

黄海春季海洋病毒的空间分布特征

何 蕾^{1,2,3}, 殷克东¹, 林志芬¹, 田 甜¹, 袁翔城¹

(1. 中国科学院 南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 采用荧光显微技术, 报道了春季(2006年4月)海洋病毒丰度在黄海的空间分布, 分析了病毒丰度与细菌丰度、叶绿素 *a* 浓度、温度和盐度的相关关系。研究表明, 黄海表层水中病毒丰度的变化范围为 $1.08 \times 10^7 \sim 9.90 \times 10^7$ 个/mL, 平均值是 5.62×10^7 个/mL $\pm 2.28 \times 10^7$ 个/mL, 细菌丰度的变化范围为 $0.01 \times 10^7 \sim 0.16 \times 10^7$ 个/mL, 平均值是 0.07×10^7 个/mL $\pm 0.03 \times 10^7$ 个/mL, 病毒丰度大于细菌丰度两个数量级。叶绿素 *a* 浓度表层的变化范围为 0.09~4.94 $\mu\text{g/L}$, 平均值是 0.75 $\mu\text{g/L}$ ± 0.84 $\mu\text{g/L}$, 最高值出现在长江口附近。通过相关性分析, 在黄海春季, 细菌可能控制着病毒的空间分布, 并且病毒的空间分布受盐度影响较小, 受温度影响较大。

关键词: 黄海; 病毒丰度; 细菌丰度; 空间分布

中图分类号: Q938

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)02-0010-07

海洋是地球生命的起源地。海洋生命的种类涵盖了从病毒到高等哺乳类的各个层次。游离的病毒和细菌存在于海水当中已经是众所周知的事情, 自从 Azam 等^[1]科学家们在 1983 年提出微生物食物环的概念以来, 浮游细菌的生物学和生态学研究成为生物海洋学最活跃的前沿领域之一。而在最近 20 年对海洋病毒的研究中, 人们不但发现在海洋中病毒数量是最丰富的^[2], 而且还发现病毒可以感染海洋中大部分的生物^[3-5]。这些重大发现使人们对海洋病毒在生态环境方面的重要性有了重新认识, 同时也引起了各国研究学者对海洋病毒的强烈关注。研究表明海洋病毒是海洋生态系统中的活跃分子, 不仅是微生物食物环和生物地球化学循环中的重要角色^[2], 还在赤潮控制^[6], 基因转移^[7]和全球气候变化^[2]等方面起着非常重要的作用。

目前, 国际上已普遍采用荧光显微技术对水体中病毒生物量进行检测^[8]。Hara 等^[9]首次利用荧光显微计数法检测了日本大阪湾和 Otsuchi Bay 两个湾域中游离病毒的丰度, 测得病毒丰度为 $0.12 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^7$ 个/mL。Hennes 等^[10]对墨西哥西部海湾表面水体中的病毒生物量进行检测, 病毒丰度为 $1 \times 10^7 \sim 12 \times 10^7$ 个/mL。Noble 和 Fuhrman^[11]对不同海水中病毒生物量进行计数, 其范围为 $0.03 \times 10^7 \sim 15 \times 10^7$ 个/mL。He 等^[12]首次报道了中国南海陆架海区表层水中病毒丰度为 1.41×10^7 个/mL $\pm 0.65 \times 10^7$ 个/mL。赵

苑等^[13]对胶州湾浮游病毒进行了研究, 胶州湾浮游病毒的丰度为 $0.48 \times 10^7 \sim 22.78 \times 10^7$ 个/mL。

黄海是颇为重要的陆架海区, 也是世界上最典型的半封闭性陆架浅海之一。它与其他陆架海区一样, 是人类活动、经济开发最为集中的地带, 由于黄海水深较浅, 紧邻陆地, 多条大河直接或间接注入, 所以营养物质十分丰富, 生物资源蕴藏量很高, 一向以生产力高而著称^[14]。在这一生态系统中, 海洋浮游病毒的生态效应如何, 现在并不清楚。本文利用荧光显微技术对黄海的病毒丰度进行计数, 并分析病毒丰度与其影响因子的关系, 探讨病毒丰度在黄海生态系统中的分布特征及其机制, 以为黄海生态环境的研究及改善提供基础资料。

