

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.14

渤海湾浮游细菌分布特征及环境影响因素

赵海萍^{1,2}, 李清雪², 陶建华¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300354;
2. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:于2011年5月、2012年5月和2012年11月分别对渤海湾33个站位表层水体中的浮游细菌及环境因子进行了调查,探讨渤海湾浮游细菌生态分布特征及其与环境影响因子的关系。结果表明:在渤海湾表层水体中,2011年5月的海洋浮游细菌丰度为 $(2.51 \sim 28.39) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,2012年5月的浮游细菌丰度为 $(2.62 \sim 87.26) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,2012年11月浮游细菌丰度为 $(2.18 \sim 18.15) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$;浮游细菌数量在空间上都是近岸站位高于远岸站位;2011年5月和2012年5月,浮游细菌生长所需有机碳分别来源于浮游植物胞外分泌的溶解有机碳和陆源输入有机碳,浮游细菌与氨氮都有极显著相关性关系,与磷酸盐均呈显著负相关关系;2012年11月,浮游细菌除了与亚硝酸盐氮、水温呈正相关外,与其他环境因子都呈负相关关系。

关键词:浮游细菌;主成分分析;环境因子;渤海湾

中图分类号:Q178.532 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2018)05-0088-07

Distribution characteristics of bacterioplankton in Bohai Bay and its environmental influence factors

ZHAO Haiping^{1,2}, LI Qingxue², TAO Jianhua¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;
2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The bacterioplankton and its environmental factors at 33 stations in the Bohai Bay were investigated in May 2011, May 2012 and November 2012 to probe the distribution characteristics of the bacterioplankton in the Bohai Bay and its relationships with the environmental factors. The results showed that: 1) the abundance of bacterioplankton in Bohai Bay surface water in May 2011, May 2012 and November 2012 changed from $2.51 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ to $28.39 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$, from $2.62 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ to $87.26 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ and from $2.18 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ to $18.15 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$, respectively. 2) The spatial change of bacterioplankton abundance was higher in inshore than offshore. 3) the organic carbon for phytoplankton growing in May 2011 and May 2012 are from exocytosis dissolved organic carbon of phytoplankton and terrestrial input of organic carbon, respectively. The bacterioplankton abundance was significantly correlated with ammonia nitrogen, and was negatively significantly correlated with phosphorus both in May 2011 and in May 2012. The bacterioplankton abundance was positive correlated with water temperature and nitrite nitrogen, while negatively correlated with other environmental factors in November 2012.

Key words: bacterioplankton; principal component analysis; environment factors; Bohai Bay

海洋细菌在海洋生态系统中既是生产者又是消费者,能直接吸收利用主食物链的代谢“废物”——溶解有机物,而增长自身的生物量,随后进入经典食物链,同时也参与颗粒有机物的矿化、分解过程,从中获得能源和营养物质,充当分解者角色^[1]。海洋细菌在海洋生态系统的物质和能流循环中起着不可替代的作用。国内外学者对海洋细菌的生态特征、群落结构和营养响应机理进行了大量研究^[2-5],对海洋细菌与环境影响因素的关系也进行了大量研究,如白洁等^[6]在南海南部海域、张喆等^[7]南海北部海域、沈烽等^[8]在南京玄武湖、李建洋等^[9]在深圳近海表层海域、陈淑文等^[10]在深圳湾海域分别进行了浮游细菌与环境影响因素之间关系的研究。

渤海湾位于渤海的最西边,是一个半封闭的淤泥质浅水海湾。渤海湾地处环渤海经济圈的中心位置,沿岸大量的工业、农业、生活废水输入,加上该海域水体自净能力比较差,致使水体富营养化和赤潮等水质灾害频繁发生^[11-12],成为中国最受威胁的海洋生态环境之一,受到了广泛关注^[12-13]。

李清雪等^[14-15]调查研究了渤海湾近岸海域表层水体中的自养、异养浮游细菌和总浮游细菌的生态分布及影响因素,乔旭东等^[16]对渤海湾南部近岸海域 10 个站位的总浮游细菌、活菌、可培养异养细菌、总大肠菌群的数量进行了调查研究。但已有报道的研究时间相对较早,研究范围也相对较小,为更好地了解渤海湾浮游细菌的生态环境状况,有必要对渤海湾进行大面积的实地调查研究。本研究分别于 2011 年 5 月、2012 年 5 月、2012 年 11 月对渤海湾海域 33 个站位表层海水中浮游细菌丰度进行了 3 个航次的调查研究,旨在探求浮游细菌的分布特征及其与环境影响因素之间的关系。

