

黄海夏季沉积物中异养细菌的现存量及分布特点*

孟昭翠^{1,2} 徐奎栋¹ 类彦立¹ 和莹莹^{1,2} 李承春^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生物分类与系统演化实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

提要 采用 DAPI 荧光染色技术, 进行了 2007 年 6 月和 2008 年 7 月黄海底栖异养细菌的丰度和生物量及分布特点研究。结果表明, 2007 年底栖细菌的丰度为 $(1.13 \pm 0.39) \times 10^9$ cells/cm³, 生物量为 $(49.63 \pm 17.26) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$; 2008 年底栖细菌的现存量较 2007 年低了约 43%。南黄海的底栖细菌现存量较北黄海分别低 8%(2007 年)和 13%(2008 年), 而中央冷水团则较其外围区域高约 10%和 37%, 在南黄海呈现中央冷水区域高于近岸的分布特点, 而在北黄海则正相反。统计分析表明, 2007 年北黄海底栖细菌丰度与沉积物叶绿素 *a* 含量呈极显著正相关, 南黄海细菌丰度与沉积物有机质含量及底层水盐度呈极显著正相关; 而 2008 年北黄海细菌丰度与环境因子未见明显的相关性, 在南黄海则与底层水的叶绿素含量呈极显著负相关, 显示浒苔暴发可能对底栖细菌产生了明显抑制。

关键词 黄海; 底栖细菌; 生物量; 分布; 沉积环境

中图分类号 Q938.1

异养细菌作为海洋生态系统中的分解者和生产者, 可将植物分泌物、动物排泄物及有机碎屑等溶解性有机质(DOM)转化为颗粒性有机质(POM), 即细菌自身的生物量, 后者又可被微型真核生物(主要是鞭毛虫、纤毛虫)摄食利用转化为更大的颗粒后进入经典食物网(Azam *et al.*, 1983)。随着微食物网概念的提出, 细菌在海洋生态系统物质循环及能量流动中的作用日益受到人们的重视。国内外学者对海洋浮游细菌做过大量研究并取得较多成果(Ducklow, 1993; 赵三军, 2002¹⁾; 李洪波等, 2006)。在海洋沉积物中同样栖息着数量庞大、种类繁多的异养细菌。国际上对沉积物中异养细菌的研究较早, 对不同海域底栖异养细菌的分布、生物量和生产力的大小及底栖异养细菌在能量流动和物质循环中的作用进行了较为详尽的报道(Dale, 1974; Deming *et al.*, 2008)。国内的相关研究起始于 20 世纪 80 年代, 主要涉及沉积物中异养细菌的数量、分布、种类组成及与环境因子的相互关系(史君贤等, 1984; 肖慧等, 2010), 但早期研究多采用

细菌培养计数法及未加超声波处理的荧光染色计数等研究技术, 此方法会造成对细菌数量的低估(郑天凌等, 1994; Epstein *et al.*, 1997)。目前有关黄海沉积物中异养细菌的生态学研究较少, 仅在黄海沿岸养殖区、胶州湾及北黄海废弃物试验倾倒区对细菌的数量、生物量及分布有报道(林凤翱等, 1989; 刘国才等, 2000; Tian *et al.*, 2006), 然而缺乏对离岸海域如黄海冷水团底栖细菌的研究。

黄海冷水团是我国近海的一个重要水文现象, 在夏季尤为明显, 是在季节温跃层下面覆盖的一海盆尺度的以低温(6—12℃)、高盐(31.5—33.6)为主要特征的水体。本文对 2007 年黄海冷水团底栖生物专项及 2008 年开放共享航次采集的黄海沉积物中异养细菌的丰度、生物量及分布特点进行研究, 并对底栖细菌丰度与环境因子的关系进行了探讨, 为进一步探讨黄海海域底栖微食物网的物质循环和能量流动提供必要基础。此外, 自 2008 年 6 月黄海发生了由浒苔(*Ulva prolifera*)暴发引起的大规模绿潮。浒苔在

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目课题, KSCX2-YW-Z-0914 号; 国家重点基础研究发展计划(973), 2011CB403604 号; 青岛市公共领域科技支撑计划项目, 10-3-3-38-jh 号; 中国科学院海洋研究所开放航次项目资助。孟昭翠, 博士研究生, E-mail: mengzhaocui@qdio.ac.cn

1) 赵三军, 2002. 黄、东海海洋异养细菌的生态学研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 16—29

通讯作者: 徐奎栋, 研究员, E-mail: kxu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-04-06, 收修改稿日期: 2012-10-24

近海大量堆积、死亡及降解过程中,消耗水体溶解氧、释放营养盐并积累有毒氰化物,可导致海水及沉积物环境的改变(Norkko *et al*, 1996)。因此,本文也意在通过对 2008 年浒苔暴发末期的底栖细菌研究,探寻浒苔暴发对沉积物中细菌的数量及分布影响。

1 材料与方法

1.1 调查海域与样品采集

2007 年 6 月 15—28 日及 2008 年 7 月 20—31 日,搭乘中国科学院海洋研究所“科学三号”考察船,在黄海冷水团底栖生物专项及中国近海海洋科学考察开放共享航次支持下,对黄海海域(31°15′—38°50′N, 120°57′—124°30′E)进行了底栖生物及沉积物环境因子调查,共成功取得 79 个站位(2007 年 49 个站位,2008 年 30 个站位)的细菌及环境因子样品,其中 2007 年有 18 个站位位于北黄海,2008 年有 7 个站位位于北黄海(图 1a, b)。依据本研究调查站位温度、盐度及水深等水文资料,黄海冷水团范围如图 1a 所示,在其范围内分布有 2007 年的 30 个站位,2008 年的 19 个站位。

