

2 种潮间带大型海藻种间竞争作用对 UV-B 辐射增强的响应

李丽霞^{1,2}, 董开升¹, 唐学玺^{1*}

(1. 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003; 2. 烟台大学化学生物理工学院, 烟台 264005)

摘要: 选择 2 种代表性的潮间带大型海藻孔石莼 (*Ulva pertusa*) 和蜈蚣藻 (*Grateloupia filicina*), 采用单独培养和共同培养的方法, 以生物量为主要测定指标, 研究了二者种间竞争关系及这种关系在 UV-B 辐射增强时的响应趋势。结果表明, 孔石莼和蜈蚣藻二者的种间竞争同时包含营养竞争和相生相克 2 种机制, 试验中营养充足及营养限制的共养处理下孔石莼特定生长率是蜈蚣藻相应值的 2.54 和 2.47 倍, 蜈蚣藻在竞争关系中处于劣势; UV-B 辐射对单独培养的孔石莼和蜈蚣藻的生长均有抑制作用, 且随着 UV-B 胁迫时间延长及辐射剂量的增加, 抑制作用愈加显著; 共同培养条件下, 低剂量 [$1.6 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]、中剂量 [$4.8 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 的 UV-B 辐射时孔石莼虽占据竞争优势, 但其种群竞争能力有弱化趋势, 孔石莼和蜈蚣藻的生物量比共养对照分别下降 6.81%、3.88% 和 10.47%、6.98%, 二者的种间竞争趋向均衡; 12d 时高剂量 [$9.6 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] UV-B 辐射使孔石莼的生物量下降 13.09%, 而蜈蚣藻生物量降低更多达 14.72%, 从而导致孔石莼在高剂量辐射处理中的优势地位更趋于明显, 因此 UV-B 辐射增强可改变共培养体系中孔石莼和蜈蚣藻种间竞争的关系, 且对应于不同 UV-B 辐射剂量其表现不同; 长期 UV-B 辐射可能会影响孔石莼和蜈蚣藻产生克生物质的代谢过程。

关键词: 营养竞争; 克生物质; UV-B 辐射; 抑制作用; 生物量; 孔石莼; 蜈蚣藻

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2766-07

Response of Interspecific Competition Between *Ulva pertusa* and *Grateloupia filicina* to UV-B Irradiation Enhancement

LI Li-xia^{1,2}, DONG Kai-sheng¹, TANG Xue-xi¹

(1. College of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. College of Chemistry Engineering and Biological Science, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The interspecific competition between *Ulva pertusa* and *Grateloupia filicina* and its response to the UV-B irradiation enhancement were analyzed using mono-culture and co-culture methods. The study adopted reasonable experimental design and took biomass as the main examined index. Results showed that the relation of interspecific competition included both allelopathy effect and nutrient competition. Specific growth rates of *U. pertusa* under treatment with abundant nutrition and limited nutrition was 2.54 and 2.47 times of those of *G. filicina*. Thus, compared to *U. pertusa*, *G. filicina* was in inferior position. UV-B irradiation could inhibit the growth of *U. pertusa* and *G. filicina* under the condition of mono-culture. The higher the dosage and the longer exposure of UV-B irradiation were, the more significant the inhibitive effect was. When they were cultured together, low dosage [$1.6 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] and medium dosage [$4.8 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] of UV-B irradiation reduced the competitive ability of *U. pertusa*, and weights of *U. pertusa* and *G. filicina* declined 6.81% and 3.88% in low dosage, and 10.47% and 6.98% in medium dosage, respectively. So the relation of interspecific competition tended to be at a balanced level even though *U. pertusa* was still the dominant algae. However, on the 12th day, weight of *U. pertusa* decreased by 13.09%, but the value of *G. filicina* was 14.72%, which was higher than that of *U. pertusa*. Therefore, high dosage [$9.6 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] of UV-B irradiation had more serious inhibitive effect on *G. filicina*, and competitive dominant position of *U. pertusa* tended to be more obvious. Thus, UV-B changed the relation of competitive balance of *U. pertusa* and *G. filicina*, which changed along with the dosage of UV-B. Moreover, UV-B irradiation might influence the metabolism of the allelochemicals produced by *U. pertusa* and *G. filicina* in a long time.

