

## 共培养系统中 4 种微藻生态因子的研究

文国樑<sup>1</sup> 梁伟峰<sup>1,2</sup> 李卓佳<sup>1\*</sup> 曹煜成<sup>1</sup> 陈素文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300)

(<sup>2</sup>广东海洋大学, 湛江 524000)

**摘 要** 通过二次回归通用旋转组合设计安排实验, 研究光强、温度和盐度对分离自对虾池塘水环境中的喙蚀隐藻、新月菱形藻、微绿球藻和蛋白核小球藻的增长率的影响。获得各微藻的最适生态因子及其影响度。喙蚀隐藻的最适生态因子为: 光强 5 750~7 944 lx, 温度 21.3~28.3 °C, 盐度 13.3~23.0; 影响度依次为: 盐度>温度>光强。新月菱形藻的最适生态因子为: 光强 5 761~8 697 lx, 温度 23.4~29.6 °C, 盐度 11.9~25.7; 影响度依次为: 盐度>光强>温度。蛋白核小球藻的最适生态因子为: 光强 6 754~8 775 lx, 温度 17.1~20.7 °C, 盐度 19.6~26.4; 影响度依次为: 温度>盐度>光强。微绿球藻的最适生态因子为: 光强 7 128~9 012 lx, 温度 18.7~26.7 °C, 盐度 17.9~24.3; 影响度为光强>温度>盐度。喙蚀隐藻和新月菱形藻的增长率受到以盐度为基础、以光强和温度为协同因子的显著影响。

**关键词** 喙蚀隐藻 新月菱形藻 蛋白核小球藻 微绿球藻 光强 温度 盐度

**中图分类号** Q178.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2009)06-0142-07

## Studies on the ecological factors of four microalgae populations in mixed-culture

WEN Guo-liang<sup>1</sup> LIANG Wei-feng<sup>1,2</sup> LI Zhuo-jia<sup>1\*</sup>

CAO Yu-cheng<sup>1</sup> CHEN Su-wen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300)

(<sup>2</sup>Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025)

**ABSTRACT** By means of the common rotation composite design of quadratic regression, four mathematical models were established to analyze the impact of light intensity ( $x_1$ ), temperature ( $x_2$ ) and salinity ( $x_3$ ) on cell division rate ( $k$ ) of each microalgal species separated from shrimp ponds in mixed-culture. The suitable conditions for the microalgae growth and the weightiness of each factor to the cell division rate were obtained. The suitable light intensity for *Cryptomonas erosa* ranged from 5 750 lx to 7 944 lx, the suitable temperatures ranged from 21.3 °C to 28.3 °C and the suitable salinity ranged from 13.3 to 23.0. The weightiness of the impact of each factor on cell division rate was  $x_3 > x_2 > x_1$ . The suitable light intensity for *Nitzschia clos-*

国家十一五支撑计划(2006BAD09A11、2006BAD09A07)、南海水产研究所中央级科研院所基本科研专项(2007ZD01)、农业部行业专项(nyhyzx07-042)、广东省科技计划(2006B20601009 和 2008A200100002)和现代农业(虾)产业技术体系建设专项资金共同资助

\* 通讯作者。E-mail: zhuojiali609@163.com

收稿日期: 2008-12-15; 接受日期: 2009-03-09

作者简介: 文国樑(1978-), 男, 助理研究员, 主要从事对虾养殖池塘调控与修复研究。E-mail: guowen66@163.com, Tel: (020)84451448

terium ranged from 5 761 lx to 8 697 lx, the suitable temperatures ranged from 23.4 °C to 29.6 °C and the suitable salinity ranged from 11.9 to 25.7. The weightiness of the impact of each factor on cell division rate was  $x_3 > x_1 > x_2$ . The suitable light intensity for *Nannochloropsis oculata* ranged from 6754 lx to 8775 lx, the suitable temperatures ranged from 17.1 °C to 20.7 °C and the suitable salinity ranged from 19.6 to 26.4. The weightiness of the impact of each factor on cell division rate was  $x_2 > x_3 > x_1$ . The suitable light intensity conditions for *Chlorella pyrenoidosa* ranged from 7 128 lx to 9 012 lx, the suitable temperatures ranged from 18.7 °C to 26.7 °C and the suitable salinity ranged from 17.9 to 24.3. The weightiness of the impact of each factor on cell division rate was  $x_1 > x_2 > x_3$ . The k of *Cryptomonas erosa* and *Nitzschia closterium* was significantly affected by salinity acting synergistically with light intensity and temperature.