利用 0.1m²改进型 Gray-Ohara 箱式采泥器在每一站位采集 3 箱未受扰动的沉积物样品,用内径为 1.6cm 的注射器改造的采样管采集 5cm 长芯样 4 个(随机选取 1 箱采集 2 管,其它两箱各采 1 管),按 0—2cm、2—5cm 分层移入 50mL 离心管中,加入经 0.22

μm 孔径滤膜过滤的 2.5%甲醛海水溶液分别至 20mL 和 30mL 进行固定。相应分层的 4 个重复各取 10mL 合并,计 40mL 于 4℃避光冷藏保存。用内径 2.3cm 的采样管以同样方式另取 4 个芯样,其相应分层合并后装入封口袋,−20℃冷冻保存,用于沉积物粒度、叶绿素 *a*、脱镁叶绿素 *a*、有机质及含水量测定。

1.2 样品分析方法

沉积物中的细菌采用 DAPI 荧光染色技术进行计数(类彦立等, 2011)。取适量样品(约 2mL)加入焦磷酸四钠(f.c. 1mmol/L), 常温避光培育 15—30min。经 JY92-II 超声波细胞破碎仪分散处理 180s(振幅 109μm, 50W, 6mm Microtip), 为避免样品过热, 每超声破碎处理 45s, 冷却 1min。镜检样品中细菌的密度, 调节至适当的稀释倍率(以每个视野 20—30 个细菌为宜), 取 3 个分样, 加入 DAPI (f. c. 5μg/mL)和复染剂 Evans Blue (f.c. 10⁻⁶g/mL), 低温避光染色 10min。染色样品经 Sartorius 真空过滤系统过滤到 0.22μm 混合纤维素黑膜上。封片后置于 Zeiss Axioskop 2 plus HBO 100 荧光显微镜镜下计数。细菌的计数在紫外光激发(BP 365/12, FT 395, LP 397)下, 每片随机计数 20—40 个视野, 计约 500 个细菌。然后转换为每立方厘米沉积物样品中细菌数(cells/cm³)即为细菌的丰度。根据细菌的平均体积为 0.2μm³及转换系数 220fgC/μm³(Cammen, 1982; Bratbak *et al*, 1984; Kuwae *et al*, 1999), 将细菌丰度转换为以碳为单位的细菌生物量。

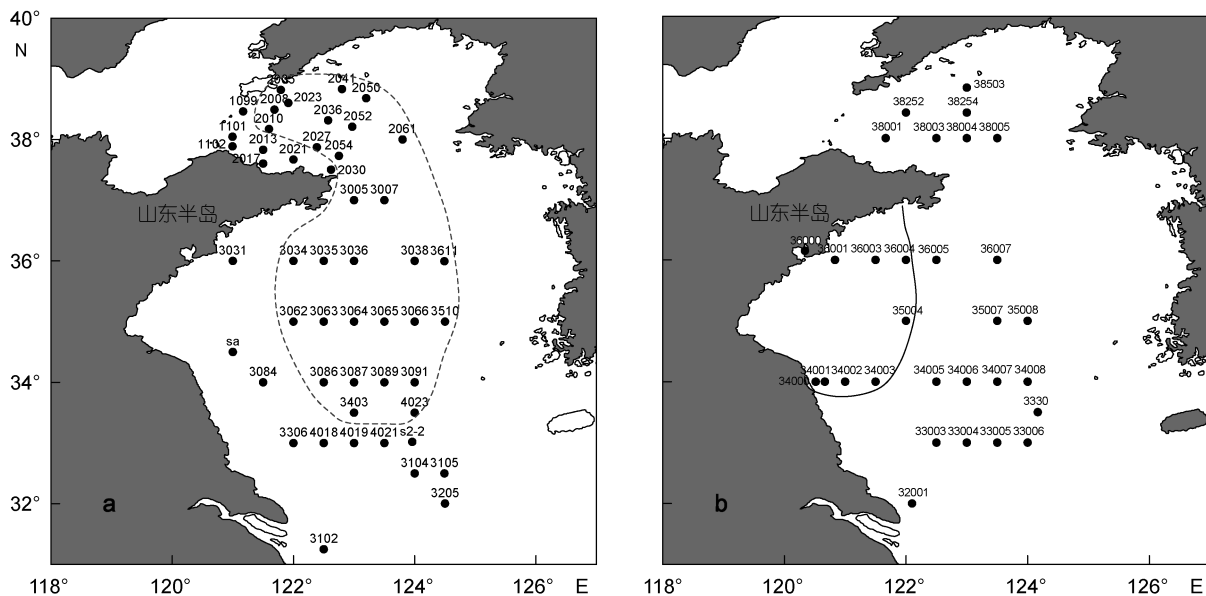


图 1 黄海 2007 年 6 月及 2008 年 7 月沉积物采样站位图

Fig.1 Sediment sampling stations in the Yellow Sea during the cruises in June 2007 and July 2008

a. 2007 年 6 月, 虚线圈内表示冷水团内的站位; b. 2008 年 7 月, 近岸至实线圈内示本年度 5—7 月浒苔大量出现的区域, 冷水团站位与 2007 年的基本一致

沉积物粒度分析采用 Cilas(940L)型激光粒度仪进行。沉积物叶绿素 *a* 和脱镁叶绿素 *a* 的测定利用 Turner II 荧光光度计测定。有机碳测定采用重铬酸钾氧化-还原容量法(国家海洋局, 1998), 有机质含量为有机碳含量乘以系数 1.724。含水量根据沉积物烘干(60°C, 72h)前后质量的减少来计算。水层温度、盐度、叶绿素含量及水深数据来自随船温盐深测定仪(CTD)现场测定。

1.3 数据统计分析

采用 Surfer 8.0 绘制站位图及细菌丰度的等值线图。采用 SPSS 15.0 统计软件对细菌丰度与环境因子(底层水温度、盐度、叶绿素、水深及沉积物叶绿素 *a*、脱镁叶绿素 *a*、有机质含量和中值粒径)进行相关分析。为使数据正态分布, 原始数据经过 $\lg(x+1)$ 转化处理。

