# UV-B 增强和海洋环境因子的变化对海洋浮游动物影响的研究进展

# Research advances in influence of UV-B enhancement and environment factor change on marine zooplankton

窦 勇, 王 悠, 唐学玺

(中国海洋大学 生态学研究室, 山东 青岛 266003)

中图分类号: Q178.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)08-0089-06

环境污染导致的臭氧层衰减是当今最引人注目的全球变化现象之一。臭氧层的衰减使得到达地球表面的紫外线, 尤其是对生物具有严重损伤作用的紫外线 B 波段(ultroviolet B, UV-B, 280 ~315 nm)的辐射增强, 从而对全球产生明显的生态学和生物学效应。研究表明, 北海海水表面 UV-B 辐射率的 10%能够穿透到 6 m 深的水层; 而在北冰洋的清澈水域, 可到达 30 m 深的水层[1], 在南极水域甚至达到 60～70 m[2], 引起明显的生态学效应, 因此, UV-B 辐射对海洋生态系统的潜在危害性不断增加。

有关 UV-B 辐射增强对海洋浮游植物影响的研究开展较多, 但对海洋浮游动物(zooplankton)的研究相对较少。海洋浮游动物是海洋食物链(网)中承前启后的中间环节, 是对能流、物流起调控作用的关键功能群, 浮游动物的种群动态直接影响整个海洋生态系统的结构与功能[3]。增强的 UV-B 辐射能从分子及细胞、个体、种群、群落、生态系统等不同生物组织层次上对海洋浮游生物产生影响, 从而危及到整个海洋生态系统的平衡和稳定。另一方面, 随着人类活动影响及全球气候变化的加剧, 海洋环境不断地发生着变化。一些海洋环境要素, 如温度、盐度、食物、pH 与营养盐等的变化也会对海洋浮游动物产生显著影响。

本文综述了近年来海洋环境因素(温度、盐度、食物、pH 与营养盐)及 UV-B 辐射增强对海洋浮游动物单独和联合作用的研究进展。

## 1 海洋环境因子对海洋浮游动物的影响研究

### 1.1 温度对海洋浮游动物的作用

生物的生长发育离不开一定的温度条件。温度对浮游动物的分布和生命活动有十分显著的影响。徐兆礼[4]甚至认为, 水温是影响东海浮游十足类总丰度的主要环境因子之一。杜飞雁等[5]研究指出, 水温对北部湾毛颚类的群落分化产生显著影响。

桡足类在海洋生态系统中占有举足轻重的地位, 所以这方面的研究主要以海洋桡足类为对象。中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)是我国近海及日本沿海的浮游动物优势种, 我国近海海洋生态系统动力学计划也将其列为关键种之一[6]。中科院海洋所的学者围绕中华哲水蚤夏季在南黄海的生殖策略和生活策略展开了一系列研究, 发现 18℃是中华哲水蚤生长的最适温度; 当环境温度达到 27℃时, 其 72 h 的死亡率达 82%, 说明高温对中华哲水蚤有致死效应; 中华哲水蚤在 9℃的低温水体中能够存活较长时间,但种群增长速率明显低于 18℃时[7]。李超伦等[8]的研究发现低温可以抑制中华哲水蚤的摄食、消化和呼吸等生命活动。另外有研究发现, 夏季黄海冷水团中的部分中华哲水蚤 CV 期幼体处于某种滞育状态, 但仍可存活[9]。廖一波等[10]的室内实验指出, 中华哲水蚤 24 h 的半致死温度为 26.9℃, 这与现场调查结果符合。以上研究表明, 高温对中华哲水蚤有不利影响, 甚至可以致死; 低温虽可以抑制中华哲水蚤的生长与繁殖, 却不会致死。另外有证据表明, 温度是影响中华哲水蚤种群分布的主要环境因素, 而高温是导致夏季中华哲水蚤数量降低和分布区向深水区退缩的主要原因[11]。

收稿日期: 2010-02-01; 修回日期: 2010-05-17

作者简介: 窦勇(1985-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事海洋生态毒理学研究, 电话: 0532-82031640, E-mail: douyonghero@163.com, 13964265846; 通信作者: 唐学玺, E-mail: tangxx@ouc.edu.cn