Key words: nutrient competition; allelochemicals; UV-B irradiation; inhibition; biomass; *Ulva pertusa*; *Grateloupia filicina*

平流层中臭氧层的减薄是当今最引人注目的全球性重大环境问题之一。迄今, 臭氧层的侵蚀和破坏仍在日渐加重, 臭氧层的损耗使到达地面的紫外线, 尤其是对生物具严重损伤作用的紫外线 B 波段 (UV-B) 的辐射增强, 从而对全球产生明显的生态学和生物学效应^[1,2]。

据评估报告指出, 目前大气臭氧层的破坏使到

达地表的太阳紫外辐射比 1980 年前增加了 6% ~ 14%^[3], 而基于一个全球气候变化的模型预测, 最严重的臭氧层衰减将在 2010 ~ 2019 年发生^[4], 因此,

收稿日期: 2007-10-29; 修订日期: 2008-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270258); 教育部新世纪优秀人才计划项目 (NCET-05-0597)

作者简介: 李丽霞 (1975 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋生态毒理学, E-mail: lilixianet @ 126.com

* 通讯联系人, E-mail: tangxx @ ouc.edu.cn

海洋生态系统受到紫外辐射的潜在危险性也在不断增加.潮间带是海洋生态系统和陆地生态系统的交错地带,属于生物圈中最敏感的生态系统之一.潮间带大型海藻生活于这一过渡地带,潮汐的作用会使其周期性地暴露于水陆两栖环境,由于其特殊的地理位置,必然更易受到紫外线胁迫的影响^[5].同时,处于相同或相近生态位的大型海藻间存在种间竞争现象,其达到的平衡状态可能会在紫外辐射增强时有所改变.近年来,植物间的相生相克和营养竞争作用在淡水生态系统中藻类与藻类间^[6,7],海洋微藻间^[8,9],海洋微藻与大型海藻之间^[10~12]的研究较为集中,但是对潮间带大型海藻之间的相互作用的报道尚不多见,仅 Svirski 等^[13]和 Friedlander 等^[14]的研究小组报道石莼对江蓠的生长存在抑制作用;尤其鲜见存在 UV-B 辐射时对共培养体系中各种大型藻类的生长及克生效应的影响的报道.因此,本研究拟选择 2 种代表性的大型海藻,对在共培养同时附加不同剂量 UV-B 处理对各种藻类种群生长关系、营养竞争及可能存在的克生效应作初步探索,探讨潜在的竞争优势种存在的可能性,以期对阐释海洋生态系统对 UV-B 辐射增强时的响应机制提供更多的理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料处理

试验所用的孔石莼(绿藻)和蜈蚣藻(红藻)采集自青岛太平角(36°07'N, 120°33'E),选择健康的鲜活海藻,用消毒海水反复冲洗去除杂藻、泥沙及其它附着物,再用灭菌海水漂洗 3~4 次,然后用打孔器将孔石莼在每片藻体的相近部位打成直径 1.3 cm 的圆片;蜈蚣藻用锋利刀片切取藻体顶端约 3cm 的组织,无菌培养于 f/2 培养基中,温度为 20℃ ± 0.5℃,光强为 70 μmol·(m²·s)⁻¹,光周期为 12 h:12 h,室温下预培养 1 周左右,每 2~3 d 更换 1 次海水.试验所用海水采自青岛鲁迅公园,经过 300 目筛绢和脱脂棉过滤,煮沸后冷却至室温备用.

用于海藻培养的容器为 300 mL 三角瓶.洗净的三角瓶用消毒海水反复冲洗后,再用 f/2 培养基预平衡后备用.

1.2 试验设计

1.2.1 单独培养试验

试验中设置 2 种营养盐的添加方式:A 处理组(单 A):接种前添加 f/2 营养盐,并且在试验期间内跟踪培养液中营养盐浓度的变化,每天补充 1 次适量

f/2 营养盐以消除可能的营养盐限制,控制其最终浓度为 NaNO₃-N: 100 μmol/L; NaH₂PO₄-P: 7 μmol/L; B 处理组(单 B):仅在接种前添加 f/2 营养盐,试验期间内不再补充 f/2 营养盐. 2 种大藻均单独培养,分别取预培养的孔石莼和蜈蚣藻接种于盛有 150 mL f/2 培养基的 300 mL 三角瓶中,初始接种重量均为 0.100 0 g ± 0.003 g (浓度为 0.67 g/L),每个处理 3 次重复.

1.2.2 共同培养试验

试验中设置 2 种营养盐的添加方式:A 处理组(共 A)和 B 处理组(共 B),与单独培养试验相同. 2 种大藻共同培养,取预培养的孔石莼和蜈蚣藻共同接种于 150 mL f/2 培养基的 300 mL 三角瓶中,初始接种重量均 0.100 0 g ± 0.001 g (浓度为 0.67 g/L),每个处理 3 次重复.

