

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社 主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第31卷 第21期 2011年11月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例.....	史利莎, 严力蛟, 黄璐, 等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律.....	游巍斌, 何东进, 巫丽芸, 等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究.....	赵景柱, 宋瑜, 石龙宇, 等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例	曹铭昌, 刘高焕, 徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征.....	凡非得, 王克林, 熊鹰, 等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例	高凡, 闫正龙, 黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配.....	王娟, 张春雨, 赵秀海, 等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应.....	王晓明, 赵秀海, 高露双, 等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局.....	赵成章, 任珩, 盛亚萍, 等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征	杨永川, 穆建平, TANG Cindy Q, 等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化	邵剑文, 张文娟, 张小平 (6410)
神农架海拔梯度上4种典型森林的乔木叶片功能性状特征.....	罗璐, 申国珍, 谢宗强, 等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征.....	
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响.....	王丽艳, 韩有志, 张成梁, 等 (6429)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性.....	张喜, 崔迎春, 朱军, 等 (6442)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析.....	马成仓, 高玉葆, 李清芳, 等 (6451)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏.....	司朗明, 刘彤, 刘斌, 等 (6460)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势.....	周永斌, 殷有, 殷鸣放, 等 (6469)
基于GIS的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例	张常智, 张明海 (6481)
2010年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析	李超, 张智, 郭文超, 等 (6488)
B型烟粉虱对寄主转换的适应性	蒋春先, 齐会会, 孙明阳, 等 (6495)
利用PCR-DGGE方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化	周福才, 李传明, 顾爱祥, 等 (6505)
鸡粪改良铜尾矿对3种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响	李永洙, Yongquan Cui (6513)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应	张宏, 沈章军, 阳贵德, 等 (6522)
10种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系	汪燕, 李珊珊, 李建宏, 等 (6532)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度	王燕, 李瑞香, 董双林, 等 (6540)
城市机动车道颗粒污染物扩散对绿化隔离带空间结构的响应	李大命, 孔繁翔, 于洋, 等 (6551)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性	蔺银鼎, 武小刚, 郝兴宇, 等 (6561)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源	杨宇, 刘毅, 董雯, 等 (6568)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响	徐春英, 李玉中, 李巧珍, 等 (6579)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数	肖国举, 张强, 张峰举, 等 (6588)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征	梁亮, 杨敏华, 邓凯东, 等 (6594)
专论与综述	张惠, 杨正礼, 罗良国, 等 (6606)
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望	黄娟, 莫江明, 孔国辉, 等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成	李宁, 白冰, 鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响	杜成凤, 李潮海, 刘天学, 等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评	石海佳, 梁赛, 王震, 等 (6641)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界15种鹤数量极小的一种, 主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地, 以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚧、软体动物为主, 也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔, 喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类, 主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的CITES附录一物种名录。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

王燕, 李瑞香, 董双林, 李艳, 孙萍, 王小冬. 10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系. 生态学报, 2011, 31(21): 6540-6550.
Wang Y, Li R X, Dong S L, Li Y, Sun P, Wang X D. Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6540-6550.

10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系

王 燕^{1,2,3}, 李瑞香^{2,3,*}, 董双林¹, 李 艳^{2,3}, 孙 萍^{2,3}, 王小冬⁴

(1. 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 青岛 266003; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

3. 海洋生态环境与工程国家海洋局重点实验室, 青岛 266061; 4. 暨南大学赤潮与水环境研究中心, 广州 510632)

摘要:选择 10 种常见甲藻,通过构建相应细胞几何模拟图形从而计算了每种甲藻细胞的体积,利用元素分析仪测定了每种甲藻的单个细胞碳、氮含量,并分析了细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系。结果表明,10 种常见甲藻的细胞体积差异显著,最小仅为 $2.97 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ (卡特双甲藻),最大可达到 $4.50 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ (红色赤潮藻),相差 2 个数量级;单个细胞碳、氮含量变化范围分别为 54.50—2238.00 pg/个和 11.42—482.28 pg/个,均相差 40 多倍。细胞体积与单个细胞碳、氮含量存在极显著的正相关线性关系($P < 0.0001$)。

关键词:常见甲藻;细胞体积;碳含量;氮含量

Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates

WANG Yan^{1,2,3}, LI Ruixiang^{2,3,*}, DONG Shuanglin¹, LI Yan^{2,3}, SUN Ping^{2,3}, WANG Xiaodong⁴

1 Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266003, China

2 First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, 266061, China

3 Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, SOA, Qingdao, 266061, China

4 Research Center of Harmful Algal Bloom and Aquatic Environmental Science, Jinan University, Guangzhou, 510632, China

Abstract: As the most important primary producer in the marine ecosystem, phytoplankton forms the foundation of the structure and function of the marine food webs. Most of the primary productivity is turned into phytoplankton biomass, which is a good indicator to reflect the spatio-temporal distribution of marine organic matter production and dynamics of the phytoplankton community. Consequently, the estimation of phytoplankton biomass has ecological significance in marine ecosystem studies.

Several methods have been established to estimate phytoplankton biomass, such as cell counting method, chlorophyll *a* determination method, cell carbon and nitrogen contents determination method, conversion of cell volume to biomass method etc.. Among them, the conversion of cell volume to biomass method is relatively more accurate as with this method, the cell volume is worked out and organic matter content per cell was measured. The results could be used to address phytoplankton biomass at the cell level and the change of ecosystem function. Therefore, this method gradually becomes the most common and effective method to estimate phytoplankton biomass.

The key of conversion of cell volume to biomass method is to study the relationship between cell volume and cell organic matter (carbon, nitrogen or others) content. In the past several decades, there were a number of studies on biomass of diatom, but fewer studies on dinoflagellates. It is needed to study dinoflagellates cell volume and cell organic matter

基金项目:科技基础性工作专项项目(2008FY230600);国家重点基础研究发展计划(2010CB4278701);国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项基金项目(GY02-2008G16);国家海洋局青年海洋科学基金(2009115)

收稿日期:2010-08-30; **修订日期:**2011-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liruixiang@fio.org.cn

contents.

