

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

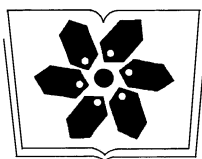
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 23 期
Vol.30 No.23
2010



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 30 卷 第 23 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中耕地类型及其土壤氮磷储量的变化	武俊喜,程 序,焦加国,等 (6309)
海洋生态资本概念与属性界定	陈 尚,任大川,李京梅,等 (6323)
海洋生态资本价值结构要素与评估指标体系	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6331)
黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征	杜有新,潘根兴,李恋卿,等 (6338)
长白山阔叶红松林样地槭属树木木生真菌的群落组成和分布	魏玉莲,戴玉成,袁海生,等 (6348)
内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征	吴永胜,马万里,李 浩,等 (6355)
盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响	廖宝文,邱凤英,张留恩,等 (6363)
基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析	胡海清,赵致奎,王晓春,等 (6372)
不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响	赵紫华,石 云,贺达汉,等 (6380)
黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系	刘继亮,李锋瑞,刘七军,等 (6389)
刺槐树冠光合作用的空间异质性	郑 元,赵 忠,周 慧,等 (6399)
南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素	宋星宇,刘华雪,黄良民,等 (6409)
怒江三种裂腹鱼属鱼类种群遗传结构	岳兴建,汪登强,刘绍平,等 (6418)
大型水生植物对重金属的富集与转移	潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等 (6430)
依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线	徐兆礼,陈佳杰 (6442)
正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响	朱丹婷,李铭红,乔宁宁 (6451)
基于中分辨率 TM 数据的湿地水生植被提取	林 川,官兆宁,赵文吉 (6460)
基于 CVM 的三江平原湿地非使用价值评价	敖长林,李一军,冯 磊,等 (6470)
耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例	方 斌,杨 叶,郑前进,等 (6478)
自然旅游地居民自然保护态度的影响因素——中国九寨沟和英国新森林国家公园的比较	程绍文,张 捷,徐菲菲 (6487)
基于 PSR 方法的区域生态安全评价	李中才,刘林德,孙玉峰,等 (6495)
灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响	滕中华,智 丽,吕 俊,等 (6504)
秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素	马莉薇,张文辉,薛瑶芹,等 (6512)
子午岭三种生境下辽东栎幼苗定居限制	郭 华,王孝安,朱志红 (6521)
温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响	饶小珍,林 岗,张殿彩,等 (6530)
锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律	王海梅,李政海,韩国栋,等 (6538)
北京市水足迹及农业用水结构变化特征	黄 晶,宋振伟,陈 阜 (6546)
延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测	孙智辉,雷延鹏,卓 静,等 (6555)
冰川前缘土壤微生物原生演替的生态特征——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王晓霞,张 涛,孙 建,等 (6563)
储藏方式和时间对三峡水库消落区一年生植物种子萌发的影响	申建红,曾 波,施美芬,等 (6571)
云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征	刘万德,苏建荣,李帅锋,等 (6581)
青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法	曹广民,龙瑞军,张法伟,等 (6591)
基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟	顾峰雪,陶 波,温学发,等 (6598)
太原盆地土壤呼吸的空间异质性	张义辉,李洪建,荣燕美,等 (6606)
专论与综述	
热带森林碳汇或碳源之争	祁承经,曹福祥,曹受金 (6613)
景观对河流生态系统的影响	欧 洋,王晓燕 (6624)
自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响	杨连新,王云霞,赵秩鹏,等 (6635)
研究简报	
基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例	王女杰,刘 建,吴大千,等 (6646)
鹤伴山国家森林公园土壤甲螨群落结构	许士国,付荣恕 (6654)
栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应	桑玉强,张劲松,孟 平,党宏忠,等 (6661)
赤眼蜂发育速率对梯度恒温的响应	陈洪凡,岑冠军,黄寿山 (6669)
学术信息与动态	
GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用	李文杰,张时煌 (6674)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 42 * 2010-12	

正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响

朱丹婷, 李铭红*, 乔宁宁

(浙江师范大学生态研究所, 浙江金华 321004)

