1993)指出,富营养化能刺激浮游病毒的增殖,而在清洁的水体中,叶绿素 a 浓度与浮游病毒的相关性更高(Peduzzi & Schiemer, 2004),这与本研究养殖池塘中 VA 与叶绿素 a 浓度的相关性没有外海水

明显的结果一致。另外,养殖池塘在不同时间的换水等物理运动所造成 VA 发生改变,也能影响到 VA 与环境因子的相关性。

细菌是水生食物网中初级生产力的主要成分,同时在微生物环路中扮演重要角色(Bratbak *et al.*, 1994),而异养细菌又是浮游病毒的重要宿主,病毒通过裂解作用增强了细菌生物量向可溶性有机物汇合塘的流动,可导致 62% 的异养细菌和 3% ~ 5% 的浮游植物裂解致死,当浮游细菌在富含浮游病毒的海水中孵育 24 h 以后,细菌丰度通常可降低 25% ~ 40% (Wommack & Colwell, 2000; 张奇亚, 2002),这些都可能引起外海水中的 VA 与异养细菌之间呈负相关关系。而本研究池塘中的 VA 和异养细菌之间无明显相关性,这与许多文献报道的 VA 与异养细菌之间具有显著相关性的结果有所不同(Fuhrman & Schwalbach, 2003; Säwström *et al.*, 2007)。Almeida 等(2001)指出,只有异养细菌在较高丰度或高速增殖状态下,浮游病毒才与异养细菌之间具有良好的相关性,而研究池塘中的异养细菌年平均丰度仅为 6.10×10^3 cfu · ml⁻¹,异养细菌数量最高值仅为 2.50×10^4 cfu · ml⁻¹,未出现高速增殖期。也有报道指出,底层沉积物中的浮游病毒与异养细菌之间的相关性不好(Bettarel *et al.*, 2006)。仿刺参养殖池塘的水深通常在 1.5 ~ 2.0 m 左右,水质受底层沉积物的影响较大,另外,仿刺参养殖池塘受人为因素的影响较大,换水时间、换水容量、池水深度、养殖密度的变化等,以及每次采样的时间、光照强度和天气情况都会对异养细菌的结果有所影响。以上的这些因素都可能对仿刺参养殖池塘中的 VA 与异养细菌数量之间的相关性造成影响。

浮游病毒的宿主(浮游植物)的分布除受环境因子影响外,还受到摄食压力、日照时间和强度等因素的协同影响(Noble & Fuhrman, 1997),上述多种因素的协同作用共同揭示了仿刺参养殖池塘中浮游病毒丰度与环境因子之间的相关性。

致谢 在浮游病毒丰度的检测过程中,得到了国家海洋环境监测中心李洪波博士的指导和帮助,谨致感谢。

参考文献

白晓歌, 汪 岷, 梁彦韬, 等. 2008. 运用荧光显微技术分析北黄海夏季浮游病毒的分布. 中国海洋大学学报, **38** (4): 609–613.

国家海洋局. 2007. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社.

姜 北, 周遵春, 邓 欢, 等. 2008. 刺参养殖池塘水体中浮游病毒的丰度. 生态学报, **28**(11): 5506–5512.

刘静雯, 董双林, 张稚兰, 等. 2009. 微藻类病毒与宿主之间的微生态关系. 中国海洋大学学报, **39**(1): 26–34.

茅 华, 许 海, 刘兆普. 2007. 温度、光照、盐度及 pH 对旋链角毛藻生长的影响. 生态科学, **26**(5): 432–436.

王 宪, 李文权. 1991. 盐度、pH 对海洋藻类光和作用速率的影响. 海洋环境科学, **10**(1): 37–40.

张奇亚. 2002. 浮游病毒. 水生生物学报, **26**(6): 691–695.

Agawin NS, Duarte CM, Agustí S, *et al.* 2000. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, **45**: 591–600.

Almeida MA, Cunha MA, Alcantara F. 2001. Loss of estuarine bacteria by viral infection and predation in microsm conditions. *Microbial Ecology*, **42**: 562–571.

Auguet JC, Montanié H, Delmas D, *et al.* 2005. Dynamic of viroplankton abundance and its environmental control in the Charente Estuary (France). *Microbial Ecology*, **50**: 337–349.

Bettarel Y, Bouvy M, Dumont C, *et al.* 2006. Virus-bacterium interactions in water and sediment of West African Inland aquatic systems. *Applied and Environmental Microbiology*, **72**: 5274–5282.

