

温度和初始密度比对 2 种微藻 生长竞争的影响研究

王卓^{1,2}, 李晓莉², 陶玲², 彭亮², 代梨梨², 李谷^{2*}

(1 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 武汉 430223)

摘要: 为了探究不同温度和初始密度比对舟形藻和铜绿微囊藻生长竞争的影响, 该研究设计不同温度梯度(10、15、20、25、30 和 35 ℃)和舟形藻与铜绿微囊藻不同初始密度比(1:10、1:1、10:1), 研究不同条件对 2 种微藻生长竞争的影响。结果表明:(1) 单种培养条件下, 随温度升高, 舟形藻细胞密度呈现先增后减趋势, 最适生长温度为 20~25 ℃, 最大藻细胞密度为 3.883×10^5 个/mL; 铜绿微囊藻细胞密度随温度升高而增大, 35 ℃ 达到最大值 (4.813×10^6 个/mL)。(2) 混合培养条件下, 温度和初始密度比对两者生长均产生影响, 舟形藻对铜绿微囊藻的竞争能力随舟形藻初始密度增大而增强, 温度 25 ℃、初始密度比 10:1 处理条件下, 舟形藻对铜绿微囊藻生长抑制作用最为明显。(3) 根据 Lotka-Volterra 竞争模型推断, 高温(30~35 ℃)条件下, 铜绿微囊藻占有优势; 低温(10~20 ℃)条件、初始密度比为 1:10 的舟形藻与铜绿微囊藻稳定共存; 初始密度比为 1:1 和 10:1 时舟形藻占有优势, 且在舟形藻最适生长条件(25 ℃)下两者不稳定共存。

关键词: 舟形藻; 铜绿微囊藻; 温度; 初始密度比; 种间竞争

中图分类号: Q948.8; Q948.1; X52 **文献标志码:** A

Effect of Growth and Competition of Two Microalgae under Temperature and Initial Density Ratio

WANG Zhuo^{1,2}, LI Xiaoli², TAO Ling², PENG Liang², DAI Lili², LI Gu^{2*}

(1 Institute of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2 Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract: In this study we investigated the effects of different temperatures and initial density ratios of *Nannochloris pelliculosa* and *Microcystis aeruginosa* on their growth competition. Different temperature gradients (10, 15, 20, 25, 30 and 35 ℃) and different initial density ratios (1:10, 1:1, and 10:1) were used. The results showed that: (1) in the xenic-culture systems, *N. pelliculosa* and *M. aeruginosa* reached the maximum growth rates at 20–25 ℃ and 35 ℃, respectively, with their maximum biomass being 3.883×10^5 and 4.813×10^6 cells/mL respectively. (2) In the co-culture systems, temperature and the initial density ratios both significantly influenced the competition between *N. pelliculosa* and *M. aeruginosa*. Higher initial density of *N. pelliculosa* resulted in greater advantage on their competitive capacity, and the growth inhibition effect of *N. pelliculosa* on *M. aeruginosa* was most obvious with the initial density ratio of 10:1 when at 25 ℃. (3) According to the Lotka-Volterra model, it can be inferred that *M. aeruginosa* preponderated at high temperature (30–35 ℃). At low temperature (10–20 ℃), *M. aeruginosa* and *N. pelliculosa* coexist stably when their initial density ratio was 1:10. *N. pelliculosa* dominated

收稿日期: 2019-06-25; 修改稿收到日期: 2019-09-19

基金项目: 沙湖水环境质量改善与水生态功能提升技术与示范(2017BY087)

作者简介: 王卓(1993-), 女, 硕士, 主要从事水域环境生态修复与水污染治理。E-mail: zhuo. wang. lacey@foxmail. com

* 通信作者: 李谷, 教授, 主要从事水域环境生态修复研究。E-mail: ligu@yfi. ac. cn

when the initial density ratio of *N. pelliculosa* to *M. aeruginosa* was 1 : 1 or 10 : 1. When *N. pelliculosa* was reached the temperature of 25 °C and the initial density ratio was 10 : 1, *M. aeruginosa* and *N. pelliculosa* were unstably coexist in the co-culture system.

Key words: *Navicula pelliculosa*; *Microcystis aeruginosa*; temperature; initial density ratio; interspecific competition

浮游植物作为水生态系统初级生产者,其群落结构动态变化直接影响水生态系统的功能变化^[1]。舟形藻(*Navicula pelliculosa*)属硅藻门舟形藻属,是一种常见的单细胞藻类,水产动物的开口饵料,常作为优势种构成淡水水体藻类群落结构的重要部分^[2-3]。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)属蓝藻门微囊藻属,是具有较强光合作用能力的自养型生物^[4],繁殖速度快,适应能力强,大规模暴发则会引起水华现象,造成水质恶化,破坏水环境,威胁水生生物生长以及人类饮用水安全^[5-6]。

