

微囊藻和拟柱孢藻对亚热带大型枝角类拟同形溞 (*Daphnia similoides*) 生长与繁殖的影响*

黄海塘 雷腊梅** 彭亮 韩博平

暨南大学生态学系, 水体富营养化与赤潮防治广东普通高校重点实验室 广州 510632

摘要 拟同形溞 (*Daphnia similoides*) 是我国南亚热带地区广泛分布的大型枝角类种类, 为了解富营养化对其种群生存的影响, 以分离驯化的拟同形溞为对象, 通过喂食有毒铜绿微囊藻 (Toxic *Microcystis aeruginosa* FACHB905)、无毒铜绿微囊藻 (Non-toxic *M. aeruginosa* FACHB469) 和拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii* N8), 探讨不同蓝藻构成的食物对拟同形溞生长和繁殖的影响。3株蓝藻分别与小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*, CP) 的生物量按4:0、3:1、2:2、1:3配比, 以致蓝藻在食物中的比例分别记为100%、75%、50%、25%, 总有机碳浓度控制为1 mg/L。结果显示, 相对于单独喂食小球藻, 含3株蓝藻的混合食物均显著抑制拟同形溞的生长和繁殖, 表现为拟同形溞的体长增长率、最大体长、净生殖率和内禀增长率均下降, 且下降趋势与蓝藻浓度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。相同浓度下, 喂食拟柱孢藻的溞体的存活率、累计产幼量、净生殖率、内禀增长率均高于两株微囊藻。在3株蓝藻浓度均为100%时, 喂食拟柱孢藻的溞体寿命、最大体长、累计产幼数分别为19 d、1.68 mm、2, 均高于喂食有毒微囊藻的5.8 d、1.20 mm、0和无毒微囊藻的5.8 d、1.19 mm、0。本研究表明, 水体中存在铜绿微囊藻和拟柱孢藻会影响拟同形溞的生长繁殖, 且微囊藻对拟同形溞生长繁殖的抑制作用大于拟柱孢藻。图3 表1 参32

关键词 拟同形溞; 微囊藻; 拟柱孢藻; 富营养化

CLC Q178.1 : X171.5

Effect of *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii* on the growth and reproduction of *Daphnia similoides* (large sub-tropical cladoceran)*

HUANG Haitang, LEI Lamei**, PENG Liang & HAN Boping

Guangdong Higher Education Key Laboratory of Eutrophication and Red Tide Prevention, Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract *Daphnia similoides* is a large-sized cladoceran species frequently found in sub-tropical of southern China. But little is known about its survival mode. This paper aimed to evaluate the potential effects of cyanobacteria on the growth and reproduction of *D. similoides* isolated from a sub-tropical pond. Three strains of cyanobacteria (toxic *Microcystis aeruginosa* FACHB905, non-toxic *Microcystis aeruginosa* FACHB469 and *Cylindrospermopsis raciborskii* N8) were mixed with *Chlorella pyrenoidosa* (CP) in the ratio of 4:0, 3:1, 2:2, 1:3, respectively. The mixtures included 100%, 75%, 50% and 25% cyanobacteria with a fixed total organic carbon concentration of 1.0 mg/L in each treatment. Compared with *D. similoides* fed with the sole diet of *C. pyrenoidosa*, *D. similoides* fed with increased proportion of cyanobacteria in the mixed food had significantly depressed somatic growth rate, maximal body length, net reproduction rate and intrinsic rate of increase (r) ($P < 0.05$). In the same percentage of cyanobacteria, *C. raciborskii* exerted a less feeding inhibition than the two *Microcystis* strains on the survivorship, total number of offspring, net production rate and intrinsic rate of increase (r) of the *D. similoides*. *D. similoides* fed with 100% *C. raciborskii* had a lifespan of 19 d, the maximal body length of 1.68 mm, and a total number of offspring of 2, all higher than those fed with 100% toxic (5.8 d, 1.20 mm, 0) and non-toxic *Microcystis* (5.8 d, 1.19 mm, 0). Our study indicated that the occurrence of *M. aeruginosa* and *C. raciborskii* can inhibit growth and reproduction of *D. similoides*. Moreover, *Microcystis* is more harmful to *D. similoides* than *C. raciborskii*.