1 调查区域和站位设定

本研究在渤海湾 117°30'E ~ 119°E、38°N ~ 39°N 的范围内共设 33 个站位,见图 1。

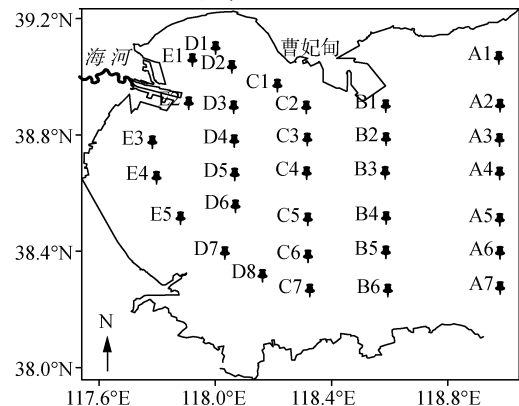


图 1 渤海湾研究区域及采样站位

2 样品采集和测定

2.1 水样的采集

于 2011 年 5 月、2012 年 5 月和 2012 年 11 月分别采集了 14、33 和 33 个站位的水样用于浮游细菌总数和环境因子测定。使用卡盖式采水器(型号 QCC15,北京普雷德仪器设备有限公司)采集各站位的表层海水(水面下 0.5 m 左右处),分装到 500 mL 无菌采样瓶中,并立即加入无菌无颗粒甲醛(事先经 0.2 μm 的无菌滤膜过滤)固定水样(无菌甲醛的质量分数为 2%),用于浮游细菌总数的测定。整个采样过程要迅速,避免外界微生物污染。然后将水样置于 4℃ 避光保存,带回实验室,并于一周内分析完毕。渤海湾海域表层海水环境影响因子水样的采集、保存和运输严格按照 GB17378—2007《海洋监测规范》中的规定进行。

2.2 浮游细菌的测定

本研究渤海湾浮游细菌的计数采用吖啶橙染色-荧光显微直接计数法(即吖啶橙落射荧光显微镜直接计数法)^[17]。取 1 mL 待测样品于无荧光黑色滤膜(WHATMAN 聚碳酸酯滤膜)上,在负压(50 kPa)条件下,把样品慢慢抽滤至滤膜刚刚呈湿润状态,释放真空;加入吖啶橙染色液(0.2 μm 的无菌滤膜过滤液)3 或 4 滴,染色 5 ~ 10 min,然后在同样负压下抽滤至干;在载玻片上贴上滤膜(载菌一面朝上),并在盖玻片上加一小滴无荧光镜油,具油面朝下盖紧滤膜(滤膜上下两面均不能有气泡);在落射荧光显微镜(Leica DM 5000B)的油镜(100 倍)条件下,随机取 20 个视野,计算具有细菌形态的、呈亮绿色或红色荧光的细胞数。计算公式为

$$B_N = \frac{N_a S}{(1 - 0.05) S_f V} \quad (1)$$

式中: B_N 为样品含菌数, L^{-1} ; N_a 为各视野平均菌数; S 为滤膜实际过滤面积, mm^2 ; S_f 为显微镜视野面积, mm^2 ; 0.05 为加入 37% ~ 40% 甲醛固定样品总体积的比例; V 为过滤样品量, L 。

测定水样时,应同时测无菌水作为空白对照,且每个视野的细菌数量不得出现 1 个以上。检测过程按照无菌操作进行,吖啶橙染色剂现用现配。

2.3 环境因子的测定

依据 GB12763.4—2007《海洋调查规范》第 4 部分“海水化学要素调查”和 GB17378—2007《海洋监测规范》第 4 部分“海水分析”中的监测方法,对渤海湾表层水体的主要环境因子进行了测定,主要包括水温、无机氮营养盐(含 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_2^- - N$ 、 $NO_3^- - N$)、活性磷酸盐($PO_4^{3-} - P$)、硅酸盐、pH、Chl-a、DOC、