Ten common dinoflagellates were investigated to determine the relationship between cell volume and their contents of carbon and nitrogen. The morphological characteristics of ten species were observed using a Nikon ECLIPSE TE2000-U optical microscope. Then cell-geometry analogous models were built accordingly. The model of *Alexandrium tamarense*, *Alexandrium affine* and *Protoceratium reticulatum* is sphere, that of *Akashiwo sanguinea*, *Amphidinium carterae*, *Prorocentrum donghaiense*, *Prorocentrum gracile* and *Prorocentrum minimum* is ellipsoid, that of *Gonyaulax spinifera* circular cone and half sphere and *Lingulodinium polyedra* circular cone and circular truncated cone. From these models, the cell volumes for each dinoflagellate can be calculated by microscope measurement including cell length, width or diameter and breadth. Furthermore, cell carbon and nitrogen content was determined using a CHN analyzer. Then the relationships between both carbon and nitrogen contents and cell volume could be established. Large differences were observed among the ten dinoflagellates in cell volume, carbon and nitrogen contents. The range of cell volumes are from $2.97 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ (*Amphidinium carterae*) to $4.50 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ (*Akashiwo sanguinea*). *Amphidinium carterae* had the lowest carbon and nitrogen contents (54.50 and 11.42 picogram per cell), while *Gonyaulax spinifera* had the greatest carbon and nitrogen contents (2238.00 and 482.28 picogram per cell), showing a difference of a factor of 40. It was more appropriate to analyze these relationships by logarithmic models due to the wide range of cell volume, which was mentioned by Verity et al (1992). In the present study, the cell volume thus determined is positively correlated to their cell carbon and nitrogen contents significantly ($P < 0.0001$), which indicated that the cell carbon and nitrogen contents would increase with cell volume increased. On the other hand, the cell volume thus determined is negatively correlated to their cell carbon and nitrogen contents per unit volume significantly ($P < 0.0001$), which indicated that the smaller cells contained more carbon and nitrogen per unit volume. In order to allow conversion among cell volume, carbon and nitrogen, in the marine ecology field, it is important to establish regression equations between these parameters.

Key Words: common dinoflagellates; cell volume; carbon content; nitrogen content

浮游植物是海洋生态系统中物质循环和能量流动的重要载体,是海洋生态系统食物网结构与功能的基础。浮游植物生物量是估算海洋初级生产力,解释海洋有机生产时空分布规律及揭示浮游植物生态动力学过程的重要指标^[1-3]。因此浮游植物生物量的计算在海洋生态系统的研究中具有极其重要的作用。

目前估算浮游植物生物量最普遍的方法为细胞计数法和叶绿素a测定法,但是这些方法往往忽略了细胞大小和有机碎屑等干扰因素的影响,降低了估算浮游植物生物量的精确度。比较而言,通过细胞碳、氮等细胞组分指标估算浮游植物生物量则更为准确^[4]。但是,通常自然海水中浮游植物细胞碳、氮含量的测量会受到水体中非浮游植物源的有机碳、氮等因素的影响导致测量准确度严重下降,而且仅测量细胞内有机物质含量并不能在浮游植物种属的阶层上反映生态系统的状态,对于生态系统的理解和贡献也仅仅限于营养阶层和功能群的水平,从而限制了对生态系统的深入研究^[5]。利用细胞体积与各种生物量转换的关系,可以将细胞体积转换成细胞碳氮含量^[6]。这个方法相对精确地计算了每个细胞的有机物质含量,在细胞层次上反映了浮游植物的生物量,影响因素以及生态系统的功能和变化,从而避开上述问题的干扰。该种方法也是目前测定浮游植物生物量最常用的方法之一。但是这个方法的缺陷也同样显著:由于某些浮游植物细胞较小和形态的多样性,在浮游植物细胞体积转化过程中可能存在误差,从而影响了估算细胞碳氮含量的精度。

几十年来,利用浮游植物细胞体积转换法^[6]换算细胞碳、氮含量更多的应用于硅藻的研究,在甲藻方面也有人进行了研究,但相对较少^[7-13]。由于甲藻形态不规则,难以测量其细胞体积,从而用该方法换算甲藻细胞碳、氮含量更有难度。然而,估算甲藻细胞的生物量对于研究食物链结构和甲藻生理生态学及碳氮循环等具有重要的意义。基于此,本文选择了10种常见甲藻,通过构建细胞几何模拟图形^[5,14]获取它们的细胞体积进而探讨了细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系,以期为从物种水平上估算以甲藻为优势种的赤潮水域浮

游植物种群结构与能流问题的解决提供帮助,进而为海洋生态系统初级生产力的估算作出相应的贡献。

1 材料与方法

1.1 材料

本文实验藻种为:红色赤潮藻(*Akashiwo sanguinea* (Hirasaki) G. Hansen&Moestrup)^[15]、相关亚历山大藻(*Alexandrium affine* Balech)^[16]、塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech)^[15]、卡特双甲藻(*Amphidinium carterae* Hulbert)^[15]、底刺膝沟藻(*Gonyaulax spinifera* (Claparede et Lachmann) Diesing)^[15]、多边舌甲藻(*Lingulodinium polyedra* (Stein) Dodge)^[17]、东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense* Lu)^[15]、细长原甲藻(*Prorocentrum gracile* Schütt)^[15]、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller)^[15]、网状原角藻(*Protoperatium reticulatum* (Claparède et Lachmann) Bütschli)^[15],分别隶属于7个属。其中底刺膝沟藻,多边舌甲藻及网状原角藻购自美国浮游植物研究中心(The Provasoli-Guillard National Center for Culture of Marine Phytoplankton),其它均由国家海洋局第一海洋研究所海洋生态中心浮游生物生态学实验室提供。

1.2 方法

1.2.1 培养方法

实验海水采自青岛近海,经过孔径为0.45 μm,直径为47 mm的醋酸纤维滤膜过滤,高温煮沸消毒后冷却,将含盐量调节至(31±1)%。培养容器先于1 mol/L HCl溶液中浸泡48 h,然后用蒸馏水洗净,烘干后使用。

于无菌操作台中,将处于指数生长期的甲藻分别接入400 mL(容积为500 mL三角锥形瓶)的f/2^[18]培养液中,每种甲藻设置3个平行样,置于培养温度为(20±1)℃,光照强度为(100±10) μmol·m⁻²·s⁻¹,光暗比为L:D=12 h:12 h的GZX-250BS-II光照培养箱中进行一次性培养。

1.2.2 细胞计数

每隔1天取样1次,样品用Lugol's碘液固定。于Nikon TS 100倒置显微镜下计数,每个样品重复计数至少3次,计数值间相差不超过15%,取其平均值。

1.2.3 细胞体积和细胞碳、氮含量的测定及计算方法

每种甲藻进入指数生长中后期时,每个平行样品取样2份,样品号记为A、B,取样体积分别为5 mL、100 mL,作如下处理:

取2—3滴样品A置于载玻片上,首先,在Nikon ECLIPSE TE2000-U倒置荧光显微镜下观察每种甲藻的细胞形态。然后对样品用终浓度为0.5%的Lugol's碘液固定并进行显微照相(400倍),构建相应的几何模拟图形及细胞体积计算公式,确定所需测量的细胞参数。然后,随机选取20个边缘清晰的细胞,于显微镜下测量细胞长度、宽度、厚度或者直径参数,必要时借助毛细解剖针小心拨动藻体,使测量更为精确。每种甲藻3个平行样品各进行3次测量,共测180次,待计算其细胞体积。

