

文章编号:1001-8166(2005)01-0106-07

增强的 UV-B 对湖泊生态系统的影响研究*

张运林^{1,2}, 秦伯强¹, 陈伟民¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:近 20 多年来, 由于平流层臭氧层减薄引起紫外辐射(UV-B)增强而导致严重的生态学后果, 已受到各国广泛的重视, 并对此进行了深入研究, 尤其集中在海洋浮游植物初级生产者及淡水食物网上。综述了国外在 UV-B 对湖泊生态系统影响的研究现状与动态, 增强的 UV-B 在湖泊中呈指数衰减, 不同湖泊衰减系数变化很大; 光衰减系数与溶解性有机碳(DOC)、有色可溶性有机物(CDOM)一般呈显著性正相关; 增强的 UV-B 对浮游植物、浮游细菌、浮游动物及鱼类均有不同程度的影响; 由于不同生物具有不同适应 UV-B 伤害的机制, 湖泊生态系统的结构和功能也势必会发生变化。最后提出了未来在太湖等富营养化湖泊 UV-B 的研究设想。

关键词:UV-B; 溶解性有机碳(DOC); 浮游植物; 浮游细菌; 适应

中图分类号:P343.3 **文献标识码:**A

20 多年前, 人们注意到人类活动导致大量的氯氟烃化合物(Chlorofluorocarbons, CFCs)和哈龙等卤族化合物等进入平流层而造成了臭氧层的减薄, 近 10 年全球臭氧层平均减少了 2%~3%, 并且还在继续加剧^[1~3]。平流层臭氧破坏的直接后果就是到达地表的太阳紫外辐射增加。紫外辐射的波长范围为 200~400 nm, 根据其生物效应可分为 UV-C(200~280 nm), UV-B(280~320 nm), UV-A(320~400 nm)。UV-C 就是通常所说的杀菌紫外线, 它对生物有强烈影响, 但它被极少量的臭氧层吸收, 即便臭氧层减少 90%, 也不可能使 UV-C 到达地表^[4]; UV-B 绝大部分被臭氧层吸收而消减; UV-A 很少被臭氧吸收, 但它对生物无杀伤作用, 且可促进植物生长。从生态学角度分析, 臭氧层破坏的主要生态效应就是到达地表的 UV-B 增强, 对动植物生长和人体健康带来不良影响。

国外许多学者就增强的 UV-B 对海洋生态系统及湖泊等淡水生态系统进行了大量研究^[5~10]。

2002 年杨顶田等^[11]在太湖首次测定了水下 UV-B 的分布。当前, 增强的 UV-B 对湖泊生态系统的研究主要集中在以下几个方面: UV-B 在湖泊水体中的衰减规律; UV-B 与水中溶解性物质的相互作用; UV-B 对湖泊生物的伤害; 湖泊生态系统对增强的 UV-B 的适应。

1 UV-B 在湖泊水体的衰减规律

太阳光在进入湖水后, 经散射同吸收联合作用引起了光的衰减。用来描述光在水中衰减程度的最重要物理量是光衰减系数 K_d 和真光层深度 D_{eu} (水表面下辐照度降到 1% 时的深度)^[12], 其中光衰减系数可用下式计算:

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{E_d(z, \lambda)} \left[\frac{dE_d(z, \lambda)}{dz} \right] \quad (1)$$

式中, $K_d(\lambda)$ 是波长为 λ 的辐照度漫射衰减系数 (m^{-1}); $E_d(z, \lambda)$ 为波长 λ 的光在湖平面下 z 深度处的向下光谱辐照度 ($W/(m^2 \cdot nm)$); z 指光穿过水

* 收稿日期:2003-11-10; 修回日期:2004-06-03.