3 结果与讨论

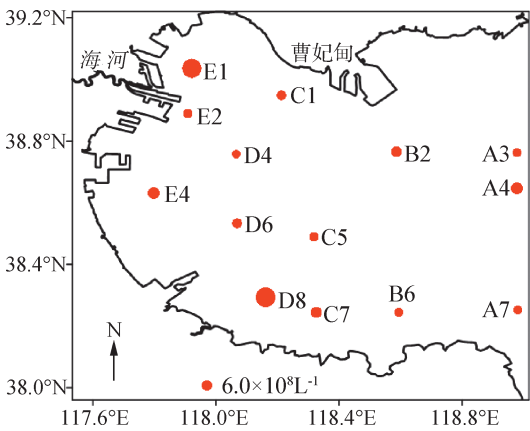
3.1 浮游细菌丰度的分布

在渤海湾表层水体中,2011 年 5 月的海洋浮游细菌丰度在 $(2.51 \sim 28.39) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ 之间,平均值为 $8.95 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$;浮游细菌丰度最高值出现在 E1 站位,在 D5 站位附近出现了最低值,在 E2 站位出现次高值 $26.72 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,D7、D8 站位及其附近海域也出现浮游细菌丰度的高值区 $(10.19 \times 10^8 \text{ L}^{-1})$ 。2011 年 5 月浮游细菌在研究海域的空间分布特征是近岸海域细菌丰度比较高,远岸相对较低,见图 2。

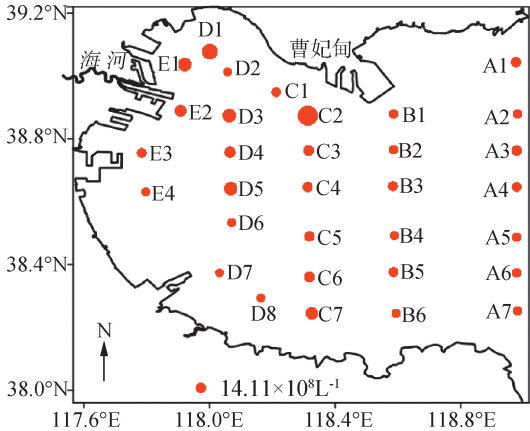
2012 年 5 月的海洋浮游细菌丰度在 $(2.62 \sim 87.26) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,平均值为 $18.44 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$;分别在 C2 站位和 D8 站位及其附近海域出现了最高值和最低值;在 C2、C3、C6、D1、D2、D4、D5、D6、E2、E3 等站位及其附近海域出现高值区,在 A2、A5、A6、A7、B4、C7、D3、D7、D8、E1、E5 等站位及其附近海域出现稍高于最低值的低值区;整体空间趋势是海湾北部、中部海域的水体中浮游细菌丰度高于南部的,近岸海域的浮游细菌丰度明显高于外海海域,曹妃甸附近海域浮游细菌丰度出现一个高值区,海河口附近及其辐射海区内的浮游细菌丰度很高,D7 站位附近海域却出现相对较低的浮游细菌丰度,见图 2。

2012 年 11 月海洋浮游细菌丰度在 $(2.18 \sim 18.15) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,平均值为 $8.76 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$;分别在 B5 站位和 A1 站位及其附近海域出现了最高值和最低值;在 A4、A5、A7、B1、B2、B5、C2、C3、D4、D5、D6、E1、E4、E5 站位及其附近海域出现高值区,在 B6、C5、D1、D2、D7 站位及其附近海域出现低值区;湾内南部海域浮游细菌丰度较北部的高,南部海域浮游细菌丰度的空间变化趋势是近岸的较外海的高;海湾北部近岸海域(D1、D2 站位附近)浮游细菌丰度出现一个低值区,由南堡到曹妃甸附近海域浮游细菌丰度逐渐增大,并在 B1 站位附近海域出现高值区,见图 2。

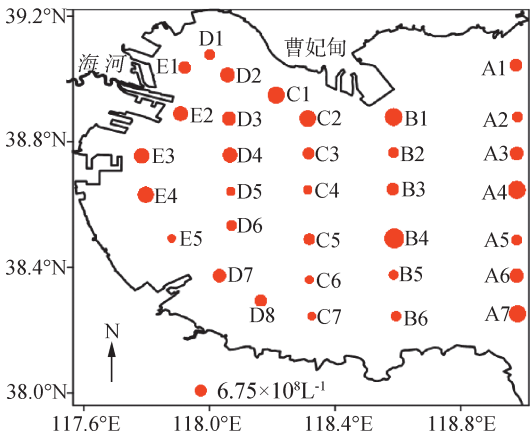
3 个航次的调查结果显示,2012 年 5 月渤海湾海域浮游细菌丰度无论最高值或是平均值都明显高于 2011 年 5 月的和 2012 年 11 月的,2012 年 11 月的浮游细菌丰度相对最低。3 个航次的浮游细菌丰度的空间分布显示:总体都表现为近岸海域高于远岸海域;2011 年 5 月和 2012 年 11 月的分布都是海湾南部高于北部,而 2012 年 5 月的分布是海湾北部、中部海域高于南部。