Keywords *Daphnia similoides*; *Microcystis aeruginosa*; *Cylindrospermopsis raciborskii*; eutrophication

收稿日期 Received: 2014-09-11 接受日期 Accepted: 2014-10-29

*国家自然科学基金项目 (31070416) 和广东省水科技创新项目 (2011-02) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31070416) and the Guangdong Innovation Foundation for Water Science and Technology (2011-02)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: tleilam@jnu.edu.cn)

浮游动物是淡水生态系统中的初级消费者,主要以浮游植物为食,同时也是鱼类等较高营养级生物的捕食对象,因此浮游动物在淡水生态系统食物链中起着承上启下的作用。水华蓝藻在高温强光照的天气聚集在水体表层,吸收了大部分的光照,在自身大量繁殖的同时抑制其它藻类的生长,成为富营养化水体的优势类群,从而对水体初级生产力产生深远影响^[1]。同时,水华蓝藻释放的次级代谢产物能够影响浮游动物的群落结构。

目前已有大量有关蓝藻对浮游动物影响的研究,特别是对蚤属(*Daphnia*)的实验研究。蓝藻和绿藻是天然水体中蚤属重要的食物来源。多数蓝藻通常被认为是低质量食物,对蚤属动物的生长具有强烈的抑制作用,这主要是因为许多蓝藻能产生对蚤属具有致死作用的毒素^[3],部分蓝藻所含臭味物质也会抑制蚤属的滤食^[4-5];另外,蓝藻缺乏一些蚤类所必需的脂肪酸和脂类等营养成分^[6-7],以及某些蓝藻具有的丝状或群体等形态特征也能抑制蚤类对其进行摄食和消化吸收。

拟同形蚤属枝角目(*Cladocera*)蚤科蚤属,在我国、湖泊和水库广泛分布,但过去一直被误命名为隆线蚤^[8],目前对该种的研究还很少。已有报道硝酸盐对拟同形蚤的寿命、蜕皮次数、体长生长、产幼量等生活史参数有明显的抑制作用^[9];10-35℃范围内,拟同形蚤的成熟个体龄期数、累计产幼量、寿命、体长均与温度的升高呈负相关^[10]。微囊藻属是蓝藻水华中最常见的优势种群之一,在广东典型中小型水库广泛分布^[11],水体中微囊藻水华种群一般都由有毒和无毒微囊藻组成^[12],而拟柱孢藻是一类具有潜在产毒能力和较强适应性的丝状蓝藻^[13],被认为是热带亚热带地区的特征性种群,已发现其种群分布由热带亚热带地区向温带地区扩散^[14]。本研究选择两株单细胞微囊藻和一株丝状拟柱孢藻分别喂食分离自南亚热带水库的拟同形蚤,了解拟同形蚤对两种蓝藻的摄食偏好,通过分析微囊藻和拟柱孢藻对拟同形蚤生长繁殖的影响差异,探讨不同蓝藻水华类型下该蚤种群变化机理。

1 材料与方法

1.1 藻株来源和培养

有毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB905)和无毒铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*, FACHB469)由中国科学院水生生物研究所藻种库提供。由于实验室长期培养,两藻株均为单细胞状态,细胞直径为4-5 μm。丝状蓝藻拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*, N8)分离自广东省镇海水库,宽5 μm左右,长30-400 μm。小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*, CP)由暨南大学水生生物研究中心藻种库提供,直径约为4.1 μm。4株藻均接种于BG11培养基中,置于(25±1)℃恒温光照培养箱中培养,光照强度为60 μmol m⁻² s⁻¹,光暗周期为16 h:8 h。

1.2 不同食物浓度的配置

取一定体积的藻液,用BG11培养基稀释成5个等体积不同浓度的稀释藻液,并在680 nm下测对应浓度的吸光值,经GF/F膜抽滤后,置于60℃烘至恒重后,用CHHS/O元素分析

仪测其有机碳含量,得出吸光值与有机碳含量的标准曲线。实验期间,每天测量藻液在680 nm下的吸光值,根据标准曲线换算成有机碳浓度。

将经过3 d以上曝气处理的自来水依次用孔径为1.2 μm的玻璃纤维膜和0.45 μm的醋酸纤维膜过滤,并将滤液置于(25±1)℃的培养箱静置2 d。用该过滤水分别稀释小球藻、有毒微囊藻、无毒微囊藻、拟柱孢藻,分别得到总有机碳浓度为1.0 mg/L的小球藻稀释液、有毒微囊藻稀释液、无毒微囊藻稀释液、拟柱孢藻稀释液。用上述3株蓝藻稀释液分别与小球藻稀释液按4:0、3:1、2:2、1:3配比,获得蓝藻比例分别为100%、75%、50%、25%的实验培养液。

1.3 实验方法

从采集的拟同形蚤样品中挑出活泼、发育正常的个体,以总有机碳浓度1.0 mg/L的小球藻为食物,在温度(25±1)℃,光照强度60 μmol/m²/s,光照周期为L:D=16 h:8 h的培养条件下,进行多代孤雌生殖驯化后获得龄期不超过24 h新生幼蚤780只,并随机测量其中78只体长,以此估算整体平均体长。将幼蚤分别放入注有120 mL培养液的容量为150 mL烧杯,每个烧杯中放10只幼蚤,每个浓度设6个平行。