1.2.3 UV-B 辐射处理

试验中的 UV-B 辐射体系是采用北京曙光源厂生产的紫外 B 灯作为光源,北京师范大学生产的 UV-B 型紫外辐射强度仪测定辐射强度.紫外 B 灯用乙酸纤维素薄膜(厚度为 0.112 mm,上海生化试剂公司生产)包被,以除去 < 280 nm 的短波辐射.整个辐射装置在正式试验前需连续照射 72 h,以减小薄膜滤过作用的不稳定性.

单养试验、共养试验(只包括营养盐添加的 A 方式)的处理组接受 UV-B 辐射.辐射强度的测定值再依据 Caldwell^[15]的公式转换成生物有效辐射(biologically effective UV-B irradiation, UV-BBE).在预试验的基础上,设计 3 种不同辐射剂量的处理组:1.6 kJ·(m²·d)⁻¹ 为低剂量 UV-B 辐射(low dosage of UV-B irradiation, Luv),4.8 kJ·(m²·d)⁻¹ 为中剂量 UV-B 辐射(medium dosage of UV-B irradiation, Muv),9.6 kJ·(m²·d)⁻¹ 为高剂量 UV-B 辐射(high dosage of UV-B irradiation, Huv),对照(control check, CK)采用正常日光灯管照射.每天照射时间从 9:00 ~ 17:00.

1.3 孔石莼与蜈蚣藻重量测定

用吸水纸小心地把孔石莼与蜈蚣藻表面的水吸干后用精密度为 0.01 mg 的电子天平称重,每 3 d 称重 1 次.试验周期为 12 d.

试验结束后,按照 2 种海藻的最终湿重来计算其特定生长率(SGR),计算公式为:

$$\text{SGR}(\% \cdot \text{d}^{-1}) = \frac{(\ln W_T - \ln W_0)}{t} \times 100\%$$

式中, W_T 和 W_0 分别表示藻体的最终湿重和初始湿重(g); t 为实验周期(d).

1.4 数据处理

本试验采用 One-way ANOVA 来检验各个处理与对照组间差异的显著性,并用 SSR 检验来进行各个处理组间的多重比较,图表采用 SigmaPlot 10.0 软件绘制.

2 结果与讨论

2.1 不同营养盐添加方式下 2 种大藻的相互作用关系

2.1.1 不同处理下孔石莼生长的变化

图 1(a)表明,不同营养盐添加方式下孔石莼生长的变化不同.在单养条件下,至试验后期,B 处理中营养盐的限制使孔石莼生长幅度降低,在 9 d 和 12 d 时均与 A 处理中孔石莼的差异达到显著水平($p < 0.05$),营养限制最终使孔石莼的生物量与营养充足的对照(单 A)相比下降 4.56%.共养 A 处理中孔石莼的生长与单养 A 相比呈下降趋势,降幅为 3.04%,与单养 B 处理相比差异不大,并在 12 d 表现稍高,但其差异未能达到显著水平($p > 0.05$).共养 B 处理中孔石莼生长受到蜈蚣藻的克生效应和营养盐的双重限制,因而重量增加缓慢,生物量降幅达 13.7%,与其它处理的差异亦达到极显著水平($p < 0.01$).

2.1.2 不同处理下蜈蚣藻生长的变化

在不同营养盐添加方式,不同培养方式下蜈蚣

藻的生物量如图 1(b)所示.从中可以看出,单独培养和共培养 2 种方式下的蜈蚣藻的生长差异较大.共养 A 处理的蜈蚣藻生长受到一定的抑制,至培养 9 d 时,与单养 B 处理差异显著($p < 0.05$),与单养 A 处理差异达极显著水平($p < 0.01$),但后期 12 d 时,共培养 A 处理的蜈蚣藻仍保持较快的生长幅度,与单养条件下 B 处理的蜈蚣藻相比已没有差异,后者由于营养盐的限制作用,生长明显受抑,与单养 A 处理相比生物量降低 3.7% ($p < 0.05$).共养条件下 B 处理的蜈蚣藻生长最为缓慢,至 12 d 其生物量与单养条件下 A 处理相比下降了 8.15%,二者之间差异达到极显著水平($p < 0.01$),而与单养 B 处理及共培养 A 处理之间的差异达到显著水平($p < 0.05$).