每种甲藻细胞体积的计算:根据对每个细胞所测量的参数,计算其细胞体积,然后根据所有细胞体积值算其算术平均值。

取1 mL样品A置于1 mL计数框中,用Lugol's碘液固定(终浓度为2%),于Nikon倒置显微镜下进行细胞计数,重复3次。

取100 mL样品B首先经已灼烧(马弗炉500℃,3 h)和称重(W_1)的GF/F玻璃纤维滤膜(Whatman 0.7 μm,47 mm)过滤,然后将载有藻体的滤膜用浓盐酸熏蒸3—5 min,而后置于55℃烘箱中24 h烘干、称重(W_2),则可得出藻净重 $W_0 = W_2 - W_1$,然后用Vario III ELCHNOS元素分析仪测定碳、氮的百分数,根据细胞计数、净重结果,便可计算出每种甲藻单个细胞的碳、氮含量。

2 结果

2.1 细胞几何模拟图形的构建和细胞体积的估算

根据细胞实体形态(图1)并结合参考文献,构建10种甲藻的几何模拟图形分别为:球体、椭圆体、圆锥与半球复合体和圆锥与正圆台复合体(表1)。

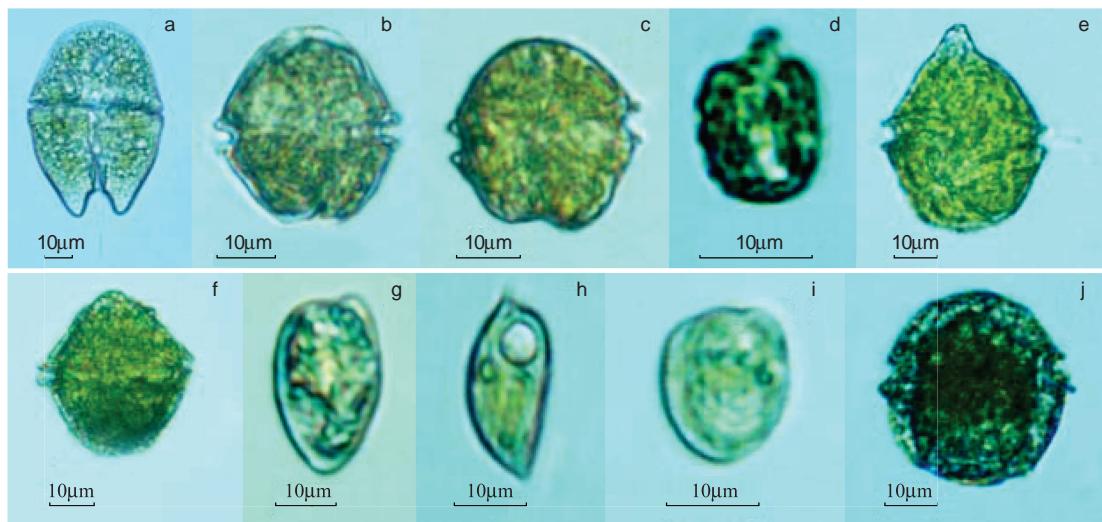


图1 10种甲藻的显微照片(400倍)

Fig. 1 Micrographs of ten dinoflagellates with 400 times amplification factor

a: 红色赤潮藻 *A. sanguinea*; b: 相关亚历山大藻 *A. affine*; c: 塔玛亚历山大藻 *A. tamarensis*; d: 卡特双甲藻 *A. carterae*; e: 底刺膝沟藻 *G. spinifera*; f: 多边舌甲藻 *L. polyedra*; g: 东海原甲藻 *P. donghaiense*; h: 细长原甲藻 *P. gracile*; i: 微小原甲藻 *P. minimum*; j: 网状原角藻 *P. reticulatum*

表1 10种常见甲藻对应的细胞几何模拟图形及细胞体积

Table 1 Geometric analogue graphs and formulas for calculating cell volumes of ten common dinoflagellates

模型名称 Model names	图形 Graphs	体积公式 Cubature formulas	对应甲藻图片及名称 Images of dinoflagellates correspondingly	细胞体积±标准差/ μm^3 Cell volume±SD
球体 Sphere		$V = \frac{\pi}{6} a^3$	(c) 塔玛亚历山大藻 (<i>A. tamarensis</i>) (b) 相关亚历山大藻 (<i>A. affine</i>) (j) 网状原角藻 (<i>P. Reticulatum</i>)	11276.84±302.15 12213.12±398.10 11614.11±591.04
椭圆体 Ellipsoid		$V = \frac{\pi}{6} abc$	(d) 卡特双甲藻 (<i>A. carterae</i>) (a) 红色赤潮藻 (<i>A. sanguinea</i>) (g) 东海原甲藻 (<i>P. donghaiense</i>) (h) 细长原甲藻 (<i>P. gracile</i>) (i) 微小原甲藻 (<i>P. minimum</i>)	296.89±23.62 45043.18±969.25 847.06±126.24 1397.24±27.69 843.20±84.93
圆锥与半球复合体 Circular cone and half sphere		$V = \frac{\pi}{12} b^2 (a+b)$	(e) 底刺膝沟藻 (<i>G. spinifera</i>)	21446.74±90.11
圆锥与正圆台复合体 Circular cone and circular truncated cone		$V = \frac{\pi}{12} a_2 (b_1^2 + b_1 b_2 + b_2^2) + \frac{\pi}{12} a_1 b_1^2$	(f) 多边舌甲藻 (<i>L. polyedra</i>)	14591.00±1049.72

塔玛亚历山大藻和相关亚历山大藻细胞上下壳近似大小相等的半球体^[16-17],故模拟为球体模型;网状原角藻藻体无顶角,细胞近似球体^[19-20],故确定其细胞几何模拟图形亦为球体。红色赤潮藻形态较不规则,上甲圆,下甲W形,背腹扁^[17],经观察其整体形态类似椭圆体,故模拟为椭圆体^[5];卡特双甲藻上锥部几乎退化^[21],整体形状亦类似椭圆体^[5];东海原甲藻细胞披针形,顶端平坦^[22],细长原甲藻细胞披针形,上壳似圆形,下壳尖形^[23],微小原甲藻细胞前宽后细圆^[24],均模拟为椭圆体^[5];底刺膝沟藻上壳圆锥形,下壳半球

形^[17],故模拟为圆锥与半球复合体;多边舌甲藻上壳为多边锥形体,下壳为截顶形锥体,侧边直^[17],模拟为圆锥和正圆台复合体。

根据上述4种模拟几何图形,得到10种甲藻细胞体积的计算公式(表1)。10种甲藻的细胞体积范围在 $2.97 \times 10^2 - 4.50 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 之间,红色赤潮藻细胞体积最大,达到 $4.50 \times 10^4 \mu\text{m}^3$,底刺膝沟藻次之,但是仅有前者体积的一半,卡特双甲藻细胞体积最小,为 $2.97 \times 10^2 \mu\text{m}^3$,相关亚历山大藻、塔玛亚历山大藻、网状原角藻和多边舌甲藻四种甲藻细胞体积均在 $(1.1-1.5) \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 之间,而细长原甲藻约为 $1.4 \times 10^3 \mu\text{m}^3$,东海原甲藻和微小原甲藻细胞体积也较小,均在 $8.5 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ 左右,稍高于卡特双甲藻细胞体积。