实验期间,所有烧杯每天更换培养液一次,同时在解剖镜下测量蚤体大小、死亡个体数、幼体个数,同步记录首次怀卵时间、首次产幼时间、产幼量(新生幼体移出烧杯,不与母体同养)。根据以上数据编制拟同形蚤的生命表,包括种群大小、特定年龄生殖率、存活率、净生殖率 R_0 、世代时间 G 和内禀增长率 r ,同时计算寿命、累积产幼量。其中,

$$R_0 = \sum_{x=1}^n l(x)b(x), \quad G = \frac{\sum_{x=1}^n l(x)b(x)x}{\sum_{x=1}^n l(x)b(x)},$$

式中 x 表示龄期, $l(x)$ 为每个龄期的存活率, $b(x)$ 为在第 x 龄期内每个母体产幼个数。并根据欧拉公式 $\sum_{x=1}^n e^{-rx}l(x)b(x)=1$,求得内禀增长率 r 。

实验得到数据采用SPSS16.0软件分析,方差分析(ANOVA)中 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 有毒微囊藻、无毒微囊藻和拟柱孢藻对拟同形蚤生长的影响

与单独喂食小球藻(100%)相比,添加蓝藻的混合食物均对拟同形蚤生长产生不同程度的抑制作用,表现为蚤体的体长增长率均随3株蓝藻浓度的增加而降低(图1);当用100%比例的微囊藻喂食时,拟同形蚤的体长增长基本停滞(图1A和1B);在100%的拟柱孢藻组中,蚤体的体长有一定的生长,但也显著低于其它实验组(图1C)。蚤体的最大体长在100%小球藻组中约为2.85 mm,蓝藻的添加使最大体长显著下降($P<0.05$),且下降幅度随浓度的升高而增加,有毒微囊藻和无毒微囊藻添加组在25%浓度下分别达到最大值1.84 mm和2.43 mm,拟柱孢藻添加组的最大体长(2.29 mm)则出现在50%浓度下(图2A)。

食物中蓝藻比例的增加对拟同形蚤的寿命也产生显著影响 ($P < 0.05$), 含有毒微囊藻混合食物使蚤体发生急性死亡, 4个浓度下的蚤体寿命均不超过12 d; 在含无毒微囊藻喂食组中, 25%的低浓度对蚤体寿命完全无影响, 达到45.7 d,

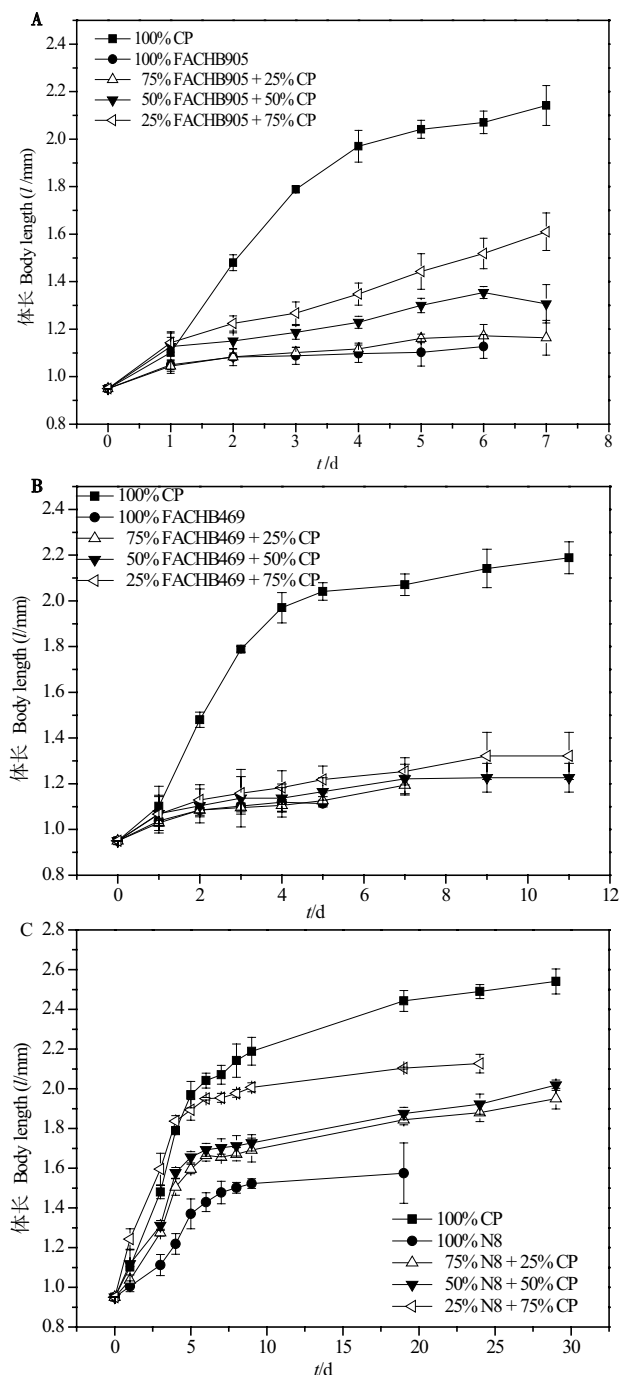


图1 单独喂食小球藻以及有毒微囊藻、无毒微囊藻、拟柱孢藻分别与小球藻按4个比例混合的食物对拟同形蚤体长生长率的影响。CP: 小球藻; FACHB905: 有毒微囊藻; FACHB469: 无毒微囊藻; N8: 拟柱孢藻。