藻类作为许多食物链和初级生产者的基础,在淡水生态系统中起着重要的生态作用,因此了解藻类种间竞争关系至关重要^[7]。藻类种间竞争加剧会引起个体生长限制,导致藻类群落结构的演替和转移,并通过影响各级营养水平链,从而改变淡水生态系统生物多样性和群落结构^[8]。目前,相关研究表明不同因素(温度^[9]、营养盐^[10]、初始藻细胞密度^[11]及化感物质^[12]等)对于藻类的竞争作用均有重要影响。其中,温度通过改变膜流动性、脂质组成和酶活性对藻类产生影响;初始藻细胞密度通过产生的化感物质数量和有限营养物质占比,对藻类竞争表现出直接或间接影响^[13-14]。近年来,有关舟形藻的研究主要集中在单一条件下,对舟形藻生长生理响应^[15-16]及其在工业用途上的开发利用^[17]。铜绿微囊藻的研究较为广泛,不仅包括环境因子对铜绿微囊藻的生长生理响应^[18-19],同时以铜绿微囊藻为蓝藻类实验对象,研究化感作用对其生长的抑制作用,取得长效进展^[20-21]。资料显示,蓝藻与蓝、绿藻相互竞争作用研究广泛^[22],但将蓝藻与硅藻混合培养,探究两者之间的竞争关系却未见报道。

舟形藻和铜绿微囊藻是养殖水体中常见的典型硅藻和蓝藻,易于培养、生长迅速且检测方法成熟,常被用于实验研究^[23]。本实验选用舟形藻和铜绿微囊藻,模拟淡水池塘养殖状况,探究单种培养以及混合培养条件下不同温度和初始密度比对 2 种微藻生长竞争的影响,根据竞争模型,深入探究种间竞争优势,为藻类频发水体实行高效、安全的藻类种间抑制提供科技支撑,为构建池塘优良藻提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

铜绿微囊藻(FACHB-905)和舟形藻(FACHB-2262)购自中国科学院水生生物研究所。培养基按 CSI 培养基^[24]和 BG-11 培养基^[25]各组分 50% 等比例混合配制 C+B 培养基,无菌条件下分别接种在 100 mL 三角烧瓶中,置于智能光照培养箱(上海新苗 GZX-150BS-III)中进行扩大培养,培养条件为:温度(25±1) °C,光照强度 2 500 Lx,光暗比 12 h : 12 h,每隔 3 h 定时摇晃,培养 16 d,每隔 4 d 更换 30% 的培养基。

1.2 实验设计

实验用藻经扩增培养至指数生长期,藻细胞密度约为 1×10^6 个/mL,稀释到实验所需藻密度,摇匀并计数,供实验接种使用。实验分为单种培养和混合培养:(1)单种培养,将舟形藻和铜绿微囊藻分别接入预先装有灭菌的新配制培养基三角烧瓶中,实验设置 6 种温度梯度,每个处理设 3 组平行;(2)混合培养,将 2 种藻按一定密度比接入同样处理的三角烧瓶中,每个处理设 3 组平行。培养条件如表 1 所示,移入培养箱,进行培养实验研究。

1.3 测定指标与处理

1.3.1 生长曲线拟合 自实验开始后每 48 h 计数藻细胞数量,计数方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[26],每个样本计数 3 次,取其平均值并计算藻密度。利用公式(1)计算微藻的生长速率(r):

$$r = \ln \frac{X_n}{X_{n-2}} / (t_n - t_{n-2}) (n = 2, 4, 6, 8, \dots) \quad (1)$$

式中: t 表示培养天数(d), X_n 、 X_{n-2} 分别表示在培养 t_n 、 t_{n-2} 天后的细胞密度(个/mL),取对数期的增长率作为该营养浓度下的生长速率。

1.3.2 竞争抑制参数计算 参照文献^[27-28],利用 Lotka-Volterra 竞争模型的差分形式(公式 2、3)计算竞争抑制参数:

$$\frac{N_{pn} - N_{p(n-2)}}{t_n - t_{n-2}} = r_p N_{p(n-2)} \left[\frac{K_p - N_{p(n-2)} - \alpha N_{a(n-2)}}{K_p} \right] \quad (n = 2, 4, 6, 8, \dots) \quad (2)$$

表1 各处理组藻种接种条件

Table 1 Quantity and temperature setting of treatment groups

处理 Treatment	接种密度 Cell density/($\times 10^4$ 个/mL)		温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$
	舟形藻 <i>N. pelliculosa</i>	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>	
单种培养 Xenic-culture	5.0(0)	0(5.0)	
混合培养 A Co-culture A/(1:10)	5.0	50.0	10,15,20,25,30,35
混合培养 B Co-culture B/(1:1)	5.0	5.0	
混合培养 C Co-culture C/(10:1)	50.0	5.0	

$$\frac{N_{an} - N_{a(n-2)}}{t_n - t_{n-2}} = \frac{r_a N_{a(n-2)} [K_a - N_{a(n-2)} - \beta N_{p(n-2)}]}{K_a} \quad (3)$$

式中:p和a分别代表舟形藻和铜绿微囊藻; N_n 和 N_{n-2} 分别为混合培养中在时间 t_n 和 t_{n-2} 时的藻细胞密度(个/mL); K 为藻细胞的最大环境容量; α 和 β 分别为混合培养中铜绿微囊藻对舟形藻和舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数。

1.4 数据统计与分析

实验所有样品均平行测定3次,结果取其均值。利用Excel 2007进行数据整理和制图,SPSS 18.0软件进行统计分析,对照组与处理组之间采用单因素方差分析进行差异显著性比较,并用 t 检验对各条件下显著性进行差异性检验, $P < 0.05$ 差异显著。

