

海洋浮游细菌在碳循环中的作用

The role of marine bacterioplankton in the carbon cycle

肖 天¹, 李洪波^{1,2}, 赵三军¹, 岳海东¹

(1. 中国科学院 海洋生态与环境科学重点实验室 山东 青岛 266071 ;2. 中国科学院 研究生院 北京 100000)

中图分类号 :Q93

文献标识码 :A

文章编号 :1000 - 3096(2004)09 - 0046 - 04

由于海洋浮游细菌 (marine bacterioplankton) 在全球碳循环中非常重要, 浮游细菌的生物学和生态学研究成为当前生物海洋学最活跃的前沿领域之一^[1]。浮游细菌主要包括异养细菌 (heterotrophic bacteria) 和超微型光合原核生物 (picoprokaryotes) 蓝细菌 (*Synechococcus*, 聚球菌属, 细胞粒径为 0.5 ~ 1.5 μm) 及原绿球藻 (*Prochlorococcus*, 细胞粒径为 0.4 ~ 0.8 μm)^[2-4]。由于技术方法的限制, 过去对其认识不足。自 1977 年 Hobbie 等科学家发表了用荧光显微镜计数海洋异养细菌的方法, 发现在营养丰富的海岸异养细菌可达 6.3×10^6 个/mL, 即使在 4 200 m 贫营养的深海中异养细菌数量也有 3.4×10^4 个/mL。此方法和结果引起海洋科学家的极大重视, 使人们不得不对海洋异养细菌在海洋的作用重新认识。1980 年美国科学家 Fuhrman 用 [甲基 - ³H] 胸腺嘧啶核苷示踪法 (tritiated thymidine incorporation) 估计了海洋细菌的生产力, 发现实验水域中的细菌生产力平均 8.4 ~ 54 $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{d})$ 相当初级生产力的 20%。并认为异养细菌生产力是海洋食物网的重要组成成份。Waterbury 在 1979 也应用荧光显微技术 (落射式荧光显微镜) 发现在世界热带和温带海洋中广泛生存着属超微型光合原核生物 (picoprokaryotes) 的蓝细菌 (*Synechococcus*, 聚球菌属), 由于它们在海洋中数量大, 能量转换效率高而受到海洋生态学家的重视。在热带和温带海洋中其丰度通常在 $10^3 \sim 10^5$ 个/mL, 在太平洋热带海区, 它对浮游植物总生物量的贡献达 25% ~ 90%, 对总初级生产力的贡献达 20% ~ 80%^[5]。而在世界大多数海

区, 它对浮游植物总生物量的贡献达 20%, 对总初级生产力的贡献达 60%^[6]。近来发现这种数量占优势的超微型光合原核生物, 其生物量通常比其消费者——微型浮游动物至少高一个数量级, 足以作为微型浮游动物的食物源, 显示其在海洋微型食物环中的重要性, 被公认为存在于世界海洋的大多数海区中作为光合浮游生物的一个重要组成部分^[7]。80 年代末流式细胞测定技术的应用使人们发现了原绿球藻 (*Prochlorococcus*, 细胞丰度达 10^5 个/L)。Azam 等科学家在 1983 年又提出了微食物环概念, 即相当数量的有机物是通过原核生物 (浮游细菌) 和非常小的真核生物利用, 并转化成自身的颗粒有机物被微型的草食性捕食者捕食后再被大的浮游动物捕食进入主食物链。而上述过程被称之为微食物环。这一概念的提出, 使海洋生物学家对海洋浮游细菌的生物量和生产过程更加关注, 不得不重新考虑海洋浮游细菌在海洋生态系统中的作用。因此浮游细菌成为近十年来海洋研究中的热点, 一些很有意义的研究结果不断发表。

收稿日期: 2003 - 12 - 17 修稿日期: 2004 - 04 - 20

资助项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (G19990437) 国家自然科学基金 (40376048)