(a) 2011 年 5 月



(b) 2012 年 5 月



(c) 2012 年 11 月

图 2 3 个航次渤海湾浮游细菌丰度的分布

3.2 渤海湾浮游细菌分布特征讨论

本研究结果与国内其他海域的浮游细菌丰度范围基本相当(表 1)。

2011 年 5 月,海洋浮游细菌最高值出现在 E1 站位及其附近海域,在 E2 站位及其附近海域出现次高值,主要是由于站位 E1 和 E2 位于海河口附近的陆海混合区,水体中含有丰富的陆源有机物和营养盐,浮游细菌可以充分利用这些物质进行繁殖生长^[23-25]。渤海湾湾口海域的水体与渤海水体交换能力相对较强,渤海水体携带相对多的营养物质,可

能是造成 A4 站位及其附近海域也出现浮游细菌高值区的原因^[23]。

表 1 国内其他海区的总细菌丰度 $10^8 L^{-1}$

海 区	总细菌数	平均值	数据来源
黄 海	2.37 ~ 13.3	5.28	赵三军等 ^[18]
东 海	3.05 ~ 13.6	6.90	赵三军等 ^[18]
三亚湾	4.28 ~ 31.7	8.20	周伟华等 ^[19]
渤海湾天津海域	5.30 ~ 192	35.80	乔旭东等 ^[16]
台湾海峡	0.35 ~ 20.6	6.72	郑天凌等 ^[20]
东海赤潮高发区	0.585 ~ 9.26	3.27	王新等 ^[21]
深圳湾	4.10 ~ 182	52.10	周凯等 ^[22]
渤海湾	2.18 ~ 87.3	12.10	本 文

2012 年 5 月,海洋浮游细菌丰度呈现渤海湾北部、中部海域高于南部海域,及近岸海域明显高于外海海域的趋势。浮游细菌丰度在曹妃甸附近海域形成一个高值区,在海河口附近及其辐射海区内也很高,D7 站位附近海域却出现相对较低的浮游细菌丰度。本结果与乔旭东等^[16]相关研究相比较,共同点是海河口附近海域浮游细菌丰度都比较高,近岸海域高于远岸海域,均体现了渤海湾海域浮游细菌丰度受到海河陆源输入的影响比较大。渤海湾处于环渤海经济圈的中心位置,沿岸大量的工业、农业、生活废水通过海河等直接输入渤海湾,加上该海域水体封闭性强、水体交换和自净能力都比较差,污染物在海域内长期滞留,为海洋细菌的生长繁殖提供了丰富的有机物和营养盐,这是造成海河口辐射海区内浮游细菌丰度高的原因。渤海湾北部近岸海域、曹妃甸附近海域浮游细菌丰度比较高的原因都与海河口海域高值区的原因相似;不同点是,本研究中渤海湾北部、中部海域的浮游细菌丰度高于南部,而乔旭东等^[16]研究显示渤海湾中部海域的浮游细菌丰度较低。二者研究时间和区域点位不同,可能是研究结果有差异的主要原因。本研究站位覆盖整个渤海湾,采样时间为 2011 年和 2012 年,而乔旭东等^[16]的研究站位是渤海湾近岸海域且主要分布在海湾的南半部分,研究时间为 2004 年。2011 年 5 月和 2012 年 5 月浮游细菌的调查结果稍有差别,产生这一结果的主要原因可能有二:一是 2011 年 5 月因故仅调查了 14 个站位的水样,2012 年 5 月是全站位(33 个站位)的调查;二是采样过程的天气条件,2011 年 5 月采样期间相对风浪较多,2012 年 5 月采样期间风和日丽的天气条件较多。

2012 年 11 月渤海湾内南部海域的浮游细菌丰度较北部的高,由南堡向曹妃甸附近海域的浮游细菌丰度逐渐增大。渤海湾南部海域相对比较开阔、近岸水深相对比较浅,且南部海域养殖业相对较发