2 结果与分析

2.1 单种培养条件下藻细胞生长情况

舟形藻在不同温度单种培养条件下的生长曲线如图1,A所示。10和15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,舟形藻增长缓慢,最大藻细胞密度分别为 2.058×10^5 和 2.220×10^5 个/mL;20和25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,舟形藻生长良好,最大藻细胞密度分别为 3.883×10^5 和 3.419×10^5 个/

mL;30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,舟形藻的增长速度较20和25 $^{\circ}\text{C}$ 缓慢,最大藻细胞密度为 1.860×10^5 个/mL;35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,舟形藻生长受到抑制,藻细胞密度较初始下降。实验结果表明,随着温度升高,舟形藻细胞密度呈现先增大后减小的趋势,温度过高,破坏藻细胞结构,损伤藻细胞代谢功能,直至死亡^[12,29],舟形藻生长最适温度范围为20~25 $^{\circ}\text{C}$ 。

铜绿微囊藻在不同温度单种培养条件下的生长曲线如图1,B所示。10 $^{\circ}\text{C}$ 和15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,铜绿微囊藻生长缓慢甚至出现细胞死亡现象;20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,铜绿微囊藻增长较为缓慢,最大藻细胞密度为 1.843×10^5 个/mL;25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,铜绿微囊藻增长速率远高于20 $^{\circ}\text{C}$,最大藻细胞密度为 7.896×10^5 个/mL;在30和35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,藻细胞增长较快,最大藻细胞密度分别为 4.655×10^6 和 4.813×10^6 个/mL。实验结果表明,温度较低条件下,不利于铜绿微囊藻生长繁殖,随着温度升高,铜绿微囊藻生长加速,藻细胞活性增强,代谢功能加快,实验条件下,铜绿微囊藻最适生长温度为30~35 $^{\circ}\text{C}$ 。

单种培养条件下,随着温度的升高,舟形藻藻细胞密度表现出先增后减的趋势,温度过高,细胞直至死亡,原因在于舟形藻藻细胞在高温条件下,细

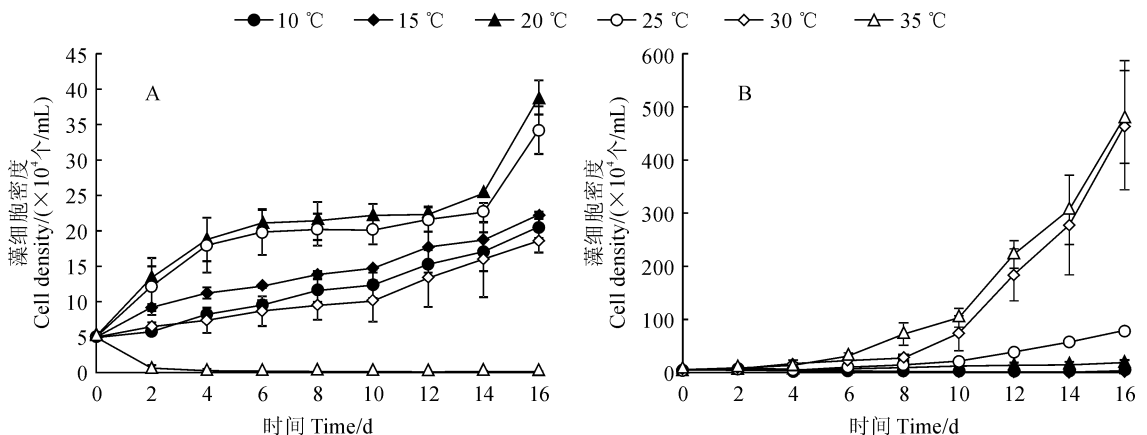


图1 不同温度下舟形藻(A)和铜绿微囊藻(B)生长曲线

Fig. 1 Growth curves of *N. pelliculosa* and *M. aeruginosa* under different temperatures

胞内部结构受损,藻细胞损伤,严重破坏细胞代谢功能或影响光合作用^[12,29-30];较低温度条件下,不利于铜绿微囊藻藻细胞生长,随温度升高,藻细胞密度表现出增长的趋势,藻细胞光合活性加快,细胞大量繁殖,这与夏季高温以蓝藻水华爆发为主的水域,铜绿微囊藻占有绝对优势的现象一致^[18]。实验结果表明,考虑温度因素,研究利用舟形藻对铜绿微囊藻的种间竞争作用,在温度 20 ℃ 左右的水域环境条件下效果应当最为显著,进一步将通过混合培养实验验证其合理性。

2.2 混合培养条件下藻细胞生长情况

混合培养体系不同温度梯度(10、15、20、25、30 和 35 ℃)、不同初始藻细胞密度比(舟形藻:铜绿微囊藻=1:10、1:1、10:1)条件下,藻细胞生长情

况如图 2 所示。10 ℃ 条件下,舟形藻在 1:10 处理组呈现出逐渐增长的趋势,1:1 处理组和 10:1 处理组均呈现先增后减的趋势,各处理组最大藻细胞密度差异显著($P < 0.05$);铜绿微囊藻在 1:1 处理组和 10:1 处理组藻细胞密度逐渐下降,直至死亡,1:10 处理组最大藻细胞密度达 1.960×10^6 个/mL,显著高于同温度下、不同初始藻细胞密度比处理组 1~2 个数量级($P < 0.01$)。15 ℃ 条件下,舟形藻各处理组均呈现逐渐增长的状态,1:10、1:1 和 10:1 处理组最大藻细胞密度分别为 2.530×10^5 、 2.993×10^5 和 1.315×10^5 个/mL,差异不显著($P > 0.05$);铜绿微囊藻各处理组生长状况与 10 ℃ 条件下基本相似,表现出相同的生长趋势。20 ℃ 条件下,舟形藻各处理组变化与 15 ℃ 条件下保持一致,