Fig. 1 Body length growth rate of *Daphnia similoides* fed with sole diet of *Chlorella pyrenoidosa*, and diet of *C. pyrenoidosa* mixed with toxic *Microcystis aeruginosa*, non-toxic *M. aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii* in four ratios. CP: *C. pyrenoidosa*; FACHB905: toxic *M. aeruginosa*; FACHB469: non-toxic *M. aeruginosa*; N8: *C. raciborskii*.

但随着无毒微囊藻浓度的升高, 蚤体寿命急剧下降, 在75%和100%浓度组中均不超过12 d; 整体而言, 拟柱孢藻对拟同形蚤寿命的影响要低于微囊藻, 即使在100%拟柱孢藻组中, 蚤体寿命也可达到19 d (图2B)。与单独喂食小球藻相比, 添加不同比例的3株蓝藻均减少蚤体的存活率, 而在相同浓度下, 3株蓝藻对蚤体存活率的抑制作用由大到小依次为有毒微囊藻、无毒微囊藻和拟柱孢藻 (图3)。

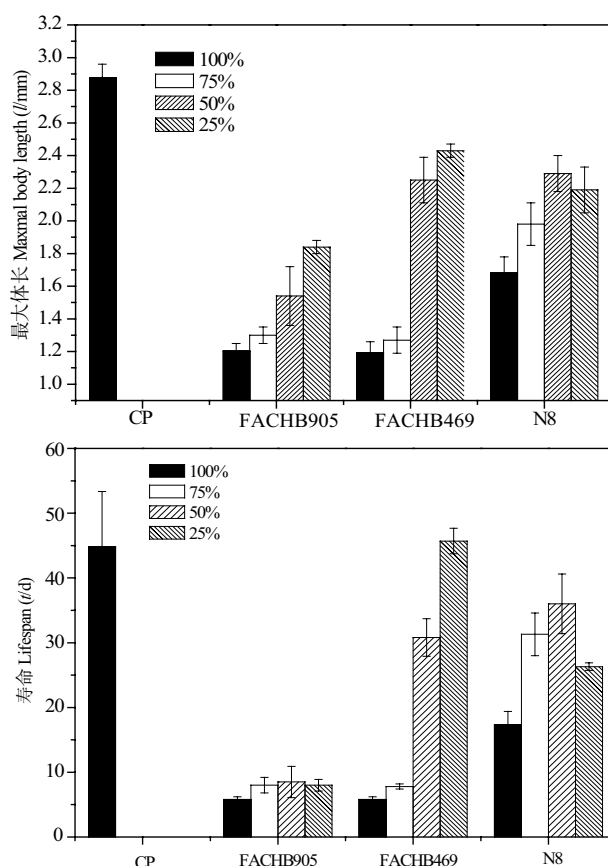


图2 单独喂食小球藻以及有毒微囊藻、无毒微囊藻、拟柱孢藻分别与小球藻按4个比例混合的食物对拟同形蚤最大体长、寿命的影响。CP: 小球藻; FACHB905: 有毒微囊藻; FACHB469: 无毒微囊藻; N8: 拟柱孢藻。

Fig. 2 Maximal body length and life span of *Daphnia similoides* fed with sole diet of *Chlorella pyrenoidosa*, and diet of *C. pyrenoidosa* mixed with toxic *Microcystis aeruginosa*, non-toxic *M. aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii* in four ratios. CP: *C. pyrenoidosa*; FACHB905: toxic *M. aeruginosa*; FACHB469: non-toxic *M. aeruginosa*; N8: *C. raciborskii*.

2.2 有毒和无毒微囊藻、拟柱孢藻对拟同形蚤繁殖的影响

单独喂食小球藻的拟同形蚤累计产幼量可达715.33只, 净生殖率达到71.55, 内禀增长率为0.315, 与之相比较, 蓝藻与小球藻按不同比例混合的食物均对拟同形蚤的繁殖产生抑制作用, 表现为蚤体累计产幼量、净生殖率、内禀增长率均随两株微囊藻和拟柱孢藻浓度的升高而降低 (表1)。喂食有毒微囊藻的蚤体在50%、75%、100%累计产幼量为0, 仅在25%浓度下产生4个幼体。蚤体在75%和100%无毒微囊