* 基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目“长江中下游地区湖泊富营养化的发生机制与控制对策研究”(编号:KZCX1-SW-12); 国家自然科学基金项目“浅水湖泊水动力过程对底泥和悬浮物作用的环境效应研究”(编号:40071019); 中国科学院研究生社会实践项目“太湖梅梁湾水域溶解性有机碳(DOC)对 UV-B 衰减的影响”(编号:200334)资助。

作者简介:张运林(1976-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事湖泊光学和湖泊生态学研究。E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

层的厚度(m)。求 UV-B 波段光衰减系数 $K_{d(\text{UV-B})}$ 时用 $\int_{280}^{320} E_d(z, \lambda) d\lambda$ 代替 $E_d(z, \lambda)$ 。

真光层深度与光衰减系数存在一定量关系,可以表示为:

$$D_{eu} = 4.6 / K_d \quad (2)$$

式中, D_{eu} 为真光层深度(m); K_d 为光衰减系数(m^{-1})。

UV-B 在水中传输主要受水中组成物质的影响,包括黄色物质、悬浮物质以及浮游藻类等,不同的物质组成对 UV-B 的衰减不同,其衰减系数从 0.05 m^{-1} 到 60 m^{-1} 不等^[13~15]。在清洁的海水中水下 30 m 还能探测到 UV-B,而 UV-B 的生物效应则可达 60 ~ 70m^[16]。在高山深水湖泊中,UV-B 的穿透深度也常达 20 m 以上,据 Ruben 对阿尔卑斯(Alps)和比利牛斯(Pyrenees)山脉上 26 个湖泊 UV-B 的真光层深度的测定,其平均深度为 8 m,最深的达 27 m^[14]。在受人类活动影响较大和富营养化浅水湖泊中,由于水中溶解性有机物质对 UV-B 的强烈吸收,其真光层深度往往要小得多,在米德韦斯特(Midwest)、佛罗里达(Florida)、魁北克(Quebec)、新斯科舍(Nova Scotia)和大平原(Great Plains)地区 75% 的湖泊 UV-B 真光层深度小于 0.5 m ^[17, 18],在芬兰中部富含高腐殖酸的湖泊中真光层深度往往只有 0.3 m ^[19],这反映了不同类型的湖泊对 UV-B 辐射衰减的影响差异显著。

2 UV-B 与溶解性物质的关系

湖泊生态系统中,有色可溶性有机物(CDOM)及一些颗粒物浓度对 UV-B 辐射具有强烈的吸收,改变水下的光场分布^[12, 20]。UV-B 的增强加速了光化学过程,光化学降解可把溶解性有机物质转化为无机物形式(如无机碳、一氧化碳等)或低分子量的碳水化合物。光化学降解所产生的溶解性无机碳产量与高浓度的铁及紫外辐射的高吸收系数成正相关,而与水中的 pH、碱度、电导率及 Chla 成负相关,因此贫营养湖泊比富营养化湖泊更易发生光化学作用^[21]。同时,伴随着光化学过程,湖水的颜色将消失(即通常所称的光漂白作用),水色的改变影响水的光学特性和 UV-B 在水中的穿透力。在溶解性有机物的这种光化学过程中扮演重要角色的是 DOC,许多研究表明,湖泊中溶解性有机碳(DOC)浓度控制着 UV-B 在湖泊中的传输与衰减^[22~24]。DOC 中的腐殖酸及其他一些组分容易被 UV-B 进行光降

解,生成甲醛、乙醛等物质。DOC 降解的增加以及微生物对小分子碎片的吸收都将增加 UV-B 在湖泊中的穿透深度。Scully 等^[25]对大量湖泊的 UV-B 光衰减系数与叶绿素 a、DOC 和颗粒有机碳浓度建立数值关系,发现 UV-B 光衰减系数(K_d)与 DOC 浓度相关性显著,建立如下经验关系式:

$$K_{d(\text{UV-B})} = 0.415(\text{DOC})^{1.86}, r^2 = 0.97 \quad (3)$$

除 Scully 之外,许多学者都曾用 DOC 浓度来预测 UV-B 在湖泊中的衰减,建立了各自的经验关系并取得较好精度^[26, 27]。除了建立 UV-B 光衰减系数与 DOC 浓度的数学关系之外,Williamson^[10]认为真光层深度与 DOC 浓度是一种双曲线关系,DOC 浓度在 1 ~ 2 mg/L 之间存在一拐点。当湖泊中 DOC 低于此值,DOC 浓度的稍微减少就会造成真光层深度的迅速增加。Schindler 等^[28]利用所测数据建立了真光层深度(D_{eu})与 DOC 浓度的定量关系:

$$D_{eu} = 5.173(\text{DOC})^{-0.706} - 1.029, r^2 = 0.98 \quad (4)$$

除了用 DOC 来反映 UV-B 在湖泊中的衰减外,许多学者还探讨了 CDOM 的吸收系数(a_d)与 UV-B 衰减的关系^[22, 25, 27],如 Scully^[25]和 Morris^[27]就分别建立了如下线性关系式:

$$K_{d(310)} = 1.23 a_{d(310)} + 0.24, r^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$K_{d(320)} = 1.27 a_{d(320)} + 0.30, r^2 = 0.95 \quad (6)$$

3 UV-B 对湖泊生物的伤害

3.1 对浮游植物的伤害

浮游植物是湖泊生态系统主要初级生产者,是湖泊食物网的重要组成部分,其结构变化和生物量关系到整个湖泊生态系统的结构和功能。增强的 UV-B 对浮游植物的伤害主要体现在对 DNA 和蛋白质的损伤,对光合色素的破坏以及浮游植物生产力的降低。DNA 是遗传的物质基础,是 UV-B 的主要伤害对象。研究表明^[29, 30],UV-B 能够诱导许多水生有机体 DNA 的破坏和推迟 DNA 的合成。当 DNA 吸收 UV-B 辐射后,其内部的碱基和多核苷酸链被损伤,通过共价修饰作用在同一链的相邻嘧啶之间形成嘧啶二聚体,从而引起遗传基因的突变。增强的 UV-B 对蛋白质的损伤主要是通过色氨酸发生光降解导致酶活性和蛋白质结构发生改变^[31, 32]。UV-B 很容易破坏光合色素,抑制光系统,从而降低浮游植物的光合能力^[33~36]。实验表明^[37, 38],在较低的光合有效辐射下,如果 UV-B 辐射较强,叶绿素浓度明显降低,而且叶绿素 a 比叶绿素 b 更易受

到破坏。浮游植物在含 UV-B 的太阳光下暴晒一天,其光合作用能力会比在滤除 UV-B 的太阳光照射下降低 80%。由于 UV-B 对光合色素的破坏,降低光合能力,因而 UV-B 的增强对浮游植物的初级生产力影响是惊人的,Smith^[39]在南极边缘冰区范围内发现,由于臭氧减少引起的 UV-B 增加导致其初级生产力减少达 6%~12%。

3.2 对浮游动物的作用

不同的浮游动物对 UV-B 辐射的敏感性不一样,存在很大的种间和种内差异。甲壳类浮游动物对 UV-B 比较敏感,小的甲壳类动物即使在低于现在海表面剂量的 UV-B 作用下,其死亡率也高达 50%;相反,虾的幼虫甚至可以抵抗臭氧层空洞 16%情况下的 UV-B 辐射。在 DOC 浓度低的湖泊中(如高山湖泊和贫营养湖泊),由于 UV-B 穿透的深度要大得多,因而这类湖泊中的浮游动物更易遭受 UV-B 的伤害。Williamson^[40]的实验显示,自然状况下处于生长活跃期的浮游动物种群通过围隔试验分别放在 DOC 高、低浓度的湖泊中培养 3 天,其中在高浓度 DOC 的湖泊中生长良好,而在低浓度 DOC 湖泊中则出现不同程度的死亡。UV-B 对浮游动物的影响可以从宏观和微观两方面加以概述。宏观角度上,UV-B 增强改变了湖泊生态系统中浮游动物的群落组成,致使湖泊生态系统中某些物种逐渐消失,生物多样性降低。这是因为 UV-B 增强一方面改变了浮游植物等初级生产者的群落结构和生物量,食物网结构改变,导致浮游动物食物来源发生变化;另一方面 UV-B 增强本身对一些浮游动物和生物体而言是致命的,在强的 UV-B 作用下其必将逐渐丧失竞争优势。微观方面,增强的 UV-B 造成某些易受 UV-B 辐射的物种 DNA、蛋白质的改变,在强的 UV-B 作用下其死亡率增高和个体小型化。在海洋中发现,UV-B 严重影响了一些桡足类浮游动物的生长、存活及生育^[41]。Zagarese 等^[42]在埃斯孔迪杜(Escondido)湖的实验发现,即便在浑浊的浅水湖泊,增强的 UV-B 对桡足类浮游动物死亡率的潜在影响也是显著的。Kouwenberg 等^[43]对海洋中桡足类 *Calanus finmarchicus* 的卵进行 UV-B 曝光发现,在正常中午的阳光下,其卵在海表面(10 cm)曝光 2.5 h 就会死去。