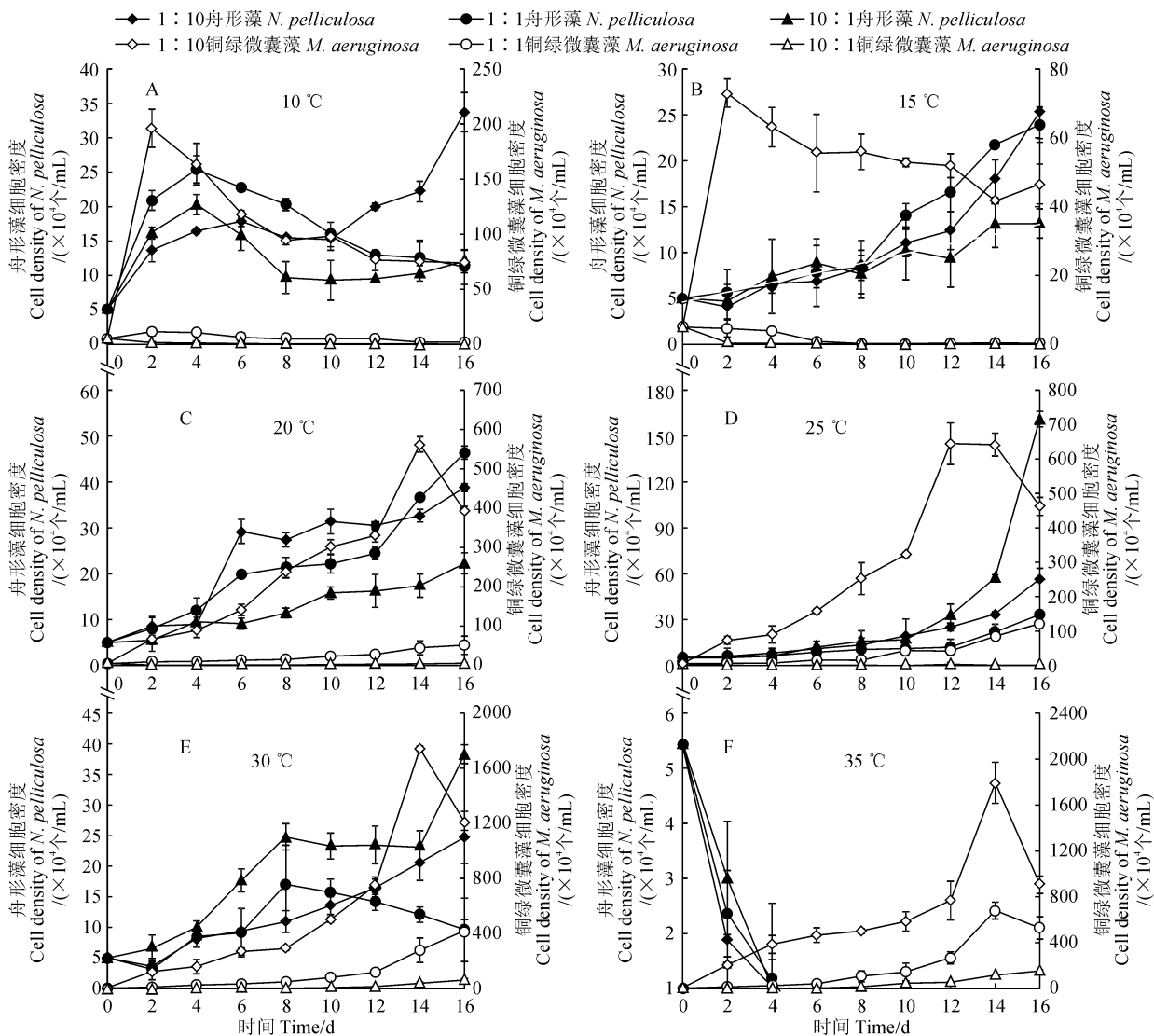


图 2 不同初始细胞密度比条件下藻细胞密度随温度的变化

Fig. 2 Cell density varies with temperature under different initial cell densities

1:10、1:1和10:1处理组最大藻细胞密度分别为 3.875×10^5 、 4.634×10^5 和 2.224×10^5 个/mL, 差异性显著($P < 0.05$); 铜绿微囊藻在1:10处理组藻细胞密度先增后减, 其余各处理组均呈现缓慢增长的趋势, 其中1:10处理组峰值藻细胞密度最大为 5.620×10^6 个/mL, 其次为1:1处理组为 5.167×10^5 个/mL, 10:1处理组峰值最小为 5.78×10^4 个/mL, 各处理组间藻细胞密度差异具有显著性($P < 0.05$)。25℃条件下, 舟形藻在10:1处理组藻细胞增长最快, 最大藻细胞密度为 1.610×10^6 个/mL, 而1:1和1:10处理组最大藻细胞密度分别为 3.325×10^5 和 5.670×10^5 个/mL, 差异极显著($P < 0.01$); 铜绿微囊藻各处理组变化趋势与20℃条件下基本一致, 10:1、1:1和1:10处理组最大藻细胞密度分别为 3.280×10^4 、 1.211×10^6 和 6.445×10^5 个/mL, 差异极显著($P < 0.01$)。30℃条件下, 舟形藻在1:10处理组和10:1处理组藻细胞均缓慢增长, 且10:1处理组始终高于1:10处理组, 1:1处理组则呈现先增大后减小的趋势, 在第8天时, 1:1处理组藻细胞密度超过1:10处理组并达到最大值 1.705×10^5 个/mL; 铜绿微囊藻在1:10处理组呈现出先增后减的趋势, 在第14d时开始下降, 最大藻细胞密度为 1.743×10^7 个/mL, 1:1处理组和10:1处理组均处于增长状态, 且