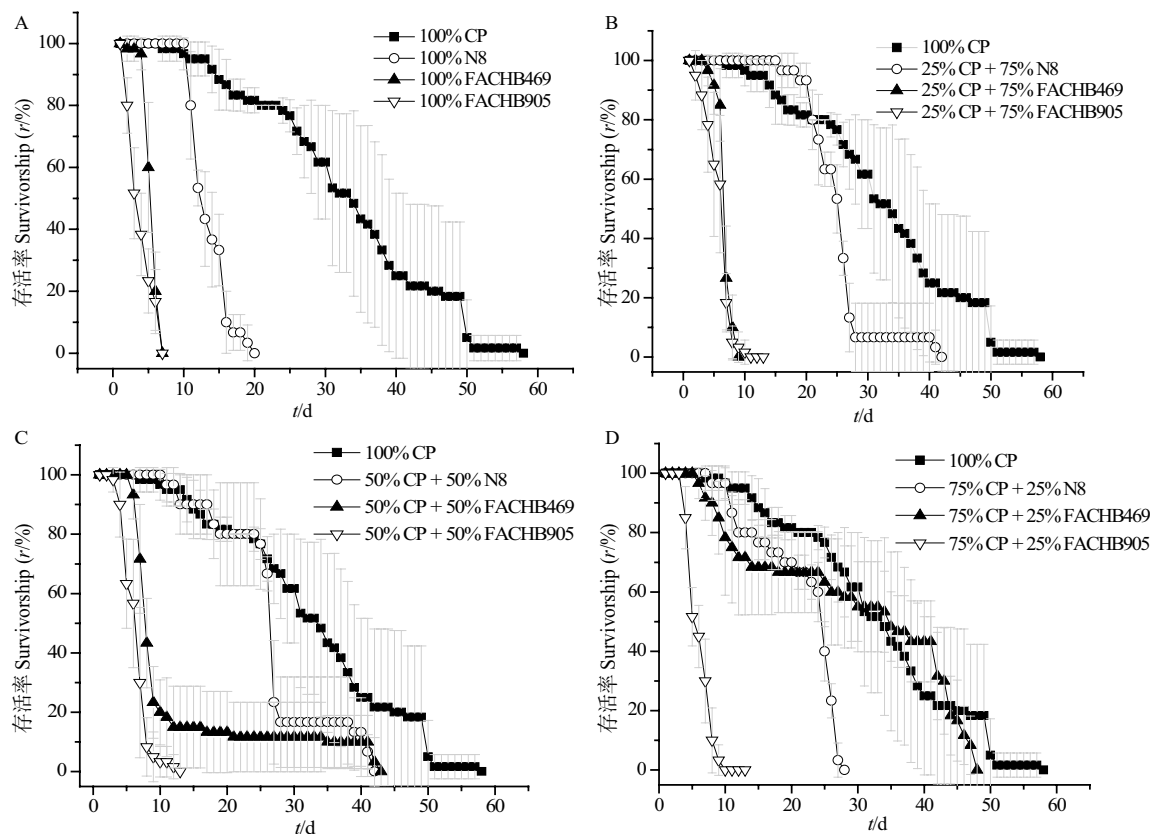


图3 同一食物浓度比例下喂食小球藻、有毒微囊藻、无毒微囊藻、拟柱孢藻对拟同形溞存活率的影响对比。CP: 小球藻; FACHB905: 有毒微囊藻; FACHB469: 无毒微囊藻; N8: 拟柱孢藻。
Fig. 3 Survivorship of *Daphnia similoides* fed with *Chlorella pyrenoidosa*, toxic *Microcystis aeruginosa*, non-toxic *M. aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii* in the same concentration. CP: *C. pyrenoidosa*; FACHB905: toxic *M. aeruginosa*; FACHB469: non-toxic *M. aeruginosa*; N8: *C. raciborskii*.

表1 不同浓度食物喂养下拟同形溞的繁殖参数
Table 1 Reproduction parameters of *D. similoides* fed with different food concentration

繁殖参数 Parameter of reproduction	CP	FACHB905				FACHB469				N8			
	100%	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
首次怀卵个体体长 Body length at maturity (l/mm)	1.99 ± 0.07	--	--	--	1.61 ± 0.08	--	--	1.84 ± 0.04	1.63 ± 0.04	1.50 ± 0.02	1.66 ± 0.02	1.70 ± 0.05	1.89 ± 0.05
幼仔首次出生时间 Age at first reproduction (t/mm)	5.16 ± 0.40	--	--	--	7 ± 1	--	--	22.5 ± 5.8	16.5 ± 1.04	8 ± 1	7 ± 0	7 ± 0	5 ± 0
累计产幼量 Total number of offspring	715.33 ± 10.9	0	0	0	4 ± 1	0	0	5.25 ± 3.20	109 ± 25.6	2 ± 1	64 ± 19.47	97.67 ± 21.73	256.67 ± 46.7
净生殖率 (R_0) Net reproduction rate	71.55 ± 12.2	--	--	--	0.067 ± 0.02	--	--	0.35 ± 0.32	11.5 ± 2.87	0.2 ± 0.1	6.4 ± 1.9	9.8 ± 2.2	25.7 ± 4.7
世代时间 (G/d) Generation time	22.09 ± 2.02	--	--	--	7 ± 2.4	--	--	25.89 ± 3.25	29.18 ± 0.89	8.22 ± 1.07	10.93 ± 0.96	13.32 ± 0.69	12.52 ± 1.18
内禀增长率 (r) Intrinsic rate of increase	0.315 ± 0.03	--	--	--	-0.387 ± 0.04	--	--	0.029 ± 0.02	0.085 ± 0.01	-0.135 ± 0.10	0.195 ± 0.03	0.203 ± 0.02	0.348 ± 0.01

