

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

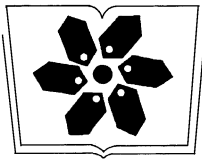
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110091469

吴明丽, 李叙勇. 光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(22): 7202-7212.

Wu M L., Li X Y. Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7202-7212.

光衰减及其相关环境因子对沉水植物 生长影响研究进展

吴明丽^{1,3}, 李叙勇^{1,2,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态重点实验室, 北京 100085;

2. 美国 Smithsonian 环境研究中心, 美国马里兰州 21037; 3. 甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要: 光衰减对沉水植物的生长具有至关重要的影响。系统归纳总结了光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长的影响, 指出: 光因子是沉水植物生长的第一环境要素, 水体中的有色可溶性有机质、浮游植物叶片细胞中的叶绿素和悬浮颗粒物以及水体本身, 对光穿透水体时光强的衰减有着直接的影响, 是影响沉水植物最重要的光衰减水质参数。其他环境因子如营养盐、沉积物和流水动力学等因素, 则会直接或间接影响光衰减水质参数, 进而影响水体透明度和浑浊度, 影响沉水植物的光合作用, 是影响沉水植物光衰减的间接环境因子。提出了研究中重点关注的几个问题。

关键词: 沉水植物; 光衰减; 水质参数; 环境因子; 生长

Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation

WU Mingli^{1,3}, LI Xuyong^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Smithsonian Environmental Research Center, Maryland 21037, America

3 College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Light attenuation has a significant impact on the growth of submersed aquatic vegetation (SAV). SAV occupies a position between the two water and sediment organic nutrition database in aquatic ecosystems, which plays a vital role in the stability of water ecosystems of biological productivity, structure and function. However, with the increasing of water pollution and the accelerated process of eutrophication, there is serious deterioration of water quality worldwide, resulting in light attenuation enhanced widely. The photosynthesis of SAV is the most important metabolic activities. Light is essential for its growth and development. However, the formation of low light is most likely to occur in the water. The growth, development and spatial distribution of SAV are subject to restrict on photosynthesis. SAV receives the amount of light is very limited in water. Light penetrating the water reaches the surface of plant leaves by the constraints of multiple environmental factors. This paper systematically analyzed light attenuation and the associated environmental factors affecting the growth of SAV, and pointed out that light was the most important environmental factor to SAV. Colour dissolved organic matter, chlorophyll, total suspended solids and water itself had direct impact on the intensity decay when light went through the water, which were the most important water quality parameters of light attenuation. Beyond Light factors such as nutrients, sediment, water dynamics and other factors would directly or indirectly affect the light attenuation of water quality

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2012ZX07209002, 2012ZX07203003)

收稿日期: 2011-10-09; 修订日期: 2012-07-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@cees.ac.cn

parameters, thereby affecting water transparency and turbidity and the photosynthesis of SAV, which were important environmental factors to the light attenuation of SAV. Based on the world-wide recession and large areas disappearance of SAV, enhance the recovery and protection of SAV has become an important issue. There have been done a lot of work on the light attenuation studies of SAV, but still exist some problems. We should strengthen the following areas of research: (1) Enhance the water quality parameters of optical attenuation quantitative expression. There are little studies on the nutrients, sediment and other water quality parameters quantify on the light attenuation, we should strengthen research in this area. (2) Enhance the light attenuation in the diagnosis of combination factors. Each factor which affects the light attenuation is not isolated in the water, one factor always linked with other factors, we should consider the combined effects of multiple factors. (3) Strengthen the delivery of land-sourced pollutants (such as nutrients, suspended particles, etc.) on the impact of SAV. The water quality parameters which affect the light attenuation of SAV mostly from land-based, watershed and estuarine characteristics and anthropogenic pollutants play more role on the growth of SAV light attenuation. We should carry out the research of land-sourced pollutants and provide evidence for the control of the light attenuation factors (such as water quality factor, etc.). (4) Large-scale remote sensing monitoring on SAV. There have been done lots of researches during large-scale, long-term and continuous work on SAV abroad, we should learn from foreign experience, take a wide range of long-term remote monitoring and carry out large-scale research on SAV, in order to promote better recovery and development of SAV.

Key Words: submersed aquatic vegetation; light attenuation; water quality parameters; environmental factor; growth

沉水植物是浅水草型湖河及海岸带生态系统中最主要的生物类群,整个植物体沉没在水下,属于大型水生植物^[1]。沉水植物为水生生物提供了生存环境、对增加水体空间生态位、抑制生物性和非生物性悬浮物、吸收水体中的污染物、改善水下光照和溶解氧条件、改善水质等具有重要作用^[2-3]。沉水植物作为水体生态系统中水和底质两大营养库之间的有机接合部位,对水体生态系统的生物生产力、结构与功能的稳定起着至关重要的作用^[4]。然而,随着水体污染的加剧和水体富营养化进程的加快,全球范围内水质恶化严重,造成光衰减广泛增强。水体中有色可溶性有机质、浮游植物叶片细胞中的叶绿素分子和悬浮颗粒物浓度增加,衰减了光照强度;其他因子如营养盐、沉积物、沉积物再悬浮和流水动力学等,影响了水体透明度和浑浊度,是影响沉水植物光衰减的重要环境因子。光衰减引起了沉水植物大面积的衰退和消失,对水生生态系统构成了严重的威胁^[5-6]。本文系统归纳与总结了光衰减对沉水植物生长的影响研究进展,分析了影响光衰减的水质参数及间接影响光衰减的相关环境因子,讨论了相关研究存在的问题,并对今后的研究重点进行了展望。

1 沉水植物自身的光合特征及其对光照强度的需求

光合作用是沉水植物最重要的代谢活动,光照是其生长发育的必备环境因子。Julian 等指出光照是生态系统结构中最主要的控制因素^[7],水生生态系统中也不例外。弱光形成的光照不足在水体中最易发生,一般认为,水底光强不足入射光的 1% 时,沉水植物就不能定居^[8]。沉水植物对水下极度变化的光照环境具有很大的可塑性与适应性。为了适应水体中迅速衰减的光照条件,沉水植物在形态学及生理机制上发生大量变化以最大限度地吸收光辐射。Bowes 等指出沉水植物的光饱和点(净光合作用最大时的光强)及光补偿点(净光合作用为零时的光强)比陆生阳生植物低很多^[9]。如表 1 可以看出,沉水植物具有较低的光饱和点和光补偿点;不同环境条件的制约下,不同的植被类型,沉水植物的最大光合有效速率和光饱和点和补偿点不同。光合作用辐射测量表明,沉水植物的光饱和点在 $45\text{—}700\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,只占到了整个太阳光照的(假设为 $2000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 2.3%—35%^[10],说明了其易适应弱光环境。较低的光饱和点保证了沉水植物一天中有较长的时间达到净光合生产,来保证其正常生长^[11];与陆地植物相比,沉水植物的光补偿点也较低,通常只有 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,仅占到了整个太阳光照的 2.5%^[12]。沉水植物光合作用的光补偿点等光合特征,决定了其在水下可分布的最大深度和光合产量及竞争能力^[13]。