2.1.3 蜈蚣藻和孔石莼的相生相克及营养竞争作用

综合图 1 分析,单养条件下,孔石莼和蜈蚣藻均在试验的中后期阶段受到营养盐的限制作用,表现为生物量增加缓慢;共培养条件下,在 A 处理中,由于体系中补充营养盐消除了可能的营养限制,但是二者的克生效应使孔石莼和蜈蚣藻的生长受到对方的抑制作用,在试验期内始终低于相应的单养条件下 A 处理.共培养条件下的 B 处理中,除二者之间的克生效应,孔石莼和蜈蚣藻之间还存在明显的营养竞争作用,它们共同竞争有限的营养资源,致使生长均受到显著的抑制作用,根据特定生长率(specific growth rates, SGR)来看,在起始重量相同的情况下,12d 时 A 处理下孔石莼 SGR 为蜈蚣藻 SGR 的 2.54 倍,而 B 处理下孔石莼 SGR 是蜈蚣藻相应值的 2.47 倍,孔石莼 SGR 显著高于蜈蚣藻($p < 0.01$).因此,蜈蚣藻在二者的竞争中处于劣势地位(图 2).

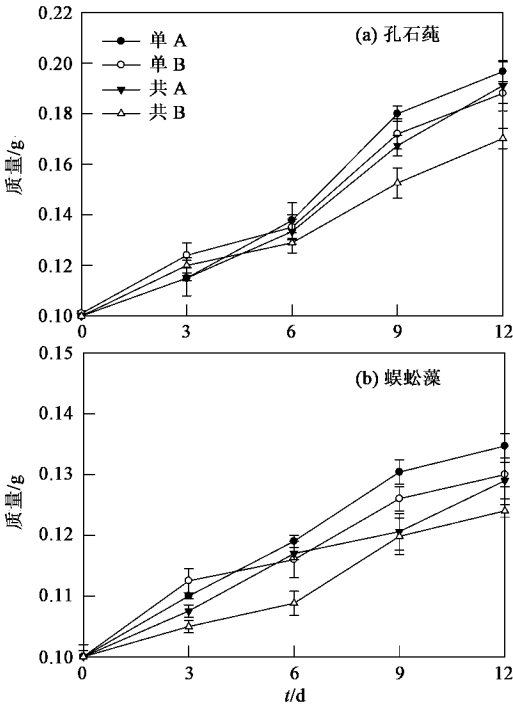


图 1 不同培养方式下 2 种大藻的生长变化

Fig.1 Growth curves of two species of macro-algae in different culture treatments

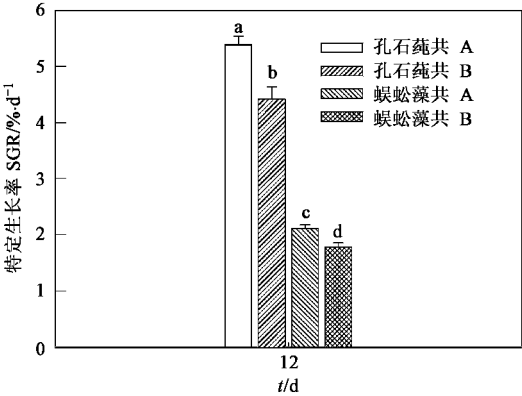


图 2 不同培养方式下孔石莼和蜈蚣藻的特定生长率

Fig.2 Specific growth rates (SGR) of *U. pertusa* and *G. filicina* in different culture treatments

一般来说,种间竞争(interspecific competition)有 2 种作用方式,或仅通过损耗有限的资源,而个体不直接相互作用,属于利用性竞争,如营养竞争;另一种是通过竞争个体间存在直接的相互作用,属于干扰性竞争,而克生作用即是一种典型的相互干扰性竞争^[16].种间竞争的结果常常具有不对称性,即一方取得优势,而另一方被抑制处于劣势甚至被消灭.本试验中所选用的 2 种潮间带大型海藻孔石莼和蜈蚣藻生态位相同,都位于潮间带的中、低潮带,可以设想,二者之间必然存在对有限资源的竞争现象.而试验结论证明了这一设想,孔石莼和蜈蚣藻之间确实存在对营养的竞争现象,因孔石莼的特定生长率显著高于蜈蚣藻,故孔石莼在种间竞争中占据优势地位,而蜈蚣藻在竞争中处于劣势地位,孔石莼具备较强的营养竞争能力,能保持较快的生长速率,这可能也是孔石莼能够形成“绿潮”的重要原因之一.

已有的研究表明,不同种群之间克生作用的相互竞争方式一般有 2 种途径:一是通过细胞的直接接触抑制;二是通过分泌次生物质来实现对其它种群的抑制作用.Nan 等^[17]研究发现大型海藻孔石莼能够显著抑制几种海洋微藻的生长.Jin 等^[18]研究发现大型海藻孔石莼能抑制亚历山大藻和赤潮异弯藻的生长.王悠等^[12]发现大型海藻孔石莼和江蓠均能影响 2 种赤潮微藻的生长,这些研究结果均通过直接的证据证明孔石莼确实可以分泌克生物质来抑制其他藻类的生长,本试验同样证实了这一规律.而大型海藻-蜈蚣藻在共培养体系中的克生作用,国内外尚未见到相关报道.本研究中,共培养的蜈蚣藻和孔石莼较易通过物理手段相互隔开(如通过尼龙网),因此,蜈蚣藻通过细胞的直接接触对孔石莼产生抑制的可能性基本可以排除,蜈蚣藻对孔石莼生长的影响是通过分泌的克生物质所产生的抑制作用,而利用蜈蚣藻和孔石莼的培养液滤液(去藻)进行交叉、单独培养时,孔石莼同样会发生生长受抑现象,这为该结论提供进一步佐证(另文发表).