**KEY WORDS** *Cryptomonas erosa* *Nitzschia closterium* *Nannochloropsis oculata*  
*Chlorella pyrenoidosa* Light intensity Temperature Salinity

微藻在对虾养殖池塘中占有重要位置,它对于维持池塘生态系统的正常功能,稳定池塘环境是不可缺少的(王崇明等 1993)。不同的微藻有不同的生态需求,这取决于它的生理学适应性和环境资源的可利用性或耐受性。关于单种微藻生态因子的研究已很多(张海琪等 2001;韩秀荧等 2001;蒋霞敏 2002;刘东艳等 2002;冯竞楠等 2005;李 锋等 2007),但是,自然水域中微藻以各种关系共同生存在一起,在不同资源因素作用下,种群的空间分布状况是不同的(余世孝 1995),而且微藻间存在他感作用,通过向体外分泌化学物质对其他微藻产生直接或间接影响(宋 君 1990),这就预示微藻单种培养获得的结果作为微藻群体的培养条件具有一定局限性。笔者从对虾养殖池塘中分离出嗜蚀隐藻、新月菱形藻、微绿球藻和蛋白核小球藻,通过二次回归正交旋转组合设计实验,研究在共培养中各微藻生长的最适光强、温度和盐度,以及各因子对微藻增长率的影响,为养殖池塘浮游微藻藻相的构建和生长调控提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 微藻的种类与来源

选用的微藻是对虾池塘的优势种和常见种,包括嗜蚀隐藻 *Cryptomonas erosa*、新月菱形藻 *Nitzschia closterium*、微绿球藻 *Nannochloropsis oculata* 和蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*,在2006年5月和2005年10月,从广东湛江东海岛对虾池塘分离、培养所得,各微藻培养至指数生长期进行实验。

### 1.2 实验方法

根据虾塘环境特征,分别对光强、温度和盐度按照二次回归通用旋转组合设计划分为5个级别(余家林 1993),并安排实验,具体见表1。

在500 ml锥形瓶加入培养液共279 ml,营养盐浓度为:硝酸铵( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )500  $\mu\text{mol/L}$ 、磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )60  $\mu\text{mol/L}$ 、柠檬酸铁( $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ )0.4  $\mu\text{mol/L}$ 和硅酸钠( $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )7  $\mu\text{mol/L}$ , pH7.8。各瓶加入4种微藻,每种微藻密度为

$1.303 \times 10^7$  ind/L,每组设置3个平行。采用46W乔森照明节能灯为光源,光照度测定使用光照度计JD-3型(上海市嘉定光学联仪厂),光照时间光:暗为12:12 h。温度控制采用DTY-813超级智能恒温循环器(北京

表1 因素水平编码

Table 1 Coding of factors and their levels

编码 Code	光强 $x_1$ (lx) Light intensity	温度 $x_2$ (°C) Temperature	盐度 $x_3$ Salinity
-1.682	10 236	33.1	31.3
-0.841	9 000	30.0	26.0
0	7 000	25.0	17.5
0.841	5 000	20.0	9.0
1.682	3 764	16.9	3.7

德天佑科技发展有限公司)水浴控温。盐度测定使用比重计。光强、温度和盐度在实验前都经过调试、测定。实验周期为7 d。

### 1.3 检测方法

培养结束后采样分析,微藻密度采用血球计数板计数法,增长率  $k$  的计算采用公式(陈明耀 1995):

$$k = \frac{\lg N - \lg N_0}{T}$$

式中,  $N$  是经过  $T$  时间后的细胞数,  $N_0$  是  $T$  时间开始时的细胞数,  $T$  表示生长的时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 数学模型的建立