表 1 不同类型沉水植物的光合辐射相关参数值

Table 1 Summary of photosynthesis-irradiance related measurements for different SAV species

植物名称 Vegetation name	1/2 最大光合有效速率 One-half the maximum photosynthesis rate(K_m) /($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	光饱和点 Light saturation point (I_k) /($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	光补偿点 light compensation point (I_c) /($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	参考文献 References
狐尾藻 <i>Myriophyllum</i>	90—365	200—600	35—84	[10,14-15]
茨藻 <i>Najas marina</i>	—	280	5	[16]
苦草属 <i>Vallisneria</i>	22—197	140—179	10—30	[17]
川曼藻 <i>Ruppia maritima</i>	—	45—1200	11—88	[17]
大叶藻 <i>Zostera marina</i>	300	7—700	0.9—35	[18-19]
水盾草 <i>Cabomba caroliniana</i>	160	700	55	[1,20]
伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	22	—	12	[21-22]

20 世纪 70 年代以来,国内外开展了广泛的关于沉水植物光合作用特征的研究^[10,12,23]。Batiuk 等的研究指出,沉水植物的生长发育以及空间分布均受到光合作用的限制^[24]。Sanches 等研究指出了不同的光照强度对沉水植物生物量影响的不同,光照因素是调节腐植酸水生生态系统中营养成分的主导因素^[25]。沉水植物的光合特征受到各种因素的影响,其光合作用能力受植物本身和外界环境因子的双重制约。Jarvis 等指出,不同的光照、温度、溶解氧和盐度等环境条件下,苦草种子的发芽率和植物的抽芽率等也不相同^[26]。不同类型的沉水植物,其生理特征不同,光合特征也有所不同。潘伟斌等研究指出光照强弱对苦草的生长和生物量的积累具有重要作用,高光照条件下苦草的营养繁殖能力最强,能明显促进其生长^[27]。吴英海等的研究指出在 $0.5 \times 10^4 - 10 \times 10^4 \text{ lx}$ 的范围内,光照强度的变化对伊乐藻顶枝产氧量有明显的影响,光照强度与毛产氧量、净产氧量均呈现曲线相关^[28]。袁龙义等研究了不同遮阳处理的光照强度下刺苦草的有性繁殖和无性繁殖方式的资源配制,结果表明,随着遮阳强度的增加,刺苦草的最大叶长、总匍匐茎长和总的叶面积减少,遮蔽强度越大,分配到地下的生物量越多,冠根比率越小;遮阳生境下的刺苦草的有性繁殖受限,无性繁殖形成的分株和冬芽也比自然状态少^[29]。因此,光照强度是影响沉水植物进行光合作用的主要限制因子。

2 光衰减对沉水植物生长的影响

2.1 光衰减产生的原因

沉水植物在水体中接收到的光照量是非常有限的,光照穿透水体到达植物叶片表面受多重环境因子的制约(图 1)^[1,24]。太阳辐射在水下的传输和分布受制于水及水中各组成物质对光的吸收和散射,其中,水分子对红外光谱有强烈的吸收作用,总悬浮颗粒物和有色可溶性有机质对可见光的蓝、绿光有较强吸收,浮游植物叶绿素在 440 nm 和 670 nm 波段附近具有光吸收特征^[30]。因此源自太阳的光能迅速衰减,加之在空气与水体交界处的损失(10% 左右)^[8],以及流水动力学(流速、波浪和潮汐等)等因素的影响,光照不足的现象在水体中最易发生,水体光强成为沉水植物生长的主要限制因子。

水体本身对光照具有很强的吸收和反射作用。除此以外,还有悬浮颗粒物和称为“黄色物质”的有色可溶性有机物质。光与水体本身、水中溶解物质和悬浮颗粒相互作用,发生散射、吸收和荧光等物理效应。散射效应是水中分子和悬浮颗粒通过折射、反射和衍射,引起入射光以不同光强向各个方向传播的效应,它使入射光束通过水体成像的分辨率和可观测距离都减小。吸收效应把光能转变为热能等其他形式的能量,使光辐射能量受到损失。散射和吸收效应引起光辐射传输能量的衰减,导致水中光场结构发生复杂的变化。

张运林等测定了水下光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)、光谱成分及悬浮物、叶绿素 a 等参数,分析了水下变化及光谱分布、光衰减系数的光谱分布、辐照度比的变化、水下光场的数值拟合,表明,PAR 的垂直分布主要取决于水体中的物质组成,从静止到小水流、大水流状态,PAR 的衰减显著增大,分别由 1 增大到 2 m^{-1} ,再到 4 m^{-1} ;表面辐照度最大值一般在 560 nm 左右,随着深度增加最大值出现波段向红光波段移动,水下光谱在蓝光波段衰减最强烈,其次是绿光、红光;光衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋

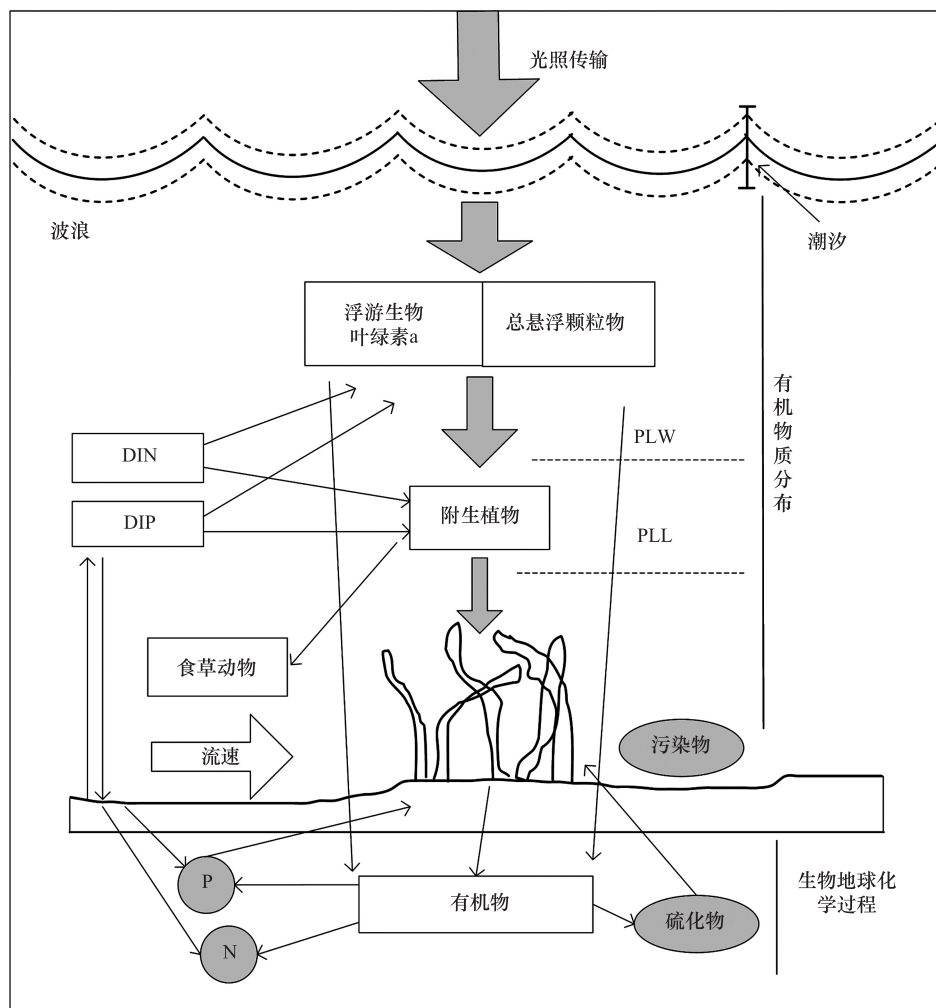


图1 影响沉水植物光衰减的环境因子相互关系图

Fig.1 Interaction among environmental factors affecting the light attenuation of submerged aquatic vegetation

DIN: 溶解态无机氮; DIP: 溶解态无机磷; P: 氮; N: 磷; PLW: 光照透过水体的光照量; PLL: 植物体叶片表面光照量

势^[31]。因此可以看出,水下光照的衰减受到了一系列环境因素的制约,沉水植物在水下接收到的太阳光是十分有限的。

2.2 光衰减水质参数

水下光照的衰减主要是由于水体本身和某些溶解性微粒物质引起的。Kirk 等指出有色可溶性有机质 (CDOM)、存在于浮游植物叶片细胞中的叶绿素分子 (Chl) 和总悬浮颗粒物 (TSS) 和水体本身是影响沉水植物最重要的光学水质参数^[30]。光照在水体中的衰减即光有效辐射 PAR 系数的诊断主要通过主要是有色可溶性有机质 (CDOM)、存在于浮游植物叶片细胞中的叶绿素分子 (Chl)、总悬浮颗粒物 (TSS) 以及水体本身 (W) 对光照的吸收和散射来体现的。通常运用公式^[32-33]:

$$E_d(Z) = E_d(0) \exp[-K_d(\text{PAR})Z] \quad (1)$$

$$K_d(\text{PAR}) = K_w + K_y[\text{CDOM}] + K_c[\text{Chl}] + K_s[\text{TSS}] \quad (2)$$

式中: $E_d(Z)$ 表示水深在 Z 处的 PAR 的余弦值; $E_d(0)$ 表示水体表面处 PAR 的余弦值; $K_d(\text{PAR})$ 为光合有效辐射的衰减系数; K_w 和 K_y 为 W 和 CDOM 对光照的衰减系数; K_c 和 K_s 分别为 Chl 和 TSS 的衰减系数。

若 f_{lr} 表示满足沉水植物生长和存活的水体表面入射光的一部分, $Z_{\max}$ 为沉水植物保护和恢复的最大深度, 通常把 K_w 和 K_y 综合考虑为 $K_{(W+\text{CDOM})}$, 则公式 (1) 和 (2) 结合起来为:

$$-\ln(f_{lr})/Z_{\max} = K_{(W+\text{CDOM})} + K_c[\text{Chl}] + K_s[\text{TSS}] \quad (3)$$

公式(3)经过重新整理可以得出 Chl 和 TSS 存在着明显的线性关系:

$$[TSS] = (-\ln(f_{lr}) - Z_{\max} K_{(W+CDOM)}) / K_s Z_{\max} - K_c / K_s [Chl] \quad (4)$$

CDOM、Chl 和 TSS 对光穿透水体时光照的衰减具有直接的影响。Alison 等指出 CDOM 对近紫外及蓝光,具有衰减作用,这种衰减与沉水植物定居区域的盐分浓度具有很好的相关性^[34-36]。Barko 等人的研究结果也表明,沉水植物的光合色素含量和光照具有明显的相关性^[37]。不同波长的光在水中被吸收的强度不一样,蓝光被吸收的强度最小,在红光波段被吸收的强度迅速增加。由于红光波段的选择性吸收,水体对光照衰减的大小与其深度密切相关^[38]。浮游植物的叶绿素又被称为色素细胞,对光照具有吸收和散射的双重功能。浮游植物对光照的衰减强度与波长具有很好的相关,因浮游植物种类组成成分的不同而不同,与水体深度和组成成分的不同而不同^[39]。浮游植物叶绿素 a 的最大吸收值分别在 440 nm 附近的蓝区和 680 nm 附近的红区,叶绿素 b 和 c 等的最大吸收值分别在 400—650 nm 间^[40]。商少凌等指出浮游植物受色素组成和打包效应的影响,对光照的吸收与叶绿素 a 浓度的关系多数为非线性^[41]。TSS 对光照具有吸收和散射两方面的影响^[42]。浮游植物对光照衰减的大小随海水深度和组成成分的不同而不同^[43],并在较小的程度上与自然种群的物种组成有关。由于水中附生植物的存在,其叶片表面粘附的矿物质和有机质碎石对光照也有一定的削减作用。浮游植物还对沉水植物产生遮光作用,从而抑制沉水植物的生长,是水下光照减弱是水生植物衰退的原因之一。

由于水体环境的复杂性与光谱吸收和散射方面存在的固有的变化性,易导致一些具有统计学意义的光衰减系数的过低估量,以及各种因素影响下的光学水质参数的定量表达。如在某些沉水植物定居的水源和主要的河口处,颗粒物等会发生显著的改变,因此区域性的光学模型需要建立起来,为满足不同地域沉水植物生长的光照需求提供依据。