Boehme J, Frischer ME, Jiang SC, *et al.* 1993. Viruses, bacterioplankton, and phytoplankton in the southeastern Gulf of Mexico: Distribution and contribution to oceanic DNA pools. *Marine Ecology Progress Series*, **97**: 1–10.

Boyer JN, Christian RR, Stanley DW. 1993. Patterns of phytoplankton primary productivity in the Neuse river estuary, North Carolina, USA. *Marine Ecology Progress Series*, **97**: 287–297.

Bratbak G, Thingstad F, Heldal M. 1994. Viruses and the microbial loop. *Microbial Ecology*, **28**: 209–221.

Chen F, Lu JR, Binder BJ, *et al.* 2001. Application of digital image analysis and flow cytometry to enumerate marine viruses stained with SYBR Gold. *Applied and Environmental Microbiology*, **67**: 539–545.

Chibani-Chennoufi S, Bruttin A, Dillmann ML. 2004. Phage-host interaction: An ecological perspective. *Journal of Bacteriology*, **186**: 3677–3686.

Cochlan WP, Wikner J, Steward GF, *et al.* 1993. Spatial distribution of viruses, bacteria and chlorophyll-a in neritic, oceanic and estuarine environments. *Marine Ecology Progress Series*, **92**: 77–87.

Cochran PK, Paul JH. 1998. Seasonal abundance of lysogenic bacteria in a subtropical estuary. *Applied and Environmental Microbiology*, **64**: 2308–2312.

Darley WM. 1982. Algal Biology: A Physiological Approach.

- Oxford; Blackwell Scientific Publications.
- Fuhrman JA, Schwalbach M. 2003. Viral influence on aquatic bacterial communities. *The Biological Bulletin*, **204**: 192–195.
- Goldman JC, Mann R. 1980. Temperature influenced variations in speciation and the chemical composition of marine phytoplankton in outdoor mass culture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **46**: 29–39.
- Horne AJ, Goldman CR. 1994. *Limnology* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Jacquet S, Heldal M, Iglesias-Rodriguez D, *et al.* 2002. Flow cytometric analysis of an *Emiliania huxleyi* bloom terminated by viral infection. *Aquatic Microbial Ecology*, **27**: 111–124.
- Justic D, Rabalais NN, Turner RE, *et al.* 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **40**: 339–356.
- Lehman PW. 2000. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco bay estuary. *Limnology and Oceanography*, **45**: 580–590.
- Nagasaki K, Yamaguchi M. 1998. Effect of temperature on the algicidal activity and the stability of HaV (*Heterosigma akashiwo* virus). *Aquatic Microbial Ecology*, **15**: 211–216.
- Nagasaki K. 2001. Domestication of eukaryotic microalgal viruses from marine environments. *Microbes and Environments*, **16**: 3–8.
- Noble RT, Fuhrman JA. 1997. Virus decay and its causes in coastal waters. *Applied and Environmental Microbiology*, **63**: 77–83.
- Noble RT, Fuhrman JA. 1998. Use of SYBR Green-I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria. *Aquatic Microbial Ecology*, **14**: 113–118.
- Peduzzi P, Schiemer F. 2004. Bacteria and viruses in the water column of tropical freshwater reservoirs. *Environmental Microbiology*, **6**: 707–715.
- Säwström C, Granéli W, Laybourn-Parry J, *et al.* 2007. High viral infection rates in Antarctic and Arctic bacterioplankton. *Environmental Microbiology*, **9**: 250–255.
- Weinbauer MG, Fuks D, Peduzzi P. 1993. Distribution of viruses and dissolved DNA along a coastal trophic gradient in the Northern Adriatic Sea. *Applied and Environmental Microbiology*, **59**: 4074–4082.
- Weinbauer MG, Fuks D, Puskaric S, *et al.* 1995. Diel, seasonal, and depth-related variability of viruses and dissolved DNA in the North Adriatic Sea. *Microbial Ecology*, **30**: 25–41.
- Wommack KE, Colwell RR. 2000. Virioplankton: Viruses in aquatic ecosystems. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **64**: 69–114.
- Wommack KE, Ravel J, Hill RT, *et al.* 1999. Hybridization analysis of Chesapeake Bay virioplankton. *Applied and Environmental Microbiology*, **65**: 241–250.
-
- 作者简介 姜 北,男,1982年生,研究实习员。主要从事海洋生态学研究。E-mail: jiangbei1983@163.com
- 责任编辑 李凤芹
-