2 结果

2.1 黄海两个航次的环境因子

2007 年调查站位的平均水深为(51±22)m, 最深处在南黄海中部东侧的 3510 站(96m), 最浅处为江苏近岸的 3084 站(17 m)。平均底层水温为(11.9±4.0)°C, 北黄海底层水温整体低于南黄海, 最高水温见于水深最浅的江苏近岸 3084 站(21.5°C), 最低水温出现于北黄海中部的 2036 站(6.4°C)。底层水盐度变化不大, 平均为 32.6±0.9, 位于南黄海冷水团中央的 3064 站底层水盐度最高(34.1), 而 2007 年采集的江苏近岸的 Sa 站最低(31.0)。底层水叶绿素含量平均为(1.4±0.9)μg/L, 最低值在 3306 站(0.5μg/L), 最高值在 3084

站(5.1μg/L), 均位于江苏近岸。沉积物类型从极细粉砂到细砂, 中值粒径为 3.6—134.9μm)。沉积物有机质含量平均为 1.0%±0.6%, 呈沿岸低中央海域高的趋势, 最低值出现于 3084 站(0.3%), 最高值出现于 3611 站(2.6%)。沉积物叶绿素 *a* 平均含量为(0.9±0.8) μg/g, 最高值出现于烟台蓬莱附近的 1101 站(5.4μg/g), 最低值见于大连附近的 1099 站(0.3μg/g)。沉积物脱镁叶绿素 *a* 平均含量为(2.71±1.18)μg/g, 其最高值见于大连湾附近的 2005 站(7.5μg/g), 最低值出现于南黄海中部的 3066 站(1.2μg/g)(图 1a)。北黄海较南黄海水浅, 底层水温和沉积物有机质含量较低, 而底盐和中值粒径较高。冷水团平均底层水温为 9.5°C, 底盐为 33.0, 水深为 62.6m。

与 2007 年相比, 2008 年调查海域沉积物中值粒径明显变小, 平均为 15.9μm; 底层水叶绿素含量明显增大, 在南黄海呈现由离岸海域向近岸逐渐升高的趋势, 在江苏盐城附近的 34000 站达到最高值(71.32μg/L), 次之为 34001 站(21.4μg/L); 其它沉积物环境因子(有机质、叶绿素 *a*、脱镁叶绿素 *a*)均较 2007 航次的低, 但差异不大。有关两个航次各项环境因子在黄海采样站位的水平分布图见王家栋等(2011)及吴秀琴等(2010)。

2.2 沉积物中异养细菌丰度和生物量的时空分布

2007 年及 2008 年两航次黄海表层 0—5cm 沉积物中异养细菌的丰度和生物量在各站位间的差异较大(图 2)。2007 年所调查海域沉积物中细菌平均丰度为(1.13±0.39)×10⁹ cells/cm³ [合(5.64±1.96)×10¹⁰

表 1 2007 年及 2008 年两航次的底栖环境因子
Tab.1 Benthic environmental factors during the cruises in 2007 and 2008

环境因子	2007 航次			2008 航次		
	整个黄海(49 站)	北黄海(18 站)	南黄海(31 站)	整个黄海(30 站)	北黄海(7 站)	南黄海(23 站)
水深(m)	50.9±21.5 (17.3—95.6)	40.8±14.7 (18.2—56.3)	49.5±22.8 (17.3—95.6)	46.2±21.3 (14.8—80.6)	53.7±9.9 (38.4—69.5)	43.9±23.4 (14.8—80.6)
底温(°C)	11.9±4.0 (6.4—21.5)	9.4±2.7 (6.4—13.8)	11.6±4.0 (7.4—21.5)	13.6±6.7 (5.4—26.5)	8.6±2.7 (5.4—12.7)	15.2±6.8 (6.4—26.5)
底盐	32.6±0.9 (31.0—34.1)	32.1±0.3 (31.6—32.7)	31.9±0.9 (31.0—34.1)	32.1±1.4 (28.2—33.9)	32.1±0.4 (31.3—32.3)	32.1±1.6 (28.2—33.9)
底层水叶绿素(μg/L)	1.4±0.9 (0.5—5.1)	1.4±0.8 (0.6—3.0)	1.4±1.0 (0.5—5.1)	4.9±13.6 (0.3—71.3)	0.8±0.3 (0.6—1.3)	6.3±15.5 (0.3—71.3)
中值粒径 (μm)	40.0±29.9 (3.6—134.9)	43.6±24.4 (12.3—83.0)	40.1±32.9 (3.6—134.9)	15.9±9.6 (8.0—56.8)	23.7±16.2 (11.0—56.8)	13.5±4.9 (8.0—22.7)
沉积物中有机质(%)	1.0±0.6 (0.3—2.6)	0.9±0.5 (0.3—2.1)	1.0±0.6 (0.3—2.6)	0.9±0.3 (0.3—1.8)	0.7±0.3 (0.3—1.2)	0.9±0.4 (0.4—1.8)
沉积物中叶绿素 <i>a</i> (μg/g)	0.9±0.8 (0.3—5.4)	1.2±1.2 (0.3—5.4)	1.0±0.3 (0.4—1.7)	0.7±0.4 (0.2—2.0)	0.8±0.4 (0.3—1.7)	0.7±0.4 (0.2—2.0)
沉积物中脱镁叶绿素 <i>a</i> (μg/g)	2.7±1.2 (1.2—7.5)	2.8±1.4 (1.3—7.5)	2.8±1.1 (1.2—5.4)	2.2±1.0 (0.9—5.1)	2.0±0.6 (1.3—3.0)	2.2±1.1 (0.4—5.1)