2.2 细胞碳、氮含量

本文10种甲藻单个细胞所含碳、氮含量差异较大,碳含量最低为54.50 pg/个(卡特双甲藻),最高为2238.00 pg/个(底刺膝沟藻)(图2),其碳含量比卡特双甲藻高出40多倍;变异系数(SD/\bar{x})最小为2%(相关亚历山大藻),最大为19.1%(底刺膝沟藻)。氮含量范围在11.42 pg/个(卡特双甲藻)和482.28 pg/个(底刺膝沟藻)之间(图2);变异系数在0.3%(相关亚历山大藻)和26.0%(底刺膝沟藻)之间。可见,这10种甲藻细胞碳、氮含量的差异性较大,其最大值比最小值高出40多倍。

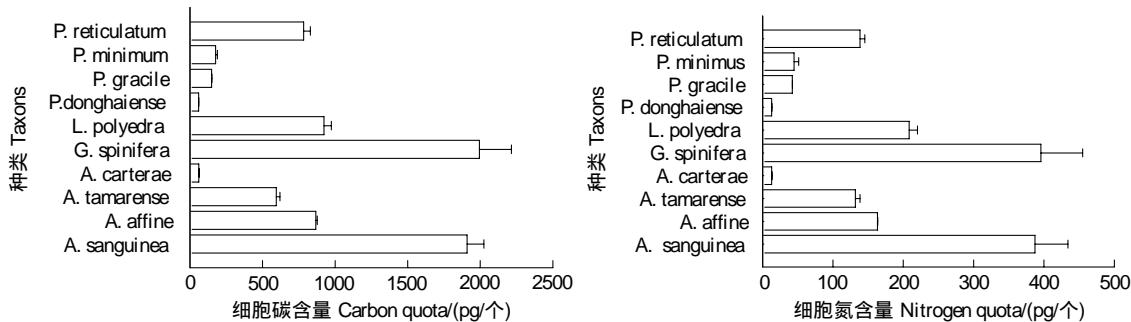


图2 10种常见甲藻的细胞碳、氮含量

Fig. 2 Cell carbon and nitrogen contents of ten common dinoflagellates

2.3 细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系

由于细胞体积与细胞碳、氮含量变化范围较大,数据比较离散,因此采用细胞体积与细胞碳、氮含量对数方程分析细胞体积转换法转换浮游植物生物量较为恰当^[12]。甲藻细胞体积和单个细胞碳、氮含量的对数呈显著的线性关系(图3),其线性回归方程如表2。结果表明,10种常见甲藻单个细胞碳、氮含量并不是一成不变的常数,而是随细胞体积的增大有增加的趋势。但是,10种常见甲藻单位体积细胞碳、氮含量随着细胞体积的增大反而有减小的趋势(图3),即较小的细胞单位体积含有较高的碳、氮成分。

表2 10种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量和单位体积细胞碳、氮含量对数之间回归方程

Table 2 log-log regression models of cell volume with cell carbon and nitrogen contents and cell carbon and nitrogen contents per unit volume of ten common dinoflagellates

模型种类 Models	回归方程 Regression equations	相关系数 r^2	样品数量 n	显著性 P
$\log C - \log V$	$\log_{10} C = 0.724 \log_{10} V - 0.037$	0.94	30	<0.0001
$\log N - \log V$	$\log_{10} N = 0.710 \log_{10} V - 0.671$	0.92	30	<0.0001
$\log C/V - \log V$	$\log_{10} C/V = -0.276 \log_{10} V - 0.037$	0.70	30	<0.0001
$\log N/V - \log V$	$\log_{10} N/V = -0.290 \log_{10} V - 0.671$	0.64	30	<0.0001

3 讨论

3.1 浮游植物粒径—细胞体积

浮游植物的粒径是其个体生长过程中的一个重要参数,影响着浮游植物对生源要素的竞争能力和被捕食

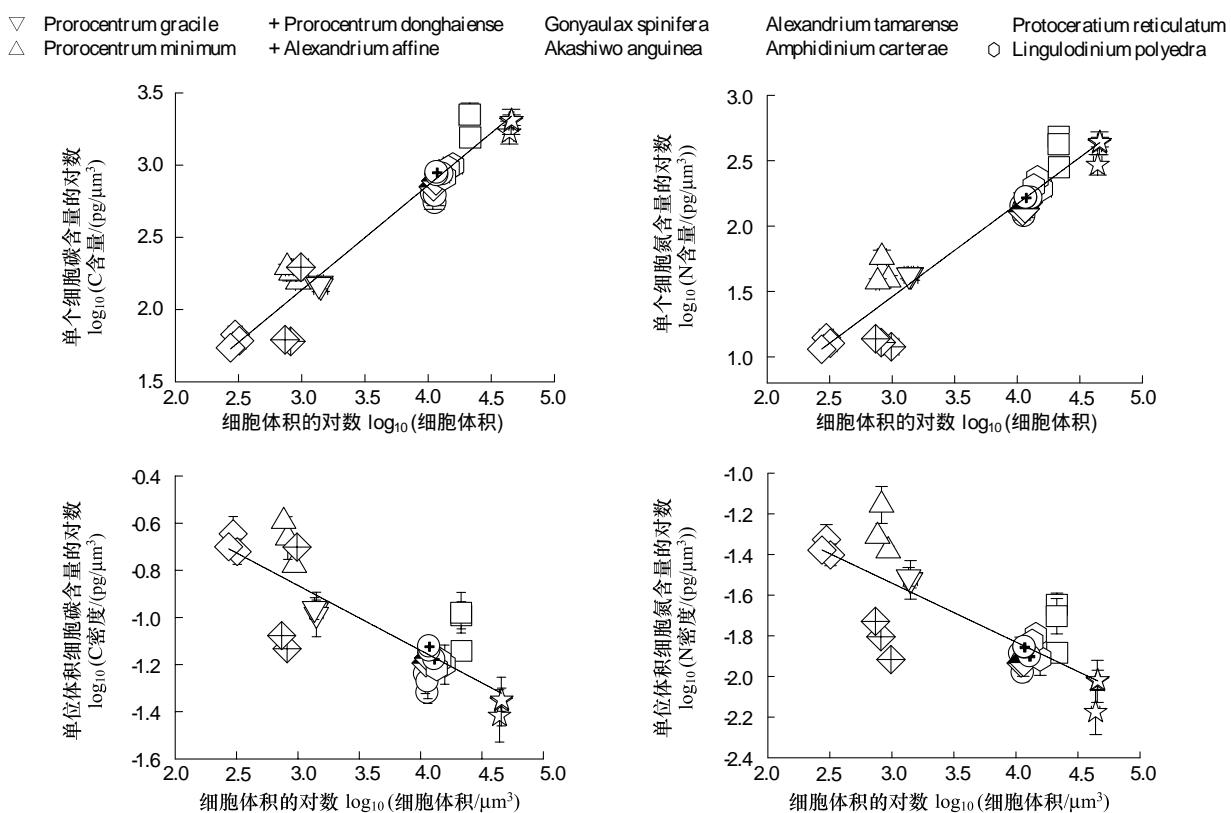


图3 10种常见甲藻细胞体积与单个细胞碳、氮含量之间及与单位体积细胞碳含量、氮含量之间的对数相关关系

Fig. 3 Log-log relationship of cell volume with cell carbon and nitrogen contents and cell volume with cell carbon and nitrogen contents per unit volume of ten common dinoflagellates, respectively