摘要: 苦草 (*Vallisneria spiralis*), 是我国长江中下游淡水水体中常见的沉水植物种类。通过室内模拟正交试验的方法, 研究不同光照强度、温度和总氮浓度 (3 光照 $\times$ 3 温度 $\times$ 3 总氮浓度) 对苦草生长的影响。结果表明: (1) 苦草在 5320lx 光照强度、10℃、2—4mg/L 水体总氮浓度的条件下生长良好。实验所设 100% (12000lx) 和 50% (5320lx) 光照条件下苦草均可正常生长; 但对于 30℃ 的高温胁迫耐受性较差; 苦草在总氮浓度为 4mg/L 的水体中各生长指标达到最大值, 2mg/L 或 8mg/L 的总氮浓度均会抑制其生长。(2) 5320lx 的光照强度和 10℃ 的温度对苦草光合色素的合成较为有利; 而单纯总氮浓度的变化对苦草光合色素的合成影响不大。(3) 苦草的生理活性在高于 12000lx 或低于 1025lx 的光强、高于 30℃ 的温度以及 8mg/L 的总氮浓度下均会受到一定程度的抑制。(4) 方差分析结果显示, 苦草生长发育的过程中, 光照强度和温度是主效环境因子; 上述 3 个环境因子对苦草光合色素的合成均有极显著的影响, 并且光强与温度的交互作用对其也有显著影响; 光照强度、温度以及这两个环境因子的交互作用为影响苦草生理活性的主效因子。苦草作为不能形成冠层的基生叶莲座型沉水植物, 对光强要求不高, 对低温的耐受性较好, 但较不耐高营养盐浓度, 因此, 在得到一定修复的富营养化水体中, 可以作为秋、冬季水生植物恢复和重建的关键物种。

关键词: 光照强度; 温度; 总氮浓度; 交互; 正交试验; 苦草

Effects of environmental factors and their interaction on *Vallisneria spiralis* by orthogonal test

ZHU Danting, LI Minghong*, QIAO Ningning

(Institute of Ecology, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract: With the strengthening of freshwater eutrophication, the original aquatic vegetation gradually reduced and even disappeared, resulting in the well-functional grass type water degraded to algae-based water. Submerged plant is a key factor for the construction of stable and well-functioning freshwater ecosystems. Therefore, restoration and reconstruction of submerged plants is very important for prevention and control of eutrophication. The growth and development, decline and extinction of submerged plants are closely related with environmental factors due to their aquatic characteristics. In this study, we aim to explore the effects of light intensity, temperature, total nitrogen concentration and their interactions on the growth and development of submerged plants. Our study can shed new light on the mechanism of decline of submerged plants in the eutrophic water, and supply a theoretical basis for species selection in the process of the restoration and reconstruction of eutrophic water.

Vallisneria spiralis is a common submerged plant species in fresh water of the middle-lower reaches of the Yangtze River in China. The effects of light intensities, temperatures and total nitrogen concentrations, 3 (light) $\times$ 3 (temperature) $\times$ 3 (nutrient), on the growth of *V. spiralis* were investigated with orthogonal design methods in the laboratory.

The experimental results showed that (1) light intensity and temperature, as well as their interaction significantly affect the growth of *V. spiralis*, *V. spiralis* grew well under the conditions of the light intensity in 5320lx, water temperature at 10 °C, and total nitrogen concentration in 2—4 mg/L. In addition, *V. spiralis* can grow normally when the light intensity

基金项目: 浙江省科技计划资助项目 (2008C23093)

收稿日期: 2010-07-13; 修订日期: 2010-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sky82@zjnu.cn

were 12000lx and 5320lx, and all of growth parameters were largest when total nitrogen concentration was 4mg/L. However, 2mg/L or 8mg/L total nitrogen concentration as well as 30 °C, the growth of *V. natans* was inhibited. (2) The concentration of photosynthetic pigment was highest under the conditions of the light intensity in 5320lx, water temperature at 10 °C than other conditions, however, the effect of total nitrogen concentration on the synthesis of photosynthetic pigment of *V. natans* was little. (3) The physiological activity of *V. natans* was inhibited under the conditions of the light intensity more than 12000lx or less than 1025lx, or temperature more than 30 °C, or total nitrogen concentration in 8mg/L. (4) The results of analysis of variance indicated that, in the process of the growth of *V. natans*, the light intensity and temperature were main factors. Light intensity, temperature, total nitrogen concentration, as well as all the interaction of light intensity and temperature all had significant impact on the synthesis of photosynthetic pigment of *V. natans*. In addition, light intensity, temperature and the interaction of them were main factors for physiological activity of *V. natans*.

In conclusion, *V. natans*, as a basal leaves and rosette-type of submerged plant species which can not form canopy, can grow well under the environment of low light intensity and low temperature, however, it can't endure high nitrogen concentration. Therefore, for the eutrophic water restored for some extent, *V. natans* can be used as a key species for restoration and reconstruction of aquatic plants in autumn and winter.