cells/10cm²], 平均生物量为 (49.63±17.26) μgC/cm³ [(2481±863) μgC/10cm²]. 其中, 北黄海各站位底栖细菌的平均丰度为(1.18±0.43)×10⁹ cells/cm³, 平均生物量为(52.09±18.88) μgC/cm³. 除 2051 及 2010 站位以外, 北黄海山东半岛近岸的底栖细菌丰度及生物量均高于离岸海域, 最高值出现在烟台近岸的 2017 站(丰度为 1.81×10⁹ cells/cm³, 生物量为 79.45 μgC/cm³), 位于中心区域的 2050 站位丰度值最低(4.37×10⁸ cells/cm³), 其次是位于黄海与渤海交界处的 1099 站(4.62×10⁸ cells/cm³). 南黄海各站位底栖细菌的平均丰度为(1.10±0.37)×10⁹ cells/cm³, 平均生物量为(48.2±16.40) μgC/cm³, 均较北黄海海域低约 8%. 最高值出现在 3063 站, 丰度为 1.85×10⁹ cells/cm³, 生物量为 81.39 μgC/cm³; 最低值出现在 3007 站, 丰度为 2.36×10⁸ cells/cm³, 生物量为 10.38 μgC/cm³(图 1a, 图 2a), 该最高值与最低值同时也是 2007 年航次黄海的最高值与最低值. 底栖细菌丰度在南黄海中心有一个明显的高值区域, 且向外围递减. 整个调查海域冷水团中的底栖细菌平均丰度为 1.17×10⁹ cells/cm³, 生物量为 51.49μgC/cm³, 较外围海域高 10%(图 3).

2008 年调查站位沉积物(0—5cm)中异养细菌平均丰度为(6.40±2.51)×10⁸ cells/cm³ [(3.20±1.25)×10¹⁰ cells/10cm²], 平均生物量为 (28.17±11.03) μgC/cm³ [(1408±551) μgC/10cm²], 丰度及生物量均较 2007 年降低 43%. 其中, 北黄海各站位底栖细菌的平均丰度为(7.09±3.51)×10⁸ cells/cm³, 平均生物量为(31.19±

15.46)μgC/cm³, 丰度及生物量最高值出现在烟台近岸的 38001 站位(丰度为 1.49×10⁹ cells/cm³, 生物量为 65.36μgC/cm³), 也是 2008 年航次的最高值; 最低值出现在其邻近的 38003 站位(丰度为 4.18×10⁸ cells/cm³, 生物量为 18.39 μgC/cm³)(图 1b, 图 2b). 南黄海各站位底栖细菌的平均丰度为(6.19±2.17)×10⁸ cells/cm³, 平均生物量为(27.25±9.55) μgC/cm³, 丰度及生物量均较北黄海海域低 13%. 南黄海底栖细菌丰度及生物量最高值出现在 3330 站(丰度为 1.31×10⁹ cells/cm³, 生物量为 57.60 μgC/cm³); 最低值出现在江苏近岸的 34001 站(同时为 2008 年航次黄海的最低值)丰度为 2.24×10⁸ cells/cm³, 生物量为 9.85 μgC/cm³. 除青岛近岸外, 南黄海近岸的底栖细菌丰度及生物量低于离岸海域; 就断面来看, 35°N、36°N 断面离沿岸最远站位底栖细菌丰度值最低, 而 34°N 断面在江苏盐城近岸的站位丰度值较低. 调查海域中央冷水团区域的底栖细菌丰度及生物量较外围高 37% (7.11×10⁸ vs. 5.18×10⁸ cells/cm³; 31.27 vs. 22.81μgC/cm³). 与 2007 年航次相比, 北黄海 2008 年航次的底栖细菌丰度及生物量降低约 40%, 南黄海低 44%; 中央冷水团区域 2008 年底栖细菌丰度及生物量较 2007 年低 39%, 而其外围低 51%(图 3).