2.3 影响光衰减的间接环境因子

2.3.1 营养盐

以水体营养盐浓度升高为主要原因导致的水体富营养化已经成为世界性的环境问题,沉水植物在许多富营养化水体中往往退化甚至消失。Henry 等指出,物种的组成和及其丰度的大小均与营养盐浓度和水质条件相关,营养盐浓度的大小对沉水植物的丰度和物种的多样性具有重要的作用^[43]。李瑞香等在青岛近岸对浒苔的研究表明,不同的营养盐条件对浒苔的生长具有明显的影响^[44]。一方面,水体中较高的氮、磷浓度会对沉水植物产生类似于盐胁迫一样的逆境胁迫,影响沉水植物正常的生理活动,抑制其生长;另一方面,营养盐浓度的增加会引起光照的衰减。朱宜平等以小型富营养水体上海崇明中心湖为研究对象,指出影响光 PAR 衰减的主要消光因子是溶解性有机碳和悬浮物^[45]。Chamber 等认为沉水植物对富营养化的敏感性主要是受水体透明度下降而引起的光衰减影响^[46]。Roberts 等的研究表明,附着生物对光合有效辐射的吸收可高达 80% 以上,它们减少到达沉水植物表面的光合有效辐射,直接影响植物的光合速率,进而影响植物的生长;而附着生物层阻碍沉水植物对水柱中的营养盐的吸收利用,尤其是对无机碳的吸收利用,也会影响沉水植物的光合作用^[47]。在富营养化水体中,附着生物不仅会促进沉水植物的消亡,而且对沉水植物的恢复起阻遏作用^[48]。菹草虽然是对富营养化水体耐受能力较强的一种沉水植物,但在营养盐浓度较高的水体中,其生长也会受到抑制。王国祥等通过对菹草的研究指出,在静止水体中,营养盐浓度升高导致浮游藻类大量繁殖,水体混浊度增加、水下光强减弱,会对菹草的光合结构 PS II 产生一定的损伤,菹草的光合作用能力受到抑制^[49]。秦伯强通过波浪水槽实验研究表明波浪扰动可迅速增加水体中颗粒态的营养盐,但是对于溶解态营养盐,尤其是水体中活性磷浓度的影响,则受沉积物性质、水-沉积物间隙水磷浓度差,以及水-沉积物中氧含量等多方面因素的影响^[50]。水力扰动作用会引起水体透明度的变化,其导致湖泊沉积物营养盐的释放情况远比静态释放量大,是影响湖泊沉积物营养盐释放的一种重要因素,一定条件下甚至是湖泊营养盐释放的主要来源。

因此,营养盐是限制到达沉水植物叶片光照量的重要因素,是间接的影响因素。营养盐浓度的升高间接增加了水体浑浊度,使水体透明度降低。水体浊度越高,水下光照强度衰减越明显,对沉水植物的光照需求量

的影响就越大。

2.3.2 沉积物

沉积物在决定沉水植物生长、形态(毛刷型和聚合型)和分布方面具有重要作用,是影响沉水植物生长的主要因素之一^[51-52]。米玮洁等的研究指出,沉积物不仅会影响到菹草的营养生长,还会影响菹草繁殖体的产生以及繁殖体进一步的发芽能力^[53];雷泽湘等的研究也指出,不同沉积物对沉水植物的生长具有不同影响,其中以生物量的影响最为显著^[54]。沉积物沉积量的增加会遮掩沉水植物的叶片,影响其光合作用,进而影响正常生长。

沉积物再悬浮是水生生态系统的重要过程,悬浮物浓度对水体透明度、光衰减系数和真光层深度均有显著影响。在水体较深的地区,浮游植物是影响光照衰减的重要因素,而在浅海海滩以及内陆湖泊沉水植物宜居的地区,悬浮沉积物则是造成光照衰减的主导因素。由于人类活动及自然因素(风暴潮、船舶运输、底栖动物引起的生物扰动等)造成的沉积物动力学变化是影响沉水植物生长的重要驱动因子。风浪扰动引起悬浮物浓度的增加尤其是无机颗粒物的增加是影响水下光场的主导因素^[55]。Lawson 等在浅海岸咸水湖的研究中指出总悬浮颗粒物是影响区域光照衰减的主导性因子,沉积物是水下光照的主要影响因子,在水体光照衰减中占主导地位^[56]。陈灿通过模拟湖流引起湖泊表层沉积物再悬浮环境,观测沉水植物苦草在不同光强下生理和形态的响应机制,沉积物再悬浮后细质颗粒附着在苦草叶片上,达到叶片的光照量减少,影响其光合机能,是苦草种群退化的重要机制之一^[57]。谢贻发等通过室内模拟实验,研究了沉积物再悬浮对苦草和马来眼子菜 2 种沉水植物生长的影响,沉积物再悬浮使水体浊度增加,减少了光照的摄入,对苦草的分蘖和块茎数也产生了明显的影响;马来眼子菜的生物量和分蘖数同样受到了沉积物再悬浮的影响,但影响程度小于苦草^[58]。朱伟等的研究指出悬浮泥沙对水下光强的衰减遵循指数函数衰减规律,光学衰减系数与泥沙含量呈显著的线性相关性,泥沙的含量对水下光强的分布起到重要的作用^[59]。因此,沉积物再悬浮增加了上浮水体的悬浮物浓度,植株的光合作用随水体浊度的增加而显著降低,促进了光衰减。

沉积物及其再悬浮对沉水植物的生长、繁殖具有抑制作用。但是目前的研究中没有充分考虑沉积悬浮物对水体光照的吸收和散射对水体反射率的影响,如何利用水体固有的光学特性和表观光学特征的联系,更精确的反映水体中悬浮物浓度对光照的衰减还需要做进一步的研究。