2.2 单独培养条件下 UV-B 辐射对 2 种大藻生长的影响

2.2.1 UV-B 辐射对孔石莼生长的影响

不同剂量的 UV-B 辐射对孔石莼生长的影响见图 3(a).可以看出,不同剂量的 UV-B 辐射均对孔石莼的生长产生抑制作用,但试验的前期阶段(3~6 d),UV-B 辐射的抑制作用并不明显,对照与各个剂量的 UV-B 辐射处理之间的差异未达到显著水平($p > 0.05$),至试验的中后期阶段(9 d)时,UV-B 辐射对

孔石莼生长的抑制作用渐趋明显,高剂量的处理下孔石莼生长明显减缓.12 d 时,对照与低剂量的处理之间差异达显著水平($p < 0.05$),生物量下降 7.63%,而与中、高剂量的辐射处理的孔石莼之间的差异达到极显著水平($p < 0.01$),生物量降幅分别达到 10.65% 和 16.75%.

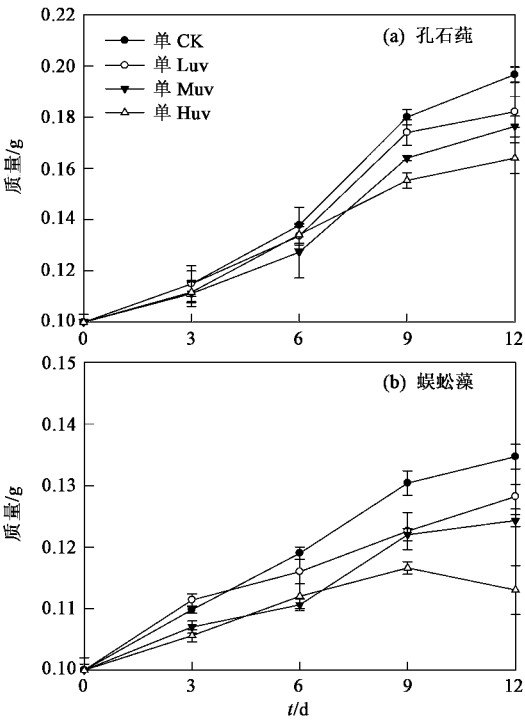


图 3 UV-B 辐射增强对 2 种大藻生长的影响
Fig.3 Effects of UV-B radiation enhancement on the growth of two species of macro-algae

2.2.2 UV-B 辐射对单独培养的蜈蚣藻生长的影响

蜈蚣藻生物量的增加对不同剂量的 UV-B 辐射的响应不同[图 3(b)].从整体趋势来看,UV-B 辐射抑制蜈蚣藻的生长,但初始阶段(3 d)时,低剂量的 UV-B 照射甚至表现出轻微的促进作用,但与对照之间差异并未达到显著水平($p > 0.05$),而与中剂量及高剂量的处理之间差异显著($p < 0.05$).随 UV-B 辐照时间的延长,其对生长的抑制作用日趋显著,至试验后期 12 d,各剂量的 UV-B 辐射对蜈蚣藻生长均有抑制作用,最终分别使蜈蚣藻生物量降低 5.19% ($p < 0.05$)、8.15% 及 16.30% (与对照之间差异达极显著水平, $p < 0.01$).可以看出,UV-B 辐射的剂量越高,其对蜈蚣藻生长的抑制作用愈明显,二者之间呈显著的正相关关系($p < 0.05$).

