

海洋浮游植物粒径组成及其生物粒径效应研究^{*}RESEARCH ON THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND ITS
EFFECT ON THE PHYSIOLOGY OF MARINE PHYTOPLANKTON

杨茹君 王修林 韩秀荣 祝陈坚 石晓勇

(中国海洋大学化学化工学院 青岛 266003)

中图分类号 Q948.8 文献标识码 A 文章编号 1000-3096(2003)11-0005-05

海洋生态系主要由生产者、消费者和分解者构成^[1],它们的群落结构和功能,生理、生物过程,以及在生态系中的物质、能量流动等在很大程度上都与生物粒径大小有关^[2-4]。自20世纪60年代,随着生物粒径测量技术的不断完善人们提出了海洋生物粒径谱假说,即海洋生态系是由最小生物(如细菌)至最大生物(如鲸)组成的一个生物粒径连续分级谱^[5-7]。海洋浮游植物是主要的海洋初级生产者,是海洋食物网(链)的初始环节^[8],因此在生物粒径谱假说的指导下,人们逐渐开展了海洋浮游植物粒径组成及其影响因素,以及海洋浮游植物生物、化学过程粒径效应等研究,这对于深入揭示海洋浮游植物群落结构与功能,以及有关生物、化学过程的作用机理等都具有重要的科学意义。

1 海洋浮游植物粒径测量方法

海洋浮游植物粒径大小可以分别采用细胞直径或半径、体积或表面积表征,目前测量浮游植物粒径的方法主要包括显微测微计法、图像分析法、库尔特计数法、流式细胞仪法和酸碱滴定法等。

显微测微计法是测量海洋浮游植物粒径的经典和基准方法^[9-11],主要是利用光学、电子显微镜的放大功能,以目镜测微尺为标尺测量(染色)浮游植物细胞的各种几何形态线性参数(如球体的直径,椭球体的长轴和短轴等),然后根据相关的几何公式计算细胞的体积、表面积和等效直径或半径等^[11,12]。由于浮游植物细胞的几何形态不规则,而且种间差异很大^[13],所以选择合适的几何形状计算公式是准确计算细胞体积等的关键。更重要的是,尽管同一种浮游植物有相同的几何形状,但细胞大小差异很大,因此测量足够数量的细胞不仅是得到准确并具有统计意义

的粒径数据的关键^[14],而且也是测量浮游植物粒径分布所必需的^①。显微测微计法具有直观的优点,但其工作量大,耗时多,难以消除细胞光晕的干扰,而且其光晕往往随焦距而变化,由此可能加大了其测量误差并导致粒径测量结果往往偏大^[10]。

图像分析法(Image analysis)是在显微测微计法基础上应用图像分析学原理发展起来的一种自动测量方法^[15],主要是根据细胞几何形态的图像信息,利用相关计算机软件测量浮游植物粒径,如细胞面积、周长、长度等。尽管目前人们已应用图像分析法测量海洋浮游植物粒径^[16,17],但是由于该方法难以实现有统计学意义上的多个细胞测量,而难以直接给出其粒径分布,由此在一定程度上限制了该方法的应用。

库尔特法主要是利用浮游植物细胞在通过恒电流电极体系时,由于瞬间取代相等体积电解液而导致电极间电位差变化的原理测量细胞体积。该方法不仅可简便地直接测量细胞体积及其分布,而且根据细胞为球形的假设可得到其等效球径和表面积。由于细胞可压缩性和导电性等原因,对于不规则的非球体细胞(如带有鞭毛的细胞、表面有沟壳的细胞

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 2001CB409703 号;国家自然科学基金项目 40136020, 49976027 号;教育部重点基金项目 01110 号;山东省自然科学基金 L2000E01 号及教育部博士点基金项目 20020423006 号。

第一作者:杨茹君,出生于1970年,博士研究生,研究方向为海洋污染生态学。E-mail: yangrj@mail.ouc.edu.cn

① 孙军. 浮游植物生物量研究. 硕士论文. 1997. 19

收稿日期:2003-02-19;修回日期:2003-04-20

等), 该方法的测量结果可能偏低, 但仍比显微测微计法、图象分析法等方法准确和合理。目前商品化的库尔特计数仪的粒径测量范围一般为 $1 \sim 120 \mu\text{m}$, 已在海洋浮游植物和浮游动物等粒径测量中得到了广泛的应用^[2, 18, 19]。