1 材料与方 法

2006 年 4 月“东方红 2 号”科学调查船在黄海进行了海上大规模调查, 调查范围为北纬 $32^{\circ}31' \sim 39^{\circ}12'$, 东经 $120^{\circ}45' \sim 124^{\circ}$, 共设 41 个站位。(图 1)

需要测量获得的参数有温度、盐度、叶绿素、细菌丰度和病毒丰度。使用 Sea-Bird SBE CTD 仪器

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2010-04-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(40490264); 国家自然科学基金面上项目(40676020)

作者简介: 何蕾(1976-), 女, 黑龙江省大庆市人, 博士生, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: leihe@scsio.ac.cn

来获得水体的温度和盐度。水样各采样点均用 2.5L 的 Niskin 采水器获得。叶绿素 *a* 水样采样参照《海洋调查规范》(海洋生物调查和化学调查), 用 Turner Designers 700 萃取荧光法测定^[15]。

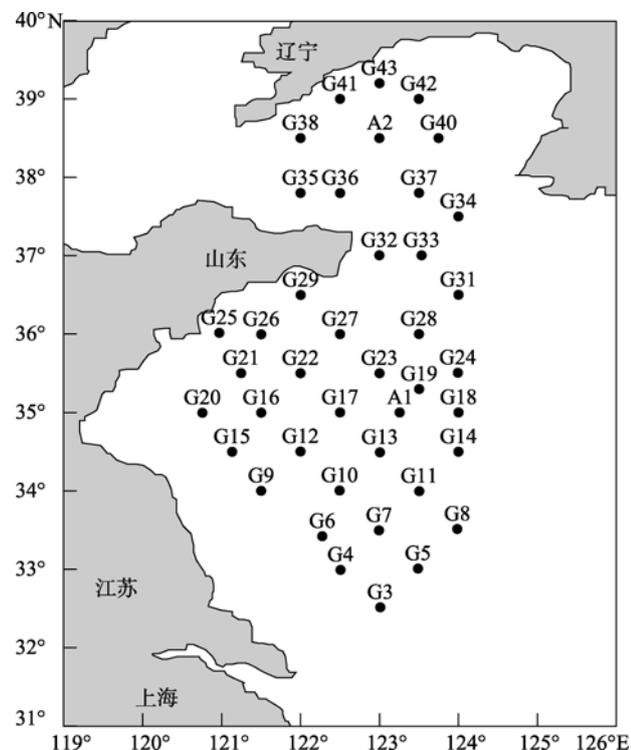


图 1 2006 年 4 月黄海站位

Fig. 1 Locations of the sampling stations in the Yellow Sea during April 2006

病毒样品取 1 mL 水样用戊二醛(终浓度 0.5%) 黑暗固定 15 min, 然后取 0.8 mL 样品过滤到 0.02 μm 氧化铝膜(Whatman, Maidstone, England)上, 干燥后, 用 0.25% SYBR-Green-I 染色, 并在黑暗中放置 15 min, 薄片制好后放在 -20 °C 下保存。样品在一个月 内用荧光显微镜 (OLYMPUS BX41 microscope, ×1000) 进行拍照计数^[10]。细菌样品取 10 mL 水样用 甲醛 (终浓度 5%) 固定保存, 回到实验室用 4'6-diamidino-2-phenylindole(DAPI)染色, 用直径为 25 mm, 孔径 0.2 μm 的黑色核孔滤膜(black Nucleo-pore filter)进行抽滤, 将滤膜放在载波片上, 滴一滴 浸油(immersion oil, Germany), 盖上盖玻片, 再滴少 量浸油, 用荧光显微镜(OLYMPUS BX41 microscope, ×1 000)进行拍照计数^[16]。每个样品随机取至少 10 个视野, 计数每个视野中所有的颗粒。

实验数据用 SPSS 软件分析, 所得实验结果用平均 值 ± 标准误差表示, 以 $P < 0.05$ 表示具有显著性 差异。图形均使用 Surfer 软件(Golden software Inc. CO)绘制。

2 结果

图 2 是 2006 年 4 月温度和盐度表层分布图, 表 层的温度变化范围为 4.50~13.74 , 平均值是 9.01 ± 2.27 。表层的盐度变化范围为 27.87~34.06PSU,