各试验组的结果整理于表2。将试验结果所得的参数使用3因子通用旋转设计试验数据计算程序,在计算机上运算分别建立各微藻增长率的回归模型为:

嗜蚀隐藻:  $y_1 = 0.2499 + 0.0047x_1 + 0.0252x_2 - 0.0179x_3 + 0.0067x_1x_2 + 0.0118x_1x_3 - 0.0282x_2x_3 - 0.0244x_1^2 - 0.0279x_2^2 - 0.0386x_3^2$

新月菱形藻:  $y_2 = 0.2287 - 0.0157x_1 + 0.0075x_2 + 0.0241x_3 - 0.0014x_1x_2 + 0.0129x_1x_3 - 0.0218x_2x_3 - 0.0105x_1^2 - 0.013x_2^2 - 0.0243x_3^2$

蛋白小球藻:  $y_3 = 0.2404 + 0.0023x_1 + 0.0383x_2 + 0.0480x_3 + 0.0020x_1x_2 - 0.0013x_1x_3 - 0.0156x_2x_3 + 0.0087x_1^2 + 0.0143x_2^2 - 0.0320x_3^2$

微绿球藻:  $y_4 = 0.2896 + 0.0108x_1 + 0.0484x_2 + 0.0024x_3 + 0.0021x_1x_2 - 0.0054x_1x_3 - 0.0133x_2x_3 + 0.0026x_1^2 - 0.0031x_2^2 - 0.0258x_3^2$

表2 试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results of the cell division rate

试验号 Number	编码 Code			增长率 $k$			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas</i> <i>erosa</i>	新月菱形藻 <i>Nitzschia</i> <i>closterium</i>	蛋白核小球藻 <i>Chlorella</i> <i>pyrenoidosa</i>	微绿球藻 <i>Nannochloropsis</i> <i>oculata</i>
1	1	1	1	0.15	0.15	0.25	0.28
2	1	1	-1	0.27	0.14	0.33	0.37
3	1	-1	1	0.17	0.16	0.21	0.22
4	1	-1	-1	0.12	0.09	0.20	0.21
5	-1	1	1	0.13	0.16	0.25	0.30
6	-1	1	-1	0.24	0.23	0.29	0.32
7	-1	-1	1	0.12	0.19	0.19	0.21
8	-1	-1	-1	0.17	0.14	0.19	0.22
9	1.682	0	0	0.17	0.22	0.24	0.33
10	-1.682	0	0	0.16	0.24	0.27	0.25
11	0	1.682	0	0.19	0.23	0.33	0.35
12	0	-1.682	0	0.12	0.23	0.21	0.20
13	0	0	1.682	0.12	0.27	0.19	0.25
14	0	0	-1.682	0.13	0.12	0.09	0.17
15	0	0	0	0.27	0.24	0.26	0.32
16	0	0	0	0.25	0.20	0.22	0.29
17	0	0	0	0.24	0.22	0.22	0.27
18	0	0	0	0.26	0.24	0.26	0.29
19	0	0	0	0.26	0.24	0.26	0.30
20	0	0	0	0.23	0.23	0.23	0.28

### 2.2 数学模型的显著性检验

方程回归结果表明,嗜蚀隐藻、蛋白核小球藻和微绿球藻的回归模型达到极显著,  $F_R > 0.01$ , 新月菱形藻的回归为显著,  $F_R > 0.05$ , 表明各因子和增长率之间存在显著的回归关系(表 3)。

表 3 回归方程方差分析表  
Table 3 Variance analysis of binary quadric common rotational regression equation

微藻 Species	总变异 SS <sub>y</sub>	回归 SS <sub>R</sub>	离回归 SS <sub>r</sub>	失拟 SS <sub>Lf</sub>	纯误差 SS <sub>e</sub>	R <sup>2</sup>	F <sub>R</sub>	F <sub>Lf</sub>	F <sub>a</sub>
嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	0.701	0.621	0.080	0.069	0.011	0.885	16.74**	3.78	$F_{0.01}(6,13)=4.62$
新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	0.508	0.312	0.196	0.185	0.011	0.614	3.44*	10.16**	$F_{0.05}(6,13)=2.92$
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	0.603	0.478	0.124	0.100	0.024	0.794	8.34**	2.61	$F_{0.01}(8,5)=10.97$ $F_{0.05}(8,5)=4.82$
微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>	0.604	0.503	0.101	0.085	0.017	0.832	0.74**	3.14	