### 1.2 盐度对海洋浮游动物的作用

盐度是影响海洋浮游动物生存和生长发育的重要因子，盐度变化直接影响动物体内渗透压和离子浓度的调节[12]，盐度的升高或降低都会影响水生生物的水- 盐代谢[13]，进而影响浮游动物的生命活动。

林霞等[14]发现，细巧华哲水蚤(*Sinocalanus tenellus*)的最适盐度范围是 12.4~18.9，人工改变盐度会显著影响其存活率；林霞等[15]还发现墨氏胸刺水蚤(*Centropages mcmurrichi*)摄食率随盐度升高呈先升后降之趋势，在最适盐度范围内达最大。陈丽华等[16]研究了厦门港春季主要桡足类的呼吸率，发现在 28℃时，在实验所设置的盐度范围内，太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica Steuer*)和真刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)的呼吸率都与盐度呈负相关。Goudy 等[17]测定两种桡足类克氏纺锤水蚤(*Acartia clausi*)和汤氏纺锤水蚤(*Acartia tonsa*)在不同温度和盐度组合下的呼吸率和排氨率，结果表明盐度对浮游动物的新陈代谢有显著影响，而且不同的物种对盐度的要求也不同。

盐度是影响海洋浮游动物个体生存和生长发育的重要因子，同时也是影响浮游动物种群结构和动态变化的关键因素之一。殷旭旺等[18]揭示了大连一沿海混盐水体褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)复合类群的种群分布规律，指出盐度是影响各型轮虫聚集的关键因素之一。国外也有学者[19]认为,复合类群中不同种类的轮虫对栖息环境中水温、盐度以及食物种类和颗粒大小等生态因子不同的选择性所产生生态位上的隔离,都为轮虫在自然环境中的同域共栖提供了条件。而 Serra[20]则更详细地指出了各型轮虫分布所对应的盐度范围。

### 1.3 食物对海洋浮游动物的作用

海洋浮游动物是海洋生态系统中的关键功能群，浮游动物特别是浮游桡足类的摄食活动调控着从初级生产力到次级生产力的转换，而其摄食活动又直接取决于环境中的营养状况，因此开展浮游动物特别是桡足类的营养及摄食生态学研究具有十分重要的意义[21]。

众多学者的研究表明，桡足类的摄食活动具有选择性。Mayer 等[22]研究表明，桡足类主要选食营养丰富且易于消化的单胞藻，而小球藻(*Chlorella* spp.)不适宜作为指状许水蚤(*Schmacheria inopinus*)的饵料。于娟[23]的实验也证实，桡足类对食物具有选择性，金藻 8701(*Isochrysis galbana* Parke 8701)最适合被指状许水蚤摄食，而小球藻和亚心型扁藻(*Platymonas subcordiformis*)不适宜作为指状许水蚤的食物。另外有研究表明，对于相同浓度和大小的食物，桡足类更倾向于摄食藻类和有生命的高营养颗粒，而对于非生命低营养颗粒的摄食率较低[24]。

环境中的食物在个体水平上能影响浮游动物生长和发育，在种群水平上能影响浮游动物的种群密度和增长速度。有研究指出[25]，某些甲藻可以产生化学物质抑制桡足类的摄食，甚至有致死效应。Paffenhofer[26]证实，以老化的硅藻 *Lauderia borealis* 作为食物的桡足类幼体，其死亡率明显高于以指数增长期的同种藻类为食物的个体。谭烨辉等[27]指出各海区浮游植物的氨基酸含量与植食性桡足类的氨基酸含量有很高的相关性。李捷等[28]的实验证实，与球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)相比，三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum* Bohlin)对中华哲水蚤产卵和孵化都存在明显的抑制作用。朱艺峰等[29]的实验结果显示轮虫在受到饥饿后，寿命略有增长；饥饿强度增大时，轮虫个体的总产幼数、总产卵量显著下降；种群世代时间随饥饿强度增加而增大，内禀增长率、周限增长率和净生殖率却明显下降。