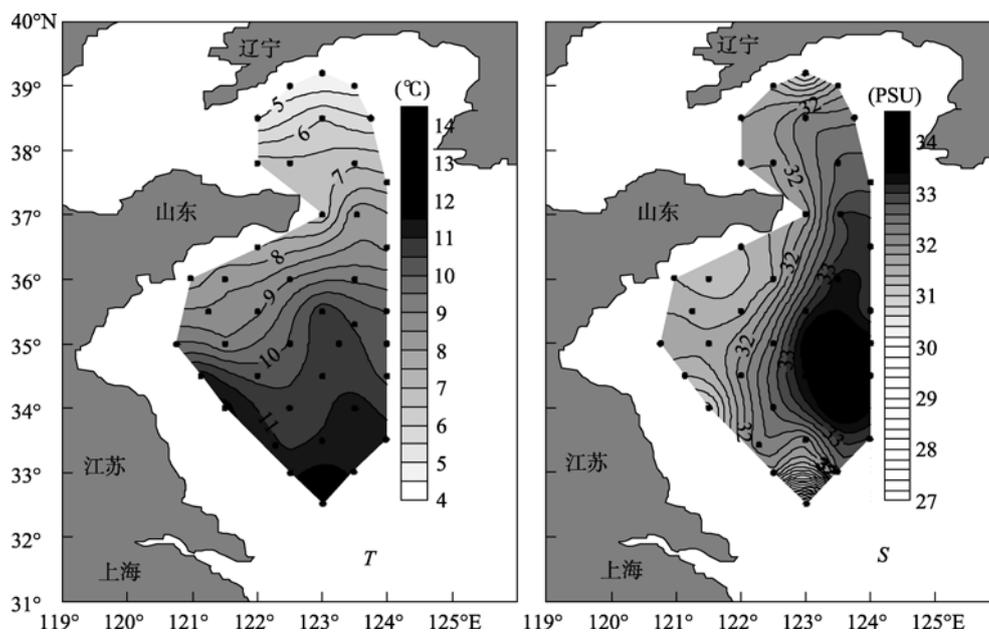


图 2 黄海 2006 年 4 月温度(T)和盐度(S)表层分布

Fig. 2 Horizontal distributions of temperature (*T*) and salinity (*S*) in the surface layer of the Yellow Sea during April 2006. Circle symbols indicate the sampling stations

平均值是 $32.20\text{PSU} \pm 1.08\text{PSU}$ 。从图 2 中可以看出温度随纬度增加而降低, 南北温度差异达 9°C , 在苏北沿岸有一暖水舌向东北延伸。在海域东南部, 有一较强的暖水舌自济州岛西侧海域向北偏西方向伸展, 这一暖水舌表征了传统上认为的黄海暖流。表层盐度的差异有 7PSU 。在黄海研究区的东南部有一较强的高盐舌自东南向西北伸展。在 35°N 附近, 主舌锋偏向西, 分出的另一舌锋指向北。这一高盐水舌的分布大致反映了春季黄海暖流的所在位置。在黄海西部, 有 3 个低盐中心, 一个位于山东外海, 一个在江苏外海, 另一个出现在长江口的东北方。

图 3 是 2006 年 4 月叶绿素 *a* 浓度和细菌丰度表层分布图, 叶绿素 *a* 浓度表层的变化范围为 $0.09\sim 4.94\ \mu\text{g/L}$, 平均值是 $0.75\ \mu\text{g/L} \pm 0.84\ \mu\text{g/L}$ 。叶绿素 *a* 浓度在表层有 3 个高值区, 其一在黄海研究区的南部, 近长江口处($4.94\ \mu\text{g/L}$), 其他两处分别在黄海研究区东部, G18($1.80\ \mu\text{g/L}$)和 G31($1.98\ \mu\text{g/L}$)站。在

辽宁和山东的南部海域, 叶绿素 *a* 浓度最低。细菌丰度的变化范围为 $0.01 \times 10^7 \sim 0.16 \times 10^7$ 个/mL, 平均值是 0.07×10^7 个/mL $\pm 0.03 \times 10^7$ 个/mL。细菌丰度在表层分布上差异很大, 有 1 个数量级的差别。北黄海细菌丰度明显比南黄海细菌丰度高, 最高值在北黄海 G35 站(0.16×10^7 个/mL)和 G40 站(0.13×10^7 个/mL)。