10:1处理组增长速率高于1:1处理组(表2)。35℃条件下, 舟形藻各组藻细胞均停止生长; 铜绿微囊藻1:10处理组和1:1处理组呈现出先增后减的趋势, 均在第14天开始出现下降趋势, 最大藻细胞密度分别为 1.794×10^7 和 6.797×10^6 个/mL, 10:1处理组最大藻细胞密度为 1.526×10^6 个/mL, 各处理组最大藻细胞密度差异极显著($P < 0.01$)。

实验结果表明, 温度较低条件下, 舟形藻初始藻细胞密度大于等于铜绿微囊藻初始藻细胞密度时, 利用舟形藻对铜绿微囊藻具有较好的种间抑制作用, 温度过高(≥ 30 ℃), 舟形藻藻细胞繁殖受到抑制, 加速铜绿微囊藻生长繁殖, 同舟形藻对铜绿微囊藻的种间竞争作用相悖, 因此考虑温度及初始藻细胞密度比等因素, 在温度低于30℃, 初始藻细胞密度舟形藻大于铜绿微囊藻的水域环境条件下, 利用舟形藻对铜绿微囊藻的种间竞争作用效果最为显著, 这与单种培养条件下, 在温度20℃左右的水域环境条件下效果最佳, 结果一致。

2.3 不同条件下藻细胞比生长率和竞争抑制参数

不同温度和初始密度比对2种藻的比生长率影响不同, 如表2所示。在单种培养体系中, 舟形藻的比生长率表现为: $25^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C} > 15^\circ\text{C} > 30^\circ\text{C} > 10^\circ\text{C} > 35^\circ\text{C}$; 铜绿微囊藻的比生长率表现为: $35^\circ\text{C} > 30^\circ\text{C} > 25^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C} > 15^\circ\text{C} > 10^\circ\text{C}$ 。在混合培养

表2 不同条件下舟形藻和铜绿微囊藻生长速率

Table 2 Growth rates of algal under different temperatures and initial cell densities

温度 Temperature /℃	舟形藻 <i>N. pelliculosa</i>				铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>			
	单种培养 Xenic-culture	混合培养 Co-culture			单种培养 Xenic-culture	混合培养 Co-culture		
		1:10	1:1	10:1		1:10	1:1	10:1
10	0.08	0.10	0.11	0.05	-0.22	-0.07	-0.13	-0.12
15	0.10	0.13	0.09	0.08	0.02	0.03	0.04	0.04
20	0.12	0.16	0.15	0.15	0.08	0.17	0.15	0.13
25	0.31	0.2	0.28	0.27	0.24	0.23	0.20	0.20
30	0.09	0.10	0.14	0.13	0.30	0.34	0.25	0.28
35	0.03	-0.28	-0.33	-0.50	0.35	0.42	0.38	0.31

表3 单种培养条件下K值和r值

Table 3 Values of K and r

参数 Parameter	10℃		15℃		20℃		25℃		30℃		35℃	
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
K	8.51	23.97	4.01	22.20	18.43	28.14	78.96	51.36	465.48	20.58	481.25	0.09
r	0.27	0.15	0.31	0.31	0.18	0.15	0.36	0.15	0.37	0.19	0.36	0.10

注: M代表铜绿微囊藻, N代表舟形藻

Note: M represents *M. aeruginosa*, N represents *N. pelliculosa*

表 4 不同条件下舟形藻和铜绿微囊藻竞争抑制参数

Table 4 Competition inhibition parameters of algal under different temperatures and initial cell densities

温度 Temperature/°C	α 竞争抑制参数 α inhibition parameter				β 竞争抑制参数 β inhibition parameter			
	1 : 10	1 : 1	10 : 1	均值 Mean	1 : 10	1 : 1	10 : 1	均值 Mean
10	0.20	-3.70	-4.79	-2.76	-5.20	0.49	0.53	-1.39
15	0.52	-0.20	-1.32	-0.33	-4.16	0.45	0.83	-0.96
20	0.80	0.30	-0.12	0.33	-8.30	0.40	2.89	-1.67
25	1.87	0.77	0.60	1.08	-4.07	6.52	10.90	4.45
30	2.26	2.07	1.83	2.05	-4.91	0.57	0.61	-1.24
35	0.00	0.01	0.13	0.05	-53.44	-49.47	-4.22	-35.71

体系中,舟形藻的比生长率随温度的升高表现出先上升后下降的趋势,铜绿微囊藻的比生长率则随温度的升高而升高。

单种培养条件下所得舟形藻和铜绿微囊藻的最大环境容量 K 值和内禀增长率 r 值如表 3 所示,同混合培养体系中舟形藻和铜绿微囊藻细胞密度代入 Lotka-Volterra 竞争模型中,计算出混合培养体系中铜绿微囊藻对舟形藻的竞争抑制参数(α)和舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数(β),如表 4 所示。