--: 无该值。CP: 小球藻; FACHB905: 有毒微囊藻; FACHB469: 无毒微囊藻; N8: 拟柱孢藻。
--: no data available. CP: *Chlorella pyrenoidosa*; FACHB905: toxic *Microcystis aeruginosa*; FACHB469: non-toxic *M. aeruginosa*; N8: *Cylindrospermopsis raciborskii*.

藻浓度下也不产生幼体,最高累计产幼量109.6出现在25%浓度下,净生殖率和内禀增长率分别为12.52和0.085。喂食拟柱孢藻的蚤体在4个浓度下均能产生幼体,在25%浓度下的累计产幼量达到最大值256.67,净生殖率和内禀增长率分别为25.7和0.348,当拟柱孢藻升高至100%时,累计产幼量仅为2个,内禀增长率为负值-0.135。结果表明,3株蓝藻均能抑制拟同形蚤的繁殖,但三者的能力存在显著差异($P < 0.05$),有毒微囊藻的抑制作用最强,其次为无毒微囊藻,拟柱孢藻在三者中最弱。

3 讨论

本研究结果表明,喂食微囊藻或拟柱孢藻导致拟同型蚤的个体生长慢,寿命短,繁殖力显著下降,这表明两种蓝藻均是低质量食物^[15],对滤食动物的生长产生了强烈的抑制作用。这种抑制作用在不同蓝藻类型间存在显著差异,在本研究中,在相同蓝藻浓度下,拟柱孢藻混合食物对蚤体存活率、累计产幼量和内禀增长率的影响均高于有毒和无毒微囊藻,因此相较于单细胞微囊藻,丝状拟柱孢藻的存在更利于蚤体的生长和繁殖。有研究发现群体蓝藻或丝状蓝藻更适于滤食性蚤属的生长繁殖^[16]。一般而言,枝角类的许多种类作为典型的滤食性浮游动物,仅对食物大小进行选择,而无法选择食物质量^[17];因受口径大小限制,蚤属通常仅能有效滤食小于40 μm 的食物^[18]。本研究实验所用的单细胞微囊藻直径为4-5 μm ,拟柱孢藻丝体长度在30-400 μm 之间,因此蚤属对单细胞微囊藻的滤食量应大于丝状蓝藻,而对单细胞微囊藻较高的滤食量会导致枝角类的生长繁殖受到显著抑制^[19]。过多的摄食微囊藻可能导致拟同型蚤营养缺乏^[20],同时微囊藻不易被大型蚤消化吸收^[21],因而使得微囊藻喂食组的生长和繁殖能力显著低于拟柱孢藻组。

拟同型蚤的体长均随有毒和无毒微囊藻浓度的升高而降低,这与已有的研究结果^[22-23]一致。但有微囊藻对拟同型蚤生长的影响显著高于无毒微囊藻,这种效应在25%微囊藻组中尤为明显,25%浓度的有毒微囊藻导致拟同型蚤发生急性死亡,而喂食含25%无毒微囊藻的混合食物则基本不影响其存活率,内禀增长率为0.085,即在此浓度下,拟同型蚤能获得种群发展。有人认为这是因为有毒微囊藻进入蚤体消化道后会释放一些有害的次级代谢产物如微囊藻毒素所致^[24]。然而100%有毒和100%无毒微囊藻实验组的蚤体最大体长和寿命却基本相同,这表明有毒和无毒微囊藻作为食物在本质上是类似的,已有研究也表明,有毒微囊藻PCC7806和它的无毒突变株对*Daphnia*的生长和存活的影响完全没有差异,微囊藻毒素并不是导致蚤体生长状态差的原因,微囊藻可能含有其它对滤食动物有毒的物质^[25-26]。因此拟同型蚤的生长在有毒微囊藻与小球藻的混合食物组中显著低于其它实验组的原因还需进一步探讨。