3.3 对浮游细菌的影响

浮游细菌可能由于个体太小,缺乏诸如 *Mycosporines*、*Scytonemins* 之类的屏蔽色素,使之更容易暴露在强的 UV-B 下^[44]。UV-B 的增强对细菌的影

响表现在正反两方面。一方面,增强的 UV-B 造成光化学反应,能够将 DOC 中难分解物质分解成碳水化合物,为细菌的生长提供充足的食物来源,从而加速了细菌的繁殖。Lindell 的实验验证了 UV-B 的增强增加了浮游细菌对溶解性物质的利用。在模拟试验条件下,随着 UV-B 的增强,细菌的数量和体积分别增加了 65%和 360%,细菌生物量差不多增加了 6 倍^[45]。另一方面,UV-B 通过光降解细菌生长所需要的酶从而抑制细菌的活动。海洋中的研究显示 UV-B 的增强可以抑制表层水细菌的生长。相比于黑暗条件,高 UV-B 的照射下细菌的活动要低得多,UV-B 强度低于 0.2 W/m²时比较有利于细菌的生长和繁殖^[46]。在伊利(Erie)湖发现,由于紫外辐射的原因,湖泊表层 5 m 深的水层一天内光抑制引起的细菌碳的生产量要损失 14%~30%^[47]。基于上述两方面原因,增强的 UV-B 对湖泊生态系统中细菌生产量是促进还是抑制还有待探讨。并且随着细菌对海洋和湖泊初级生产力的贡献率甚至要大于浮游植物这一现象的发现,研究 UV-B 对细菌生产量的作用将成为未来研究的热点领域。

3.4 对其他生物的影响

当前,关于 UV-B 对湖泊无脊椎动物的影响研究较少,然而事实上一些鱼和两栖类动物的胚胎及幼体常常暴露在 UV-B 辐射下,其中许多鱼的胚胎及幼体对 UV-B 辐射相当敏感^[48, 49],在湖泊中的一些实验显示,水表面的 UV-B 足以造成金鲈鱼卵的 100%死亡^[50]。但是关于 UV-B 对两栖动物幼体的伤害却说法不一致^[51~53],一些研究表明 UV-B 的增强会伤害两栖动物幼体,而另外一些则显示当前的 UV-B 强度还不至于对两栖动物造成伤害。从已有的一些研究来看,UV-B 的增强可能是引起近年来一些地区鱼和两栖类动物数量下降的一个重要原因^[54, 55],但这些结论的正确性还有待于进一步研究。

4 湖泊生态系统对增强的 UV-B 的适应

湖泊生物具有数种降低 UV-B 伤害的适应机制^[56, 57]。对于那些能运动的生物而言,它们可以潜到更深处利用水体对 UV-B 的滤除作用来避免 UV-B 的暴晒。对于其他一些生物,通过分泌一些光保护和抗氧化化合物(如虾青素、黑素、MAAs: Mycosporine-like amino acids 等)来保护重要组织免受

H-der D P, Kumar H D, Worrest R C. Aquatic Ecosystems. United Nations Environment Programme, 1989. 39-48.