作者简介: 肖天, (1957 -) 男, 博士, 研究员, 研究方向: 海洋微生物生态学 E-mail: txiao@ms.qdio.ac.cn

已经启动的 IGBP 新一轮核心计划之一“表层海洋与低层大气研究”(SOLAS-Surface Ocean-Lower Atmosphere Study), 其重要内容之一是进一步开展生物泵和海洋碳循环的研究。通过 JGOFS 计划的研究, 科学家们认识到海洋碳循环是一个有生物活动积极参与的地球化学过程, 生物的呼吸代谢活动直接影响到海洋对大气中 CO_2 的吸收。研究表明海洋中 CO_2 含量是大气中的 50 倍, 人类活动产生 CO_2 的 1/3 被海洋吸收。而影响某海区 CO_2 吸收与否, 取决于该海区浮游植物的初级生产力和生物的呼吸代谢活动, 假如初级生产利用的 CO_2 大于生物的呼吸代谢, 那么该海区是一个吸收 CO_2 的自养状态 (net autotrophy)。反之初级生产利用的 CO_2 小于生物的呼吸代谢活动产生的 CO_2 , 该海区是一个释放 CO_2 的异养状态 (net heterotrophy)。研究认为海洋中的生物的呼吸代谢活动可以用细菌的呼吸代谢活动代表。也就是认为生物的呼吸代谢活动产生的 CO_2 主要是由细菌的呼吸代谢活动产生的。还发现海洋中 CO_2 的垂直转移与水体中浮游细菌的呼吸代谢活动密切相关, 并认为水体中生物的呼吸代谢活动产生的 CO_2 几乎是细菌代谢活动的结果。因此在研究某海区对 CO_2 吸收与否时, 更加关注浮游植物的初级生产和浮游细菌的呼吸代谢^[8-9]。

以上研究结果是在长期实验观测研究基础上提出的, 有一些认识也需要长期连续实验观测研究来证实。因此海洋生物的生态学过程研究和中长期实验观测研究受到科学家的重视。例如:

(1) 浮游细菌在微食物环或微食物网中的重要作用和贡献已为科学家们公认。但不同海区不同季节, 其作用和贡献的多少? 途径如何(捕食者是谁)? 虽然各国科学家做了一些工作, 但仍然需要更多的数据才能回答这个问题^[2-4]。

(2) 世界各国的浮游细菌调查数据已经有了相当的积累, 但在分析利用这些数据时发现, 长时间连续性的数据较少, 系统可比性数据较少。因此浮游细

菌各类群的生物量和生产力在同一海区长时间连续同步调查工作开始受到重视。例如: 美国科学家在大西洋百慕大海区(The Bermuda Atlantic)实施的“全球海洋通量联合研究”(JGOFS)计划, 对此海区进行了 10 年月频率的调查观测(自 1988 年 10 月至 1998 年 10 月, 称之为美国 JGOFS 的 BATS (The Bermuda Atlantic Time-series Study) 计划)。其研究结果引起了科学家的广泛关注^[4-10]。

上述两个问题, 在引进流式细胞仪分析应用技术后, 成为热点问题。流式细胞仪分析应用在海洋浮游细菌生物学和生态学方面的应用, 可以同步计数几个类群的浮游细菌, 并可计算个体细胞的含 C 量, 准确获得各个类群的生物量。省时省力、快速准确、同步系统^[9]。