2.3 黄海海域沉积物中异养细菌丰度和生物量的垂直分布

2007 年及 2008 年两航次沉积物异养细菌的丰度及生物量随沉积物深度的增加而减少(图 4). 2007 年

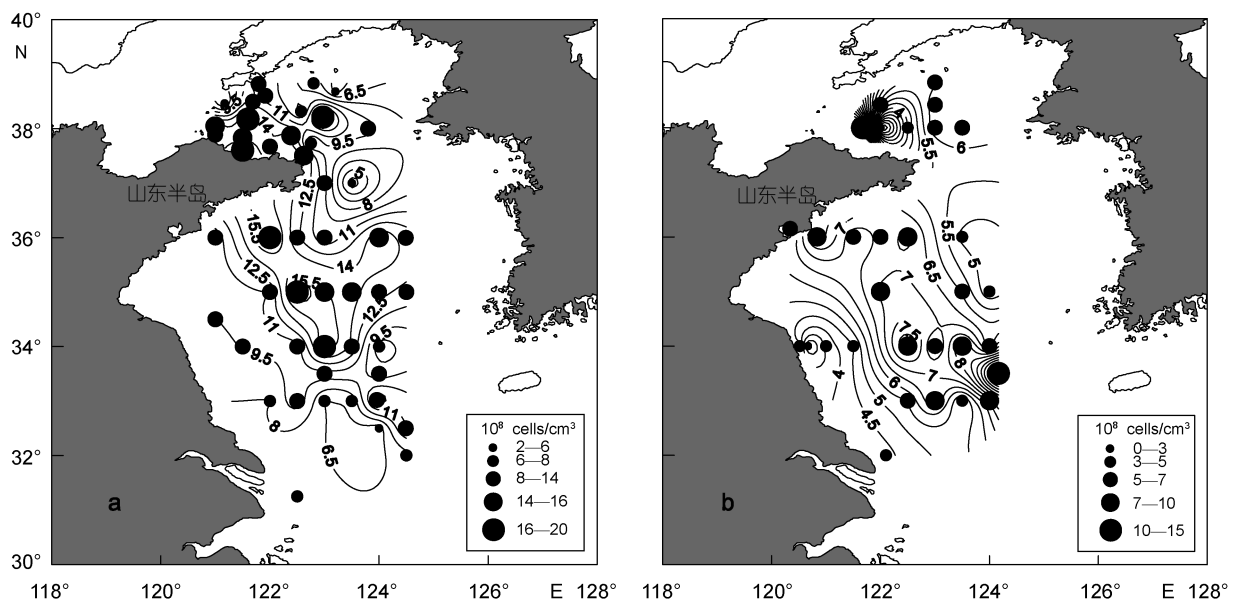


图 2 2007 年(a)及 2008 年(b)黄海 0—5cm 沉积物中异养细菌的丰度分布图

Fig.2 The abundance of heterotrophic bacteria in the surface 0—5cm sediments in the Yellow Sea during the cruises in 2007 (a) and 2008 (b)

航次调查站位 0—2cm 分层底栖细菌平均丰度为 $(1.31 \pm 0.47) \times 10^8$ cells/cm³, 生物量为 $(57.75 \pm 20.85) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$; 2—5cm 分层底栖细菌平均丰度为 $(1.00 \pm 0.38) \times 10^8$ cells/cm³, 生物量为 $(44.22 \pm 16.90) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$; 0—2cm 分层的底栖细菌丰度比 2—5cm 的高 31%。2008 年航次调查站位 0—2cm 分层底栖细菌平均丰度为 $(7.77 \pm 3.09) \times 10^8$ cells/cm³, 生物量为 $(34.19 \pm 13.59) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$; 2—5cm 分层底栖细菌平均丰度为 $(5.49 \pm 2.34) \times 10^8$ cells/cm³, 生物量为 $(24.15 \pm 10.30) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$ 。0—2cm 分层的底栖细菌丰度比 2—5cm 的高 42%。与 2007 年航次相应分层比较, 2008 年航次 0—2cm 及 2—5cm 两分层的异养细菌丰度分别低 41%和 45%。

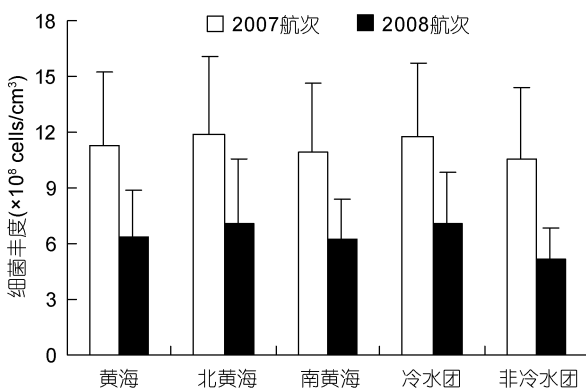


图3 2007年及2008年黄海不同划分区域沉积物(0—5cm)中异养细菌的丰度

Fig.3 The abundance of heterotrophic bacteria in the 0—5cm sediment layers of different compartments of the Yellow Sea during the cruises in 2007 and 2008

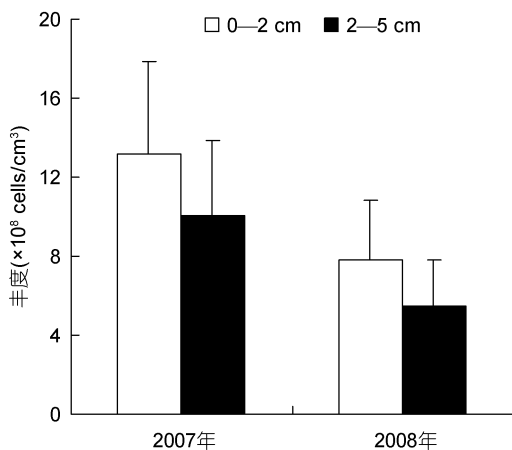


图4 2007年及2008年沉积物中异养细菌丰度的垂直分布
Fig.4 Vertical distribution of heterotrophic bacteria in the sediments during the cruises in 2007 and 2008

2.4 黄海海域沉积物中异养细菌丰度和生物量与各环境因子的关系

统计分析表明, 2007年航次整个黄海沉积物中细

菌的丰度仅与沉积物中值粒径呈弱的负相关关系($P=0.023$), 2008年航次整个黄海沉积物中异养细菌的丰度与底盐呈弱的正相关($P=0.040$), 与底层水叶绿素含量呈弱负相关关系($P=0.021$)。

就南北黄海分开来看, 2007年航次北黄海底栖细菌丰度与沉积物叶绿素 *a* 含量呈极显著正相关($P=0.004$), 与底温($P=0.045$)和脱镁叶绿素 *a* ($P=0.015$)及底层水叶绿素 *a* 含量($P=0.039$)均呈弱正相关, 与水深呈弱负相关($P=0.018$); 南黄海底栖细菌丰度与底盐、有机质含量之间呈极显著正相关($P=0.003$, $P=0.009$), 与水深呈弱正相关($P=0.018$), 与底温及沉积物中值粒径呈弱负相关($P=0.023$, $P=0.010$)。

2008年航次北黄海底栖细菌丰度与任何环境因子均未呈现明显的相关性; 南黄海底栖细菌丰度与底层水叶绿素含量呈显著负相关($P=0.010$), 与底温呈弱负相关($P=0.023$), 与底盐和水深呈弱正相关($P=0.012$, $P=0.041$)(表2)。