达,再加上 11 月海水与底质的物质交换比较明显,大量底质营养物质被传递到上覆水体中,这可能是导致该时期渤海湾南部海域浮游细菌丰度较北部高的原因。

3.3 渤海湾浮游细菌与环境因子的关系

采用 R 语言(版本 3.1.0)对渤海湾表层浮游细菌、浮游植物与环境因子^[26]之间的关系进行相关性和主成分分析,结果见图 3~5。

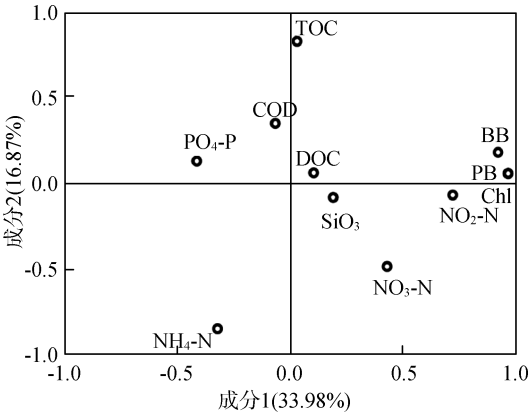


图 3 2011 年 5 月浮游细菌与环境因子在主成分 1、2 下的得分

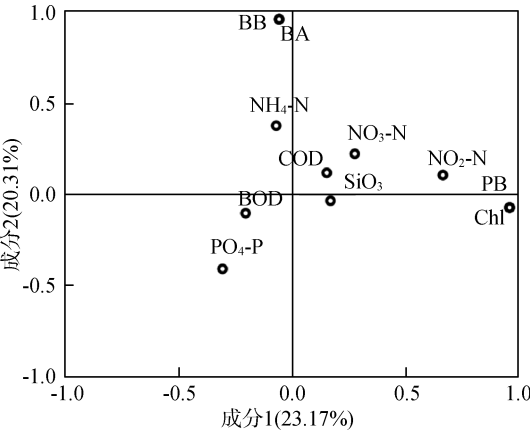


图 4 2012 年 5 月浮游细菌与环境因子在主成分 1、2 下的得分

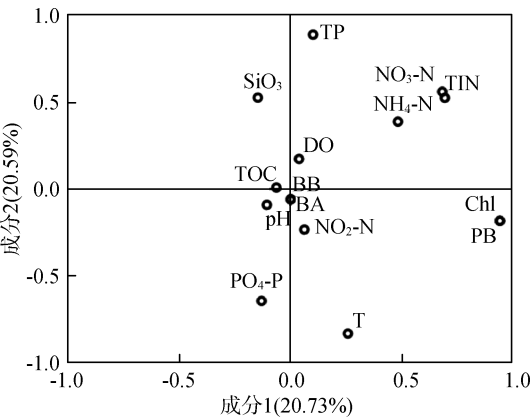


图 5 2012 年 11 月浮游细菌与环境因子在主成分 1、2 下的得分

2011 年 5 月,浮游细菌和浮游植物有极显著的正相关关系。浮游植物与浮游细菌之间的关系相当密切和复杂,一方面,浮游植物胞外分泌大量溶解有机碳供浮游细菌进行二次生产^[25];另一方面,通过生物竞争、分泌特殊物质等途径,浮游细菌可以抑制浮游植物的生长繁殖,甚至裂解其细胞^[27]。2011 年 5 月渤海湾表层水体中浮游细菌和浮游植物的高度正相关性进一步验证了浮游植物和浮游细菌的密切关系。该时期浮游细菌与 TOC 呈弱正相关关系,与 COD 呈负相关关系,综合体现了 2011 年 5 月渤海湾浮游细菌生长繁殖所需的有机碳主要来源于浮游植物胞外分泌的溶解有机碳,该时期浮游细菌的数量、生物量受浮游植物现存量的影响比较大。

2011 年 5 月浮游植物生物量和浮游细菌生物量与氨氮呈显著负相关关系,与亚硝酸盐氮、硝酸盐氮呈正相关关系,且浮游细菌生物量与氨氮呈现的负相关关系更明显。这些说明该时期渤海湾表层海域浮游植物和浮游细菌的生长繁殖受营养盐含量的调节,浮游植物和浮游细菌更优先利用氨氮^[28],并且二者对氨氮的吸收存在竞争机制^[29],造成水体中氨氮含量的锐减而呈现出显著负相关关系。由于浮游植物和浮游细菌在自身生长繁殖过程中对碳、氮、磷是各按一定比例吸收利用的,所以大量氨氮消耗的同时也有大量磷的消耗,这可能是造成水体中磷酸盐与浮游植物生物量和浮游细菌生物量呈显著负相关关系的原因。另外,浮游细菌生物量和浮游植物生物量均与 TOC 呈现正相关关系,说明陆源有机碳在一定程度上会刺激浮游植物和浮游细菌的生长繁殖^[30]。浮游细菌生物量和浮游植物生物量与溶解有机碳、硅酸盐在同一方向上(图 3),即浮游细菌生物量和浮游植物生物量会随着溶解有机碳、硅酸盐的增加而增加。