图 4 是 2006 年 4 月病毒丰度和病毒丰度与细菌丰度的比值(VBR)表层分布图。病毒丰度的变化范围为 $1.08 \times 10^7 \sim 9.90 \times 10^7$ 个/mL, 平均值是 5.62×10^7 个/mL $\pm 2.28 \times 10^7$ 个/mL。病毒丰度在平面分布上差异也很大。最大值在南部 G10 站(9.90×10^7 个/mL), 其次是 G7 站(8.85×10^7 个/mL), 第三大值黄海北部 G5 站(8.52×10^7 个/mL)。VBR 的变化范围为 $20.93 \sim 427.90$, 平均值是 103.52 ± 87.57 。VBR 的表面分布差异也很大, 最大值东南部 G28(427.90), 最小值在黄海研究区的东北部 G33(20.93)。

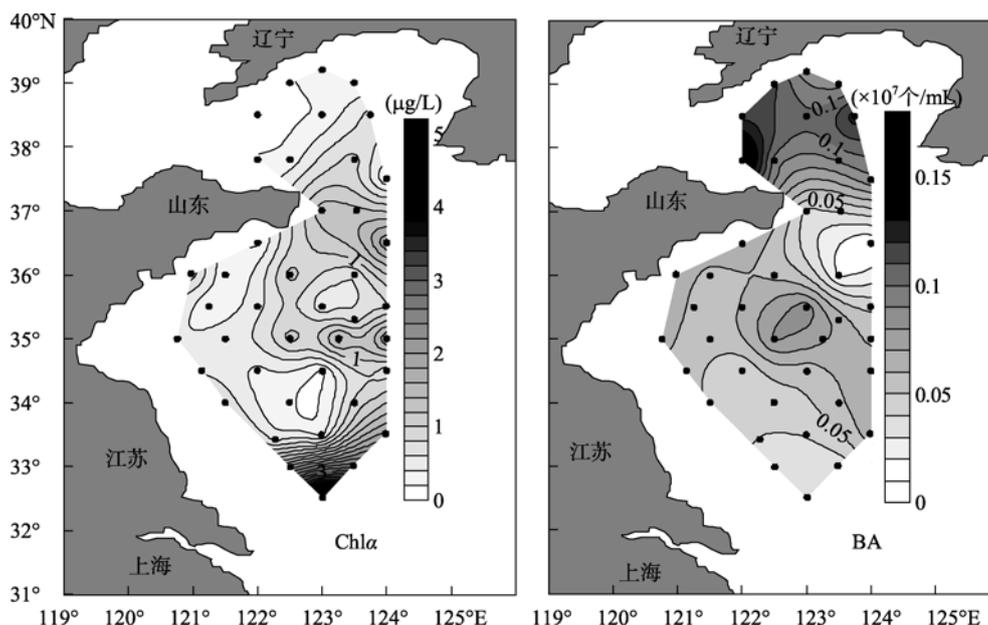


图 3 黄海 2006 年 4 月叶绿素 *a*(Chla)浓度和细菌丰度(BA)表层分布

Fig. 3 Horizontal distributions of chlorophyll *a* (Chla) and bacterial abundance (BA) in the surface layer of the Yellow Sea during April 2006. Circle symbols indicate the sampling stations

3 讨论

3.1 病毒丰度计数方法的选择

病毒生物量的正确估计对于微生物生态研究是非常重要的。当前, 海洋病毒丰度的计数有如下 4 种方法: 透射电镜计数法、荧光显微镜计数法、流式细胞仪计数法和最大可能数法。在这 4 种方法中, 流式

细胞仪法、荧光显微镜法和最大似然数法比较简单易行, 而透射电镜法则较难操作。透射电镜是最早也是较为普遍使用的计数病毒丰度的方法, 第一个高病毒丰度的数据就是用透射电镜法获得的^[17-18]。但透射电镜法由于采样的不均匀和低的探测极限等技术原因而低估病毒丰度^[9-11,19-20]。最大似然数法简单易行, 但精确度不高。流式细胞仪法是现在比较流行

的方法,可以区分病毒和细菌,但对仪器的灵敏度要求高。而荧光显微镜法尽管无法消除小的细菌和大的病毒相互重叠所带来的误差^[21],但由于该方法的快速,使之越来越频繁地用来估计病毒丰度,而