2.3.3 流速

沉水植物可以降低水流速度、减缓波浪、改变沉积物特性、甚至改变水层高度^[60-61];相反,这些因素也会影响沉水植物的生产力。因此,在沉水植物和其生长栖息地的非生物条件之间就存在着一个复杂的反馈机制:通过减小流速和光照衰减,沉水植物为细小的无机沉淀物和低密度的细碎颗粒创造了定居条件,这又会影响到光照的可用性、营养物的传输以及毒害物质的产生。王付等的研究指出,沉水植物水流流速分布以植物冠层为拐点呈现反“S”形分布,在植被层上方流速增大,而在植被层内部流速迅速削减,沉水植物对于水流的阻挡作用相当明显^[62]。赵振兴等的研究也指出,植被对水流的阻力大小与植被的高度、抗弯刚度以及种植密度等有密切的关系^[63]。沉水植物密度较高的区域,水流流速减小,较多的颗粒物质沉淀下来,光照的可利用性降低,影响沉水植物对光照强度的需求;沉水植物密度较低时,流速和波浪的衰减能力也较低,则会增加光照和营养物质的可用性。因此,流速大小对颗粒物质会产生一定的影响,影响光照的可用性,进而影响沉水植物的生长。

2.3.4 波浪

波浪对沉水植物有直接和间接两方面的影响。直接影响为波浪直接侵蚀沉水植物生长的基床,以及暴风雨和船体运动造成植物体的摇摆晃动;间接影响为波浪引发的沉淀物再悬浮、沉积物粒度大小的变化等影响到光照的可用性,对沉水植物的生长产生一定影响。波浪的作用深度影响沉水植物分布的最小深度。由于波浪对沉淀物的冲刷和植被的击打增加了水体的浑浊度,促进光照的衰减,因此,沉水植物的最小深度分布与波浪作用引起的沉淀物再悬浮有关。Chambers 指出^[46],沉水植物分布的最小深度($Z_{\min}$)与波浪作用的最大水体

深度(Z_{wave})是相等的,均为波浪长度(L)的一半:

$$Z_{\min} = Z_{\text{wave}} = L/2 \quad (5)$$

波长(L)与波长周期(T)的关系为:

$$L = gT^2/2\pi \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度(9.805 m/s^2)

2.3.5 湍流和潮汐

湍流是指较大的水流形态在时间和空间上不规则运动的叠加。它形成在沉淀物表面或者是沉水植物叶片表面。沉水植物枝叶之间的距离决定了湍流尺度的大小^[64-65]。湍流取决于流速,流速低的地方,湍流较小;流速增大,湍流则随之增加。水流冲击和冲刷着植被,造成了植被周围的湍流强度相应减小。在植物群落中,湍流可以重新生成和调整,旋转其漩涡的尺度大小。涡流扩散引起的颗粒物分散、营养物质和碳质量的传递,成为影响沉水植物生长的重要环境因子。

潮汐对沉水植物的最大深度分布却是混杂因素,其分布受到上部(潮汐和波浪)和下部(光照)深度的限制。Tatsuya Shibata 等的研究指出光照在大潮时的衰减强度比在小潮时的大。潮汐较大时,往往引起更多的颗粒物的悬浮,水体浑浊度增加,光照的可利用性减小^[66]。

3 影响沉水植物生长的光照和相关环境因子需求的定量诊断

基于世界范围内沉水植物的大面积衰退和消失,加强沉水植物的恢复和保护已经成为一个重要的议题。在沉水植物的恢复和保护上,国内典型的案例是王洪铸在 2001 年 12 月—2003 年 3 月对长江流域四个湖泊区域的大型水生植被所做的研究,指出在生长的平均水体深度、塞克盘深度(透明度盘深度)、温度、总氮、总磷和叶绿素 a 等因素中,塞克盘深度与水生植被生长的平均水体深度比是影响植被生物量大小的关键因素,同时指出 3—6 月并不是沉水植被积极生长的季节,但却是时间因素作用的关键时期^[67]。国外的研究中,美国切斯匹克海湾是一个典型的范例。如表 2^[24]美国国家海洋和大气局(NOAA)对切斯匹克海湾地区沉水植物的研究,在不同的沉水植物的恢复深度内,采集植物生长季节的数据,计算出了沉水植物影响沉水植物生长的一些环境因子的需求数据,指出了光照是影响沉水植物生长主要环境因子,总悬浮固体浮游生物等第二性环境因子对沉水植物也具有一定的影响,得出了满足沉水植物生长的一些环境影响因子的定量诊断指标。由表 2 可以看出,沉水植物生长的主要环境因子即对光照的需求量在淡水区和低盐度区均>9%,中盐度和高盐度区光照的需求量均>15%;其他生长状况因盐度区域的不同而不同。沉水植物生长的第二性环境因子,总悬浮颗粒物和浮游生物叶绿素含量在各个盐度区域的生长要求均相同,即<15 mg/L;其他生长状况因盐度区域的不同而不同;溶解无机氮在中盐度和高盐度区为<0.15 mg/L,溶解无机磷在沉水植物的生长要求下均<0.02 mg/L,其他生长状况在各个盐度区域均不相同。这种定量诊断指标为不同盐度区域沉水植物更好的恢复和发展提供了借鉴依据。

4 讨论与展望

基于国内外关于影响沉水植物生长的光衰减及其相关环境因子的系统分析,光照是沉水植物生长的主要限制因子,光衰减会对沉水植物生长产生不利影响;非光因素如营养盐、沉积物、流速、波浪、湍流和潮汐等,会对光衰减产生一定的影响。迄今为止,关于沉水植物光衰减的研究已经做了大量的工作,但仍存在一些问题,应加强以下几个方面的研究:

(1)加强沉水植物光衰减水质参数的定量表达。由于水体环境的复杂性,沉水植物的生长受到多种环境因子的影响,目前的研究中大多是关于叶绿素、有色可溶性有机质和总悬浮颗粒物等光衰减水质参数的定量表达,但是如营养盐、沉积物等光衰减水质参数定量表述还较少,应加强这方面的研究。

(2)加强影响沉水植物光衰减因素的综合诊断研究。水体中影响光衰减的每个因子并不是孤立存在的,各因子之间相互联系、相互制约,应考虑多重因子的综合影响。基于切斯匹克海湾的长期研究工作制定的沉

表2 切斯克海湾沉水植物在不同盐度地区生长水质要求比较

Table 2 Comparison of SAV Habitat Requirements with median levels of water quality variables among SAV growth categories within salinity regimes in Chesapeake Bay