3 讨论

3.1 黄海沉积物中异养细菌的现存量

已报道的海洋沉积物中异养细菌的丰度为 10^8 — 10^9 cells/cm³, 生物量最高可达 $500 \mu\text{gC}/\text{cm}^3$ (Dale, 1974; Deming *et al.*, 2008)。本研究所获底栖细菌丰度 $[(0.23—1.85) \times 10^9$ cells/cm³]和生物量 $(9.85—81.39 \mu\text{gC}/\text{cm}^3)$ 与国外报道的数据相近。与国外的同类研究相比, 我国已报道的细菌丰度差异较大: 郑国兴等(1982)、史君贤等(1984)报道长江口及邻近海区的底栖细菌丰度极低, 仅 10^5 cells/g 底泥; 林凤翱等(1989)报道的北黄海三类废弃物试验倾倒地沉积物中细菌的平均丰度仅为 3.6×10^4 cells/g; 刘国才等(2000)报道山东海阳对虾养殖池底泥中的细菌为 $(4.10—12.36) \times 10^8$ cells/g (平均 8.09×10^8 cells/g); 肖慧等(2010)采用报道了渤海湾天津近岸表层沉积物异养细菌的丰度为 $(1—10.4) \times 10^7$ cells/g 湿泥。上述研究均采用培养计数法进行底栖细菌的定量, 仅 Tian 等(2006)结合超声波处理和吖啶橙荧光染色对胶州湾沉积物中的异养细菌进行了计数, 报道的丰度值为 $(0.98—16.87) \times 10^7$ cells/g [$(1.31—22.6) \times 10^7$ cells/cm³], 生物量为 $0.45—7.08 \mu\text{gC}/\text{g}$ ($0.6—9.49 \mu\text{gC}/\text{cm}^3$)。该研究所采用的方法与本文相近, 但结果偏低, 本研究结果远高于自长江口、北黄海废弃物倾倒地和天津近岸海域的数据。其原因除研究区域的差异外, 可能主要系定量方法不同所致。郑天凌等(1994)指出海洋细菌有 50%为不可培养, 采用培养计

表 2 2007 年及 2008 年沉积物异养细菌丰度与环境因子的相关分析

Tab.2 Correlation analyses between benthic bacterial abundance and environmental factors during the cruises in 2007 and 2008

环境因子	2007 年			2008 年		
	整个黄海	北黄海	南黄海	整个黄海	北黄海	南黄海
底温	-0.103	0.478*	-0.407*	-0.224	0.679	-0.482*
底盐	0.186	-0.377	0.517**	0.383*	0.036	0.527*
水深	0.033	-0.549*	0.422*	0.328	0.126	0.429*
底层水叶绿素	0.102	0.490*	-0.110	-0.427*	-0.180	-0.539**
沉积物叶绿素 <i>a</i> 含量	0.212	0.637**	-0.211	0.074	-0.143	0.142
沉积物脱镁叶绿素 <i>a</i> 含量	0.208	0.564*	0.027	0.306	0.643	0.270
沉积物有机质含量	0.251	-0.026	0.460**	-0.099	-0.214	-0.003
沉积物中值粒径	-0.325*	-0.121	-0.453*	0.092	0.321	-0.043

注: *示显著相关($P < 0.05$), **示极显著相关($P < 0.01$)

数会造成对细菌丰度的低估。此外, 由于细菌因可大量附着于其它生物体和/或沉积物颗粒表面, 若未经超声波处理而直接进行荧光计数, 可造成不同程度的低估(Epstein *et al.*, 1997)。

已有研究表明, 在海洋生态系统中, 细菌在沉积物中的丰度可较水体中的高达 1000 倍(Novitsky, 1983)。在黄海, 相较于沉积物中异养细菌研究的缺乏, 有关水体浮游细菌的生态研究较多。据报道黄海水体异养细菌的丰度为 10^5 — 10^6 cells/cm³, 南黄海、北黄海及黄海冷水团海域的生物量分别为 518.83(100.60—940.87) mgC/m², 3.20—13.60 mgC/m³ 及 1.58—21.25 mgC/m³(赵三军, 2002¹⁾; 李洪波等, 2006; 白洁等, 2009)。本研究结果表明, 黄海沉积物中细菌的丰度比水体中细菌丰度高 3 个数量级, 单位面积中的生物量远高于相应海域浮游细菌的生物量。

3.2 黄海沉积物中异养细菌的分布与环境因子的关系

本研究发现, 两航次中北黄海的底栖细菌丰度及生物量均高于南黄海, 中央冷水团区域高于其外围海域, 且南北黄海间的差异较后两者之间的差异小。2008 年浒苔暴发末期底栖细菌的现存量明显较 2007 年的低, 其中, 北黄海所有调查站位均位于冷水团区域且受浒苔暴发的影响小, 故降低的幅度低于南黄海。而在浒苔暴发的江苏盐城近岸至山东半岛南部的南黄海近岸海域, 底栖细菌数量的降低幅度大于冷水团区域。

通常, 底栖生物体的现存量由上层水体浮游植物的生物生产及有机质输入量所控制。沉积物中叶绿素 *a* 含量代表了水体中沉降的藻类(微藻)和底栖微藻的

现存量, 底栖细菌的数量与沉积物中的叶绿素 *a* 含量有着密切关系。而且, 底栖细菌能够吸收藻类所产生的可溶性的代谢物及不溶性的有机物作为碳源, 促进自身的生长(Cammen *et al.*, 1986)。2008 年沉积物中叶绿素 *a* 虽然略低于 2007 年(0.7 μg/g vs. 0.9 μg/g), 但这可能并非是造成底栖细菌数量减少的主要原因。根据 Norkko 等(1996), 浒苔暴发后 15—20d 可自然死亡, 浒苔暴发后在近海的大量堆积、死亡及降解过程中, 可消耗水体溶解氧, 释放营养盐并积累有毒氰化物, 从而导致海水及沉积物环境的改变, 由此抑制细菌的增长。由此推测, 2008 年较 2007 年底栖细菌丰度降低可能系浒苔沉降后的生态效应所致。这一点可从 2007 年北黄海底栖细菌丰度与沉积物叶绿素 *a* 含量呈极显著的正相关($P = 0.004$), 而 2008 年浒苔暴发的南黄海底栖细菌丰度与底层水叶绿素含量呈显著的负相关($P = 0.010$)得到验证。而 2008 年北黄海底栖细菌数量较 2007 年低的主要原因是, 2008 年的调查站位均位于离岸较远的冷水团区域, 而 2007 年则有多个近岸站位, 是传统的高生物量和高生产力海域。