### 2.3 数学模型的回归系数显著性检验

由回归系数进行显著性检验可知,线性项、交互项和平方项的显著水平在各微藻的表现不同,说明各因子对不同微藻的增长率的影响途径不一样。对于嗜蚀隐藻和新月菱形藻,交互项  $x_1x_3$  和  $x_2x_3$  水平分别达到显著和极显著,说明这两种微藻的增长率既受到光强、温度和盐度因子的单一作用,又受到光强和盐度、温度和盐度的协同作用;对于蛋白核小球藻和微绿球藻,交互项均不显著,说明这两种微藻的增长率只受到因子的单独作用,没有受因子协同作用(表 4)。

表 4 回归系数显著性检验表  
Table 4 Significant test of regression coefficient

变异来源 Source of variation	微藻种类 Species				F <sub>a</sub>
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>	
$x_1$	1.43	16.26**	0.17	5.22	
$x_2$	42.09**	3.76	46.04**	104.75**	
$x_3$	21.20**	38.66**	0.73	0.26	$F_{0.20}(1,8)=1.82$
$x_1x_2$	1.74	0.07	0.07	0.12	$F_{0.10}(1,8)=3.46$
$x_1x_3$	5.40*	6.42*	0.03	0.75	$F_{0.05}(1,8)=5.32$
$x_2x_3$	30.79**	18.43**	4.47	4.65	$F_{0.01}(1,8)=11.26$
$x_1^2$	55.46**	33.20**	8.05*	8.37*	
$x_2^2$	41.47**	7.66*	2.52	0.31	
$x_3^2$	54.20**	11.82**	6.77*	0.46	

### 2.4 各因子对微藻增长率的贡献率分析

各因子对各微藻的增长率的重要性不一样,对于本回归中,采用贡献率法判定各因子对增长率影响的重要性。结果表明,对于嗜蚀隐藻为盐度 > 温度 > 光强;对于新月菱形藻为盐度 > 光强 > 温度;对于蛋白核小球藻

为温度>盐度>光强;对于微绿球藻为光强>温度>盐度。从平均值分析得出各因子对增长率影响的重要性为温度>盐度>光强,具体见表5。

表5 各因素对增长率的重要性分析

Table 5 Weightiness of each factor on division rate of different microalgae

因子 Factors	微藻种类 Species				平均值 Average
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>	
光强 $x_1$ Light intensity	1.904	2.331	0.876	1.689	1.700
温度 $x_2$ Temperature	2.649	2.077	1.969	1.383	2.019
盐度 $x_3$ Salinity	2.826	2.785	1.240	0.392	1.810

## 2.5 模型的优选

根据统计频数法对各回归方程寻优,通过计算不同水平下的组合进行模拟试验,从 $5^3=125$ 个组合中选取多样性指数高的组合方案,根据频数分析得出相应总体平均水平为95%置信区间的调控措施如表6所示。

表6 获得微藻高增长率的各因子调控措施

Table 6 Optimized combination of factors that may achieve the highest division rate

因素 Factors	微藻种类 Species			
	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
光强 $x_1$ (lx) Light intensity	5 750~7 944	5 761~8 697	6 754~8 775	7 128~9 012
温度 $x_2$ (°C) Temperature	21.3~28.3	23.4~29.6	17.1~20.7	18.7~26.7
盐度 $x_3$ (%) Salinity	13.3~23.0	11.9~25.7	19.6~26.4	17.9~24.3