UV-B 的损伤^[58]。湖泊生物对增强的 UV-B 这种生理生态学的适应机制,一方面降低了 UV-B 辐射对生物组织的伤害,另一方面从根本上改变了生物有机体与环境之间原有的生态相互作用。湖泊生态系

统对 UV-B 的适应主要体现在湖泊生物对 UV-B 的适应以及由此而发生的生态系统组成、结构和功能的变化(图 1)。

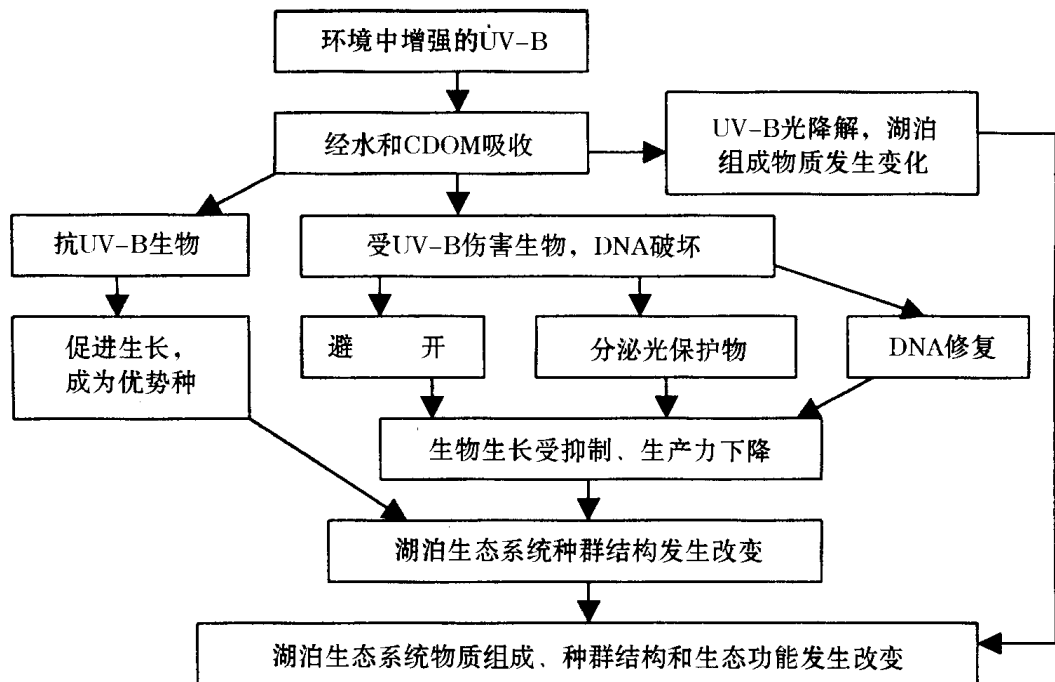


图 1 湖泊生态系统对增强的 UV-B 的适应

Fig. 1 Responses to increased UV-B radiation of aquatic ecosystems in lakes

在上述概念模式中,比较关心的是湖泊中受 UV-B 伤害的生物通过什么样的方式来降低 UV-B 损伤。这主要通过 3 个层面:首先,在一些生物体内含有光敏感色素,能感受到周围环境中 UV-B 强度,一旦 UV-B 超过阈值,生物就会发出信号通过行为逃避来达到免遭 UV-B 的伤害;其次,某些生物在 UV-B 的激发下,分泌出一些光保护和光修复物质来吸收 UV-B 以避免对其重要组织的损害,这些物质主要是 *Mycosporines*、*Scytonemins* 及 MAAs 等屏障色素;最后,一旦 UV-B 对 DNA 的伤害已发生,许多生物体自身能修复 DNA,修复方式有光修复 (photorepair)、切除修复 (excision repair) 和事后复制修复 (postreplication repair) 等^[57,59,60]。

5 展 望

增强的 UV-B 对湖泊生态系统的生态学影响已成为当前国际湖泊生态学研究热点领域,短短的 20 年内就发表了 1 000 多篇与 UV-B 辐射相关的论文。然而国内基本上还没开展这方面研究,笔者曾

于 2002 年 9 月、2003 年 1 月、2003 年 7 月在太湖、巢湖、龙感湖、大溪水库进行一些 UV-B 野外现场测定,旨在探讨 UV-B 在大型富营养化浅水藻型湖泊中的衰减规律,并与草型湖泊及清洁的深水湖泊进行一些对比。在今后工作中将采用野外调查与室内模拟相结合的方法,来探讨增强的 UV-B 与 DOC 的定量关系,对湖泊生物(在太湖、巢湖等富营养化湖泊中主要考虑微囊藻,探讨 UV-B 的增强是否是引起微囊藻异常暴发的一个重要原因)的影响机制以及湖泊生态系统的反馈机制。