2012 年 5 月,浮游细菌与浮游植物没有明显的相关关系,二者都与 COD 呈现正相关关系,说明该时期浮游细菌生长繁殖需要的有机碳源主要是陆源输入有机物,浮游植物胞外分泌的溶解有机碳对浮游细菌的生长贡献相对不明显。该时期渤海湾浮游细菌与 BOD 呈现负相关关系,说明该时期由陆源输入的有机物促进浮游细菌的大量、快速繁殖,造成水体中可降解有机物迅速减少。2012 年 5 月,浮游细菌生物量与氨氮呈现极显著的正相关关系,与亚硝酸盐氮和硝酸盐氮呈正相关关系,而与活性磷酸盐呈现极显著的负相关关系。由于海洋细菌吸收营养物质进行自身生长时,依据自身 C、N、P 比值来建立其生理状态所调节的化学平衡^[31],造成海洋浮游细菌生物

量与活性磷酸盐呈极显著负相关关系,这一结果与 2011 年 5 月的研究结果相同。

2012 年 11 月,渤海湾浮游细菌生物量除了与亚硝酸盐氮、水温呈现正相关关系外,与其他环境因子都呈负相关,不同于无机营养盐促进浮游细菌生长繁殖的规律。出现这一结果的原因可能是,海洋细菌吸收无机营养盐进行生物合成时,该生物合成是建立在自身生理状态的化学平衡上^[32]。一般而言,浮游细菌的生长增殖离不开营养盐的供给,在一定条件下,无机营养盐的种类、形态和浓度含量对细菌的生长具有正向促进作用^[33-36]。但当海水中某元素的可利用量满足不了细菌维持这种平衡时,该元素就成为细菌生长的限制因子,进而影响细菌对其他元素的吸收利用。而且,细菌的生长繁殖只有在不受碳源影响的前提下,无机氮、活性磷的作用才会显现出来,当三大营养源的比例不符合浮游细菌生长繁殖所需的比例时,无机营养盐与浮游细菌的相关关系就会发生变化。3 个航次的主因子分析结果显示:2011 年 5 月,浮游细菌与浮游植物密切相关,都在被提取的第一主成分中,对海洋水环境指示作用的贡献率达到 33.98%;2012 年 5 月和 2012 年 11 月浮游细菌作用项分别处于第二、第三主成分中,其对海洋水环境指示作用的贡献率分别为 20.312%、13.615%。

4 结 论

在渤海湾表层水体中,海洋浮游细菌丰度在 $(2.18 \sim 87.26) \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ 之间。2011 年 5 月、2012 年 5 月和 2012 年 11 月 3 个航次浮游细菌丰度的空间分布都是近岸高于远岸。2011 年 5 月和 2012 年 11 月的浮游细菌丰度均是海湾南部海域的高于北部海域的,而 2012 年 5 月是海湾北部、中部海域的高于南部海域的。陆源输入有机碳和浮游植物胞外分泌有机碳对浮游细菌的生长繁殖在不同时期的贡献程度不同。

渤海湾表层水体中,2011 年 5 月,浮游细菌生长繁殖所需碳源主要是浮游植物胞外分泌的溶解有机碳,浮游细菌生物量与氨氮呈显著负相关关系,与亚硝酸盐氮、硝酸盐氮呈正相关关系,与磷酸盐呈显著负相关关系;2012 年 5 月,浮游细菌生长繁殖所需碳源主要是陆源输入有机物,浮游细菌生物量与氨氮呈极显著的正相关关系,与亚硝酸盐氮和硝酸盐氮呈正相关关系,而与活性磷酸盐呈极显著的负相关关系;2012 年 11 月,渤海湾浮游细菌生物量除了与亚硝酸盐氮、水温呈正相关关系外,与其他环境因子都呈负相关关系。

参考文献:

- [1] KEMP P F, SHERR E B, et al. Handbook of methods in aquatic microbial ecology [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993: 143-147.
- [2] 郭凯旋, 张瑜斌, 章洁香, 等. 雷州半岛近海夏季浮游植物和浮游细菌生物量的分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 31 (1): 8-15. (GUO Kaixuan, ZHANG Yubin, ZHANG Jiexiang, et al. Biomass distribution of phytoplankton and bacterioplankton in coastal areas of Leizhou Peninsula in summer and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31 (1): 8-15. (in Chinese))
- [3] SHAN D P, WEI G S, LI M C, et al. Distribution and diversity of bacterioplankton communities in subtropical seawater around Xiamen Island, China [J]. Microbiological Research, 2015, 175: 16-23.
- [4] ALEXANDRA L, CAPIAUX H, Vincent Turpin, et al. Bacterial community structure of the marine diatom *Haslea ostrearia* [J]. Algal Research, 2016, 16: 418-426.
- [5] DONG Z, WANG K, CHEN X, et al. Temporal dynamics of bacterioplankton communities in response to excessive nitrate loading in oligotrophic coastal water [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(2): 656-663.
- [6] 白洁, 刘小沙, 侯瑞, 等. 南海南部海域浮游细菌群落特征及影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2950-2957. (BAI Jie, LIU Xiaosha, HOU Rui, et al. Community structure and influencing factors of bacterioplankton in the southern South China Sea [J]. China Environmental Science, 2014, 34(11): 2950-2957. (in Chinese))
- [7] 张喆, 王晓红, 巩秀玉, 等. 南海北部海域春季浮游细菌和病毒空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1639-1649. (ZHANG Zhe, WANG Xiaohong, GONG Xiuyu, et al. Ecological distribution of bacterioplankton and virioplankton in the north of South China Sea in spring [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1639-1649. (in Chinese))
- [8] 沈烽, 赵大勇, 黄睿, 等. 南京玄武湖浮游细菌群落结构的季节变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 662-669. (SHEN Feng, ZHAO Dayong, HUANG Rui, et al. Seasonal variation of bacterioplankton community structure in Xuanwu Lake (Nanjing) and its relationship with environmental factors [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3): 662-669. (in Chinese))
- [9] 李建洋, 赵月, 谢宁栋, 等. 深圳近海表层浮游细菌分布特征及其环境影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 1-11. (LI Jianyang, ZHAO Yue, XIE Ningdong, et al. Distribution characteristics of bacterioplankton and effect of environmental factors in the coastal surface waters of Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 1-11. (in Chinese))
- [10] 陈淑文, 宋俊廷, 类成龙, 等. 深圳湾浮游细菌生物量的时空动态及影响因素[J]. 海洋学研究, 2016, 34(4): 84-91. (CHEN Shuwen, SONG Junting, LEI Chenglong, et al. Temporal and spatial dynamics of bacterioplankton biomass and the influenced factors in Shenzhen Bay [J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(4): 84-91. (in Chinese))
- [11] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37. (LIU Cheng, WANG Zhaoyin, HE Yun, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay [J]. Research of Environmental Sciences, 2002, 15(5): 33-37. (in Chinese))
- [12] 杨世民, 董树刚, 窦明武, 等. 渤海湾海域生态环境的研究: II. 水体富营养化的评价与分析[J]. 海洋环境科学, 2008, 26(6): 541-545. (YANG Shimin, DONG Shugang, DOU Mingwu, et al. Study on ecological environment in the Bohai Bay: II. Assessment of coastal eutrophication [J]. Marine Environmental Science, 2008, 26(6): 541-545. (in Chinese))
- [13] ZHAN S, PENG S, LIU C, et al. Spatial and temporal variations of heavy metals in surface sediments in Bohai Bay, North China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(4): 482-487.
- [14] 李清雪, 赵海萍, 陶建华. 渤海湾海域浮游细菌的生态研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 50-53. (LI Qingxue, ZHAO Haiping, TAO Jianhua. Ecological Research of Bacterioplankton in the Bohai Bay Waters [J]. Ocean Technology, 2005, 24(4): 50-53. (in Chinese))
- [15] 赵海萍, 陶建华, 李清雪. 渤海湾海域硝化、亚硝化细菌的生态研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 44-49. (ZHAO Haiping, TAO Jianhua, LI Qingxue. Ecological research of nitrobacteria and ntrosobacteria in the Bohai Bay waters [J]. Ocean Technology, 2005, 24(4): 44-49. (in Chinese))
- [16] 乔旭东, 唐学玺, 肖慧, 等. 渤海湾近岸海域的细菌数量分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 273-276. (QIAO Xudong, TANG Xuexi, XIAO Hui, et al. Analysis of bacterial abundance in costal Bohai Bay [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(2): 273-276. (in Chinese))
- [17] Hobbie J E, Daley R J, Jasper S. Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1977, 3: 1225-1228.
- [18] 赵三军. 黄东海海洋异养细菌的生态学研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2002.
- [19] 周伟华, 王汉奎, 董俊德, 等. 三亚湾秋、冬季浮游植物和细菌的生物量分布特征及其与环境因子的关系[J].