且样品的制备完全可以在船上完成,大量样品使成本更低,可以收集更多的数据,也增加了统计的精确度^[22-23]。所以本研究采用荧光显微镜法来计数病毒丰度。

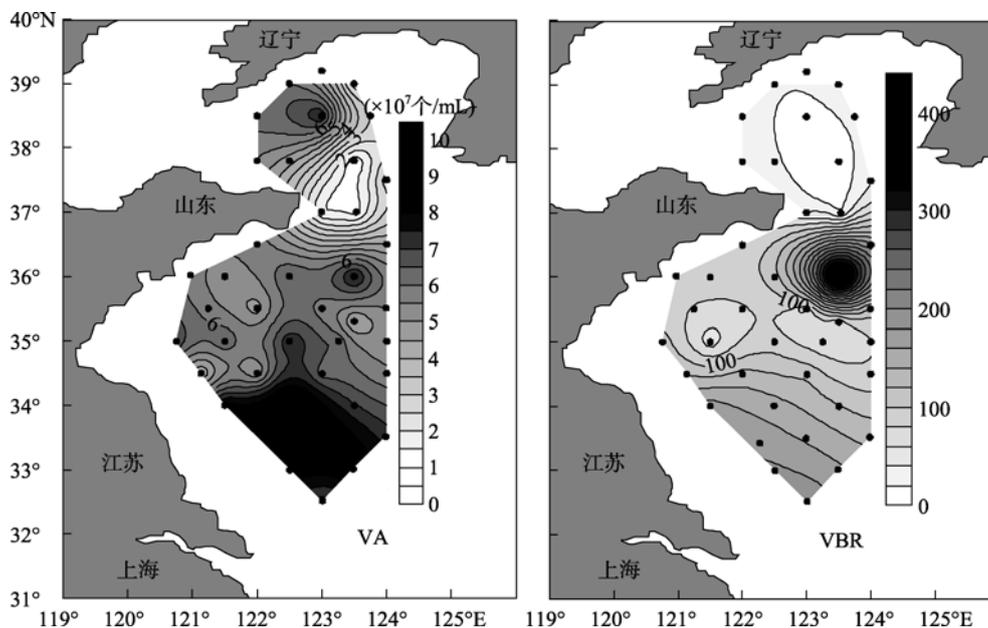


图4 黄海2006年4月病毒丰度(VA)和病毒细菌比(VBR)表层分布图

Fig. 4 Horizontal distributions of viral abundance (VA) and viruses to bacteria ratio (VBR) in the surface layer of the Yellow Sea during April 2006. Circle symbols indicate the sampling stations

3.2 病毒丰度与其他海域的比较

最近由于报道了在自然水体中游离病毒颗粒的大量存在,微生物学家用不同的方法计数病毒在水生环境中的数量。Wommannck 等^[24]总结了用不同的方法在不同的水生环境中病毒的数量,其变化范围为 $10^4 \sim 10^8$ 个/mL,在生产力高、富营养的环境中,病毒丰度也高;在空间分布上呈现近岸丰度高、远岸丰度低的特点。黄海是颇为重要的陆架海区,一向以生产力高而著称^[14],病毒丰度为 $1.08 \times 10^7 \sim 9.90 \times 10^7$ 个/mL,平均值是 5.62×10^7 个/mL $\pm 2.28 \times 10^7$ 个/mL。Hara 等^[9]首次利用荧光显微计数法于1987年9月检测了日本近岸 Osaka 湾游离病毒的丰度,测得病毒丰度为 3.5×10^7 个/mL, Hennes 等^[10]与 Weinbauer 等^[19]使用不同的方法分别测墨西哥湾的病毒丰度为 $1.0 \times 10^7 \sim 12 \times 10^7$ 个/mL 和 $0.03 \times 10^7 \sim 7.9 \times 10^7$ 个/mL,与我们测得的结果非常相近。由于黄海是富营养海区,而南海是贫营养海区,所以黄海病毒丰度显著高于南海病毒丰度($0.35 \times 10^7 \sim 2.51 \times 10^7$ 个/mL)^[12]。