### 1.4 pH及营养盐条件对海洋浮游动物的作用

海水呈现一定的 pH 值，且具有一定的缓冲能力，这是海洋浮游动物正常生活所必须的环境条件。王晓清等[30]指出，pH 对壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)休眠卵的产量和混交雌体百分率均有极显著的影响($P < 0.001$)；当 pH 为 7.5 时壶状臂尾轮虫的休眠卵产量最大，混交雌体百分率也最高。周竹君等[31]证实，褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)在不同 pH 介质中增殖速率不同，pH 为 9.00 左右时轮虫增殖速率最快；pH 过低或过高，轮虫增殖速率均会受到影响。不过 pH 影响浮游动物生命活动的机制研究目前少见报道。

海域的营养盐条件是影响初级生产力的重要因素，并通过食物链传递影响浮游动物的种群动态[32]。目前已有不同海域的研究结果支持这一观点。宁修仁等[33]通过分析海洋生态学资料并结合卫星遥感、渔场及赤潮等资料，发现长江口和杭州湾及其毗邻海域生物生产力的锋面，在离长江口和杭州湾口约 100 km 的长江冲淡水中部海域出现蓝细菌丰度、浮

游植物现存量和初级生产力以及浮游动物的最大值,该锋面的存在和位置被水色遥感所确认,营养盐在此呈现最佳权衡。管卫兵等[34]通过数值模拟揭示了珠江河口海域营养盐特别是氮、磷的分布及比例对浮游植物生物量的影响和通过食物链作用于浮游动物种群的机制。夏洁等[35]模拟研究了黄海浮游生态系统要素垂直分布的季节变化,发现浮游植物与硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的变化趋势基本吻合,而浮游动物的种群数量动态则取决于浮游植物的生物量。曾祥波等[36]在台湾海峡所得到的结果也支持营养盐对浮游动物间接作用的观点。

## 2 UV-B 增强对海洋浮游动物的影响

目前有关 UV-B 辐射增强对海洋浮游植物影响的研究开展较多,但对海洋浮游动物(zooplankton)的研究相对较少。增强的 UV-B 辐射能从分子及细胞、个体、种群、群落、生态系统等不同生物组织层次上对海洋浮游生物产生影响,从而危及到整个海洋生态系统的平衡和稳定。

### 2.1 UV-B 增强在分子及细胞水平上对海洋浮游动物的影响

UV-B 可以直接改变细胞内生物大分子结构,破坏细胞遗传基因和生命活性物质,给细胞以致命的危害。DNA 是 UV-B 的主要伤害对象,有研究表明,UV-B 可以对许多水生有机体的 DNA 造成破坏并推迟 DNA 的合成[37-38]。Kuwenberg[39]研究证实, UV-B 能够破坏飞马哲水蚤(*Calanus finmarchicus*)胚胎 DNA 组成; Malloy 等[40]也认为 UV-B 可以对浮游动物的 DNA 造成伤害。Palmer 等[41]研究证实,UV-B 辐射不仅影响腰鞭毛虫(*Euglena gracilis*)的细胞存活,而且还会抑制其细胞的生长。

### 2.2 UV-B 增强在个体水平上对海洋浮游动物的影响

在浮游动物的生存环境中,光是一个重要而又复杂的生态因子,它有多方面的生态作用,直接或间接地影响浮游动物的行为、生长和发育。

UV-B 影响浮游动物的行为,最明显的莫过于启动浮游动物的垂直迁移。Christal 等[42]的研究表明,歪尾水蚤 *Tortanus dextrilobatus* 的早期幼体对 UV-B 辐射很敏感,表现出了明显的避害行为,从而改变本身的垂直分布。UV-B 引发的垂直迁移现象在其他多种浮游动物中均有发现[43]。有证据[44-46]表明浮游动物的昼夜垂直移动是生物在长期进化过程中形成的一种很重要的适应机制,有利于其生存和繁衍后代。