的概率,对于阐释生态系中碳、氮等物质的流动方向和能量传输效率有重要作用^[25-26]。细胞体积是表征浮游植物粒径大小的重要指标之一,直接影响着自然海域浮游植物粒径分布与种群结构变化,进而影响着初级生产力的大小^[27],所以精确的细胞体积的获得具有重要的生态意义。但是测量细胞体积经常受到各种因素的影响,包括测量方法、细胞几何模拟图形的选择及浮游植物细胞形态的规则程度等。

目前显微测微计法被认为是既能够解决物种组成问题,又是可以解决细胞形态差异的测量细胞线性参数的方法^[28],该方法均被国内外众多学者^[5-8, 11, 13]成功应用于浮游植物粒径的研究。同许多成像系统比较,显微测微计法能够比较准确的观测到细胞形态,从而有利于准确的建立细胞几何模拟图形。例如,本文中选用的底刺膝沟藻的几何结构为圆锥体同半球体的结合,而以往研究中仅仅将其作为双锥体进行几何体积的模拟^[4-5],从而低估了细胞体积和细胞物质含量。

合适的细胞几何模拟图形和细胞体积计算公式的选择是精确估算细胞体积的前提,而浮游植物细胞的形态往往是不规则的,例如,本文中所研究的10种甲藻细胞,红色赤潮藻上甲圆,下甲W形;相关亚历山大藻和塔玛亚历山大藻细胞看似球体,但其上下甲壳大小并不相同,而东海原甲藻与细长原甲藻看似椭圆体,实际细胞为披针形。对于较不规则的细胞,选择较复杂的模型,即选择的细胞参数较多,对于细胞体积的精确度有所提高,但是降低了其实用性,但是若选择太简单的模型,即选择参数较少,实际操作效率提高了反而精确度有所降低,鉴于精确性和实用性的结合,许多浮游植物工作者一般偏向于2—3个细胞参数的测量^[5]。在此基础上,本文对10种常见甲藻细胞作了几何模拟,在这个过程中,某些甲藻的细胞较小且不规则的部分可以被忽略或者填补成规则的几何图形,例如细胞上的突起,尖角,鞭毛等部分,所以利用细胞几何模拟图形计算出的细胞体积与细胞实际体积难免存在误差,而相对于较大的细胞,这些部位的忽略并不会明显影响计算精度,反而简化了几何模拟的过程。因此,构建合适的较精确的几何模拟模型依然需要继续摸索。

同种浮游植物相同生长阶段细胞大小也有差异,可以通过统计学方法缩小细胞几何模拟图形法与细胞实际体积值之间直接的误差。许多学者认为测量足够的细胞个体是减小细胞体积估算统计学误差的重要途径,如 Strathmann 等^[8]认为每种浮游植物需要随机选择 20 个细胞进行测量,Verity 等^[12]选择了 200 个细胞进行了测量(图像分析法),孙军等^[5]认为每种浮游植物需要至少随机选择 25 个细胞进行测量,杨茹君等^[29]认为每种浮游植物至少需要随机选择 100 个细胞进行测量。所以本文对每种甲藻进行了 180 次测量,有效的避免了由于生长过程中细胞大小产生的误差。

另外,本文与 Montagnes 等^[13]同是以椭圆体为标准细胞几何模拟图形利用显微测微计法测定了处于指数生长期的红色赤潮藻的细胞体积,其结果却相差近 33%,这很可能与浮游植物培养条件的不同有关,也可能与物种地理分布不同有关。有关营养盐条件对浮游植物细胞体积的影响,Hein 等^[30]报道,浮游植物细胞体积在营养盐受限时较小,增加营养盐浓度,浮游植物细胞体积会逐渐增大;杨茹君^[27]研究表明,随着磷酸盐浓度的增加中值等效球径(ESD)逐渐减小,而随着硝酸盐浓度的增加裸甲藻和新月菱形藻开始减小,但当浓度超过 $68.22 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 或 $77.58 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 时,两种藻的 ESD 反而会增加。有关光照对浮游植物细胞体积的影响研究结论较为一致,均认为浮游植物细胞体积会随着光照强度的增加而增大^[31-33]。有关温度对浮游植物细胞体积的影响,结论存在分歧,Olson 等^[34]和 Montagnes 等^[35]研究发现,浮游植物细胞体积随着温度的升高而减小,而 Stramski 等^[36]认为 *Thalassiosira pseudonana* 在 10°C 时细胞体积最小,在 25°C 时细胞体积最大。可见,浮游植物细胞体积会因环境条件的不同而产生差异。

3.2 影响碳、氮含量的因素

研究表明,10 种常见甲藻细胞碳、氮含量的变化与细胞体积变化密切相关,随细胞体积的增大有显著增加的趋势。而本文中细胞体积最大的红色赤潮藻并不含有最高的碳、氮含量,反而低于底刺膝沟藻的细胞碳、氮含量,这可能与甲藻细胞自身特殊结构有关。底刺膝沟藻等甲藻具有不同甲板组成的纤维素细胞壁,而有的甲藻细胞,例如红色赤潮藻细胞裸露或者细胞表面仅为一层薄板^[15],结构的差异可能导致红色赤潮藻同底刺膝沟藻的细胞碳、氮含量间的差异。

浮游植物细胞碳、氮含量的变化除了与细胞体积变化密切相关外,还易受环境生态因子的影响。这主要是因为环境生态因子影响浮游植物的新陈代谢,从而影响浮游植物体内能量储存,进而影响到碳水化合物、蛋白质及脂肪酸等生化组成^[37],导致浮游植物细胞碳、氮含量出现差异。例如,浮游植物的细胞碳、氮含量随着光强的增大而增加^[38-39],随着温度的升高呈现先较小后升高的“U”字形变化^[38,40-41];在营养盐受限时,由于浮游植物的碳水化合物累积及蛋白质合成明显减少^[42],其总碳和总氮含量减少^[36],从而影响细胞碳、氮含量;而有些甲藻在生长过程中,其葡聚糖并不随营养盐的消耗而发生变化^[43]。本文测定细胞碳、氮含量的浮游植物处于营养盐充足的水体中,与 Montagnes 等^[13]和 Verity 等^[12]较为一致,但温度和光照有所不同,这可能导致了红色赤潮藻和微小原甲藻细胞碳、氮含量结果的差异。