2.3 增强的 UV-B 对 2 种大藻生长和种间竞争关系的影响

2.3.1 共养条件下 UV-B 辐射处理对孔石莼和蜈蚣

藻种群竞争的影响

图 4 为在共培养条件下施加不同剂量的UV-B辐射处理对孔石莼和蜈蚣藻种群竞争的影响. 图 4 (a)显示, 低剂量的UV-B辐射使孔石莼和蜈蚣藻的生物量均有所降低, 12d 时分别比共养 CK 下降了 6.81% ($p < 0.05$)和 3.88% ($p > 0.05$); 图 4(b)中, 中剂量的UV-B辐射使孔石莼和蜈蚣藻的生物量下降更多, 与相应对照相比, 12d 时降幅分别为 10.47% ($p < 0.01$)和 6.98% ($p < 0.05$). 因此, 在低、中剂量的UV-B辐射时, 孔石莼相比蜈蚣藻而言, 生长受抑更为严重, 此时虽然孔石莼仍然在种间竞争中占据优势地位, 但其竞争优势呈弱化趋势, 二者的种间竞争向均衡的方向发展. 图 4(c)中可见, 高剂量的UV-B辐射对孔石莼和蜈蚣藻生长的抑制作用愈加明显, 12d 时孔石莼的生物量下降 13.09%, 而此时蜈蚣藻生物量比对照降低更多达 14.72%, 差异均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 因此, 蜈蚣藻似乎对高剂量的UV-B胁迫更加敏感, 种间竞争有向有利于孔石莼的方向发展的趋势.

UV-B辐射变化改变了不同种的生长量、营养分配及共生种的竞争能力, 使种间已达成的竞争平衡发生改变已在陆地高等植物、海洋微藻中获得较多证据支持. 不同种类植物对UV-B 辐射处理的敏感性有较大的差异, 敏感性低的种类不易受到UV-B 辐射处理的影响, 其生长速率相对提高, 而敏感性高的种类容易受到UV-B辐射处理的影响, 引起生长的减缓, 致使种群间的竞争关系发生改变, 主要表现在打破种群间原有的生长平衡状态, 生态系统优势种发生改变, 对紫外线敏感的优势种让位于对紫外线不敏感的优势种^[19-22]. 本研究中选用的孔石莼和蜈蚣藻在不同剂量UV-B辐射处理时表现不同, 在低、中剂量的UV-B辐射时, 孔石莼比蜈蚣藻生长受抑更为严重, 孔石莼的种间竞争优势被弱化, 二者的种间竞争向均衡的方向发展, 而长期、高剂量的UV-B辐射对蜈蚣藻生长的抑制作用更加明显, 生物量降低更多, 种间竞争向有利于孔石莼的方向发展. 而二者的种群竞争关系在UV-B辐射剂量不同时发生改变, 不能仅仅由蜈蚣藻相对于孔石莼二者谁对UV-B辐射更敏感加以简单判断, 推测在不同UV-B胁迫程度时, 2 种海藻被诱导不同的适应性反应或保护机制, 从而使其具备不同的抗紫外线胁迫的能力, 这一机制仍需进一步的实验验证.

Cai 等^[23]、张培玉等^[11]研究发现UV-B 辐射对单独培养时的孔石莼存在明显的抑制作用, 共同培养

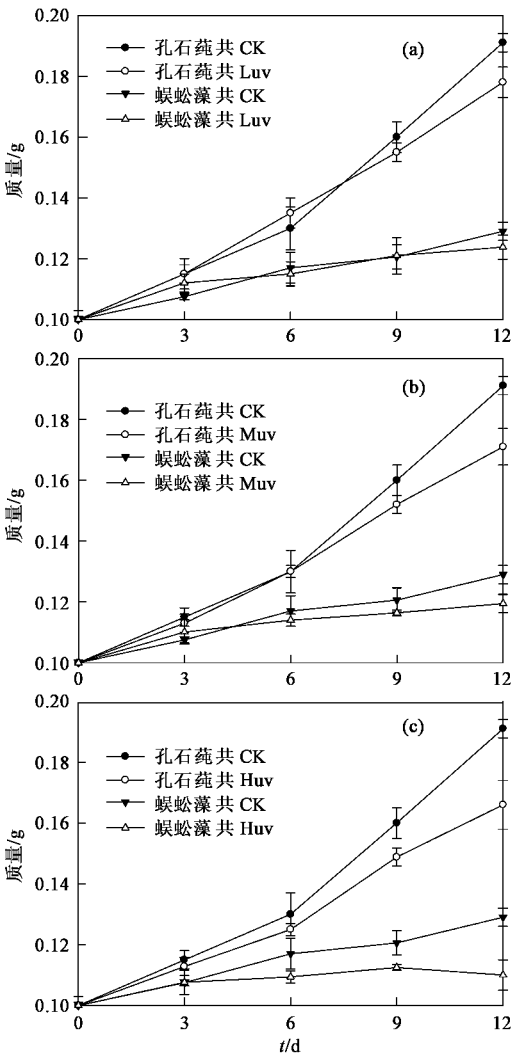


图 4 不同剂量UV-B辐射对共养的孔石莼和蜈蚣藻生长的影响

Fig.4 Effects of different dosage of UV-B radiation on the growth of *U. pertusa* and *G. filicina* in co-culture

时低剂量时孔石莼生长受到促进, 本研究结论与此基本一致. 在本试验中, 低剂量的UV-B 辐射对单独培养和共培养时蜈蚣藻、共培养时孔石莼的生长均出现短期的促进效应, 类似于“毒物的兴奋效应”^[24], 但长期UV-B辐射对植物的生长体现为抑制作用, 最终使其生物量降低是必然趋势^[25].