## 3 讨论

### 3.1 光强的影响

本研究中,4种微藻的最适光强范围接近,嗜蚀隐藻和新月菱形藻的最适光强范围比蛋白核小球藻和微绿球藻稍低。在适光范围内,增加光强可使光合作用速度加快,细胞分裂速率达到最高值时的光强称最适光强或饱和光强,超过饱和光强后光合作用减弱甚至受抑制(李文权等 1999;周汝伦等 1994),因此,光是单胞藻培养中影响其生长的最重要的因子之一(陈明耀 1995)。有资料表明,高光强下叶绿素a和类胡萝卜素的含量明显减少(Parke 1949),微藻对光的利用效率降低,细胞分裂变慢。光照在水体中有所衰减,造成水体中表层与底层的光强不同。此外,有报道指出,新月菱形藻自然生长中有两个群体,一是营浮游生活的群体,另一是营底栖生活的群体(金德祥等 1965),因此本种可能对光具有很强的适应范围。本研究表明,其最适光强上限达8 697 lx,这比营浮游生活的嗜蚀隐藻的最适光强上限7 944 lx稍高,而下限却和嗜蚀隐藻相近。蛋白核小球藻和微绿球藻属广分布种类,蛋白核小球藻的最适光强比微绿球藻稍低。蒋霞敏(2002)研究表明,微绿球藻喜强光,生长的最适光强范围为5 000~7 000 lx(周洪琪等 1996)。本研究发现,其最适光强具有更高要求,达

7 128~9 012 lx,比蒋霞敏(2002)研究的结果稍高。

### 3.2 温度的影响

实验发现,4种微藻对温度的耐受力因藻种而异,获得较高增长率时嗜蚀隐藻、新月菱形藻比微绿球藻和蛋白核小球藻需要更高的温度。Davison(1949)曾提出对于光自养生物来说温度主要是通过控制酶动力学来影响其生长,此外超出适温范围的低限和高限,微藻的生命活动受到影响(陈明耀 1995)。嗜蚀隐藻的最适温度范围为 21.3~28.3 °C,当池塘水温在 23~31 °C,可检测到嗜蚀隐藻的优势种群,本实验结果与虾池现场采样分析的结果稍有差异,结合因素重要性结果得出这是因为盐度对其具有更深远的影响,造成其对温度的适应有一定差异。有研究表明,新月菱形藻的适温范围最狭,适宜于在较低温度时生长,最适温度为 20~25 °C(周洪琪等 1996),本研究得出其最适温度为 23.4~29.6 °C,这与其生长的池塘水温相近。蒋霞敏(2002)研究温度、光照和氮含量对微绿球藻生长的影响表明,微绿球藻的最适温度为 30±1 °C,但其在先前对光照温度、碳源及接种密度对微绿球藻生长的影响研究中指出,微绿球藻是广温性微藻,最适温度为 20 °C(张海琪等 2001),可见,在不同培养条件下,微绿球藻的最适生长温度具有可变性,本研究得出其最适温度为 18.7~26.7 °C是合理的。蛋白核小球藻的最适温度范围较低,可能由于预备培养时最高温度仅在 22~23 °C,本种对低温已驯化适应。李艳和等(2003)研究不同培养液对蛋白核小球藻的效果时发现,不同培养液、不同光强,获得最优效果的温度不一样,本种对温度的适应性质和微绿球藻的一致,具有可变性。

### 3.3 盐度的影响

本研究结果与采样池塘的盐度 14.5~28.2 比较可知,微藻最适盐度范围受到其原有生境的影响,不会出现太大的偏差。盐度对微藻的影响主要表现在渗透压和比重上的作用。由于不同水域的盐度不同,变化幅度也各异,长期在各种盐度不同的水域中生活的水生生物,形成了它们以各自生活水域盐度的特殊适应性。隐藻是淡水养殖系统重要的生产力(万成炎等 2005),嗜蚀隐藻分布极广,湖泊、鱼塘中极为常见,本种对虾池环境盐度具有特殊的适应,并非盐度越低生长越好,最适范围为 13.3~23.0。新月菱形藻是半咸水种(金德祥等 1965),本研究得出其最适盐度范围为 11.9~25.7,这是合理的。陈贞奋等(1986)研究表明,小球藻对盐度的适应能力强,从淡水至盐度为 40 都能生长繁殖,但最适宜的盐度范围是 5~15 的水域。蛋白核小球藻的最适盐度为 19.6~26.4,其成为优势种的池塘盐度为 25.6~28.2,本种的最适盐度比其原来生境的稍低。而微绿球藻的最适盐度范围为 17.9~24.3,其成为优势种的池塘盐度为 14.5~28.2,本研究结果在其池塘生长的盐度范围内。