对于单位体积细胞碳、氮含量大小的比较也有多位学者进行了报导,Strathmann 等^[8]认为硅藻细胞的单位体积碳含量低于甲藻细胞。Moal 等^[11]认为隐藻细胞单位体积所含碳、氮含量最高,硅藻最低,甲藻和绿藻位于二者之间,对于同一门类的浮游植物较小的细胞含有较多的细胞化学组成成分如碳、蛋白质及淀粉等。本次研究中,10 种甲藻也显示出体积较小的细胞单位体积碳、氮含量较高,与以上研究结果相一致。

3.3 细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系

现阶段,利用浮游植物细胞体积换算浮游植物碳、氮含量这一方法逐渐备受国内外学者的关注,该项研究在国外已广为开展,而在国内还未普及甚至较少研究。Mullin 等^[7]最早研究了浮游植物细胞体积与碳含量之间的关系,结果表明细胞体积与细胞碳含量线性相关。Strathmann 等^[8]认为硅藻体内含有较大的液泡,细胞体积转换碳、氮含量法可能高估了细胞的碳、氮含量,应与其它浮游植物物种区别对待。Eppley 等^[44]借鉴前两位学者的研究,区分了硅藻和非硅藻之间的差别。Moal 等、Verity 等和 Montagnes 等^[11-13]研究了以硅藻为主的浮游植物细胞体积与细胞碳、氮含量之间的转换关系,建立了相应的对数回归模型,归纳了经验公式(表

3)。其中 Eppley 等^[44]归纳的经验公式被认可为比较适合中国近海浮游植物生物量的估算^[4],但其将甲藻类群与除硅藻外的其它门类归为一种经验公式,限制了自然水域特别是发生甲藻赤潮水域中甲藻生物量估算的准确性。

本文 10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量之间存在良好的相关性,其对数回归模型相关系数高达 0.94 和 0.92 ($P<0.0001$),这说明能够通过细胞体积来实现甲藻生物量的估算。但由于本文所研究的是粒径为 10^1 — $10^4 \mu\text{m}^3$ 的甲藻,导致本研究结果应用于该粒径范围外的甲藻生物量的估算可能会出现偏差。另外,本文与前人研究^[7-8,10-13]都是在温度、光照较为稳定和营养盐充足的环境条件下获得的结论,而且对浮游植物的培养与 Moal 等^[11]和 Verity 等一致^[12]均采用了 f/2 培养液,其无机氮和无机磷含量高于已报道中自然海区发生甲藻赤潮时的含量^[45-48]。因此,本文 10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量之间关系的回归模型应用于环境多变的自然海区甲藻生物量的估算难免会出现偏差,更适用于富营养化自然海域中甲藻生物量的估算,以期对目前在中国沿海频繁发生的甲藻赤潮的研究提供帮助。目前,有关环境因子对浮游植物细胞体积与细胞碳、氮含量之间关系影响的研究较少且无明确结论,例如,Strathmann^[8]认为浮游植物细胞体积与细胞碳含量之间的关系不受温度和光强的影响,而 Montagnes 等^[13]认为浮游植物细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系可能会受环境因子的影响。因而,对不同环境条件下浮游植物细胞体积与细胞碳、氮含量之间的关系还有待进一步研究。

表 3 细胞体积与细胞内含物之间的关系总结表

Table 3 The summary table for relationship between cell volume and cell inclusions

文献来源 Sources	实验材料 Materials	细胞体积/ μm^3 Cell volume	回归方程 Regression equations
[10]	37 种浮游植物 (硅藻为主,2 种甲藻)	10^1 — 10^6	$\log_{10} C = 0.76 \log_{10} V - 0.29$
[11]	13 种浮游植物 (无甲藻)	10^1 — 10^4	$\log_{10} C = 0.758 \log_{10} V - 0.422$ (硅藻) $\log_{10} C = 0.892 \log_{10} PV - 0.610$ (硅藻) $\log_{10} C = 0.866 \log_{10} V - 0.460$ (非硅藻)
[34]	借鉴于 Mullin 和 Strathmann	10^1 — 10^6	$\log_{10} C = 0.76 \log_{10} V - 0.29$ (硅藻) $\log_{10} C = 0.94 \log_{10} V - 0.60$ (非硅藻)
[14]	11 种浮游植物 (3 种甲藻)	10^1 — 10^6	$\log_{10} C = 0.829 \log_{10} V - 0.927$ $\log_{10} N = 0.838 \log_{10} V - 2.73$
[15]	13 种微型浮游植物 (2 种甲藻)	10^1 — 10^3	$\log_{10} C = 0.863 \log_{10} V - 0.363$ $\log_{10} N = 0.837 \log_{10} V - 1.084$
[16]	30 种浮游植物 (硅藻为主,5 种甲藻)	10^0 — 10^4	$\log_{10} C = 0.991 \log_{10} V - 0.963$ $\log_{10} N = 1.023 \log_{10} V - 1.764$
最近研究 The present study	10 种甲藻	10^1 — 10^4	$\log_{10} C = 0.724 \log_{10} V - 0.037$ $\log_{10} N = 0.710 \log_{10} V - 0.671$

C 、 N 分别表示细胞的碳、氮,单位是皮克($\text{pg}/\text{个}$), V 表示每个细胞的体积 (μm^3)

基于以往研究,本工作进一步将细胞体积转换法应用于多种甲藻生物量的估算,确立了细胞体积与细胞碳、氮含量之间的转换,对于进一步研究浮游植物生物量提供了方法和数据。尽管建立浮游植物细胞体积与细胞碳、氮含量之间的对数回归模型已成为一种常用方法,并且某种程度上也能为从物种水平上估算以甲藻为优势种的赤潮水域浮游植物种群结构与能流问题的解决提供帮助,但是,由于目前的研究结果依然有所分歧,限制了该方法的直接利用。因此从物种水平上深入揭示整个生态系中浮游植物种群或者群落结构等角度看,细胞体积转换法还需进一步完善。

致谢:感谢 Ian R. Jenkinson 教授对英文摘要的润色;感谢国家海洋局第一海洋研究所朱明远老师对文章写作的帮助。

References:

- [1] Wang J, Li H Z. Study on chlorophyll and primary production in inshore waters of the Bohai Sea. Marine Fisheries Research, 2002, 23 (1):

23-28.