3.3 病毒丰度与其影响因素的关系

病毒是由一个核酸分子(DNA 或 RNA)与蛋白质

构成的核酸-蛋白质的复合体。它虽然具备了生命活动的最基本特征(复制与遗传),但不具备细胞的形态结构,是不“完全”的生命体,它们的主要生命活动必须在宿主细胞内才能表现,因此,病毒是彻底的寄生物^[25]。海洋病毒的宿主细胞主要是浮游植物和海洋细菌。Boehme 等与 Jiang 等报道美国佛罗里达的 Tampa 湾病毒丰度与叶绿素 *a* 浓度显著相关,说明浮游植物是病毒的主要宿主,可能的解释是富营养水域浮游植物生物量的增加导致了病毒丰度的增加。然而,在大部分的海洋环境中,研究结果表明病毒丰度与细菌丰度有着显著的相关关系,说明细菌是病毒的主要宿主,细菌的丰度控制着病毒丰度^[26-37]。从本研究的数据分析(表 1)看,病毒丰度与细菌丰度呈显著的负相关,而与叶绿素 *a* 浓度没有显著的相关关系,说明细菌很有可能是病毒的宿主,影响着病毒的空间分布。从图 3 和图 4 中细菌丰度和病毒丰度的表层分布图看,细菌丰度少的地方病毒丰度高,而叶绿素 *a* 浓度有高有低。例如在黄海南部,近长江口海域,由于受长江径流影响,带来大量的营养盐,刺激浮游植物生长,所以叶绿素 *a* 浓度在长江口附近比较高。由于浮游植物生长旺盛,对细菌的生

表 1 表层病毒丰度与温度、盐度、叶绿素 *a* 浓度和细菌丰度的相关关系

Tab. 1 Simple correlation coefficients between virus, bacterial abundance and environmental parameters in the surface layer

		VA	BA	VBR	Chla	<i>T</i>	<i>S</i>
VA	<i>r</i>	1					
	<i>P</i>						
	N	30					
BA	<i>r</i>	-0.477*	1				
	<i>P</i>	0.029					
	N	21	29				
VBR	<i>r</i>	0.634**	-0.687**	1			
	<i>P</i>	0.002	0.001				
	N	21	19	21			
Chla	<i>r</i>	-0.003	-0.408*	0.205	1		
	<i>P</i>	0.986	0.034	0.373			
	N	29	27	21	38		
<i>T</i>	<i>r</i>	0.666**	-0.643**	0.441*	0.446**	1	
	<i>P</i>	0	0	0.045	0.006		
	N	29	28	21	36	39	
<i>S</i>	<i>r</i>	-0.046	-0.06	-0.083	-0.352*	0.098	1
	<i>P</i>	0.81	0.758	0.72	0.03	0.553	
	N	30	29	21	38	39	41

注: * $P < 0.05$ 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)

长有所抑制而对病毒没有影响, 所以细菌丰度相对较低, 而病毒丰度较高。

海洋细菌与浮游植物的生长繁殖有密切的关系, 一方面, 细菌能够吸收浮游植物产生的溶解有机物进行二次生产^[38], 在为促进自身生长和增殖提供碳源的同时^[39], 也为浮游植物的生长提供必要的有机营养和生长因子, 并调节浮游植物的微生长环境^[40]; 另一方面, 细菌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^[41]。从表 1 中可以看出, 叶绿素 *a* 浓度与细菌丰度呈显著的负相关关系, 在图 3 中, 叶绿素 *a* 浓度高的地方细菌丰度低, 说明在黄海浮游植物和细菌的生长有一定的相互抑制作用。

病毒丰度的分布除了受生物因素(浮游植物, 细菌)影响, 同时也受非生物因素(温度, 盐度)影响。从表 1 中可以看出, 病毒丰度、叶绿素 *a* 浓度和 VBR 值与温度呈显著的正相关, 细菌丰度与温度呈显著的负相关, 说明在春季, 由于太阳辐射, 使表层水增温, 而且由于纬度的关系, 越往南增温越大, 所以合适的温度条件为生物生长提供条件。由于浮游植物指数生长时, 抑制细菌生长, 所以病毒就会选择感染大量的浮游植物, 而使病毒数量增加, 也就导致

了 VBR 增加。而病毒丰度, 细菌丰度和 VBR 与盐度之间没有显著的关系, 说明盐度对这些参数的影响并不明显。根据以上相关关系分析, 黄海海洋病毒的空间分布受盐度影响较小, 受温度影响较大。

病毒在海洋生态系统中的重要作用日益受到重视, 本文报道了海洋病毒在黄海的空间分布特征, 分析了病毒、细菌、浮游植物、温度和盐度的相互影响关系, 初步探讨了海洋病毒在黄海生态系统中的作用, 为黄海生态环境的研究和了解提供资料, 为更全面的研究黄海海洋生态系统打下基础。