		主要环境因子 Primary Requirements		第二性环境因子 Secondary Requirements		
	沉水植物生长状况 SAV Growth Condition	植物体叶片 表面光照量 (Percent Light at Light) PLL/%	总悬浮颗粒物 (Total Suspended Solids) TSS /(mg/L)	浮游生物叶绿素 a (Plankton Chlorophyll-a) /(ug/L)	溶解无机氮 (Dissolved Inorganic Nitrogen) /(mg/L)	溶解无机磷 (Dissolved Inorganic Posphorus) /(mg/L)
淡水区 Tide Fresh	生长要求	>9	<15	<15	—	<0.02
	始终丰富	18	10.0	8.8	0.94	0.006
	有时没有	5.6 *	20.0 *	23.8 *	0.66	0.015
	通常没有	1.3	24.0	19.4	1.17	0.033
	始终没有	6.6	17.0	7.7 * *	0.37	0.020
低盐度区 Oligohaline	生长要求	>9	<15	<15	—	<0.02
	始终丰富	8.5 *	17.0 *	4.7	0.86	0.047 *
	有时没有	4.3 *	25.0 *	28.7 *	0.12	0.005
	通常没有	3.8	27.3	17.4	0.15	0.023
	始终没有	2.2	32.8	13.0 **	0.23	0.020
中盐度区 Mesohaline	生长要求	>15	<15	<15	<0.15	<0.01
	始终丰富	41	8.0	8.1	0.08	0.004
	有时没有	28	11.0	10.0	0.08	0.005
	通常没有	19 **	15.0	15.2	0.09 **	0.010
	始终没有	5.3	27.0	11.9 **	0.18	0.015
高盐度区 Polyhaline	生长要求	>15	<15	<15	<0.15	<0.02
	始终丰富	4.	10.0	6.3	0.05	0.003
	有时没有	22	11.1	7.1	0.14	0.015
	通常没有	—	—	—	—	—
	始终没有	15	11.5 **	6.0 **	0.21	0.025

* 表示生长条件未达到满足,但沉水植物通常存在; ** 表示生长条件达到了满足,但沉水植物通常不存在;— 为无数据

水植物生长的环境因子的定量诊断指标,虽然具有一定的普遍性的特征,但在沉水植物的恢复上,还是应结合本地区沉水植物种类的特殊要求及当地环境因子特征,研究制定适合本地区指导沉水植物恢复的综合定量诊断指标。

(3)加强陆源污染物(如养分、悬浮颗粒物等)的输送对沉水植物的影响研究。影响沉水植物光衰减的污染物大多源于陆地,流域和海湾结构特征以及人为污染物的排放对沉水植物生长光衰减的影响较大,陆源污染物对沉水植物生长影响的研究,将为如何从流域陆地源头控制影响光衰减的因子(如水质因子等)提供科学依据。

(4)对沉水植物进行大尺度的遥感监测。目前国内也有很多关于沉水植物遥感方面的研究,但大多是小范围、短期性和间断性的研究,国外在进行沉水植物大尺度、长期性和连续性的研究上已经做了大量的工作。我国可以借鉴国外的经验,对沉水植物进行大范围的长期连续性的遥感监测,为开展大尺度的沉水植物研究工作及保护和恢复提供基础数据。

我国在开展沉水植物的研究上,亟待解决的问题主要有:控制污染,改善水域水质,使其适于沉水植物的生长;禁止破坏性捕捞方式,降低捕捞强度等措施,减轻人为活动对沉水植物生长栖息地造成的压力;坚持多学科、多层次相交叉,理论与实践相结合,同时参照各个国家和地区对沉水植物的恢复管理措施,运用高效先进的科技方法,加强沉水植物的保护和恢复。

References:

- [1] Wang H, Pang Y, Liu S B, Ma X. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3958-3968.
- [2] Kong Y Y, Xia Y P, Chen Y C. Research on the submerged plants and their landscape uses. *Chinese Landscape Architecture*, 2005, 21(6): 65-68.
- [3] Väliaranta M, Weckström J, Siitonen S, Seppä H, Alkio J, Juutinen S, Tuittila E S. Holocene aquatic ecosystem change in the boreal vegetation zone of northern Finland. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 45(3): 339-352.
- [4] Yuan L. A Study on the Remote Sensing Monitoring of Submerged Aquatic Vegetation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [5] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, Orth R J, Dennison W C, Olyarnik S, Calladine A, Fourqurean J W, Heck K L Jr, Hughes A R, Kendrick G A, Kenworthy W J, Short F T, Williams S L. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(30): 12377-12381.
- [6] Vaudrey J M P, Kremer J N, Branco B F, Short F T. Eelgrass recovery after nutrient enrichment reversal. *Aquatic Botany*, 2010, 93(4): 237-243.
- [7] Julian J P, Seegert S Z, Powers S M, Stanley E H, Doyle M W. Light as a first-order control on ecosystem structure in a temperate stream. *Ecohydrology*, 2011, 4(3): 422-432.
- [8] Su R L, Li W. Advances in research on photosynthesis of submerged macrophytes. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(S1): 128-138.
- [9] Bowes G. Pathways of CO₂ fixation by aquatic organisms // Lucas W J, Berry J A, eds. *Inorganic Carbon Uptake by Aquatic Photosynthetic Organisms*. Rockville, Maryland: American Society of Plant Physiologists, 1985: 187-210.
- [10] Harley M T, Findlay S. Photosynthesis-irradiance relationships for 3 species of submersed macrophytes in the tidal freshwater Hudson River. *Estuaries and Coasts*, 1994, 17(1B): 200-205.
- [11] Han Q Y, Shi P. Progress in the study of seagrass ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5561-5570.
- [12] Dunton K H, Tomasko D A. In situ photosynthesis in the seagrass *Halodule wrightii* in a hypersaline subtropical lagoon. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 107(3): 281-293.
- [13] Liu J K. *Senior Aquatic Biology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [14] Rybicki N B, Carter V. Light and temperature effects on the growth of wild celery and Hydrilla. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2002, 40: 92-99.
- [15] Tóth V R, Vari Á, Lugossi S. Morphological and photosynthetic acclimation of *Potamogeton perfoliatus* to different environments in Lake Balaton. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2011, 40(3): 43-51.
- [16] Sanderson B G, Asaeda T, Rajapakse L, Redden A M. Mechanisms affecting biomass and distribution of charophytes and *Najas marina* in Myall lake, New South Wales, Australia. *Hydrobiologia*, 2008, 608(1): 99-119.
- [17] Newell R I E, Koch E W. Modeling seagrass density and distribution in response to changes in turbidity stemming from bivalve filtration and seagrass sediment stabilization. *Estuaries and Coasts*, 2004, 27(5): 793-806.
- [18] Koch E W, Beer S. Tides, light and the distribution of *Zostera marina* in Long Island Sound, U. S. A. *Aquatic Botany*, 1996, 53(1/2): 97-107.
- [19] Thom R M, Southard S L, Borde A B, Stoltz P. Light requirements for growth and survival of eelgrass (*Zostera marina* L.) in Pacific Northwest (USA) estuaries. *Estuaries and Coasts*, 2008, 31(5): 969-980.
- [20] Klavens S K, Madsen T V, Maberly S C. Crassulacean acid metabolism in the context of other carbon-concentrating mechanisms in freshwater plants: a review. *Photosynthesis Research*, 2011, 109(1/3): 269-279.
- [21] Santos M J, Anderson L W, Ustin S L. Effects of invasive species on plant communities: an example using submersed aquatic plants at the regional scale. *Biological Invasions*, 2011, 13(2): 443-457.
- [22] Zhang Y H, An Y J, Zhu C, Yang S. Physiological effects of dissolved inorganic carbon on common submerged macrophytes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(6): 1020-1030.
- [23] Dennison W C, Alberte R C. Role of daily light period in the depth distribution of *Zoster marina* (eelgrass). *Marine Ecology Progress Series*, 1985, 25: 51-61.
- [24] Batiuk R A, Bergstrom P W. In Chesapeake Bay Submerged Aquatic Vegetation Water Quality and Habitat-based Requirements and Restoration Targets; A second technical synthesis, CBP/TRS 245/00, EPA 903-R-00-014. Annapolis: Chesapeake Bay Program, 2000.
- [25] Sanches L F, Guariento R D, Caliman A, Bozelli R L, Esteves F A. Effects of nutrients and light on periphytic biomass and nutrient stoichiometry in a tropical black-water aquatic ecosystem. *Hydrobiologia*, 2011, 669(1): 35-44.
- [26] Jarvis J C, Moore K A. Influence of environmental factors on *Vallisneria americana* seed germination. *Aquatic Botany*, 2008, 88(4): 283-294.
- [27] Wang S M. The Combined Effect of Light and N, P on Growth and P hysiology of *Vallisneria Natans* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [28] Wu Y H, Bian G Q, Fang J D, Zhao J J, Chen X Y. Study on the effect of environmental factors on the photosynthesis of elodea nuttallii. *Sichuan Environment*, 2009, 28(6): 1-4.
- [29] Yuan L Y, Li S C, Li W, Liu G H. The effects of light on the life-history strategy of submerged macrophyte *vallisneria spinulosa*. *Journal of Jiangxi*