流式细胞法主要是根据在流体作用下, 细胞散射光大小和角度差异确定浮游植物粒径。流式细胞法可同时测量单个细胞的几何形状、内部结构、荧光特性和 DNA 组成等, 并据此可进行种类鉴定。尽管商品化流式细胞仪自 20 世纪 80 年代已在水生生物学研究中得到应用^[20], 但是目前一般只能测量 $50 \mu\text{m}$ 以下的细胞^[21], 而且存在不同种类浮游植物所需不同染色剂之间相互干扰, 前处理中会损失部分细胞, 以及仪器昂贵等问题。

目前上述几种方法只能测量浮游植物细胞的几何表面积, 但实际上浮游植物的许多生物、化学过程都与其“活性位”表面积相关。为此, 根据浮游植物细胞壁化学组分(如聚糖)的 Bronsted 酸性质和表面双电层理论, Wang 等建立了酸-碱滴定浮游植物表面积测定方法^[22], 并且最近已将该方法应用于海洋底栖生物表面积的测量^[23]。尽管该方法可以测定浮游植物细胞“活性位”表面积, 但至今没有见到细胞“活性位”表面积与其几何表面积之间关系的研究报道。

2 海洋浮游植物粒径组成及其影响因素

由于海域位置、水文(如水温、盐度、流场等)和气象条件(如气温、辐射场)、营养盐水平等差异, 不同海区浮游植物群落结构、种类组成、生物量、初级生产力水平及其时空分布特征等都有很大差别^[24-29]。这些差别在很大程度上可以应用浮游植物粒径组成及其分布表征^[26], 这样根据细胞粒径大小可以将海洋浮游植物划分为超微型(Pico)、微型(Nano)、小型浮游植物(Micro), Pico 粒径一般为 $0.2 \sim 3 \mu\text{m}$, Nano 为 $3 \sim 20 \mu\text{m}$, 小型为 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ ^[30]。一般而言, 大洋初级生产力主要由 Pico 级浮游植物贡献, 可占全球海洋初级生产力的 39%^[31], 特别是在温暖且寡营养的海区, Pico 级是最重要的初级生产力的贡献者^[32], 在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低于 1 mmol/L 的海域, Pico 级浮游植物将成为优势种群^[31]。在近海海域, 随着营养盐浓度的变化, 不同粒径的浮游植物对初级生产力的贡献变得较为复杂, 总体上讲, Nano 和 Micro 级浮游植物对初级生产力的贡献比大洋区有所增加, 但是 Pico 级浮游植物仍然是重要的贡献者^[25, 28]。据报道, 北部湾 Nano 和 Pico 级对初级生产力的贡献合计达 90% 以上, 而 Micro 级仅占 9%^[33]。象山港 Pico 级浮游植物对初级生

产力的贡献达 11%, Nano 级达 82%, 而 Micro 级达 11%^[28]。Lee Chen^[27]对东海南部的大陆架区、上升流区及黑潮区等三个有代表性海域的粒径分级初级生产力进行了比较系统的研究。结果表明, 在黑潮区 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度几乎未检出, Pico 级浮游植物对初级生产力的贡献为 54%~83%, 占绝对优势, Nano 级占 9%~14%, Micro 级占 8%~32%; 在大陆架区, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在 $0.1 \sim 0.7 \text{ mmol/L}$ 之间, Pico 级占 27%~64%, Nano 占 19%, 而 Micro 占 17%~54%, 并且随 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度增加, Nano 和 Micro 级对初级生产力的贡献有所增加, 而 Pico 则有所减少; 在有上升流的海域, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度增加到 $0.12 \sim 2.00 \mu\text{mol/L}$, Micro 级对初级生产力的贡献大大增加, 可达 68%, 而 Pico 最大仅为 36%。河口和沿岸海域各粒径浮游植物对海洋初级生产力的贡献随地域、季节的变化而不同, 例如珠江口海域由于存在 P、Si 的限制, Nano 和 Pico 级的贡献仍占主要地位, Micro 级对初级生产力的贡献在冬夏两季分别为 29% 和 10%^[34], 而在营养丰富的河口和沿岸水区域, 生产力主要由较大的 Micro 级浮游植物贡献。在温度较低的南极普里兹湾, 各粒径浮游植物对初级生产力的贡献分别为 Micro 为 69%, Nano 为 21%, Pico 为 10%^[35], 由此可见, 温度也是影响浮游植物粒径分布的重要因素。