- 生态学报, 2006, 26 (8): 2633-2639. (ZHOU Weihua, WANG Hankui, DONG Junde, et al. Phytoplankton and bacterial biomass and their relationship with the environmental factors in autumn and winter in the Sanya Bay, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (8): 2633-2639. (in Chinese))
- [20] 郑天凌, 田蕴, 苏建强, 等. 海洋赤潮生物与厦门海域几种细菌的生态关系研究[J]. 生态学报, 2002, 22 (12): 2063-2070. (ZHENG Tianling, TIAN Yun, SU Jianqiang, et al. Study on the ecological relationship between a red-tide causative alga and three strains of bacteria isolated from Xiamen harbor [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (12): 2063-2070. (in Chinese))
- [21] 王新, 李志江, 郑天凌. 海洋浮游细菌在东海赤潮高发区的分布与活性[J]. 环境科学, 2010, 31 (2): 287-295. (WANG Xin, LI Zhijiang, ZHENG Tianling. Distribution and activity of marine bacterioplankton at frequent HAB area of East China Sea [J]. Environmental Science, 2010, 31 (2): 287-295. (in Chinese))
- [22] 周凯, 章洁香, 张瑜斌, 等. 深圳湾浮游细菌生物量的时空分布及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2013, 32 (3): 65-71. (ZHOU Kai, ZHANG Jiexiang, ZHANG Yubin, et al. Temporal and spatial distributions of bacterioplankton biomass and the influenced factors in Shenzhen Bay [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32 (3): 65-71. (in Chinese))
- [23] 白洁, 李岩然, 李正炎, 等. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2004, 33 (6): 841-846. (BAI Jie, LI Kuiran, LI Zhengyan, et al. Relationship between the environmental factors and distribution of bacterioplankton in the Bohai Sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Sciences), 2004, 33 (6): 841-846. (in Chinese))
- [24] LEE S, FUHRMAN J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, 53: 1298-1303.
- [25] 李洪波. 南黄海浮游细菌的分布特点与水文现象的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [26] 蒋玉玲, 李青, 陈晓宏, 等. 广州市大金钟水库浮游植物与环境因子的关系[J]. 水资源保护, 2011, 27 (1): 46-50. (JIANG Yuling, LI Qing, CHEN Xiaohong, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in Dajingzhong reservoir of Guangzhou [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (1): 46-50. (in Chinese))
- [27] JENNIFER C, JAMES A E, ELLEN T M. Utilization and turnover of labile dissolved organic matter by bacterial heterotrophs in eastern North Pacific surface waters [J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 139: 267-279.
- [28] 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地球化学循环的作用[J]. 台湾海峡, 2001, 20 (3): 340-345. (ZHOU Yuhang, PAN Jianming, YE Ying, et al. Relationship between bacterium, virus and phytoplankton and their effects to geochemical cycling in ocean [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20 (3): 340-345. (in Chinese))
- [29] MIDDLEBURG J J, NIEUWENHUIZE J. Nitrogen uptake by heterotrophic bacteria and phytoplankton in the nitrate-rich Thames estuary [J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 20 (3): 13-21.
- [30] ANDERSON T R, WILLIAMS P J B. Modeling the seasonal cycle of dissolved organic carbon at station E1 in English Channel [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 46: 93-109.
- [31] 李筠, 周宏霞, 刘佳琳, 等. 青岛近岸特征环境中海洋异养细菌的分布规律及其分子鉴定[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36 (6): 965-970. (LI Yun, ZHOU Hongxia, LIU Jialin, et al. Distribution and identification of marine heterotrophic bacteria in different sea areas close to the shore of Qingdao [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences), 2006, 36 (6): 965-970. (in Chinese))
- [32] 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.
- [33] 张笑欣, 于瑞宏, 张宇瑾, 等. 浅水湖泊稳态转换模型PCLake研究进展[J]. 水资源保护, 2017, 33 (3): 19-24. (ZHANG Xiaoxin, YU Ruihong, ZHANG Yujin, et al. Progress in research of regime shift model PCLake for shallow lakes [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (3): 19-24. (in Chinese))
- [34] 赵海萍, 陈旺, 李清雪, 等. 漳河上游水质时空分异特征及污染源识别[J]. 水资源保护, 2017, 33 (4): 47-54. (ZHAO Haiping, CHEN Wang, LI Qingxue, et al. Spatio-temporal variation of water quality and pollutant source identification in upper reaches of Zhanghe River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (4): 47-54. (in Chinese))
- [35] 江磊, 朱德军, 陈永灿, 等. 我国地表水体粪大肠菌群污染现状分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (3): 11-18. (JIANG Lei, ZHU Dejun, CHEN Yongcan, et al. Analysis on fecal coliform pollution in surface waters of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (3): 11-18. (in Chinese))
- [36] 尚淑丽, 顾正华, 曹晓萌. 水利工程生态环境效应研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (1): 14-19. (SHANG Shuli, GU Zhenghua, CAO Xiaomeng. Review of research on ecological and environmental effects of water conservancy projects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (1): 14-19. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-05 编辑: 彭桃英)