- Normal University: Natural Science, 2008, 32(4): 482-487.
- [30] Kirk J T O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 47-144.
- [31] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, Hu W P, Gao G, Zhu G W, Luo L C. Attenuation of photosynthetically available radiation (PAR) in Meiliang Bay under different winds and waves. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1133-1137.
- [32] Gallegos C L. Calculating optical water quality targets to restore and protect submersed aquatic vegetation: Overcoming problems in partitioning the diffuse attenuation coefficient for photosynthetically active radiation. Estuaries and Coasts, 2001, 24(3): 381-397.
- [33] Pérez G L, Llamas M E, Lagomarsino L, Zagarese H. Seasonal variability of optical properties in a highly turbid lake (Laguna Chascomús, Argentina). Photochemistry and Photobiology, 2011, 87(3): 659-670.
- [34] Cuthbert I D, del Giorgio P. Toward a standard method of measuring color in freshwater. Limnology and Oceanography, 1992, 37(6): 1319-1326.
- [35] Yang D T, Chen W M, Wu C S, Zhu G W, Zhang Y L, Cao W X. The effects of CDOC on the attenuation of close ultraviolet and blue light in Chaohu Lake and Longgan Lake. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(3): 269-274.
- [36] Branco A B, Kremer J N. The relative importance of chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM) to the prediction of the diffuse attenuation coefficient in shallow estuaries. Estuaries and Coasts, 2005, 28(5): 643-652.
- [37] Barko J W, Filbin G J. Influences of light and temperature on chlorophyll composition in submersed freshwater macrophytes. Aquatic Botany, 1983, 15(3): 249-255.
- [38] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I Waters). Journal of Geophysical Research-Oceans, 1988, 93(C9): 10749-10768.
- [39] Atlas D, Bannister T T. Dependence of mean spectral extinction coefficient of phytoplankton on depth, water color, and species. Limnology and Oceanography, 1980, 25(1): 157-159.
- [40] Körner S. Loss of submerged macrophytes in shallow lakes in north-eastern Germany. International Review of Hydrobiology, 2002, 87(4): 375-384.
- [41] Wu J Y, Shang S L, Hong H S, Li Y. Advances in the studies on light absorption properties of phytoplankton. Marine Sciences, 2006, 30(6): 77-81.
- [42] Gallegos C L. Refining habitat requirements of submersed aquatic vegetation: role of optical models. Estuaries and Coasts, 1994, 17(1B): 187-199.
- [43] Ruhl H A, Rybicki N B. Long-term reductions in anthropogenic nutrients link to improvements in Chesapeake Bay habitat. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(38): 16566-16570.
- [44] Li R X, Wu X W, Wei Q S, Wang Z L, Li Y, Sun P. Growth of enteromorpha prolifera under different nutrient conditions. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 211-216.
- [45] Zhu Y P, Zhang H P. Analysis on the photosynthetically available radiation (PAR) attenuation in small eutrophic lake. Environmental Pollution and Control, 2011, 33(3): 65-68.
- [46] Chambers P A. Nearshore occurrence of submersed aquatic macrophytes in relation to wave action. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, 44(9): 1666-1669.
- [47] Domozych D S, Roberts R, Danyow C, Flitter R, Smith B, Providence K. Plasmolysis, hechtian strand formation, and localized membrane-wall adhesions in the desmid, *Closterium acerosum* (Chlorophyta). Journal of Phycology, 2003, 39(6): 1194-1206.
- [48] Irfanullall H M, Moss B. Factors influencing the return of submerged Plants to a clear-water, shallow temperate lake. Aquatic Botany, 2004, 80(3): 177-191.
- [49] Ma T. Effect of Water Nutrient on the Growth of Potamageton Crispus [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007.
- [50] Ding Y Q, Zhu G W, Qin B Q, Wang Y P, Wu T F, Shen X, Hong D L. Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 273-278.
- [51] Livingston R J, McGlynn S E, Niu X F. Factors controlling seagrass growth in a gulf coastal system: Water and sediment quality and light. Aquatic Botany, 1998, 60(2): 135-159.
- [52] Devereux R, Yates D F, Aukamp J, Quarles R L, Jordan S J, Stanley R S, Eldridge P M. Interactions of *Thalassia testudinum* and sediment biogeochemistry in Santa Rosa Sound, NW Florida. Marine Biology Research, 2011, 7(4): 317-331.
- [53] Mi W J. Study on the Nutritional Characteristics of Different Lake and the Responsive Growth of Submersed Macrophyte crispus L in the Sediments [D]. Wuhan: Hua Zhong Agricultural University, 2008.
- [54] Lei Z X, Xie Y F, Liu Z W. Effects of different sediments from Meiliang Bay of Taihu Lake on the growth of three submersed aquatic macrophytes. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2006, 40(2): 260-264.
- [55] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, Gao G, Luo L C, Chen W M. Changjiang shallow lake sediment resuspension on research of underwater light. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35(S2): 101-110.
- [56] Lawson S E, Wiberg P L, Mcglathery K J, Fugate D C. Wind-driven sediment suspension controls light availability in a shallow coastal lagoon. Estuaries and Coasts, 2007, 30(1): 102-112.
- [57] Xie Y F, Hu Y J, Liu Z W, Xie G S. Effects of sediment resuspension on the growth of submerged plants. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27