海洋浮游植物细胞粒径在不同生命时期是不尽相同的, 例如, 在整个生命周期过程中, 硅藻(*Rhizosolenia setigera*)随着细胞分裂和繁殖, 细胞体积持续减小, 当减小到某个临界值时, 细胞繁殖通过产生复大孢子由简单的分裂转变为有性生殖, 并且其细胞体积也达到最大状态。浮游植物细胞粒径不仅在不同生命时期表现出一定的差异, 而更重要的是, 营养盐水平等化学环境, 污染物浓度等水质环境条件, 以及光照等气象条件等都在相当大程度上影响浮游植物粒径大小。例如, 应用海洋围隔生态系实验研究表明, 在营养盐($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)限制条件下, 浮游植物体积较小, 而随着营养盐浓度增加, 浮游植物体积逐渐增大^[36]。这似乎说明, 小粒径浮游植物更适应低营养盐环境, 而高营养盐环境更能满足大粒径浮游植物生长。石油烃、重金属等化学污染物对浮游植物粒径可产生重要影响, 石油烃可促使浮游植物粒径增大, 这可能主要是由于石油烃的毒性效应, 抑制了细胞的分裂和生长^[37], 由此导致浮游植物细胞粒径增

① 江玉. 海洋浮游植物对石油烃的生物富集及其生物毒性作用研究, 硕士学位论文。1999。9

大。实际上,最新的研究表明,在一定条件下浮游植物细胞密度(N)与其体积(M)呈负相关,遵守 $N \propto M^{-3/4}$ 关系^[3, 4],由此可以推断在一定条件下伴随浮游植物细胞密度的减小,可能导致细胞粒径的增加。同样,由于重金属污染物的毒性效应,如抑制光合作用、改变代谢过程和减少细胞色素等,重金属污染物不仅可以影响浮游植物粒径,而且可以导致细胞形状畸变^[38, 39]。Hg 在亚致死浓度下可使盐藻 (*Dunaliella salina*) 细胞体积增大^[40], Cu 可使小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 和纤维藻 (*Ankistrodesmus*) 形成巨细胞,使组囊藻 (*Anacystis nidularis*) 形成球形个体^[41],而 Pb 在 0.05 ~ 10 mg/L 浓度下,可使骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 体积增大^[42]。此外,光照条件在很大程度上可以影响浮游植物细胞粒径,如 UV-B 可使赫胥历藻 (*Emiliania huxleyi*) 粒径增大^[11]。

3 海洋浮游植物生物、化学过程粒径效应

海洋浮游植物生物、化学等过程在很大程度上都与其粒径相关^[2]。例如,浮游植物对 N 如 NO_3^- 、P (如 PO_4^{3-}) 的(比)吸收速率与浮游植物粒径密切相关。在寡营养的水域,小粒径($< 3\mu\text{m}$)浮游植物对 PO_4^{3-} -P 的吸收速率一般大于大粒径($> 3\mu\text{m}$)浮游植物,而对 NH_4^+ -N 的吸收则相反^[43],因此在自然条件下, N:P 比例的差异会影响浮游植物群落结构,从而间接地影响营养盐循环^[36]。然而,在近海海域可能由于营养盐水平等的差异,浮游植物对营养盐吸收速率的生物粒径效应可能更加复杂,例如厦门湾不同粒径浮游植物对 PO_4^{3-} -P 的(比)吸收速率顺序是 Nano > Micro > Pico,其中 Nano 级浮游植物吸收了 2/3 以上的 PO_4^{3-} ,而 Pico 和 Micro 级浮游植物对 PO_4^{3-} -P 的吸收表现出明显的季节变化^[25]。Hein 等^[36]应用海洋围隔生态实验研究了 N 限制条件下浮游植物生长速率时发现,尽管随营养盐浓度增加以颗粒有机碳表征的生物量增加,并且浮游植物对营养盐吸收速率也接近最大值,但以细胞密度表征的浮游植物种群生长速率并没有增加。上述研究表明,浮游植物对营养盐吸收速率与其粒径之间存在着复杂的关系,会随着海域、营养盐水平等的不同有很大差异。海洋浮游植物不仅对 N、P 等常量营养盐吸收表现出明显的粒径效应,而且对微量营养元素(如 Fe)也是如此。浮游植物对 Fe 的吸收速率与其细胞比表面积成正相关,即小粒径(Pico)浮游植物对 Fe 的吸收速率大于大粒径(Nano, Micro)细