参考文献(References):

- [1] Molina M J, Rowland F S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed distribution of ozone[J]. *Nature*, 1974, 249: 810-812.
- [2] Madronich S. Increases in biologically damaging UV-B radiation due to stratospheric ozone reductions: A brief review[J]. *Archiv für Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 1994, 43: 17-30.
- [3] Taalas P, Damski J, Kyr E, et al. The effects of stratospheric ozone variations on UV-radiation and tropospheric ozone at high latitudes[J].

- Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 1 533-1 539.
- [4] Caldwell M M, Flint S D. Implications of increased solar UV-B for terrestrial vegetation[A]. In: Chanin M L, ed. *The Role of the Stratosphere in Global Change* [C]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. 495-516.
- [5] H-der D P, Worrest R C, Kuman H D, et al. Effects of increased solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystem[J]. *AMBIO*, 1995, 24: 174-180.
- [6] Booth C R, Morrow J H, Coghlin T P, et al. Impacts of solar UVR on aquatic microorganism[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, 65: 252-269.
- [7] Mora S D, Demers S, Vernet M. The effects of UV radiation in the Marine Environment[M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 2000.
- [8] H-der D P. Effects on aquatic ecosystems[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1998, 46: 53-68.
- [9] Williamson C E. What role does UV-B radiation play in freshwater ecosystems? [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40: 386-392.
- [10] Williamson C E. Effects of UV radiation on freshwater ecosystems [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 1996, 51: 245-256.
- [11] Yang Dingtian, Chen Weimin, Zhang Yunlin, et al. Effect of underwater light spectrum primary production of the Taihu Lake[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(2): 24-28. [杨顶田, 陈伟民, 张运林, 等. 太湖水体光学特征及其对水中初级生产力的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(2): 24-28.]
- [12] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (2nd) [M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [13] Vincent W F, Rae R, Laurion I, et al. Transparency of Antarctic ice-covered lakes to solar UV radiation[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43: 618-624.
- [14] Sommaruga R. The role of solar UV radiation in the ecosystem of alpine lakes[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2001, 62: 35-42.
- [15] Rae R, Williams C H, Hawes I, et al. Penetration of solar ultraviolet radiation into New Zealand lakes: Influence of dissolved organic carbon and catchment vegetation[J]. *Limnology*, 2001, 2: 79-89.
- [16] 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.
- [17] Williamson C E, Stemberger R S, Morris D P, et al. Ultraviolet radiation in North American lakes: Attenuation estimates from DOC measurements and implication for plankton communities[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41: 1 024-1 034.
- [18] Michael T A, Richard D R, Fumie K, et al. The attenuation of ultraviolet radiation in high dissolved organic carbon waters of wetlands and lakes on the northern Great Plains[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 292-299.
- [19] Huovinen P S, Penttil H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland [J]. *Chemosphere*, 2003, 51: 205-214.
- [20] Kirk J T O. Optics of UV-B radiation in natural waters[J]. *Archiv für Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 1994, 43: 1-16.
- [21] Bertilsson S, Tranvik L J. Photochemical transformation of dissolved organic matter in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 753-762.
- [22] Morris D P, Zagarese H E, Williamson C E, et al. The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40: 1 381-1 391.
- [23] Laurion I, Ventura M, Catalan J, et al. Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among- and within-lake variability[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 1 274-1 288.
- [24] Xenopoulos M A, Schindler D W. Physical factors determining ultraviolet radiation flux in to ecosystem[A]. In: Cockell C S, Blaustein A R, eds. *Ecosystems, Evolution, and Ultraviolet Radiation* [C]. New York: Springer-Verlag, 2001. 37-62.
- [25] Scully N M, Lean D R S. The attenuation of UV radiation in temperate lakes [J]. *Archiv für Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 1994, 43: 135-144.
- [26] Laurion I, Vincent W F, Lean D R S. Underwater ultraviolet radiation: Development of spectral models for northern high latitude lakes [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, 65: 107-114.
- [27] Morris D P, Hargreaves B R. The role of photochemical degradation of dissolved organic matter in regulating UV transparency of three lakes on the Pocono Plateau [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 239-249.
- [28] Schindler D W, Curtis P J, Park B R, et al. Consequences of climate warming and lake acidification for UV-B penetration in North American boreal lake[J]. *Nature*, 1996, 379: 705-708.
- [29] Scheuerlein R, Trembl S, Thar B, et al. Evidence for UV-B induced DNA degradation in *Euglena gracilis* mediated by activation of metal-dependent nucleases[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1995, 31: 113-123.
- [30] 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 dimer detection[J]. *Journal of Phycology*, 1995, 51: 314-321.
- [31] S-qui J A, Maire V, Gabashvili I S, et al. Oxygen evolution loss and structural transitions in photosystem II induced by low intensity UV-B radiation of 280 nm wavelength[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2000, 56: 39-47.
- [32] Campbell D, Erikson M J, Quist G, et al. The cyanobacterium *Synechococcus* resists UV-B by exchanging photosystem II reaction-center D1 proteins[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95: 364-369.
- [33] Assiliev I R, Prasil O, Wyman K D, et al. Inhibition of PS photochemistry by PAR and UV radiation in natural phytoplankton communities[J]. *Photosynthesis Research*, 1994, 42: 51-64.
- [34] Hermann H, H-der D P, K-fferlen M, et al. Study on the effects of