许多研究者都发现一定剂量的 UV-B 会抑制海洋浮游动物的摄食与排泄。冯蕾等[47]证实,褶皱臂尾轮虫对每一种饵料单胞藻的滤水率和摄食率都表现为随 UV-B 辐射剂量的增大而显著减小($P<0.05$)。冯蕾等[48]以壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)为实验材料也得到了极其类似的结果。陶振铖[49]研究指出,在 100、200、400 μW/cm$^2$ 的 UV-B 照射下,中华哲水蚤的摄食都受到明显抑制,UV-B 对其排粪率的抑制率可达 50%。李扬等[50]的试验结果显示,UV-B 辐射对指状许水蚤(*Schmacheria inopinus*)雌、雄成体的摄食率和滤水率有明显抑制,并且作用趋势是一致的。

Karanas[51]于 1979 年首次对紫外线照射下浮游动物的生殖量进行研究,表明 UV-B 辐射对克氏纺锤水蚤(*Acartia clausi*)的生殖有显著影响。Kuwenberg[39]指出,紫外线(尤其是 UV-B)能够对飞马哲水蚤(*Calanus finmarchicus*)的卵孵化率产生强烈影响,卵孵化率降低是紫外线通过破坏其卵内胚胎 DNA 组成造成的; Rodriguez 等[52]也证实了这个结果。Saito 等[53]研究发现,长时间低强度、低剂量的紫外线辐射比短时间、高强度的紫外线辐射对小拟哲水蚤(*Paracalanus Parcus*)卵孵化率的影响更大。

### 2.3 UV-B 增强在种群和群落水平对海洋浮游动物的影响

UV-B 辐射能使海洋浮游动物的存活时间显著缩短[54]。有资料[55]显示, UV-B 能够增加海洋桡足类幼体的死亡率,降低雌体的存活率和怀卵率,并且改变种群的性比。冯蕾等[56-57]研究指出当 UV-B 辐射强度达到一定阈值时,会对褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)和壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceus*)产生急性致死效应。李扬等[50]测定了 UV-B 辐射对指状许水蚤(*Schmacheria inopinus*)雌雄成体的致死率,结果表明, UV-B 辐射对雄性成体的 24 h 的半数致死剂量($LD_{50,24h}$)为 5.77kJ/m$^2$,对雌性成体 48 h 的半数致死剂量($LD_{50,48h}$)为 5.04kJ/m$^2$。

UV-B 辐射对浮游动物的致死效应属于极端情况,而在低于致死剂量的情况下,增强的 UV-B 会使浮游动物的种群结构和特征参数发生改变。冯蕾等[54]指出,在实验辐射强度(20μW/cm$^2$)和剂量范围内,褶

皱臂尾轮虫的生命期望、净生殖率和内禀增长率均随 UV-B 辐射剂量的增大而降低,世代时间则随着辐射剂量的增大而延长。她同时发现 UV-B 辐射增强可引起两种海水轮虫(褶皱臂尾轮虫和壶状臂尾轮虫)种群之间竞争关系的改变，使褶皱臂尾轮虫的生长竞争能力提高，壶状臂尾轮虫的生长竞争能力降低[58]。

## 3 海洋环境因素及UV-B增强对海洋浮游动物的联合作用

海洋环境是一个极为复杂的系统，浮游动物的生命活动要受到海洋中各种环境因子的影响。不仅要考虑各种环境因子单独对浮游动物产生的作用，而且要考虑环境因子之间的互作，同时还要兼顾直接效应和间接效应的统一。海洋环境的高度复杂性给模拟研究多种环境因子对浮游动物的影响带来了极大难度，所以目前国内外这方面的研究工作没有大规模开展。

Mousseau 等[59]进行的围隔实验表明, UV-B 增强会改变中上层生态系统的结构和动力学。增强的 UV-B 与无机盐类、生原要素、浮游植物生物量等环境因子综合作用会改变围隔生态系统中浮游动物的种群结构，使群落演替速度加快。随着 UV-B 辐射量的增大,生态系统从以微生物为主的食物网演变成以草食浮游动物为主的食物网。于娟[23]的研究表明，环境因子对海洋桡足类的作用是多种因素共同作用的综合体现。她同时证实，UV-B 与环境胁迫因子的叠加作用比其中任一个单因素对桡足类生存的影响更严重。UV-B 与营养盐限制的联合效应能够通过食物网传递，间接影响海洋浮游动物。Shick 等[60]的研究结果显示，营养盐(N、P、Fe)的限制能够加剧 UV-B 辐射对浮游植物的伤害，浮游植物受伤害后将导致以此为食的浮游动物个体及种群水平的变化。Goncalves 等[61]对萼花臂尾轮虫(*Daphnia spinulata*)进行了研究，结果表明：多个环境因素的相互作用可以影响 *Daphnia spinulata* 的运动参数。这些环境因素不仅包括 UV 辐射，还包括许多物理因素(水下光辐射场、风的强度)和生物因素(食物的可给性、捕食者及同类的存在)。