胞,因此小粒径浮游植物在 Fe 限制条件下更容易生长^[44, 45]。

海洋浮游植物可通过生物富集使石油烃、重金属等污染物在细胞中累积,这不仅对污染物生物地球化学过程产生影响,而且对海洋生态系也产生危害^[37]。海洋浮游植物对化学污染物生物富集过程不仅决定于浮游植物种类和污染物的物理化学性质^[46],而且其生物富集因子(BCF)大小在很大程度上与浮游植物粒径有关。海洋浮游植物对疏水性有机物生物富集双箱热力学模型^[47]表明,细胞粒径越小,对疏水性有机污染物(如 monochlorobenzene, 1, 2-dichlorobenzene, 1, 2, 3, 4-tetrachlorobenzene 等)的 BCF 越大。实际上,组成浮游植物细胞壁的肽聚糖、磷脂等脂类化合物^[48]可提供与有机污染物结合的“活性位”,因此浮游植物对疏水性有机污染物生物富集不仅与细胞脂类含量和分布有关,而且也与细胞表面积有关^[47, 49, 50]。可能基于类似的原因,组成浮游植物细胞壁的某些表面官能团(如硫酸盐、氨基、羧基)可提供能与重金属污染物进行络和或阳离子交换的表面“活性位”,浮游植物对重金属的生物富集不仅与细胞表面官能团含量和分布有关,而且也应当与细胞表面积有关,但目前尚未有见到有关这方面的报道。

4 小结

综上所述,研究浮游植物的粒度分布对于描述海洋浮游植物生物、化学过程,深入揭示海洋浮游植物群落结构与功能,定量分析海洋生态系中物质和能量流动,以及有关生物、化学过程的作用机理,预测化学污染物对浮游植物群落结构的影响等都具有重要的科学意义。在测量方法上,虽然目前测量技术可以满足浮游植物细胞的粒径大小及其分布的分析要求,但是由于浮游植物在不同的生命周期粒径变化很大,目前并没有见到有关不同生命周期浮游植物粒径大小及其分布变化的研究报道。随着我国近海海域富营养化程度的不断加剧,以及石油烃、重金属等化学污染物浓度的增加,我们面临着有害赤潮频发和经济类海洋生物数量不断减少等重大海洋生态环境问题,揭示海洋环境污染对海洋浮游植物粒径影响,以及相关生物、化学过程的粒径效应等已成为海洋生态环境研究的当务之急。尽管以往的研究已表明了营养盐、化学污染物对浮游植物粒径有一定的影响,以及浮游植物对营养盐吸收、污染物生物富集等存在一定程度的粒径效应,但是缺乏细致的定量描述和深入的作用机

理研究。因此,有必要开展各种海洋环境条件下海洋浮游植物粒径变化规律,以及海洋浮游植物各种生物、化学过程粒径效应等的深入研究,这对于揭示海洋浮游植物群落结构及其功能,描述海洋初级生产力组成及其变化规律等都具有重要的科学意义。