- UV radiation on phytoplankton photosynthetic efficiency by means of a sunlight simulator[J]. *Medical and Biological Environment*, 1995, 23: 36-40.
- [35] Hermann H, H-der D P, Köffler M, et al. Effects of UV radiation on photosynthesis of phytoplankton exposed to solar simulator light [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1996, 34: 21-28.
- [36] Geskes W W C, Burna A G J. UV damage to plant life in a photobiologically dynamic environment: The case of marine phytoplankton [J]. *Plant Ecology*, 1997, 128: 16-25.
- [37] Gerber S, H-der D P. Effects of solar radiation on motility and pigmentation of the three species of phytoplankton [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1993, 33: 515-521.
- [38] Furgal J A, Smith R E H. Ultraviolet radiation and photosynthesis by Georgian Bay phytoplankton of varying nutrient and photoadaptive[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54: 1 659-1 667.
- [39] Smith R C, Wan Z, Baker K S. Ozone depletion in the Antarctica: Modeling its effects on solar UV irradiance under clear sky conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 7 383-7 397.
- [40] Williamson C E, Zagarese H E, Schulze P C, et al. The impact of short-term exposure to UV-B radiation on zooplankton communities in north temperate lakes[J]. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16: 205-218.
- [41] Chalker-Scott L. Survival and sex ratios of the intertidal copepod, *Tigriopus californicus*, following Ultraviolet-B (290-320 nm) radiation exposure[J]. *Marine Biology*, 1995, 123: 799-804.
- [42] Zagarese H E, Cravero W, Gonzalez P, et al. Copepod mortality induced by fluctuating levels of natural ultraviolet radiation simulating vertical water mixing[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43: 169-174.
- [43] Kouwenberg J 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]. *Marine Biology*, 1999, 134: 285-293.
- [44] Garcia-Pichel F. A model for the internal self-shading in planktonic organisms and its implication for the usefulness of ultraviolet sunscreens[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 1 704-1 717.
- [45] Lindell M J, Granli W, Tranvik L J. Enhanced bacterial growth in response to photochemical transformation of dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40: 195-199.
- [46] Herndl G J, Niklas G M, Frick J. Major role of ultraviolet-B in controlling bacterioplankton growth in the surface layer of the ocean[J]. *Nature*, 1993, 361: 717-719.
- [47] Wilhelm S W, Smith R E H. Bacterial carbon production in Lake Erie is influenced by viruses and solar radiation[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57: 317-326.
- [48] Little E E, Fabacher D L. Comparative sensitivity of rainbow trout and two threatened salmonids, Apache Trout and Lahontan Cutthroat trout, to UV-B radiation[J]. *Archiv für Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 1994, 43: 217-226.
- [49] Kouwenberg J H M, Browman H I, Cullen J J, et al. Biological weighting of ultraviolet (280-400nm) induced mortality in marine zooplankton and fish, Atlantic cod (*Gadus morhua* L) eggs[J]. *Marine Biology*, 1999, 134: 269-284.
- [50] Williamson C E, Metzgar S I, Lovera P A, et al. Solar ultraviolet radiation and the spawning habitat of yellow perch, *Perca flavescens* [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7: 1 017-1 023.
- [51] Licht L E, Grant K P. The effects of ultraviolet radiation on the biology of amphibians[J]. *American Zoologist*, 1997, 37: 137-145.
- [52] Ovaska K, Davis T M, Flamarique I N. Hatching success and larval survival of the frogs *Hyla regilla* and *Rana aurora* under ambient and artificially enhanced solar ultraviolet radiation[J]. *Canadian Journal of Zoology-revue Canadienne de Zoologie*, 1997, 75: 1 081-1 088.
- [53] Corn P S. Effects of ultraviolet radiation on boreal toads in Colorado [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8: 18-26.
- [54] Blaustein A R, Hoffman P D, Hbkitt D G, et al. UV repair and resistance to solar UV-B in amphibian eggs: A link to population declines? [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1994, 91: 1 791-1 795.
- [55] Blaustein A R, Edmond B, Kiesecker J M, et al. Ambient ultraviolet radiation causes mortality in salamander eggs[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5: 740-743.
- [56] Vincent W, Roy S. Solar ultraviolet-B radiation and aquatic primary production: Damage, protection, and recovery [J]. *Environmental Reviews*, 1993, 1: 1-12.
- [57] Zagarese H E, Williamson C E. Modeling the impacts of UV-B radiation on ecological interactions in freshwater and marine ecosystems [A]. In: Biggs R H, Joyner M E B, eds. *Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere NATO ASI Series I* (18) [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 315-328.
- [58] Karentz D, Mceuen F S, Land M C, et al. Survey of mycosporine-like amino acid compounds in Antarctic marine organisms: Potential protection from ultraviolet exposure[J]. *Marine Biology*, 1991, 108: 157-166.
- [59] Ringelberg J, Keyser A L, Flik B J G. The mortality effect of ultraviolet radiation in a red morph of *Acanthodiptomus denticornis* (Crustacea: Copepoda) and its possible ecological relevance[J]. *Hydrobiologia*, 1984, 112: 217-222.
- [60] Chen Shanwen, Wu Baogan. Algal responses to enhanced UV-B and its mechanism on molecular level [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science)*, 2000, 21(5): 88-94. [陈善文, 武宝. 藻类对 UV-B 增强的响应及其分子基础[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2000, 21(5): 88-94.]