## 4 展望

目前，国内外在海洋环境因子及 UV-B 对海洋浮游动物影响领域的研究已经得到了不少现场调查资料和实验室研究数据，取得了很多有价值的成果。但是这些研究主要是单个因子或者少数几个因子的影响，真正涉及多因素的研究国内外还是凤毛麟角。目前一些学者开始了海洋环境污染物与 UV-B 对海洋浮游动物联合作用的研究，并取得了积极的进展；另外随着围隔生态系统实验技术与方法的完善，模拟海域生态系统内多因素的互作对浮游动物的影响将会变得更加现实。相信今后这方面的工作会是大家努力的重点。

目前该领域的工作多集中于实验现象描述，真正的量化研究和机理阐释不多。今后努力的方向是研究尺度向微观靠拢，从细胞、细胞器、分子水平上揭示环境因子和 UV-B 对浮游动物的作用机理。

参考文献:


[1] Ryan K G. UV radiation and photosynthetic production in antarctic sea ice microalgae[J]. Photochem Photobiol, 1993; 40: 235-240.

[2] Smith R C, Prezelin B B, Baker K S, et al. Ozone depletion: ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic water[J]. Science, 1992; 225: 952-959.

[3] 徐兆礼，蒋玫，晁敏，等. 东海浮游桡足类的数量分布[J]. 水产学报, 2003, 27(3): 258-264.

[4] 徐兆礼. 东海浮游十足类总丰度分布与环境的关系[J].中国水产科学, 2005, 12(5): 614-618.

[5] 杜飞雁，李纯厚，贾晓平. 北部湾海域毛颚类种类组成与群落结构[J]. 中国水产科学，2004，11(1): 59-64.

[6] 张芳，孙松.中华哲水蚤生态学研究进展[J].海洋科学, 2001, 25(11): 16-19.

[7] Pu X M,Sun S, Yang B, et al. The combined effects of tempreture and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer[J]. Jounal of Plankton Research, 2004, 26( 9): 1049-1057.

[8] Li C,Sun S, Wang R, et al. Feeding and respiration rates of a plankton copepod(*Calanus sinicus*) qversummering in Yellow Sea cold bottom waters[J]. Mar Biol, 2004, 145(1): 149-157.

[9] Pu X M, Sun S, Yang B, et al. Life history strategies of *Calanus sinicusin* the southern Yellow Sea in summer[J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26(9): 1059-1068.

[10] 廖一波，陈全震，曾江宁，等. 海洋桡足类的热耐受

性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 449-452.

[11] Wang R, Zuo T, Wang K. The Yellow Sea cold bottom water an oversummering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) [J]. Journal of Plankton Reasearch, 2003, 25(2): 169-183.

[12] Chona B, Estudillo, Marietla N Duray, et al. Salinity tolerance of larvae of the mangrove red snapper(*Lutjanus argentinaculatus*) during ontogeny[J]. Aquaculture, 2000, 190: 155-167.

[13] 刘青, 曲晗, 张硕. 强壮箭虫对温度、盐度的耐受性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007: 111-116.

[14] 林霞, 李春月, 陆开宏. 温度和盐度对细巧华哲水蚤存活率的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2001, 14(1): 43-46.

[15] 林霞. 温度、盐度及饵料对象山港两种优势桡足类摄食与存活的影响[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2003.

[16] 陈丽华, 陈钢, 李少菁, 等. 温盐度对厦门港春季主要桡足类呼吸率影响的实验[J]. 台湾海峡, 2001, 20(Sup): 184-189.

[17] Gaudy R, Cervetto G, Pagano M.Comparison of the metabolism of *Acartia clause* and *A.tonsa*: influence of temperature and salinity[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 147(1): 51-56.