底栖细菌的丰度除与叶绿素 *a* 含量、盐度有关外, 还受多种因子的影响, 如沉积物有机质含量、温度以及沉积物类型等。有机质作为细菌生长的碳源, 对细菌的生长具有重要的影响。在本研究中, 南黄海沉积物中异养细菌的丰度总体上呈现出沿岸低中间高的特点, 这与沉积物中有机质含量的分布相一致(吴秀琴等, 2010; 王家栋等, 2011)。许多研究表明, 沉积物中异养细菌的丰度与有机质含量有关, 有机质含量高, 细菌数量亦高(史君贤等, 1984; Hamels *et al.*,

1) 赵三军, 2002. 黄、东海海洋异养细菌的生态学研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 16—29

2001; 肖慧等, 2010)。沉积物中值粒径也可影响沉积物中异养细菌的数量和生物量, 通常中值粒径大的沉积物中底栖细菌反而较小(Kuwae *et al*, 1999), 而颗粒小的沉积物可供细菌附着的表面积大于颗粒大的沉积物(Dale, 1974); 另一方面, 沉积物中值粒径越大, 砂含量越高, 则有机质的保存积累较困难, 所含养料贫乏, 影响细菌的生长繁殖, 造成细菌数量偏低。但有机质含量对细菌丰度的影响要大于沉积物粒径(Cammen, 1982)。此外, 温度也是影响细菌生长的重要环境因子。细菌新陈代谢能力主要取决于酶的活性, 在一定温度范围内酶活性与温度成正比。本研究中随着水深的增加, 底层水温降低及盐度升高, 相关分析也表明底栖细菌丰度与这些因子均相关。由此可见, 上述多环境因子的相互作用共同影响了沉积物中异养细菌的数量分布。

3.3 黄海沉积物中异养细菌的生产力

异养细菌利用溶解性有机物和颗粒性有机物, 合成自身颗粒有机物的过程, 称为细菌的二次生产, 颗粒有机物可被微型动物捕食利用转化为更大的颗粒后进入主食物链, 由此在海洋生源要素循环中起着重要作用。对于海洋异养细菌生物生产的了解, 是研究其在海洋生态系统中作用的重要基础。已有的研究表明, 海洋沉积物中底栖细菌的生产力为 20—600 mgC/(m²·d)(van Duyl *et al*, 1993; Hamels *et al*, 2001; van Oevelen *et al*, 2006)。本研究没有实测底栖细菌的生产力, 但依据 Cole 等(1988)给出的如下公式做了估算: $\lg P = 2.054 + 1.08 \lg B$ 来估算(P 为细菌的生产力, B 为细菌的生物量), 得出 2007 年及 2008 年两航次底栖细菌的平均生产力分别为 304mgC/(m²·d) [折合 6.1μgC/(cm³·d)] 和 165mgC/(m²·d) [折合 3.3 μgC/(cm³·d)]。该结果与国外报道的底栖细菌生产力吻合。我国对浮游细菌生产力的研究主要集中在黄、东海, 赵三军(2002)¹⁾报道了黄海秋季浮游异养细菌的生产力为 2.11μgC/(L·h) [折合 0.05μgC/(cm³·d)], 春季为 0.55 μgC/(L·h) [折合 0.01μgC/(cm³·d)]。与此相比, 黄海沉积物中异养细菌的生产力远高于水体。

采自黄海相同站位的小型底栖动物研究结果显示, 2007 年 6 月及 2008 年 7 月两航次小型底栖动物的平均生物量分别为 711.65 和 498.46μgC/10cm² (吴秀琴等, 2010; 王家栋等, 2011), 若以 $P/B=9$ 估算小型底栖动

物的生产力, 则两航次小型底栖动物的平均生产力分别为 18 和 12mgC/(m²·d)。如此, 2007 年及 2008 年两航次底栖细菌生物量可达小型底栖动物生物量的 3.5 倍和 2.8 倍, 生产力高达 17.3 倍和 13.4 倍。尽管依据经验公式会造成对底栖细菌及小型动物生产力估算的偏差, 但大致廓出了异养细菌在黄海沉积物中的庞大资源量和生产力。底栖细菌数量上的显著性联系着功能上的重要作用, 是底栖微食物网乃至浅海生态系统能流研究中不可或缺的组成部分。