参考文献

- 1 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等.基础生态学.北京:高等教育出版社,2002.191-192
- 2 Santanu R. Optimization of exergy and implications of body sizes of phytoplankton and zooplankton in an aquatic ecosystem model. *Ecological Modelling*, 2001, 140: 219-234
- 3 Andrea B, James H B. Oceans under the microscope. *Nature*, 2002, 419: 128-129
- 4 Li W K W. Macroecological patterns of phytoplankton in the northwestern North Atlantic Ocean. *Nature*, 2002, 419: 154-157
- 5 Sheldon R W, Parsons T R. A continuous size spectrum for particulate matter in the sea. *J Fish Res Board Can*, 1967, 24: 909-915
- 6 Sheldon R W, Prakash A, Surcliffe W H Jr. The size distribution of particles in the oceans. *Limnol Oceanogr*, 1972, 17: 327-340
- 7 Kerr S R. Theory of size distribution in ecological communities. *J Fish Res Board Can*, 1974, 31: 1859-1862
- 8 Morel A, Antoine D. Small critters - big effects. *Science*, 2002, 296(5575): 1980-1982
- 9 彦昌敬.植物组织培养手册.上海:上海科学技术出版社.1990.453-454
- 10 Montagnes D J S, Berges J A, Harrison P J, et al. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnol Oceanogr*, 1994, 39(5): 1044-1060
- 11 Garde K, Cailliau C. The impact of UV-B radiation and different PAR intensities on growth, uptake of ^{14}C , excretion of DOC, cell volume, and pigmentation in the marine prymnesiophyte, *Emiliania huxleyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 247: 99-112
- 12 Edler L. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. In: *Phytoplankton and Chlorophyll. Baltic: Marine Biologists Publication*, 1979, 5: 38-48
- 13 孙军,刘东艳.浮游植物生物量研究II. *海洋学报*, 2000, 22(1): 102-109
- 14 Rott E. Some results from phytoplankton counting intercalibrations. *Schweiz Hydrol*, 1981, 43: 34-62
- 15 Weibel E R. Stereological principles for morphometry in electron microscopy. *Int Rev Cytol*, 1969, 26: 235-302
- 16 Billones R G. Image analysis as a tool for measuring particulate matter concentrations and gut content, body size, and clearance rates of estuarine copepods: validation and application. *Journal of Marine Systems*, 1999, 22: 179-194
- 17 Waite A. New measurements of phytoplankton aggregation in a flocculator using videography and image analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 155: 77-88
- 18 Gilek M, Tackx M L M, Hachier A T, et al. Influence of body size on the uptake, depuration, and bioaccumulation of polychlorinated biphenyl congeners by Baltic Sea blue mussels, *Mytilus edulis*. *Marine Biology*, 1996, 125: 499-510
- 19 Arakawa H, Yaoit T, Koike T, et al. Size of suspended particles caught by Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. *Morinaga La Mer*, 1997, 35(4): 149-156
- 20 Paa As, Uro J C J R. Applications of flow cytometry to the study of algal cells and isolated chloroplasts. *J Exp Bot*, 1978, 29: 1011-1022
- 21 孙书存,陆健健,张利华.流式细胞仪在微型浮游植物生态学中的应用. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 72-78
- 22 Wang X L, Ma Y J, Su Y L. Determining the surface area of marine phytoplankton cells by acid-base titration. *Chemosphere*, 1997, 35: 1131-1141
- 23 Wang X L, Zauke G P. Relationship between growth parameters of the amphipod *Gammarus zaddachi* (Sexton 1912) and the permeable body surface area determined by the acid-base titration method. *Hydrobiologia*, 2002, 482(1-3): 179-189
- 24 Gosselin M, Levasseur M, Wheeler P A, et al. New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Research part II*, 1997, 44(8): 1623-1644
- 25 Wang H L, Huang B Q, Hong H S. Size-fractionated productivity and nutrient dynamics of phytoplankton in subtropical coastal environments. *Hydrobiologia*, 1997, 352: 97-106
- 26 Shalapyonok A, Olson R J, Shalapyonok L S. Arabian Sea phytoplankton during Southwest and Northeast Monsoons 1995: composition, size structure and biomass from individual cell properties measured by flow cytometry. *Deep-Sea Research II*, 2001, 48: 1231-1261
- 27 Lee Chen Y L. Comparisons of primary productivity and phytoplankton size structure in the marginal regions of southern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2000, 20:

- 437 - 458
- 28 刘子琳, 蔡昱明, 宁修仁. 象山港中西部秋季浮游植物粒径分级、叶绿素 a 和初级生产力. 东海海洋, 1998, 16(3): 18 - 23
 - 29 刘子琳, 史君贤, 陈忠元, 等. 南极夏季普里兹湾邻近海域浮游植物 粒度分级叶绿素 a 和初级生产力的分布. 极地研究, 1997, 9(1): 18 - 27
 - 30 陈怀清, 钱树本. 青岛近海微型、超微型浮游藻类的研究. 海洋学报, 1992, 14(3): 105 - 113
 - 31 Agawin NS R, Duarte C M, Agustí S. Nutrient and temperature control of picoplankton to phytoplankton biomass and production. Limnol Oceanogr, 2000, 45(3): 591 - 600
 - 32 Agawin NS R, Duarte C M, Agustí S. Response of Mediterranean *Synechococcus* growth and loss rates to experimental nutrient inputs. Mar Ecol Prog Ser, 2000, 206: 97 - 106
 - 33 刘子琳, 宁修仁, 蔡昱明. 北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. 海洋学报, 1998, 20(1): 50 - 57
 - 34 蔡昱明, 宁修人, 刘子琳. 珠江口初级生产力和新生生产力研究. 海洋学报, 2002, 24(3): 101 - 111
 - 35 刘子琳, 蔡昱明, 陈中元, 等. 1998/1999 年南极夏季普里兹湾及北部海区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. 极地研究, 2002, 14(1): 12 - 21
 - 36 Hein M, Riemann B. Nutrient limitation of phytoplankton biomass or growth rate: an experimental approach using marine enclosures. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1995, 188: 167 - 180
 - 37 李永祺, 丁美丽. 海洋污染生物学. 北京: 海洋出版社, 1991. 233 - 287
 - 38 Herbert E A, Carol B, Thomas D B. An algal assay method for determination of copper complexation capacities of natural waters. Bull Environ Contam Toxicol, 1983, 30: 448 - 455
 - 39 Kaladharan P. Inhibition of primary production as induced by heavy metal ions on phytoplankton population of Cochin. Indian J Fish, 1990, 37(1): 51 - 54
 - 40 Bolanos L. Differential toxicological response to Cd in An absena strain PCC 7119 growth with NO_3^- of NH_4^+ as nitrogen source. J Plant Physiol, 1992, 140(3): 345 - 349
 - 41 Klotz R L. Algal response to copper under riverine conditions. Environ Pollut Series A, 1981, 24(1): 1 - 19
 - 42 Copelo S. Effect of lead on the uptake of nutrients by unicellular algae. Water Res, 1993, 27(10): 1563 - 1568
 - 43 Suttle C A, Cochlan W P, Stockner J G. Size - dependent ammonium and phosphate uptake, and N: P supply ratios in an Oligotrophic Lake. Can J Fish Aquat Sci, 1991, 48: 1226 - 1234
 - 44 Sunda W G, Huntsman S A. Interrelated influence of iron, light and cell size on marine phytoplankton growth. Nature (C), 1997, 390(6658): 389 - 392
 - 45 Sunda W G, Huntsman S A. Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. Marine Chem, 1995, 50: 189 - 206
 - 46 陈小霞, 吴振强, 梁世中. 藻类对微量元素的生物富集及其机理探讨. 食品与发酵工业, 1995, 25(4): 56 - 60
 - 47 Wang X L, Ma Y J, Yu W J, et al. Two - compartment thermodynamic model for bioconcentration of hydrophobic organic chemicals by alga: Quantitative relationship between bioconcentration factor and surface area of marine algae or octanol/ water partition coefficient. Chemosphere, 1997, 35(8): 1781 - 1797
 - 48 Morelli E, Scarano G. Synthesis and stability of phyto-chelates induced by cadmium and lead in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. Marine Environmental Research, 2001, 52: 383 - 395
 - 49 王修林, 马延军, 郁伟军, 等. 海洋浮游植物的生物富集热力学模型 - 对疏水性污染有机物生物富集双箱热力学模型. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(2): 299 - 306
 - 50 江玉, 韩秀荣, 张军, 等. 海洋浮游植物对 2- 甲基萘的生物富集研究. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(1): 101 - 106

(本文编辑 :张培新)