[18] 殷旭旺, 赵文. 沿海混盐水体褶皱臂尾轮虫的复合类群及其种群动态[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(1): 1-10.

[19] Ciros - perez J, Carmona M J, Serra M. Resource competition between sympatric sibling rotifer species[J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46: 1511-1523.

[20] Serra M, Gomez A, Carmona M J. Ecological genetics of *Brachionus sympatric* sibling species [J]. Hydrobiologia, 1998, 387 /388: 373-384.

[21] 李超伦, 王克. 植食性浮游桡足类摄食生态学研究进展[J].生态学报, 2002, 22(4): 593-596.

[22] Meyer B, Irigoien X, Graeve M, et al. Feeding rates and selectivity among nauplii.copepodites and adult females of *Calanus finmarchicus* and *Calanus helgolandicus*[J]. Helgoland Mar Res, 2002, 56(1): 169-178.

[23] 于娟. 环境因子和 UV-B 辐射对三种海洋桡足类的实验生物学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学博士后研究工作报告, 2006.

[24] Huntley M. Feeding biology of *Calanus*: a new perspective[J]. Hydrobiologia, 1988, 167/168: 83-99.

[25] Sykes P F and HuntleyM E. A cute physiological reactions of *Calanus pacificus* to selected dinoflagellates: Direct observations[J]. Mar Biol, 1987, 94: 19-24.

[26] Paffenhofer G-A. Some characteristics of abundant subtrop ical copepods in estuarine, Shelf and ocean waters (Proceedings of the Fourth International conference on Copepoda: Bull Plankton)[J]. Soc Jap Spec, 1991, 201-216.

[27] 谭烨辉, 黄良民, 尹健强, 等. 海洋桡足类氨基酸组成及与饵料和光照的关系[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 42-49.

[28] 李捷, 蒲新明, 张展, 等. 两种藻类饲喂中华哲水蚤的繁殖差异[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(1): 38-44.

[29] 朱艺峰, 林霞, 徐同成. 周期性饥饿对褶皱臂尾轮虫实验种群特征参数的影响[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 101-106.

[30] 王晓清, 綦志仁, 戴振炎, 等. 环境因子对壶状臂尾轮虫休眠卵促产和孵化的影响[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(1): 81-83.

[31] 周竹君, 刘青, 宋智修, 等. pH 和几种金属离子对褶皱臂尾轮虫增殖的影响[J]. 大连水产学院学报, 2000, 15(2): 119-124.

[32] 韩希福, 王荣. 海洋浮游动物对浮游植物水华的摄食与调控作用[J]. 海洋科学, 2001, 25(10): 31-33.

[33] 宁修仁, 史君贤, 蔡昱明, 等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 96-106.

[34] 管卫兵, 王丽娅, 许东峰. 珠江河口氮和磷循环及溶解氧的数值模拟[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 52-60.

[35] 夏洁, 高会旺. 南黄海东部海域浮游生态系统要素季节变化的模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(4): 59-65.

[36] 曾祥波, 黄邦钦. 台湾海峡微型浮游动物的摄食压力及其对营养盐再生的贡献[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(2): 231-235.

[37] Scheuerlein R, Treml S, Thar B, et al. Evidence for UV-B induced DNA degradation in *Euglena gracilis* mediated by avtivation of metal-dependent nucleases[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 1995, 31: 113-123.

[38] Buma A G J, Van Hannen E J, Roza L, et al . Monitoring ultraviolet-B induced DNA damage in individual diatom cells by immunofluorescent thymine dimmer detection[J]. Journal of Phycology, 1995, 51: 314-321.

[39] Kouwenberg H M, Browman H I, Runge J A, et al.

Biological weighting of ultraviolet (280~400 nm) induced mortality in marine zooplankton and fish. Ⅱ. *Calanus finmarchicus* (Copepoda) eggs[J]. Mar Biol, 1999; 134: 285-293

[40] Malloy K D, Holman M A, Mitchell D, et al. Solar UV-B induced DNA damage and photoenzymatic DNA repair in Antarctic zooplankton[J]. Procnatn Acad Sci USA, 1997; 94: 1258-1263.