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]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1983, 10: 257-263.
- [2] Fuhrman J A. Marine viruses and their biogeochemical and ecological and ecological effects[J]. *Nature*, 1999, 399: 541-548.
- [3] Bergh O, Borsheim K Y, Bratbak G, et al. High abundance of viruses found in aquatic environments [J]. *Nature*, 1989, 340(6233): 467-468.
- [4] Proctor L M, Fuhrman J A. Viral mortality of marine bacteria and cyanobacteria [J]. *Nature*, 1990, 343:

- 60-62.
- [5] Suttle C A, Chan A M, Cottrell M T. Infection of phytoplankton by viruses and reduction of primary productivity[J]. *Nature*, 1990, 347: 467-469.
- [6] Peduzzi P, Weinbauer M G. Effect of concentrating the virus-rich 200nm size fraction of seawater on the formation of algal flocs (marine snow) [J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 38: 1562-1565.
- [7] Chiura H X. Generalized gene transfer by virus-like particles from marine bacteria[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1997, 13: 75-83.
- [8] 李洪波, 肖天, 林凤翱. 海洋浮游病毒的研究方法[J]. *海洋科学*, 2010, 34(9): 97-101.
- [9] Hara S, Terauchi K, Koike I. Abundance of viruses in marine waters assessment by epifluorescence and transmission electron microscopy[J]. *Appl Environ Microb*, 1991, 57: 2731-2734.
- [10] Hennes K P, Suttle C A, Chan A M. Fluorescently labeled virus probes show that natural virus population can control the structure of marine microbial communities[J]. *Appl Environ Microb*, 1995, 61: 3623-3627.
- [11] Noble R T, Fuhrman J A. Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1998, 14: 113-118.
- [12] He L, Yin K, Yuan X, et al. Spatial Distribution of Viruses, Bacteria and Chlorophyll in the Northern South China Sea[J]. *Aquat Microb Ecol*, 2009, 54(2): 153-162.
- [13] 赵苑, 武洪庆, 李洪波, 等. 胶州湾浮游病毒的分布研究[J]. *海洋科学*, 2010, 34(7): 86-92.
- [14] 王保栋, 刘峰, 战闰. 黄海生源要素的生物地球化学研究评述[J]. *黄渤海海洋*, 2001, 19(2): 99-106.
- [15] Parsons T R, Maita Y, Lalli C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis[M]. Oxford: Pergamon Press, 1984: 7-37.
- [16] Kepner R L JR, Pratt J R. Use of fluorochromes for direct enumeration of total bacteria in environmental samples: past and present[J]. *Microbiol Rev*, 1994, 58: 603-615
- [17] Torrella F, Morita R Y. Evidence for a high incidence of bacteriophage particles in the waters of Yaquina Bay, Oregon: Ecological and taxonomical implications[J]. *Appl Environ Microb*, 1979, 37: 774-778.
- [18] Ewert D, Paynter M. Enumeration of bacteriophages and host bacteria in sewage and the activated-sludge treatment process[J]. *Appl Environ Microb*, 1980, 39: 67-69.
- [19] Weinbauer M G, Suttle C A. Comparison of epifluorescence and transmission electron microscopy for counting viruses in natural marine waters[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1997, 13: 225-232.
- [20] Bettarel Y, Sime-Ngando T, Amblard C, et al. A comparison of methods for counting viruses in aquatic systems[J]. *Appl Environ Microb*, 2000, 66: 2283-2289.
- [21] Sommaruga R, Krossbacher M, Salvenmoser W, et al. Presence of large virus-like particles in a eutrophic reservoir[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1995, 9: 305-308.
- [22] Proctor L. Advances in the study of marine viruses[J]. *Microsc Res Tech*, 1997, 37: 136-161.
- [23] Fuhrman J. Impact of viruses on bacterial processes[C]//Kirchman D. *Microbial Ecology of the Oceans*. New York: Wiley, 2000: 327-350.
- [24] Wommack K E, Colwell R R. Virioplankton: viruses in aquatic ecosystems[J]. *Microbiol Mol Biol Rev*, 2000, 64: 69-114.
- [25] 翟中和, 王喜忠, 丁明孝. 细胞生物学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [26] Boehme J, Frischer M E, Jiang S C, et al. Viruses, bacterioplankton in the southeastern Gulf of Mexico: distribution and contribution to oceanic DNA pools[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, 97: 1-10.
- [27] Cochlan W P, Wikner J, Steward G F, et al. Spatial distribution of viruses, bacteria, and chlorophyll a in neritic, oceanic and estuarine environments[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, 92: 77-87.
- [28] Hara S, Koike I, Terauchi K, et al. Abundance of viruses in deep oceanic waters[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1996, 145: 269-277.
- [29] Hennes K P, Simon M. Significance of bacteriophages for controlling bacterioplankton growth in a mesotrophic lake[J]. *Appl Environ Microb*, 1995, 61: 333-340.
- [30] Jiang S C, Paul J H. Seasonal and diel abundance of viruses and the occurrence of lysogeny/ bacteriocinogeny in the marine environment[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1994, 104: 163-172.
- [31] Kepner R L, Wharton R A, Suttle C A. Viruses in Antarctic lakes[J]. *Limnol Oceanogr*, 1998, 43: 1754-1761.