- [2] Zhang Y K, Zhang C J, Zhang X S, Huo X Y, Ren J B, Zhang H Y. Biomass, chlorophyll content and production of phytoplankton in the Lake Baiyangdian. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 1999, 19 (3) : 267-271.
- [3] Le F F, Ning X R, Liu C G, Hao K, Cai Y M. Standing stock and production of phytoplankton in the northern South China Sea during winter of 2006. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (11) : 5775-5784.
- [4] Sun J, Liu D Y, Qian S B. Study on phytoplankton biomass I . Phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21 (2) : 75-85.
- [5] Sun J. Geometric Models for Calculating Cell Biovolume and Surface Area for Marine Phytoplankton and its Relative Conversion Biomass. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [6] Sun J, Liu D Y, Qian S B. Study on phytoplankton biomass II . Net-phytoplankton measurement biomass estimated from the cell volume in the Jiaozhu Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (1) : 102-109.
- [7] Mullin M M, Sloan P R, Eppley R W. Relationship between carbon content, cell volume, and area in phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1966, 11 (2) : 307-311.
- [8] Strathmann R R. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12 (3) : 411-418.
- [9] Pavlovskaya T V, Kondrateva T M. Cell volume dependence of organic carbon content in Mass Black sea phytoplankton species. *Okeanologiya*, 1981, 21 (3) : 523-528.
- [10] Rocha O, Duncan A. The relationship between cell carbon and cell volume in freshwater algal species used in zooplanktonic studies. *Journal of Plankton Research*, 1985, 7 (2) : 279-294.
- [11] Moal J, Martin-Jezequel V, Harris R P, Samain J-F, Poulet S A. Interspecific and intraspecific variability of the chemical composition of marine phytoplankton. *Oceanologica Acta*, 1987, 10 (3) : 339-346.
- [12] Verity P G, Robertson C Y, Tronzo C R, Andrews M G, Nelson J R, Sierachi M E. Relationships between cell volume and the carbon and nitrogen content of marine photosynthetic nanoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37 (7) : 1434-1446.
- [13] Montagne D J S, Berges J A, Harrison P J, Taylor F J R. Estimating carbon, nitrogen, protein and chlorophyll *a* from volume in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39 (5) : 1044-1060.
- [14] Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, Pollingher U, Zohary T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, 35 (2) : 403-424.
- [15] Liu R Y. Chelist of Marine Biota of China Seas. Beijing: Science Press, 2008 : 175-186.
- [16] Zhang B, Yan T, Chen T Y, Zhou M J. The toxicity of non-PSP-producing *Alexandrium affine*, *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2008, 39 (4) : 419-426.
- [17] Qian S B, Liu D Y, Sun J. Algaeography. Qingdao: China Ocean University Press, 2005 : 247-273.
- [18] Guillard R R, Ryther J H. Studies of marine planktonic diatoms. I . *Cyclotella nana (Hustedt) and Detonula confervacea (Cleve)* Gran. *Canadian Journal of Microbiology*, 1962, 8 : 229-239.
- [19] Gallardo Rodríguez J J, Sánchez Mirón A, Cerón García M C, Belarbi E H, García Camacho F, Chisti Y, Mplina Grima E. Macronutrients requirements of the dinoflagellate *Protoceratium reticulatum*. *Harmful Algae*, 2009, 8 (2) : 239-246.
- [20] Paz B, Riobó P, Ramilo I, Franco J M. Yessotoxins profile in strains of *Protoceratium reticulatum* from Spain and USA. *Toxicon*, 2007, 50 (1) : 1-17.
- [21] Han X T, Yan T, Zou J Z, Yu Z M. Morphological features and growth characteristics of the dinoflagellate *Amphidinium carterae* Hulbert. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2004, 35 (3) : 279-283.
- [22] Gu X L, Qi Y Z, Chen J F, Lu S H, Xie L C. Species of prorocentrum (Dinophyceae) in Daya Bay, China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10 (4) : 335-339.
- [23] Tomas C R, Hasle G R, Syvertsen E E, Steidinger K A, Tangen K. Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates. San Diego: Academic Press, Inc, 1996 : 423-510.
- [24] Zhao W. Hydrobiology. Beijing: China Agriculture Press, 2008 : 77-90.
- [25] Wang X G, Sun S. Application of size spectrum theory in marine ecology. *Marine Science*, 2002, 26 (4) : 36-39.
- [26] Wu C Y, Jiao N Z. Method of analysis of size spectra of marine plankton by flow-imaging techniques. *Chinese High Technology Letters*, 2005, 15 (4) : 71-74.
- [27] Yang R J. Studies on Size Effect on the Growth of Marine Phytoplankton in Different Kind of Environment Pollutants. Qingdao: Ocean University of China, 2004.

- [28] Sournia A. Phytoplankton Manual. Paris: Unesco, 1978: 165-166.
- [29] Yang R J, Wang X L, Shi X Y, Zhu C J. Study on the size distribution of marine phytoplankton. Chinese High Technology Letters, 2004, 14 (6): 89-93.
- [30] 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 (2): 167-180.
- [31] Langdon C. On the causes of interspecific differences in the growth-irradiance relationship for phytoplankton. Part I. A comparative study of the growth-irradiance relationship of three marine phytoplankton species: *Skeletonema costatum*, *Olisthodiscus luteus*, and *Gonyaulax tamarensis*. Journal of Plankton Research, 1987, 9 (3): 459-482.
- [32] Garde K, Cailliau C. The impact of UV-B radiation and different PAP 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.
- [33] Ohi N, Ishiwata Y, Taguchi S. Diel patterns in light absorption and absorption efficiency factors of *Isochrysis galbana* (prymnesiophyceae). Journal of Phycology, 2002, 38 (4): 730-737.
- [34] Olson R J, Vaulot D, Chrisholm S W. Effects of environmental stresses on the cell cycle of two marine phytoplankton species. Plant Physiology, 1986, 80 (4): 918 - 925.
- [35] Montagnes D J S, Franklin D J. Effect of temperature on diatom volume, growth rate, and carbon and nitrogen content: reconsidering some paradigms. Limnology and Oceanography, 2001, 46 (8): 2008-2018.
- [36] Stramski D, Sciandra A, Claustre H. Effects of temperature, nitrogen, and light limitation on the optical properties of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana*. Limnology and Oceanography, 2002, 47 (2): 392-403.
- [37] Yang Q X. The effect of temperature on fatty acid composition of marine phytoplankton. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1988, 19 (5): 440-446.
- [38] Goldman J C. Temperature effects on phytoplankton growth in continuous culture. Limnology and Oceanography, 1977, 22 (5): 932-935.
- [39] Yoder J A. Effect of temperature on light limited growth and chemical composition of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). Journal of Phycology, 1979, 15 (4): 362-370.
- [40] Harris R, Samain J F, Moal J, Poulet S, Martin-Jézequel V. Effects of algal diet on digestive enzyme activity in *Calanus helgolandicus*. Marine Biology, 1986, 90: 353-361.
- [41] Thompson P A, Guo M, Harroson P J. Effects of variation in temperature I. On the biochemical composition of eight species of marine phytoplankton. Journal of Phycology, 1992, 28: 481-488.
- [42] Yang X L, Zhu M Y. Effects of light and nutrient on the diel variation of *Thalassiosira pseudonana* II. Carbohydrate, protein and ratio of biochemical components. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1993, 24 (2): 166-171.
- [43] Salshaug E, Graneli E, Elbrachter M, Kayser H. Chemical composition and alkaline phosphatase activity of nutrient-saturated and P-deficient cells of four dinoflagellates. Journal of Experimental Marine Biology And Ecology, 1984, 77: 241-254.
- [44] Eppley R W, Reid F M H, Strickland J D H. The ecology of the plankton off La Jolla, California, in the period April through September, 1967 Part III. Estimates of phytoplankton crop size, growth rate, and primary production. Bulletin of Scripps Institution of Oceanography, 1970, 17: 33-42.
- [45] Qian H L, Liang S, Qi Y Z. Study of the characteristics and the causes of formation on the red tides in coastal Guangdong Sea. Ecologic Science, 2000, 19 (3): 8-16.
- [46] Yu L, Hao Y J. Process analysis for harmful bloom of *Akashiwo sanguinea* in Sishili Bay of Yantai. Advances in Marine Science, 2009, 27 (4): 517-522.
- [47] Han X R, Wang X L, Sun X, Shi X Y, Zhu C J, Zhang C S, Lu R. Nutrient distribution and its relationship with occurrence of red tide in coastal area of East China Sea. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (7): 1097-1101.
- [48] Wang J H, Qin Y T, Li Z E, Huang X Q, Chen L, Lei Y W, Xu L G, You S P. The environmental factor and cause of *Gymnodinium sanguineum* HAB in Nanji Islands Preserved District. Marine Science, 2005, 29 (2): 32-36.