我国在 1986 年由宁修仁研究员最早对长江口及其冲淡水区中的细菌、蓝细菌的分布特点进行了研究^[11]。随后有关研究不断开展(表 1 表 2)^[11-18]。通过表 1 和表 2, 可以看出, 到我国对海洋浮游细菌的研究也存在着不连续和不系统的问题, 研究浮游细菌在微食物环中作用和贡献的现场培养实验也较少。我们有必要根据已有的研究结果和实验数据, 选择一两个典型海区进行较长时间的连续观测研究, 回答中国近海浮游细菌的分布、特点和在 C 循环中的作用的问题。因此作者获得了国家自然科学基金的支持, 应用流式细胞仪技术, 在黄海海区对海洋浮游细菌的几个主要类群进行分析观测, 定性定量的研究其分布规律和特点及与环境因子的关系; 研究影响浮游细菌主要类群分布变化的关键因子和制约机制; 应用现场培养实验方法研究微、小型浮游动物对浮游细菌主要类群的摄食率和它们之间的摄食关系, 确定相互之间的能物流途径; 建立数学模型估算浮游细菌对碳循环收支贡献; 为中国海洋浮游细菌研究积累长期系统的观测实验数据资料; 揭示中国近海生态系统中海洋浮游细菌在生物地球化学循环中的重要作用。

表 1 中国近海浮游细菌调查表

时间(年·月)	海区	经纬度	调查内容	作者
1982	东海大陆架		异养细菌分类鉴定	陈笃等
1986.1 ~ 1986.7	长江口	30°45' ~ 32°N、 121° ~ 124°E	蓝细菌和异养细菌生物量	宁修仁等
1989	黄海北部	39°25' ~ 39°50' N、 122° ~ 122°20' E	异养细菌生物量	林凤翔等
1989	大亚湾	22°25' ~ 22°51' N、 114°28' ~ 114°55' E	异养细菌生物量	沈鹤琴等
1990.6	青岛近海		蓝细菌	陈怀清等
1991	闽南-台湾浅滩上升流区		异养细菌生物量	郑天凌等
1992.2 ~ 1992.8	象山港	29°24' ~ 29°53' N , 121°23' ~ 122°03' E	蓝细菌生物量	宁修仁等
1993. (2.5.8,11)	胶州湾	35°55' ~ 36°18' N , 120°04' ~ 120°23' E	异养细菌生物量 and 生产力 , 蓝细菌生物量	肖天等
1993	长江口		异养细菌生物量	黄秀清等
1994.8 ~ 1995.2	台湾海峡	21° ~ 27°N , 116.5° ~ 122.5°E	异养细菌生物量 and 生产力	郑天凌等
1994.(5,11) ; 1995.3 ;1996.4	东海南部	24° ~ 27°N , 120° ~ 124°E	异养细菌生物量 and 生产力	夏复国等
1996	湛江海域		异养细菌生物量	刘志清等
1997.8 ~ 1998.2	台湾海峡	21° ~ 27°N , 116.5° ~ 122.3°E	异养细菌生物量 and 生产力	郑天凌等
1997.2 ~ 1998.7	东海	27° ~ 32°N、 122° ~ 130°E	异养细菌生物量 and 生产力 , 蓝细菌生物量	肖天等
1997.2	东海	27° ~ 32°N、 122° ~ 130°E	原绿球藻生物量	杨燕辉等
1997.11	南海	6° ~ 12°N、 108° ~ 117°E	异养细菌、蓝细菌和原绿球藻生物量	杨燕辉等
1998.6	南海	5° ~ 25°N、 108° ~ 120°E	异养细菌、蓝细菌和原绿球藻生物量	杨燕辉等
1998.9 ~ 1999.4	渤海	37°45' ~ 39°N , 118°30' ~ 121°30' E	异养细菌生物量 and 生产力 , 蓝细菌生物量	肖天等
1999.2 ~ 1999.8	胶州湾	35°55' ~ 36°18' N , 120°04' ~ 120°23' E	蓝细菌生物量	杨燕辉等
1999.8	南海北部	18° ~ 22°N , 107° ~ 117°E	蓝细菌和原绿球藻生物量	宁修仁等

表 2 微小浮游动物对浮游细菌的摄食现场培养实验

时间(年·月)	海区	实验方法	研究内容	作者
1996.(6.9,10)	青岛汇泉湾	分级培养法	微小浮游动物对蓝细菌	肖天等
1997.6	渤海	稀释法和分级培养法	微小浮游动物对浮游植物和蓝细菌	张武昌和肖天
1998.7	东海	稀释法和分级培养法	微小浮游动物对浮游植物和蓝细菌	张武昌和肖天
1998.6	莱州湾	稀释法	微小浮游动物对浮游植物	张武昌等
1999.9	渤海	稀释法和分级培养法	微小浮游动物对浮游植物和蓝细菌	张武昌和肖天
2000.6	黄海	稀释法和分级培养法	微小浮游动物对浮游植物和蓝细菌	张武昌和肖天