- [32] Paul J H, Rose J B, Jiang S C, et al. Distribution of viral abundance in the reef environment of Key Largo, Florida[J]. *Appl Environ Microb*, 1993, 59: 718-724.
- [33] Steward G F, Smith D C, Azam F. Abundance and production of bacteria and viruses in the Bering and Chukchi Sea[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1996, 131: 287-300.
- [34] Tuomi P, Torsvik T, Heldal M, et al. Bacterial population dynamics in a meromictic lake[J]. *Appl Environ Microb*, 1997, 63: 2 181-2 188.
- [35] Weinbauer M G, Fuks D, Peduzzi P. Distribution of viruses and dissolved DNA along a coastal trophic gradient in the northern Adriatic Sea[J]. *Appl Environ Microb*, 1993, 59: 4 074-4 082.
- [36] Weinbauer M G, Peduzzi P. Significance of viruses versus heterotrophic nanoflagellates for controlling bacterial abundance in the northern Adriatic Sea[J]. *J Plankton Res*, 1995, 17: 1 851-1 856.
- [37] Weinbauer M G, Fuks D, Puskaric S, et al. Diel, seasonal, and depth-related variability of viruses and dissolved DNA in the Northern Adriatic Sea[J]. *Microb Ecol*, 1995, 30: 25-41.
- [38] 郑天凌, 王海黎, 洪华生. 微生物在碳的海洋生物地球化学循环中的作用[J]. *生态学杂志*, 1994, 13(4): 47-50.
- [39] Jennifer C, James A A E, Ellen T M. Utilization and turnover of labile dissolved organic matter by bacterial heterotrophs in eastern North Pacific surface waters [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1996, 139: 267-279.
- [40] Cho B C, Azam F. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior [J]. *Nature*, 1988, 332: 441-443.
- [41] 周玉航, 潘建明, 叶瑛, 等. 细菌、病毒与浮游植物相互关系及其对海洋生物地球化学循环的作用[J]. *台湾海峡*, 2001, 20(3): 340-345.

Spatial distribution of viruses in spring in the Yellow Sea

HE Lei^{1,2,3}, YIN Ke-dong¹, LIN Zhi-fen¹, TIAN Tian¹, YUAN Xiang-cheng¹

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Nov., 20, 2009

Key words: Yellow Sea; Viral abundance (VA); Bacterial abundance (BA); spatial distribution

Abstract: The spatial distribution of viral and bacterial abundance as well as chlorophyll *a* (chl *a*) concentrations were investigated during spring (April 2006) in the Yellow Sea. The viral abundance varied from 1.08×10^7 /mL to 9.90×10^7 /mL with the average of 5.62×10^7 /mL \pm 2.28×10^7 /mL in spring, exceeding bacterial abundance (from 0.01×10^7 /mL to 0.16×10^7 /mL with the average of 0.07×10^7 /mL \pm 0.03×10^7 /mL) by two order of magnitude. The chlorophyll *a* concentrations varied from 0.09 μ g/L to 4.94 μ g/L with the average of 0.75μ g/L \pm 0.84μ g/L, and the highest concentration occurred near the Changjiang River estuary. A multiple regression analysis showed that the bacteria and temperature were the main factors governing the viral spatial distribution in the Yellow Sea.

(本文编辑: 张培新)