参考文献:

- [1] 王俊, 李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. 海洋水产研究, 2002, 23 (1): 23-28.
- [2] 张义科, 张翠君, 张雪松, 霍新颖, 任金豹, 张红艳. 白洋淀浮游植物的生物量、叶绿素含量和生产量. 河北大学学报, 1999, 19 (3): 267-271.
- [3] 乐凤凤, 宁修仁, 刘诚刚, 郝锵, 蔡昱明. 2006年冬季南海北部浮游植物生物量和初级生产力及其环境调控. 生态学报, 2008, 28 (11): 5775-5784.

- [4] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报, 1999, 21 (2): 75-85.
- [5] 孙军. 海洋浮游植物细胞体积和表面积模型及其转换生物量. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [6] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 II. 胶州湾网采浮游植物细胞体积转换生物量. 海洋学报, 2000, 22 (1): 102-109.
- [15] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录. 北京: 科学出版社, 2008: 175-186.
- [16] 张彬, 颜天, 陈桃英, 周名江. 相关亚历山大藻 (*Alexandrium affine*) (非 PSP 产毒株) 毒理的初步研究. 海洋与湖沼, 2008, 39 (4): 419-426.
- [17] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 247-273.
- [21] 韩笑天, 颜天, 邹景忠, 俞志明. 强壮前沟藻 (*Amphidinium carterae* Hulbert) 形态特征及其生长特性研究. 海洋与湖沼, 2004, 35 (3): 279-283.
- [22] 王小莲, 齐雨藻, 陈菊芳, 吕颂辉, 谢隆初. 大亚湾水域原甲藻调查与鉴定. 热带亚热带植物学报, 2002, 10 (4): 335-339.
- [24] 赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2008: 77-90.
- [25] 王新刚, 孙松. 粒径谱理论在海洋生态学研究中的应用. 海洋科学, 2002, 26 (4): 36-39.
- [26] 吴成业, 焦念志. 海洋浮游生物粒径谱分析技术. 高技术通讯, 2005, 15 (4): 71-74.
- [27] 杨茹君. 不同环境污染物条件下海洋浮游植物生长的粒径效应研究. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [29] 杨茹君, 王修林, 石晓勇, 祝陈坚. 海洋浮游植物粒径分布方法研究. 高技术通讯, 2004, 14 (6): 89-93.
- [37] 杨庆霄. 温度对一些浮游植物中脂肪酸组成的影响. 海洋与湖沼, 1988, 19 (5): 440-446.
- [42] 杨小龙, 朱明远. 光强和营养盐对伪矮海链藻昼夜节律变化的影响 II. 碳水化合物、蛋白质及生化组成比. 海洋与湖沼, 1993, 24 (2): 166-171.
- [45] 钱宏林, 梁松, 齐雨藻. 广东沿海赤潮的特点及成因研究. 生态科学, 2000, 19 (3): 8-16.
- [46] 喻龙, 郝彦菊. 烟台四十里湾一次血红哈卡藻赤潮过程的分析. 海洋科学进展, 2009, 27 (4): 517-522.
- [47] 韩秀荣, 王修林, 孙霞, 石晓勇, 祝陈坚, 张传松, 陆茸. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究. 应用生态学报, 2003, 14 (7): 1097-1101.
- [48] 王金辉, 秦玉涛, 李志恩, 黄秀清, 陈蕾, 雷友万, 徐良国, 尤胜炮. 南麂列岛自然保护区海域红色裸甲藻赤潮及其成因分析. 海洋科学, 2005, 29 (2): 32-36.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory: the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area: a case study within Yulong County JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data: an example from the Tarim River Basin GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, *Rhamnus davurica* WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiupei, et al (6371)
Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China WANG Xiaoming, ZHAO Xiupei, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of *Stipa krylovii* population in different alpine degraded grasslands ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant *Ginkgo biloba* stands YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, *Primula merrilliana* SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of *Pinus massoniana* in a karst mountain area of central Guizhou province ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of *Caragana* species in the Inner Mongolia Plateau MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of *Haloxylon ammodendron* population in the western part of Gurbantunggut desert SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of *Cnaphalocrois medinalis* Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010 JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype *Bemisia tabaci* (Gennadius) to Host Shift ZHOU Fucai, LI Chuanning, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of *Microcystis* to solar UV radiation WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia XIAO Guojun, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Scientific Note
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

*《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

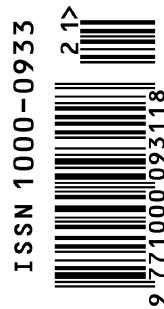
编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址: 北京海淀区双清路 18 号 邮政编码: 100085 电话: (010) 62941099 www. ecologica. cn shengtaixuebao@ rcees. ac. cn	Edited by Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010) 62941099 www. ecologica. cn Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址: 北京海淀区双清路 18 号 邮政编码: 100085	Sponsored by Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科学出版社 地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published by Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科学出版社 地址: 东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717 电话: (010) 64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010) 64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044	Foreign China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号	



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元