### 3.4 因子作用方式

各因子对各微藻的增长率的重要性不一样,既可单一因子起作用,又可多因子联合作用,说明在微藻培养过程中,不可忽视生态因子交互作用对培养结果的影响。嗜蚀隐藻和新月菱形藻的最适生长因子范围出现与生活环境的接近或远离的现象应与因子联合作用有关。本研究发现嗜蚀隐藻和新月菱形藻的增长率不仅受到盐度的显著影响,而且也受到光强和温度联合作用的显著影响,而另两种微藻只受到因子的单一作用。

本研究采用贡献率法判定各因子对微藻影响的重要性,有利于把握主要因子,这对掌握微藻的生长特点和指导微藻的培育具有重大的科学意义。

## 参 考 文 献

- 万成炎,朱爱民,唐支亚,胡 莲,陈光辉,吴生桂. 2005. 云龙湖水库水生生物群落结构特征. 水利渔业, 25(4):56~60
- 王崇明,张 岩,麻次松. 1993. 对虾池塘浮游植物与主要水质因子的关系. 海洋科学, 4:10~12
- 冯竞楠,曾昭琪,杨永华. 2005. 不同培养基、温度、光照及 pH 值对卵形隐藻生长的影响. 河南大学学报, 35(2):63~67
- 李文权,黄贤芒,陈清花,郑爱榕,王 宪,蔡阿根. 1999. 4 种海洋单胞藻生化组成的环境因子效应研究. 海洋学报, 21(3):59~65
- 李艳和,管远亮,叶应旺,余 磊,卢文轩,陈 宇. 2003. 两种培养液培养蛋白核小球藻的效果. 安徽农业科学, 31(2):262~263

- 李 锋,葛长宇,方建光,毛玉泽,于守团. 2007. 不同温度和接种密度下亚心形扁藻增殖的初步研究. 海洋水产研究, 28(6):61~66
- 刘东艳,孙 军,巩 晶,钱树本. 2002. 不同氮、磷比例对球等鞭金藻生长的影响. 海洋水产研究, 23(1):29~32
- 宋 君. 1990. 植物间的他感作用. 生态学杂志, 9(6):43~47
- 陈明耀. 1995. 生物饵料培养. 北京:中国农业出版社, 49~180
- 陈贞奋,黄方红,林树祺. 1986. 小球藻对盐度的适应能力. 海洋学报, 8(4):523~523
- 余家林. 1993. 农业多元试验统计. 北京:北京农业大学出版社, 87~135
- 余世孝. 1995. 数学生态学导论. 北京:科学技术文献出版社, 68~69
- 张海琪,蒋霞敏,潘双叶,赵明忠. 2001. 光照、温度、碳源及接种密度对微绿球藻生长的影响. 河北渔业, 1:8~12
- 金德祥,陈金环,黄凯歌. 1965. 中国海洋浮游硅藻类. 上海:上海科学技术出版社, 20~220
- 周汝伦,孙爱淑,杨 震. 1994. 金藻 8701 培养的生态条件研究. 青岛海洋大学学报, 24(2):181~186
- 周洪琪, Naud, S. M., Parry, D. L., and Woo, K. C. 1996. 温度对新月菱形藻、铲状菱形藻和杷夫藻的生长、总脂肪含量以及脂肪酸组成的影响. 水产学报, 20(3):235~240
- 韩秀荧,王修林,祝陈坚. 2001. 角毛藻对营养盐的吸收/释放速率常数的测定. 海洋水产研究, 22(2):52~56
- 蒋霞敏. 2002. 温度、光照、氮含量对微绿球藻生长及脂肪酸组成的影响. 海洋科学, 26(8):9~14
- Davison Parke, M. W. 1949. Studies on marine flagellates. J. Mar. Bio. Ass. UK, 28:255~285