实验数据可得,从温度和初始藻细胞密度比对竞争抑制参数的影响来看,30 °C、1 : 10 处理组铜绿微囊藻对舟形藻的竞争抑制参数(α)最大;25 °C、10 : 1 处理组舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数(β)最大。结合表 2 数据,铜绿微囊藻对舟形藻的竞争抑制参数(α)随着温度的升高而增大,初始密度对其影响不明显;舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数(β)随着初始密度的升高而增大,温度对其影响不显著,综上所述,利用舟形藻对铜绿微囊藻的种间竞争作用,初始藻密度舟形藻大于等于铜绿微囊藻条件下,温度在 20~25 °C 的水域环境效果最佳。

3 讨论

3.1 不同温度对舟形藻和铜绿微囊藻的生长竞争影响

温度是生物生长发育的一个重要因素,对生物体内的新陈代谢速率及细胞酶活性具有重要影响^[14]。研究表明,温度对于藻类生长的影响程度高于盐度、光照等其他环境因素^[31-32]。实验结果显示,舟形藻在 10~30 °C 均可正常生长,但最适生长温度范围为 20~25 °C,这与毕桂灿^[33]通过实验得出舟形藻的最适生长温度为 22 °C 一致。本研究中在 10 和 15 °C 时,铜绿微囊藻停止生长,在 20~35 °C 条件下,铜绿微囊藻表现出随温度升高藻细胞密度增大的趋势,最适生长温度为 30~35 °C。靳萍

等^[34]研究表明,铜绿微囊藻在 15 °C 时增长率为 -61.67%,张青田等^[35]研究发现,铜绿微囊藻在低于 20 °C 的温度下,生长受到抑制,这与本实验的研究结果基本一致。

从竞争抑制参数来看,郑忠明等^[36]研究表明当温度与藻类本身适宜的温度一致时,其竞争力较强,这与本实验结果一致。在 25 °C 条件下,舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数 β 显著高于铜绿微囊藻对舟形藻的竞争抑制参数 α ,由此可见,在舟形藻的最适生长温度下,对铜绿微囊藻的抑制作用明显升高。

3.2 不同初始密度比对舟形藻和铜绿微囊藻的生长竞争影响

微藻不同的初始密度比对其种群密度和生物量均有重要影响。张坤等^[37]研究 5 种微藻在不同的初始密度下对铜绿微囊藻的抑制,结果表明,5 种微藻在不同初始密度条件下对铜绿微囊藻均有影响,且随着微藻初始密度升高抑制作用增强。郭羽丰等^[38]通过研究不同密度比下的绿色巴夫藻和四列藻的竞争得出,混合培养的绿色巴夫藻和四列藻不同的接种密度会导致种间竞争抑制强弱的变化。王朝晖等^[39]研究不同藻细胞初始密度对海洋卡盾藻和中肋骨条藻以及锥状斯氏藻之间竞争的影响,结果表明随着初始密度的增大,海洋卡盾藻进入对数期和稳定期的时间提前。在本实验中,无论在何种温度下,随着铜绿微囊藻接种密度的减小, β 呈现出上升的趋势,而在达到舟形藻的适宜生长温度前, α 则呈现出下降的趋势。

3.3 不同温度和初始密度比下舟形藻和铜绿微囊藻的竞争结局

参照陈家长等^[9]在文献中所列出的 Lotka-Volterra 竞争模型,在 10 和 15 °C 条件下, $1/K_m > \alpha/K_n$ 且 $1/K_n > \beta/K_m$,即舟形藻和铜绿微囊藻稳定共存,1 : 1 和 10 : 1 处理组则表现为 $1/K_n < \beta/K_m$ 且 $1/K_m > \alpha/K_n$,即舟形藻取胜;20 °C 条件下,1 : 10 和

1:1处理组均表现为 $1/K_m > \alpha/K_n$ 且 $1/K_n > \beta/K_m$, 即舟形藻和铜绿微囊藻稳定共存, 而 10:1 处理组舟形藻取胜; 25 °C 条件下, 1:10 处理组铜绿微囊藻取胜, 1:1 和 10:1 处理组则表现为 $1/K_m < \alpha/K_n$ 且 $1/K_n < \beta/K_m$, 即两者不稳定共存; 30 和 35 °C 条件下, 三组均为铜绿微囊藻取胜。

4 结论

(1) 温度对不同藻类生长生理的影响程度不同, 在实验温度范围内, 无论是单种培养还是混合培养, 随着温度升高, 舟形藻细胞密度大量繁殖, 温度过

高, 藻细胞死亡, 生长最适宜温度范围为 20~25 °C; 铜绿微囊藻的最大藻细胞密度随着温度的升高而增大, 生长最适宜温度范围为 30~35 °C, 优化合理的温度条件有利于藻细胞的生长繁殖。

(2) 不同温度和初始密度比条件下混合培养的藻类生长状况不同, 舟形藻对铜绿微囊藻的竞争能力随着初始密度比的增大而增强, 舟形藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数在 25 °C、10:1 处理时最大, 通过改变舟形藻在混合培养中的比例, 可以增强其竞争能力, 这为藻类频发水体实行高效、安全的藻类种间抑制提供了理论和实践依据。

参考文献:

- [1] QIN B Q, GAO G, ZHU G W, *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58** (9): 961-970.
- [2] 谢钦铭, 李长春, 彭赐莲. 鄱阳湖浮游藻类群落生态的初步研究[J]. *江西科学*, 2000, (3): 162-166.
XIE Q M, LI C C, PENG C L. Preliminary study on the ecology of phytoplankton community in Poyang Lake[J]. *Jiangxi Science*, 2000, (3): 162-166.
- [3] 王丑明, 郭晶, 张屹, 等. 1988-2017 年洞庭湖浮游植物的群落演变[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(6): 19-25.
WANG C M, GUO J, ZHANG Q, *et al.* Community evolution of phytoplankton in Dongting Lake from 1988 to 2017[J]. *China Environmental Monitoring*, 2018, **34**(6): 19-25.
- [4] 马欠, 邓春暖, 郭锋锋. 温度对小球藻和铜绿微囊藻生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. *中州大学学报*, 2018, **35**(4): 108-112.
MA Q, DENG C N, GUO F F. Effects of temperature on the growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Zhongzhou University*, 2018, **35**(4): 108-112.
- [5] PAERL H W, PAUL V J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria [J]. *Water Research*, 2012, **46**(5): 1349-1363.
- [6] QIN B Q, ZHU G W, GAO G, *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management [J]. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [7] STOIBER T L, SHAFER M M, ARMSTRONG D E. Relationships between surface-bound and internalized copper and cadmium and toxicity in *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31** (2): 324-335.
- [8] GRANIELI E, WEBERG M, SALOMON P S. Harmful algal blooms of allelopathic microalgal species: the role of eutrophication[J]. *Harmful of Algae*, 2008, **8**(1): 94-102.
- [9] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 温度对两种蓝藻种间竞争的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(3): 454-459.
CHEN J Z, MENG S L, HU G D, *et al.* Effect of temperature on competition between two species of cyanobacteria[J]. *Journal of Ecology*, 2010, **29**(3): 454-459.
- [10] 张晶晶, 周进, 张怀瑾, 等. 不同营养条件下铜绿微囊藻, (*Microcystis aeruginosa*) 和小球藻, (*Chlorella vulgaris*) 的生长竞争行为[J]. *海洋与湖沼*, 2016, **47**(5): 1013-1023.
ZHANG J J, ZHOU J, ZHANG H J, *et al.* Growth competition behavior of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella vulgaris* under different nutrient conditions [J]. *Ocean and Lake*, 2016, **47**(5): 1013-1023.
- [11] QIU X C, YAMASAKI Y, SHIMASKI Y, *et al.* Growth interactions between the raphidophyte *Chattonella antiqua* and the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea* [J]. *Harmful of Algae*, 2011, **11**: 81-87.
- [12] 徐成龙, 张饮江, 卢家磊, 等. 绞股蓝提取液对蛋白核小球藻的化感效应及影响机理研究[J]. *西北植物学报*, 2019, **39** (5): 824-830.
XU C L, ZHANG Y J, LU J L, *et al.* Allelopathic effect of *Gynostemma pentaphyllum* extract on *Chlorella proteinucleus* and its mechanism [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(5): 824-830.
- [13] NECCHI O. Photosynthetic responses to temperature in tropical lotic macroalgae [J]. *Phycological Research*, 2004, **52** (2): 140-148.
- [14] VAVILIN D V, DUCRUET J M, MATORIN D N, *et al.* Membrane lipid peroxidation, cell viability and Photosystem II activity in the green alga *Chlorella pyrenoidosa* subjected to various stress conditions [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology Biology*, 1998, **42**(3): 233-239.
- [15] 郑维发, 王雪梅, 王义琴, 等. 四种营养盐对舟形藻 (*Navicula*) BT001 生长速率的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2007, (2): 157-162.
ZHENG W F, WANG X M, WANG Y Q, *et al.* Effects of four nutrients on the growth rate of *Navicula* BT001 [J]. *Ocean and Lake*, 2007, (2): 157-162.
- [16] 刘超, 支崇远, 李培林, 等. 舟形藻生长运动过程对重金属 Cu^{2+} 急性毒性胁迫响应研究[J]. *江苏农业科学*, 2016, **44** (3): 373-375.
LIU C, ZHI C Y, LI P L, *et al.* Response of the growth process of *Navicula aquarius* to acute toxicity of heavy metal Cu^{2+} [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2016, **44** (3): 373-375.
- [17] WU X Y, LI H, WEI P. Optimization of the conditions for using sewage to cultivate *Navicula tenera* [J]. *Agricultural*