2.3.2 增强的UV-B对孔石莼和蜈蚣藻分泌的克生物物质的影响

由不同处理 12 d 的数据见图 5. 从中可以看出, 与单养对照相比, UV-B辐射使孔石莼和蜈蚣藻的生物量降低, 共养时由于克生物物质的抑制效应也使二者的生长速度减缓, 共培养的同时施加UV-B辐射, 二者的叠加效果应该使孔石莼和蜈蚣藻的生长降低更多(本试验中未考虑克生效应与UV-B辐射的交互

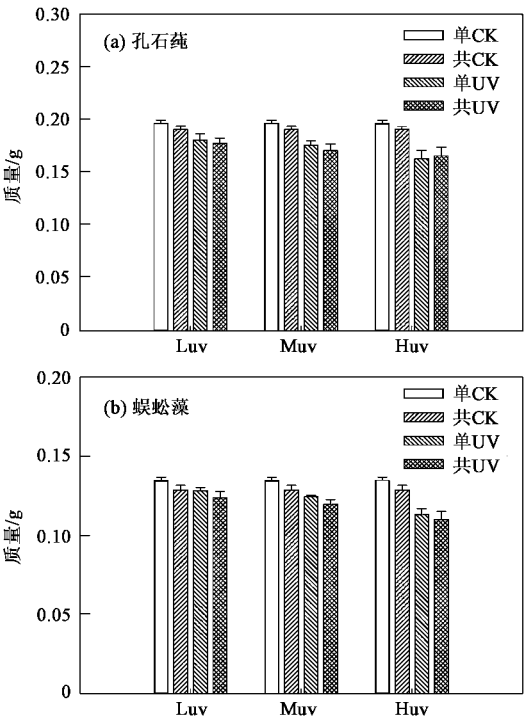


图 5 不同处理下 2 种海藻的生长变化
Fig.5 Growth response of two species of macro-algae to different treatments

效应),但在低、中剂量UV-B辐射时的孔石莼和蜈蚣藻相比单独 UV 处理下其生长受抑并未达到显著水平($p > 0.05$); 共培养同时施加高剂量UV-B辐射时,蜈蚣藻的生长没有受到显著抑制,而孔石莼的生物量甚至超过单独培养下施加紫外的处理,尽管差异并未达到显著水平($p > 0.05$). 据此结果有理由推测,长期紫外线辐射可能影响克生物质的代谢过程,使孔石莼和蜈蚣藻共培养体系中的克生物质的有效量(或者有效浓度)降低,从而使二者生长受抑的程度呈减轻的趋势,高剂量UV-B辐射时这一趋势更加明显.

南春容等^[10]研究发现潮间带的大型海藻孔石莼所产生的克生物物质是不稳定的,如在高温条件下即可失效. 在本研究中,长期的紫外线辐射,最终使孔石莼和蜈蚣藻共培养体系中的克生物质的有效量(或者有效浓度)降低,表现为影响了克生物质的代谢过程(包括体内和体外的代谢),但其具体机制,即UV-B辐射到底是抑制孔石莼和蜈蚣藻的克生物物质在体内的某些代谢途径,导致其合成或分泌受阻,分泌量减少,还是延迟分泌时间,抑或促进已分泌的克生物物质在溶液中的降解和转化,影响其在环境中的存留时间,或者是几者兼而有之,还有待于进一步的

实验探讨.

3 结论

- (1)通过合理试验设计,证明孔石莼和蜈蚣藻二者的种间竞争关系中同时存在营养竞争和相生相克 2 种机制,营养限制和克生效应使二者生长均严重受抑,这种影响是相互的,而蜈蚣藻在二者的竞争关系中处于劣势地位.
- (2)单养条件下,UV-B辐射对孔石莼和蜈蚣藻的生长均有抑制作用,并且随着辐射剂量的增加和处理时间的延长,抑制作用愈加明显.
- (3)UV-B辐射增强可改变共培养体系中孔石莼和蜈蚣藻种间竞争的关系,低、中剂量的UV-B辐射时孔石莼仍占据一定竞争优势,但种群竞争能力降低,二者的种间竞争趋向均衡;高剂量UV-B辐射对蜈蚣藻生长的抑制作用更明显,从而为孔石莼在高剂量的UV-B辐射处理中提供了竞争优势.
- (4)长期UV-B辐射可能影响克生物质的代谢过程,使孔石莼和蜈蚣藻共培养体系中的克生物质的有效量(或者有效浓度)呈降低趋势.