Key Words: light intensity, temperature, total nitrogen concentration, interaction, orthogonal test, *Vallisneria natans*

沉水植物具有维持水生态系统物质循环及能量流动的重要功能^[1],是健康水体必不可少的组成部分,而随着水体富营养化程度的加剧,水生植物尤其是沉水植物的消退现象已普遍可见^[2]。沉水植物的恢复与重建过程与环境因子密切相关,因而环境因子对沉水植物的影响正成为沉水植物研究的热点^[3]。多年研究表明,沉水植物的生长发育及建群受到水体中诸多因素如光照、水深、温度、营养盐等的影响^[4-8]。只有弄清各环境因子对沉水植物的具体影响,结合野外实际条件,才能根据实际情况顺利恢复和重建受损水体的植被。

苦草(*Vallisneria natans*),属于水鳖科苦草属,为我国长江中下游淡水湖库常见沉水植物种群^[9]。由于其光需求量较低^[10]、繁殖速度较快^[11]、生态幅较广、吸附营养盐及重金属等污染物的能力较强^[12]、鱼类适口性较好^[13]等特点,常被用于富营养化水体的生态修复。本研究从与苦草生长联系紧密的环境因子光照强度、温度和水体总氮浓度入手,研究这3种环境因子及其交互作用对苦草生长及生理的影响,寻求影响苦草生长的主效环境因子,为富营养化水体沉水植被恢复与重建的选种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

研究用苦草取自金华武义,实验室预培养1周,选取生长良好、长势一致的幼苗作为实验材料。

1.2 研究方法

根据已有对单因素的研究对环境因子进行参数设置^[5,14-15](表1),借助 $L_{27}(3^3)$ 正交表安排27个组合(表2)。选取长约15cm幼苗,移栽到装满石英砂的培养杯中,每个培养杯扦插4株植株作为平行样,培养杯放入10L无色培养缸中,置于光照培养箱中培养。营养液采用改良的1/10倍Hoagland培养液^[16],以 NaNO_3 作为氮源, KH_2PO_4 作为磷源,培养液总磷浓度保持0.2mg/L,保持培养液pH在6.8—7.2。每组试验为期40d。

各处理组植株采用观察称量法测量株高、生物量和分枝数、乙醇-丙酮混合液浸泡法测定叶绿素含量、氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根活力、双组分分光光度法测定丙二醛(MDA)及可溶性蔗糖含量^[17]。实验数据运用SPSS18.0统计软件处理,通过单因子方差分析(One-way ANOVA)检查差异的显著性,若差异显著,再利用Turkey's检验平均值间的差异性。

表 1 试验设计

Table 1 The experimental design

因素 Factor	水平 Level		
光强 Light intensity	1:100% (12000lx)	2:50% (5320lx)	3:10% (1025lx)
温度 Temperature/℃	1:30	2:20	3:10
总氮 Total nitrogen/(mg/L)	1:8.0	2:4.0	3:2.0

表 2 正交试验 L₂₇(3¹³) 设计表

Table 2 Orthogonal design for L₂₇(3¹³)

处理组 Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	A × B	A × B	C	A × C	A × C	B × C			B × C		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	2	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	3	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	1	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	1	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	2	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	3	3	1	3	2

A:光强;B:温度;C:总氮浓度;1,2,3:表 1 中所设这 3 个环境因子的 3 个水平

2 结果与讨论

2.1 光强、温度和总氮对苦草生长的影响

27 个处理组苦草在培养 40d 后各生长指标变化见图 1。

植物株高、生物量、分蘖数等指标可直观反映植株的生长情况。处理组 17 苦草株高、生物量和分蘖数均达到最大,而处理组 19 苦草在 3 个生长指标上均为最小(图 1)。因此,苦草幼苗在 50% 光强、10℃ 及 4.0 mg/L总氮浓度的条件下生长最佳;而 10% 光强、30℃ 及 8.0mg/L 总氮浓度的条件不利于苦草幼苗的生长。现也有研究指出,弱光照和过高营养盐浓度均会对苦草的生长产生比较明显的抑制作用^[18]。根据本研究结果,苦草的生长不仅仅受到遮光和高氮浓度的影响,还受到温度较显著的影响,30℃ 高温已对其产生一定的