拟柱孢藻与小球藻混合食物喂食实验中,拟同型蚤体长增长率和内禀增长率等随拟柱孢藻浓度升高而降低,有研究者认为丝状蓝藻会堵塞蚤体的滤食系统,蚤体清除堵塞物需要消耗能量,从而降低个体生长率^[27]。但拟同型蚤平均寿命在25%为26.3 d,显著低于50%和75%组的36 d和31.3

d。有研究表明,对于同种蚤体,丝状蓝藻对个体较大蚤体的抑制作用大于小个体蚤体。个体越大的蚤体对丝状蓝藻的滤食量越大,这导致了更多的丝状蓝藻堵塞蚤体滤食器,蚤体寿命因此降低^[28-29]。本研究实验中喂食25%拟柱孢藻组中的拟同型蚤个体明显大于喂食其它拟柱孢藻混合食物喂食组。拟同型蚤的内禀增长率仅在100%喂食下为负数(-0.135),而在25%-75%浓度范围中均具有较高的内禀增长率,分别为0.195、0.203、0.348,种群在该浓度范围内可获得快速增长。这与Maria Carolina用拟柱孢藻和栅藻混合食物喂养大型蚤的研究结果^[30]相似,进一步证实拟柱孢藻仅在暴发形成水华时才对大型蚤种群发展的造成危害。

浮游动物的群落结构、数量变化以及优势种、污染指示种的变化都可以反映水体富营养化水平,对蓝藻水华的爆发起一定的预警作用^[31]。研究表明当蓝藻生物量低于一定临界值(该临界值与蓝藻种类、形态、生长状态和枝角类的形态大小等有关)时,大型枝角类如大型蚤可以通过滤食蓝藻而有效减少蓝藻生物量而获得生长繁殖,在枝角类种群的增殖、营养盐和光照的减少等合适条件下,蓝藻水华则可以缓解^[32]。本研究实验中,在丝状拟柱孢藻和无毒微囊藻无机碳分别小于75% (0.75 mg/L) 和50% (0.5 mg/L) 时,拟同型蚤内禀增长率分别大于0.195和0.029,蚤体种群可以获得发展。说明在一定浓度蓝藻范围内,拟同型蚤能控制这两种蓝藻生物量。因此,减少浮游动物捕食者如鱼类的同时,在蓝藻水华爆发前保持较高的枝角类种群密度,则可以在蓝藻生物量达到临界点之前抑制蓝藻水华。

参考文献 [References]

- Gulati RD. Structural and grazing responses of zooplankton community to biomanipulation of some Dutch water bodies [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **200** (1): 99-118
- Nanazato T, Yasuno M. Population dynamics and production of cladoceran zooplankton in the highly eutrophic Lake Kasumigaura [J]. *Hydrobiologia*, 1985, **124** (1): 13-22
- Demott WR, Muller-Navarra DC. The importance of highly unsaturated fatty acids in zooplankton nutrition: evidence from experiments with *Daphnia*, a cyanobacterium and lipid emulsions [J]. *Freshwat. Biol* 1997, **38** (3): 649-664
- Nizan S, Dimentam C, Shilo M. Acute toxic effects of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on *Daphnia magna*. *Limnol Oceanogr*, 1986, **31** (3): 497-502
- Haney JF, Sasner J, Ikawa M. Effects of products released by *Aphanizomenon flos-aquae* and purified saxitoxin on the movements of *Daphnia carinata* feeding appendages. *Limnol Oceanogr*, 1995, **40** (2): 263-272
- Müller N, Dörthe C. Biochemical versus mineral limitation in *Daphnia*. *Limnol Oceanogr*, 1995, **40** (7): 1209-1214
- Von E, Tania W. Supplementation of cyanobacterial food with polyunsaturated fatty acids does not improve *Daphnia* growth. *Limnol Oceanogr*, 2001, **46** (6): 1552-1558
- 顾杨亮, 徐磊, 林秋奇, Dumont HJ, 韩博平. 新亚种—中华拟同形蚤