参考文献：

- [1] Pinhassi J, Zweifel U L, Hagstrom A. Dominant marine bacterioplankton species found among colony-forming bacteria [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1997, **63**(9): 3 359 - 3 366.
- [2] Caron D A. The contribution of microorganisms to particulate carbon and nitrogen in surface waters of the Sargasso Sea near Bermuda [J]. *Deep - Sea Research*, 1995a, **42**: 943 - 972.
- [3] Carlson C A, Ducklow H W. Growth of bacterioplankton and consumption of dissolved organic carbon in the Sargasso Sea [J]. *Aqua Micro Ecol*, 1996, **10**: 69 - 85.
- [4] Steinberg D K. Overview of the US JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS): a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry [J]. *Deep - Sea Research II*, 2001, **48**: 1 405 - 1 447.
- [5] Murphy L S, Haugen E M. The distribution and abundance of phototrophic ultraplankton in the North Atlantic [J]. *Limnol Oceanogr*, 1985, **30**: 47 - 58.
- [6] Caron D A, Lim E L, Miceli G, et al. Grazing and utilization of chroococcoid cyanobacteria and heterotrophic bacteria by protozoa in laboratory cultures and a coastal plankton community [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1991, **76**: 205 - 217.
- [7] Iturrlaga R, Mitchell B G. Chroococcoid cyanobacteria: A significant component in the food web dynamics of the open ocean [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1986, **28**: 291 - 297.
- [8] Sarmiento J L, Le Quere C. Oceanic carbon dioxide uptake in a model of century-scale global warming [J]. *Science*, 1996, **274**: 1 346 - 1 350.
- [9] Legendre L, Courties C, Troussellier M. Flow cytometry in oceanography 1989 - 1999: environmental challenges and research trends [J]. *Cytometry*, 2001, **44**: 164 - 172.
- [10] Gundersen K. Particulate organic carbon mass distribution at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) site [J]. *Deep - Sea Research II*, 2001, **48**: 1 697 - 1 718.
- [11] 宁修仁. 长江口及其毗邻东海水域蓝细菌的分布和细胞特性及其环境调节 [J]. *海洋学报*, 1991, **15**(4): 552 - 559.
- [12] 宁修仁. 海洋微型和超型浮游生物 [J]. *东海海洋*, 1997b, **15**(3): 60 - 64.
- [13] 焦念志, 肖天. 胶州湾的微生物二次生产力 [J]. *科学通报*, 1995, **40**(9): 829 - 832.
- [14] 肖天, 张武昌, 王荣. 海洋蓝细菌在微型食物环中的作用初步研究 [J]. *海洋科学*, 1999, **5**: 5 - 8.
- [15] 郑天凌, 王斐, 徐美珠, 等. 台湾海峡海域细菌产量、生物量及其在微食物环中的作用生产力及其异养活性研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(4): 415 - 423.
- [16] 郑天凌, 默罕默德, 陈进才, 等. *中国海洋文集* [M]. 北京: 海洋出版社, 1997. 146 - 152.
- [17] 郑天凌, 默罕默德, 李文权, 等. *中国海洋文集* [M]. 北京: 海洋出版社, 1997. 153 - 161.
- [18] ZHANG Wuchang, XU Kuidong, WAN Ruijing, et al. Spatial distribution of ciliates, copepod nauplii and eggs, *Engraulis japonicus* post-larvae and microzooplankton herbivorous activity in the Yellow Sea, China [J]. *Aquat Microb Ecol*, 2002, **27**: 249 - 259.

(本文编辑 张培新)