参考文献:

[1] Caldwell M M, Teramura A H, Tevini M. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial plants [J]. *Ambio*, 1995, **24**(3): 166-173.

[2] Madronich S, McKenzie R L, Björn L O, *et al.* Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*, 1998, **46** (1-3): 5-19.

[3] UNEP/WMO. Executive summary, scientific assessment of ozone depletion: global ozone research and monitoring project-report No. 47 [R]. USA: World Meteorological Organization, 2002.

[4] Shindell D T, Rind D, Loneragan P. Increased polar strato spheric ozones losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations [J]. *Nature*, 1998, **392**: 589-592.

[5] Hanelt D, Wiencke C, Nultsch W. Influence of UV radiation on the photosynthesis of arctic macroalgae in the field [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1997, **38**(1): 40-47.

[6] Van Donk E, Van de Bund W J. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms [J]. *Aquatic Botany*, 2002, **72** (3-4): 261-274.

[7] Schagerl M, Unterrieder I, Angeler D G. Allelopathy among cyanoprokaryota and other algae originating from lake neusiedlersee (Austria) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2002, **87**(4): 365-374.

[8] Schmidt L E, Hansen P J. Allelopathy in the prymnesiophyte *Chrysochromulina polylepis*: effect of cell concentration, growth phase and pH [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **216**: 67-

- 81.
- [9] Xiao H, Tang X X, Zhang P Y, *et al.* The effect of UV-B radiation enhancement on the interspecific competition between *Skeletonema costatum* and *Heterosigma akashiwo* [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, **24**(2): 77-84.
- [10] 南春容, 张海智, 董双林. 孔石莼水溶性抽提液抑制 3 种海洋赤潮藻的生长[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 702-706.
- [11] 张培玉, 唐学玺, 蔡恒江, 等. UV-B 辐射增强对海洋大型藻与微型藻种群生长关系的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3335-3342.
- [12] 王悠, 俞志明, 宋秀贤, 等. 大型海藻与赤潮微藻以及赤潮微藻之间的相互作用研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 274-280.
- [13] Svirski E, Beers S, Friedlander M. *Gracilaria conferta* and its epiphytes: (2) Interrelationship between the red seaweed and *Ulva cf. lactuca* [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **260/261**: 391-396.
- [14] Friedlander M, Gonen Y, Kashman Y, *et al.* *Gracilaria conferta* and its epiphytes: 3. Allelopathic inhibition of the red seaweed by *Ulva cf. lactuca* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1996, **8**(1): 21-25.
- [15] Caldwell M M. Solar ultraviolet irradiation and the growth and development of higher plants [A]. In: Giese A C. *Photo physiology* [C]. New York: Academic Press, 1971. 131-137.
- [16] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 等. *基础生态学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 119.
- [17] Nan C R, Zhang H Z, Zhao G Q. Allelopathic interactions between the macroalga *Ulva pertusa* and eight microalgal species [J]. *Journal of Sea Research*, 2004, **52**(4): 259-268.
- [18] Jin Q, Dong S L. Comparative studies on the allelopathic effects of two different strains of *Ulva pertusa* on *Heterosigma akashiwo* and *Alexandrium tamarense* [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, **293**(1): 41-55.
- [19] 王悠, 杨震, 唐学玺, 等. 7 种海洋微藻对 UV-B 辐射的敏感性差异分析[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 225-230.
- [20] Haeder D P, Worrest R C. Effects of enhanced solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1991, **53**(5): 717-725.
- [21] Häder D P, Kumar H D, Smith R C, *et al.* Effects on aquatic ecosystems [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*, 1998, **46**(1-3): 53-68.
- [22] Keller A A, Hargraves P, Jeon H, *et al.* Effects of ultraviolet-B enhancement on marine trophic levels in a stratified coastal system [J]. *Marine Biology*, 1997, **130**(2): 277-287.
- [23] Cai H J, Tang X X, Zhang P Y. Effects of UV-B radiation on the growth interaction of *Ulva pertusa* and *Alexandrium tamarense* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, **17**(4): 605-610.
- [24] Stebbing A R. Hormesis-the stimulation of growth by low levels of inhibitors [J]. *Scientific Total Environment*, 1982, **22**(3): 213-234.
- [25] Björn L O. Effects of ozone depletion and increased UV-B on terrestrial ecosystems [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 1996, **51**(3): 217-243.