- (*Daphnia similoides sinensis*) [J]. 生态科学, 2013, **32** (3): 308-312 [Gu YL, Xu L, Lin QQ, Dumont HJ, Han BP. A new subspecies of *Daphnia*: *Daphnia similoides sinensis* [J]. *Ecol Sci*, 2013, **32** (3): 308-312]
- 9 Xiang F, Yang W. Acute toxicity of nitrite and ammonia to *Daphnia similoides* of different developmental stages: using the modified Gaussian model to describe [J]. *Bull Environ Contamin Toxicol*, 2010, **84** (6): 114-121
- 10 Chen M, Chen F, Li J. Effect of Temperature and Food on Development and Growth of *Daphnia similoides* (Cladocera: Daphniidae) from Lake Donghu [J]. *J Freshwater Ecol*, 2011, **24** (4): 545-551
- 11 黄成. 广东省典型中小型水库富营养化与蓝藻种群动态特征[D]. 广州: 暨南大学, 2011 [Huang C. Eutrophication and dynamics of cyanobacterial populations in small and medium sized reservoirs Guangdong province [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011]
- 12 李大命, 孔繁翔, 张民. 太湖和巢湖夏季蓝藻水华期间产毒微囊藻和非产毒微囊藻种群丰度的空间分布[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **7** (4): 480-485 [Li DM, Kong FX, Zhang M. Spatial changes in abundance of microcystin-producing and non-microcystin producing *Microcystis* populations in the Taihu lake and the Chaohu lake during cyanobacterial bloom period [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **7** (4): 480-485]
- 13 Padisák J. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptive cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology [J]. *Archiv Hydrobiol Supplementband Beitrage*, 1997, **107** (4): 563-593
- 14 Briand JF, Lebourlangier C, Humbert JF. *Cylindrospermopsis raciborskii*(cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: selection, wide physiological tolerance or global warming? [J]. *J Phycol*, 2004, **40** (2): 231-238
- 15 Gulati R, Demott W. The role of food quality for zooplankton: remarks on the state-of-the-art, perspectives and priorities [J]. *Freshwater Biol*, 1997, **38** (3): 753-768
- 16 Chan F, Pace ML, Howarth RW. Bloom formation in heterocystic nitrogen-fixing cyanobacteria: the dependence on colony size and zooplankton grazing [J]. *Limnol Oceanogr*, 2004, **49** (6): 2171-2178
- 17 戴曦, 陈非洲. 太湖群体微囊藻对同形溞(*Daphnia similis*)生长和繁殖影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2012, **24** (1): 149-155 [Dai X, Chen FZ. Effect of colonial *Microcystis* spp. on the growth and reproduction of large-sized cladoceran *Daphnia similis* in Lake Taihu [J]. *J Lake Sci*, 2012, **24** (1): 149-155]
- 18 Burns CW. The relationship between body size of filter-feeding cladoceran and the maximum size of particle ingested [J]. *Limnol. & Oceanogr*, 1968, **13** (4): 675-678
- 19 Da Silva Ferrão-Filho A, Azevedo SMFO. Effects of unicellular and colonial forms of toxic *Microcystis aeruginosa* from laboratory cultures and natural populations on tropical cladocerans [J]. *Aquatic Ecol*, 2003, **37** (1): 23-35
- 20 Demott W. Foraging strategies and growth inhibition in five *Daphnids* feeding on mixtures of a toxic cyanobacterium and a green alga. *Freshw Biol*, 1999, **42** (2): 263-274
- 21 Hanazato T, Yasuno M. Evaluation of *Microcystis* as food for zooplankton in a eutrophic lake [J]. *Hydrobiologia*, 1987, **144** (3): 251-259
- 22 李效宇, 张志娟, 李磊. 有毒和无毒微囊藻对大型溞生长和繁殖的影响[J]. 水生生物学报, 2009, **33** (6): 1198-1201 [Li XY, Zhang ZJ, Li L. Effect of *Microcystis* on the growth and reproduction of *Daphnia magna* [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2009, **33** (6): 1198-1201]
- 23 BP H, Lin X, Lei L, Gu JG. Survivals of *D. galeata* in sub-tropical reservoirs: harmful effects of toxic cyanobacteria in food source [J]. *Ecotoxicology*, 2012, **21** (6): 692-705
- 24 Wolfe GV. The chemical defense ecology of marine unicellular plankton: constraints, mechanisms, and impacts. *Biol Bull*, 2000, **198** (2): 225-244
- 25 Lüring M. *Daphnia* growth on microcystin-producing and microcystin-free *Microcystis aeruginosa* in different mixtures with the green alga *Scenedesmus obliquus* [J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, **48** (6): 2214-2220
- 26 Semyalo R, Rohrlack T, Larsson P. Growth and survival responses of a tropical *Daphnia* (*Daphnia lumholtzi*) to cell-bound microcystins [J]. *J Plankton Res*, 2009, **31** (8): 827-835
- 27 Porter KG, Gerritsen J, Orcutt JD. The effect of food concentration on swimming patterns, feeding behavior, ingestion, assimilation, and respiration by *Daphnia* [J]. *Limnol Oceanogr*, 1982, **27** (5): 935-949
- 28 Hawkins PR, Lampert W. The effect of *Daphnia* body size on filtering rate inhibition in the presence of a filamentous cyanobacterium [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **34** (6): 1084-1089
- 29 Gliwicz ZM, Lampert W. Food thresholds in *Daphnia* species in the absence and presence of bluegreen filaments [J]. *Ecology*, 1990, **71**: 691-702
- 30 Soares MCS, Lüring M, Panosso R. Effects of the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* on feeding and life-history characteristics of the grazer *Daphnia magna* [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2009, **72** (4): 1183-1189
- 31 徐家铸, 苏翠荣. 浮游动物群落和数量的变化与水质污染的关系[J]. 南京师大学报, 1980 (2): 10 [Xu JZ, Su CR. The relation between number and community of the zooplankton and water pollution [J]. *J Nanjing Norm Univ*, 1980 (2): 10
- 32 Gliwicz ZM. Why do cladocerans fail to control algal blooms? [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **200** (1): 83-97]