[41] Palmer H, Ohta M, Watanabe M, et al. Oxidative stress-induced cellular damage caused by UV andmethyl viologen in *Euglena gracilis* and its suppression with rutin[J]. J Photochem Photobiol B: Biology, 2002; 67: 116-129.

[42] ChristaL S, Stephen M B, Sean R A. The efect of ultraviolet radiation on the vertical distribution and mortality of estuarine zooplankton.[J]. Plankton Res, 2000, 22(12): 2325-2350.

[43] 张武昌. 浮游动物的昼夜垂直迁移[J]. 海洋科学, 2000, 24, 11: 18-20.

[44] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 2 版, 北京: 科学出版社, 2002: 128-129.

[45] ]Rhode S C, Pawlowski M, Tollrian R. The impact of ultraviolet radiation on the vertical distribution of zooplankton of the genus *Daphnia*[J]. Nature, 2001; 412 (6842): 69-72.

[46] Piazena H, Perez-Rodrigues E, HaderD P, et al. Penetration of solar radiation into the water column of the central subtropical Atlantic Ocean-optical properties and possible biological consequences[J].Deep-Sea Res Ⅱ, 2002: 49: 3512-3528.

[47] 冯蕾, 韩洪蕾, 唐学玺. UV-B 辐射增强对褶皱臂尾轮虫摄食的影响[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(3): 229-234.

[48] 冯蕾, 王洪水, 潘蔚, 等. UV-B 辐射增强对壶状臂尾轮虫摄食的影响[J]. 海洋科学, 2006, 30(9): 31-35.

[49] 陶振铖. 可见光和紫外线对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)几种行为的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.

[50] 李扬, 唐学玺, 于娟, 等. UV-B 辐射对指状许水蚤效应的初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(Sup.): 109-113.

[51] Karanas J J, Van D H, Worrest R C. Midultraviolet (UV-B) sensitivity of *Acartia clausii* Giesbrecht (Copepoda ) [J] . Limnol Ocean, 1979; 24: 1104-1116.

[52] Rodriguez C A, Browman H I, Runge J A, et al. Impact of solar ultraviolet radiation on hatching of amarine copepod, *Calanus finmarchicus*[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2000, 193: 85-93.

[53] SaitoH, Taguchi S. Influence of UV-B radiation on hatching success of marine copepod *Paracalanus Parvuss*[J]. Exp Mar Biol Ecol, 2003, 282: 135-147.

[54] 冯蕾, 肖慧, 孟祥红, 等. UV-B 辐射增强对褶皱臂尾轮虫实验种群动态的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2006, 52(2): 225-229.

[55] 陶振铖, 张武昌, 孙松. 可见光和紫外线对浮游动物行为的影响[J]. 海洋科学, 2004, 28(9): 56-61.

[56] 冯蕾, 唐学玺, 王仁君, 等. UV-B 对两种海水轮虫的致死效应[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(3): 421-426.

[57] 冯蕾, 肖慧, 王仁君, 等. 2 种海水轮虫对 UV-B 辐射敏感性的比较[J]. 海洋环境科学, 2006, 35(3): 25-28.

[58] 冯蕾. 二种海水轮虫(*B. plicatilis&B. urceus*)实验种群动态和种间竞争对 UV-B 辐射增强的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

[59] Mousseau L, Gosselin M, Levasseau M, et al. Effects of ultraviolet B radiation on simultaneous carbon and nitrogen transport rates by estuarine phytoplankton during a week-long mesocosm study[ J ]. Marine Ecology Progress Series, 2000 (199): 69-81.

[60] Shick J M, Dunlap W C. Mycosporine-like amino acids and related gadusols: biosynthesis, accumulation, and UV-protective functions in aquatic organisms[J]. Annual Review of Physiology, 2002, 64: 223-262.

[61] Gonçalves R J, Barbieri E S, Villafañe V E, et al. Motility of *Daphnia spinulata* as Affected by Solor Radiation Throughout an Annual Cycle in Mid-latitudes of *Patagonia*[J]. Photochemistry and Photobiology, 2007, 83(4): 824-832.

(本文编辑: 张培新)