- Science & Technology*, 2009, **10**(1): 68-73.
- [18] 张 艳,马 放,李圭白. 不同生长条件对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 净水技术, 2014, **33**(3): 84-86+99.
ZHANG Y, MA F, LI G B. Effects of different growth conditions on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Purification Technology*, 2014, **33**(3): 84-86+99.
- [19] 张思家,张君枝,马文林. 微生物修复剂投加量对铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. 环境工程, 2014, **32**(S1): 162-165+220.
ZHANG S J, ZHANG J Z, MA W L. Effects of microbial remediation dosage on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Engineering*, 2014, **32**(S1): 162-165+220.
- [20] 柴 天,严辉智,刘建福,等. N-苯基-2-萘胺对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 农村经济与科技, 2017, **28**(S1): 204-206.
CHAI T, YAN H Z, LIU J F, et al. Allelopathic effect of N-phenyl-2-naphthylamine on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Rural Economy and Technology*, 2017, **28**(S1): 204-206.
- [21] 谭凯婷,王志红,黄梓淇,等. 对叔丁基邻苯二酚对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 环境化学, 2018, **37**(12): 2 645-2 650.
TAN K T, WANG Z H, HUANG Z Q, et al. Allelopathic inhibition of p-tert-butyl catechol on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(12): 2 645-2 650.
- [22] 吴建颖,颜润润,张毅敏. 不同温度下铜绿微囊藻和斜生栅藻的最佳生长率及竞争作用[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(2): 53-57.
CHAO J Y, YAN R R, ZHANG Y M. Optimal growth rate and competition of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* at different temperatures [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, **27**(2): 53-57.
- [23] JACOBY J M, COLLIER D C, WELCH E B, et al. Environmental factors associated with a toxic bloom of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 2000, **57**(1): 231-240.
- [24] LI X L, THOMAS K M, TAO L, et al. Optimization of growth conditions and fatty acid analysis for three freshwater diatom isolates [J]. *Phycological Research*, 2017, **65**(3): 177-187.
- [25] SAITO K, HIROSHI I, NISHIDA F, et al. Purification of microcystins by DEAE and C₁₈ cartridge chromatography [J]. *Toxicon*, 2002, **40**(1): 97-101.
- [26] 王心芳,魏复盛,齐文启. 水和废水监测分析方法, (第四版) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2002: 704.
- [27] 孟顺龙,裴丽萍,胡庚东,等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1 438-1 444.
MENG S L, QIU L P, HU G D, et al. Effects of nitrogen to phosphorus ratio on growth and competition of two cyanobacteria [J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2012, **31**(7): 1 438-1 444.
- [28] 茅 华,许 海,刘兆普,等. 不同起始细胞数量对旋链角毛藻和中肋骨条藻种群竞争的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(5): 458-461.
MAO H, XU H, LIU Z P, et al. Effects of different number of starting cells on population competition of *Chaetoceros cervisiae* and *Skeletonema costatum* [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**(5): 458-461.
- [29] GILLOLY J F, BROWN J H, WEST G B, et al. Effects of size and temperature on metabolic rate [J]. *Science*, 2001, **293**(5 538): 2 248-2 251.
- [30] MARANON E, LORENZO M P, CERMENO P, et al. Nutrient limitation suppresses the temperature dependence of phytoplankton metabolites [J]. *ISME Journal*, 2018, **12**(7): 1 836-1 845.
- [31] 晏国佳,丁琼瑶,高先池. 温度、盐度和光照对球形棕囊藻生长和卤代烃释放的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, **49**(2): 67-73.
YAN G J, DING Q Y, GAO X C. Effects of temperature, salinity and light on the growth of *Phaeocystis globosa* and the release of halogenated hydrocarbons [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2019, **49**(2): 67-73.
- [32] 曾艳艺,黄翔鹤. 温度、光照对小环藻生长和叶绿素 a 含量的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2007, (6): 36-40.
ZENG Y Y, HUANG X H. Effects of temperature and light on the growth and chlorophyll a content of *Cymbidium* [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2007, (6): 36-40.
- [33] 毕桂灿. 舟形藻 (*Navicula* sp. N6) 废水培养及其转录组分析 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [34] 靳 萍,郭 萌,徐婷婷,等. 温度和光照对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻共同培养的影响[J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(5): 65-70.
JIN P, GUO M, XU T T, et al. Effects of temperature and light on co-cultivation of *Microcystis aeruginosa*, large carp and goldfish [J]. *Journal of Water Ecology*, 2013, **34**(5): 65-70.
- [35] 张青田,王新华,林 超,等. 温度和光照对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 天津科技大学学报, 2011, **26**(2): 24-27.
ZHANG Q T, WANG X H, LIN C, et al. Effects of temperature and light on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2011, **26**(2): 24-27.
- [36] 郑忠明,白培峰,陆开宏,等. 铜绿微囊藻和四尾栅藻在不同温度下的生长特性及竞争参数计算[J]. 水生生物学报, 2008, (5): 720-728.
ZHENG Z M, BAI P F, LU K H, et al. Growth characteristics and competitive parameter calculation of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus aeruginosa* at different temperatures [J]. *Journal of Aquatic Biology*, 2008, (5): 720-728.
- [37] 张 坤,戴习林. 5 种微藻及其密度对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 广东农业科学, 2012, **39**(10): 166-169+178.
ZHANG K, DAI X L. Effects of five microalgae and their density on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2012, **39**(10): 166-169+178.
- [38] 郭羽丰,段舜山,陈 洁,等. 绿色巴夫藻和四列藻种间竞争机制研究[J]. 生态学杂志, 2002, (6): 11-14.
GUO Y F, DUAN S S, CHEN J, et al. Study on the competition mechanism between *Green Pavlova* and *Tetrahymena* [J]. *Journal of Ecology*, 2002, (6): 11-14.
- [39] 王朝晖,袁美玲,骆育敏,等. 海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻种间竞争研究[J]. 水生生物学报, 2010, **34**(2): 336-344.
WANG Z H, YUAN M L, LUO Y M, et al. Study on the competition between *C. elegans* and *Skeletonema costatum* and *Cone* [J]. *Journal of Aquatic Biology*, 2010, **34**(2): 336-344.