参 考 文 献

- 王家栋, 类彦立, 徐奎栋, 2011. 黄海冷水团及周边夏季小型底栖动物现存量及空间分布研究. 海洋与湖沼, 42(3): 359—366
- 史君贤, 郑国兴, 陈忠元等, 1984. 长江口区海水及沉积物中异养细菌的生态分布. 海洋通报, 3(6): 59—63
- 白洁, 时瑶, 宋亮, 2009. 黄海西北部浮游细菌生物量分布特点及其与环境因子的关系. 中国海洋大学学报, 39(4): 592—596
- 刘国才, 李德尚, 董双林等, 2000. 对虾综合养殖生态系底泥细菌的数量动态. 应用生态学报, 11(1): 138—140
- 李洪波, 肖天, 丁涛等, 2006. 浮游细菌在黄海冷水团中的分布. 生态学报, 26(4): 1012—1020
- 肖慧, 唐学玺, 乔旭东等, 2010. 渤海湾天津近岸表层沉积物中细菌丰度及其与环境因子的相关性研究. 中国海洋大学学报, 40(6): 87—90
- 吴秀琴, 徐奎栋, 于子山等, 2010. 2008 年浒苔大暴发末期黄海小型底栖动物现存量及空间分布. 应用生态学报, 21(8): 2140—2147
- 林凤翔, 贺杰, 于占国, 1989. 北黄海三类废弃物试验倾倒区海洋细菌的生态学研究 I. 海洋异养细菌的分布. 海洋环境科学, 8(3): 10—15
- 国家海洋局, 1998. 海洋监测规范——第 5 部分: 沉积物分析 (GB 17378.5-1998). 北京: 中国标准出版社, 73—75
- 郑天凌, 薛雄志, 李福东, 1994. 海洋微生物在生态环境中的作用. 海洋科学, 4: 35—38
- 郑国兴, 史君贤, 陈忠元等, 1982. 长江口及邻近陆架海区细菌与沉积物相互关系的初步探讨. 海洋学报, 4(6): 743—752
- 类彦立, 徐奎栋, 2011. 海洋微型底栖生物调查方法与操作规程. 海洋与湖沼, 42(1): 157—164
- Azam F, Fenchel T, Field J G *et al*, 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. Mar Ecol Prog Ser, 10(3): 257—263
- Bratbak G, Dundas I, 1984. Bacterial dry matter content and

1) 赵三军, 2002. 黄、东海海洋异养细菌的生态学研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 16—29

- biomass estimations. *Appl Environ Microbiol*, 48: 755—757
- Cammen L M, 1982. Effect of particle size on organic content and microbial abundance within four marine sediments. *Mar Ecol Prog Ser*, 9: 273—280
- Cammen L M, Walker J A, 1986. The relationship between bacteria and micro-algae in the sediments of a bay of fundy mudflat. *Estuar Coast Shelf Sci*, 22: 91—99
- Cole J J, Findlay S, Pace M L, 1988. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Mar Ecol Prog Ser*, 43: 1—10
- Dale N G, 1974. Bacteria in intertidal sediments: factors related to their distribution. *Limnol Oceanogr*, 19(3): 509—518
- Deming J W, Carpenter S D, 2008. Factors influencing benthic bacterial abundance, biomass, and activity on the northern continental margin and deep basin of the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res II*, 55: 2597—2606
- Ducklow H W, 1993. Bacterioplankton distributions and production in the northwestern Indian Ocean and Gulf of Oman, September 1986. *Deep-Sea Res II*, 40: 753—771
- Epstein S S, Alexander D, Cosman K *et al*, 1997. Enumeration of sandy sediment bacteria: Are the counts quantitative or relative? *Mar Ecol Prog Ser*, 151: 11—16
- Hamels I, Muylaert K, Casteleyn G *et al*, 2001. Uncoupling of bacterial production and flagellate grazing in aquatic sediments: a case study from an intertidal flat. *Aquat Microb Ecol*, 25: 31—42
- Kuwaie T, Hosokawa Y, 1999. 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. *Appl Environ Microbiol*, 65: 3407—3412
- Norkko A, Bonsdorff E, 1996. Rapid zoobenthic community responses to accumulations of drifting algae. *Mar Ecol Prog Ser*, 131: 143—157
- Novitsky J A, 1983. Microbial activity at the sediment-water interface in Halifax Harbor, Canada. *Appl Environ Microbiol*, 45: 1761—1766
- Tian S Y, Zhang Z N, Liu X S, 2006. Abundance and biomass of benthic heterotrophic bacteria in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Ocean University of China*, 5: 71—74
- van Duyl F C, van Raaphorst W, Kop A J, 1993. Benthic bacterial production and nutrient sediment-water exchange in sandy North Sea sediments. *Mar Ecol Prog Ser*, 100: 85—95
- van Oevelen D, Soetaert K, Middelburg J J, 2006. Carbon flows through a benthic food web: Integrating biomass, isotope and tracer data. *J Mar Res*, 64(3): 453—482

STANDING CROPS AND DISTRIBUTION OF HETEROTROPHIC BACTERIA IN THE SEDIMENTS OF THE YELLOW SEA IN SUMMERTIME

MENG Zhao-Cui^{1,2}, XU Kui-Dong¹, LEI Yan-Li¹, HE Ying-Ying^{1,2}, LI Cheng-Chun^{1,2}

(1. *Department of Marine Organism Taxonomy & Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*)

Abstract Using DAPI epifluorescence microscopy, we investigated the abundance and biomass as well as the distribution of benthic heterotrophic bacteria based on the sediments samples collected in June 2007 and July 2008 in the Yellow Sea. The abundance of benthic bacteria in 2007 was $(1.13 \pm 0.39) \times 10^8$ cells/cm³ and the biomass was $(49.63 \pm 17.26) \mu\text{gC}/\text{cm}^3$, while in 2008 the bacterial standing crops were about 43% lower than those in 2007. In the southern Yellow Sea the benthic bacterial standing crops were respectively 8% (in 2007) and 13% (in 2008) lower than those in the northern Yellow Sea, and were respectively 10% and 37% higher in the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) than those in the area outside the YSCWM. Moreover, the benthic bacterial standing crops were distinctly higher in the coastal region than in the YSCWM in the northern Yellow Sea, while in the southern Yellow Sea the pattern was exactly opposite. Statistical analyses showed that the benthic bacterial abundance had a significantly positive correlation with the contents of sediment chlorophyll *a* in the northern Yellow Sea in 2007, while that in the southern Yellow Sea had a significantly positive correlation with bottom water salinity and sediment organic matter contents. In 2008, no relationship was observed in the northern Yellow Sea, while in the southern Yellow Sea there was a significantly negative correlation between the abundance and bottom water chlorophyll concentrations, indicating inhibition of bacterial growth caused by the green algal bloom of *Ulva prolifera*.

Key words Yellow Sea; benthic bacteria; biomass; distribution; benthic environment