EFFECTS OF INCREASED UV-B RADIATION ON AQUATIC ECOSYSTEMS IN LAKES

ZHANG Yun-Lin^{1,2}, QIN Bo-qiang¹, CHEN Wei-Min¹

(1. *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract : In the past 20 years, the decrease in stratospheric ozone concentrations has provoked an increase of UV-B radiation in the wavelength range from 280 to 320nm. The ecological effects of increased UV-B on global environment attract more and more scientific studies. This paper demonstrates the advances of effects of UV-B radiation on aquatic organisms and aquatic ecosystems in lakes. The penetration of UV-B radiation into lakes is highly dependent on the concentration of dissolved organic carbon (DOC) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the water body. Many empirical regression relationships between the concentration of DOC and the diffuse attenuation coefficient, the euphotic depth (1 % of surface irradiance) were found in many studies. Many studies demonstrate a variety of aquatic organism ranging from bacterioplankton and phytoplankton to zooplankton, and even aquatic vertebrates such as fish are vulnerable to damage from increased UV-B radiation. In general, aquatic organisms have three levels responses to minimize the exposure to UV-B: (1) behavioral avoidance, (2) manufacture or sequester UV-B absorbing compounds, (3) DNA repair mechanisms. Some assumptions about the effects of UV-B radiation on Lake Taihu ecosystem are presented.

Key words : UV-B radiation; Dissolved organic carbon; Phytoplankton; Bacterioplankton; Adaption.