(1): 18-22.

- [58] Chen C. Effect of suspending lake sediments on photosynthetic function of *Vallisneria asiatica*. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(1): 6-10.
- [59] Zhu W, Jiang M Y, Zhao L F, Tian T. Field survey and analysis of influence of suspended sediment on algae growth. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 241-247.
- [60] Rybicki N B, Jenter H L, Carter V, Baltzer R A, Turtora M. Observations of tidal flux between a submersed aquatic plant stand and the adjacent channel in the Potomac River near Washington, DC. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(2): 307-317.
- [61] Li H L, Lei G C, Zhi Y B, Bridgewater P, Zhao L, Wang Y, Deng Z F, Liu Y H, Liu F D, An S Q. Phenotypic responses of *Spartina anglica* to duration of tidal immersion. *Ecological Research*, 2011, 26(2): 395-402.
- [62] Wang C, Wang C. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 816-822.
- [63] Wang Y Y. Experiment Research on Hydraulic Characteristics of the Channel with Double Vegetations [D]. Nanjing: HoHai University. 2007.
- [64] Ackerman J D, Okubo A. Reduced mixing in a marine macrophyte canopy. *Functional Ecology*, 1993, 7(3): 305-309.
- [65] Zhang Z E, Campbell A, Leus D, Bureau, D. Recruitment patterns and juvenile-adult associations of red sea urchins in three areas of British Columbia. *Fisheries Research*, 2011, 109(2/3): 276-284.
- [66] Tatsuya Shibata, Sarat C, Joji Ishizaka. Phytoplankton pigment change as a photoadaptive response to light variation caused by tidal cycle in Ariake Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, 2010, 66(6): 831-843.
- [67] Wang H Z, Wang H J, Liang X M, Ni L Y, Liu X Q, Cui Y D. Empirical modelling of submersed macrophytes in Yangtze lakes. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/4): 483-491.

参考文献:

- [1] 王华, 逢勇, 刘申宝, 马璇. 沉水植物生长影响因子研究进展. *生态学报*, 2008, 28(8): 3958-3968.
- [2] 孔杨勇, 夏宜平, 陈煜初. 沉水植物的研究现状及其园林应用. *中国园林*, 2005, 21(6): 65-68.
- [4] 袁琳. 大型沉水植物遥感监测研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [16] 张彦辉, 安彦杰, 朱迟, 杨劭. 水体无机碳条件对常见沉水植物生长和生理的影响. *水生生物学报*, 2009, 33(6): 1020-1030.
- [18] 苏睿丽, 李伟. 沉水植物光合作用的特点与研究进展. *植物学通报*, 2005, 22(增刊): 128-138.
- [20] 韩秋影, 施平. 海草生态学研究进展. *生态学报*, 2008, 28(11): 5561-5570.
- [22] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] 王素梅. 光照和氮、磷的复合作用对苦草生长和生理的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [28] 吴英海, 卞国建, 方建德, 赵俊杰, 陈晓燕. 环境因子对伊乐藻光合作用影响的试验研究. *四川环境*, 2009, 28(6): 1-4.
- [29] 袁龙义, 李守淳, 李伟, 刘贵华. 光照对沉水植物刺苦草生活史对策的影响. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 482-487.
- [31] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 胡维平, 高光, 朱广伟, 罗澈葱. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1133-1137.
- [35] 杨顶田, 陈伟民, 吴生才, 朱广伟, 张运林, 曹文熙. 湖泊中有色可溶性物质对近紫外及蓝光衰减的影响. *湖泊科学*, 2003, 15(3): 269-274.
- [41] 吴璟瑜, 商少凌, 洪华生, 李炎. 浮游植物光吸收特性研究. *海洋科学*, 2006, 30(6): 77-81.
- [44] 李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜, 王宗灵, 李艳, 孙萍. 不同营养盐条件下浒苔的生长. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 211-216.
- [45] 朱宜平, 张海平. 小型富营养水体光合有效辐射衰减特性分析. *环境污染与防治*, 2011, 33(3): 65-68.
- [49] 马婷. 水体营养盐对菹草生长的影响 [D]. 南京: 南京师范大学, 2007.
- [50] 丁艳青, 朱广伟, 秦伯强, 王永平, 吴挺峰, 申霞, 洪大林. 波浪扰动对太湖底泥磷释放影响模拟. *水科学进展*, 2011, 22(2): 273-278.
- [53] 米玮洁. 不同湖泊沉积物营养特征与沉水植物菹草生长的应答关系研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [54] 雷泽湘, 谢贻发, 刘正文. 太湖梅梁湾不同沉积物对 3 种沉水植物生长的影响. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 40(2): 260-264.
- [55] 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 高光, 罗澈葱, 陈伟民. 长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究——以龙感湖和太湖为例. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 II): 101-110.
- [57] 谢贻发, 胡耀辉, 刘正文, 谢贵水. 沉积物再悬浮对沉水植物生长的影响研究. *环境科学学报*, 2007, 27(1): 18-22.
- [58] 陈灿. 湖泊沉积物再悬浮对苦草光合机能的影响. *环境科学与技术*, 2010, 33(1): 6-10.
- [59] 朱伟, 姜谋余, 赵联芳, 田涛. 悬浮泥沙对藻类生长影响的实测与分析. *水科学进展*, 2010, 21(2): 241-247.
- [62] 王忬, 王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性. *水科学进展*, 2010, 21(6): 816-822.
- [63] 王莹莹. 有双重植被河道水流特性试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元