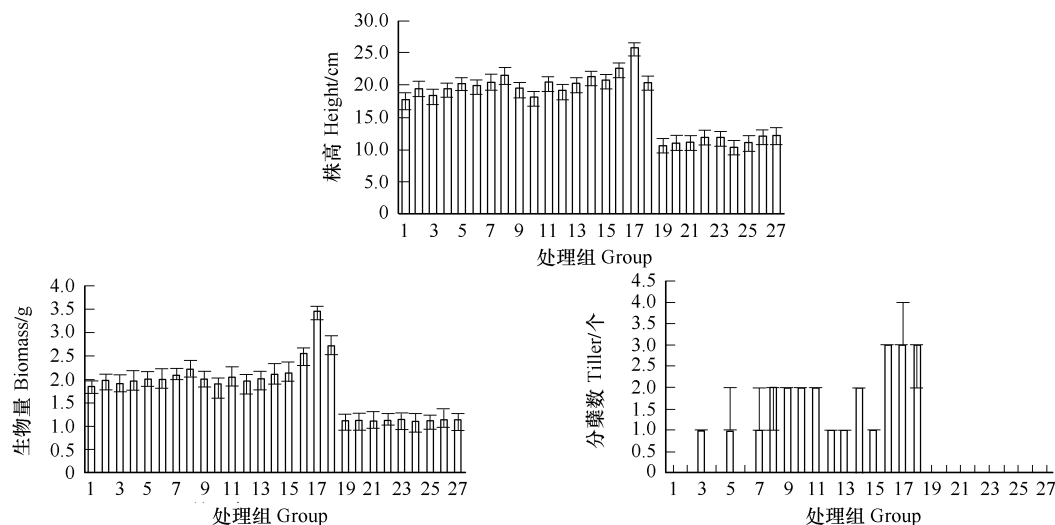


图1 不同光强、温度、总氮浓度对苦草株高、生物量和分蘖数的影响(平均值 $\pm$ 标准误)

Fig. 1 The height, biomass, and tiller numbers of *V. natans* at three levels of light intensity, temperature and total nitrogen concentration (Mean $\pm$ SE)

胁迫,因而在富营养化水体生态修复的过程中,恢复和重建沉水植物不仅需要考虑到空间上(水体垂直结构)的优化配置,也要考虑时间上(四季)的合理安排。

根据光照强度、温度和总氮浓度将 27 组试验分类统计,结果如下:原始长度为 15cm、生物量约为 1.09g、无分蘖的苦草幼苗在培养 40d 后,平均株高分别为 50% 光强(20.77cm) > 100% 光强(19.45cm) > 10% 光强(11.27cm), 10℃(18.22cm) > 20℃(17.16cm) > 30℃(16.11cm), 4mg/L(18.05cm) > 8mg/L(16.76cm) $\approx$ 2mg/L(16.67cm); 平均生物量分别为 50% 光强(2.31g) > 100% 光强(1.99g) > 10% 光强(1.11g), 10℃(2.04g) > 20℃(1.72g) > 30℃(1.65g), 4mg/L(1.90g) > 2mg/L(1.78g) $\approx$ 8mg/L(1.74g); 平均分蘖数分别为 50% 光强(2.00 个) > 100% 光强(0.78 个) > 10% 光强(0.00 个), 10℃(1.56 个) > 30℃(0.67 个) > 20℃(0.56 个), 4mg/L(1.11 个) > 2mg/L(0.89 个) > 8mg/L(0.78 个)。不同处理组苦草的生物量都大于初始生物量,这表明实验所设置的光照水平都在其光补偿点以上,而遮光对苦草生长有抑制作用,随着光照强度的减弱,苦草各生长指标逐渐减小,即苦草的生长受到一定程度的抑制。很多研究也表明富营养化水体透明度降低造成水下光照的减弱可能是沉水植物消亡的基本原因^[6,19],这也提示富营养化水体沉水植物的恢复和重建应以水体透明度的提高为前提。同时苦草幼苗在 10℃ 时生长指标均较高,故苦草可能较适合温度较低的秋、冬季节生长。

为探究主要环境因子以及其交互作用对苦草生长过程的影响,对上述生长指标数据作单因素方差分析,结果见表 3。

表3 生长指标的方差分析

Table 3 Analysis results of growth indices

因素 Factor	株高 Height		生物量 Biomass		分蘖数 Tiller numbers	
	F	SS/%	F	SS/%	F	SS/%
光强(L) Light intensity	284.85	91.40 **	67.12	84.20 **	61.75	63.82 **
温度(T) Temperature	12.04	3.86 **	4.27	5.36	18.25	18.86 **
总氮(TN) Total nitrogen	6.38	2.05	0.76	0.96	1.75	1.81
光强 $\times$ 温度 L $\times$ T	1.96	1.26	1.41	3.55	4.75	9.82 *
光强 $\times$ 总氮 L $\times$ TN	1.04	0.76	0.94	2.35	1.75	3.62
温度 $\times$ 总氮 T $\times$ TN	1.20	0.77	1.44	3.59	1.00	2.07

SS:离均差平方和除以总平方和, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

方差分析结果显示,光照强度对苦草幼苗生长有极显著影响,温度对苦草生物量及分蘖数的增加有极显著的影响,而分蘖数还受到光照强度和温度交互作用的显著影响(表3)。因此,在苦草生长过程中,光照强度和温度是主效环境因子,而总氮浓度及这3个环境因子的交互作用对苦草生长影响并不显著。在水下光照严重缺乏时,沉水植物光合速率的下降导致的能量缺乏,并成为限制其生长和代谢的主要因素^[6],这可能也是对本研究中总氮浓度变化对苦草的生长指标影响不显著的原因。

2.2 光强、温度和总氮对苦草光合色素的影响

27个处理组苦草在培养40d后各光合色素指标变化见图2。

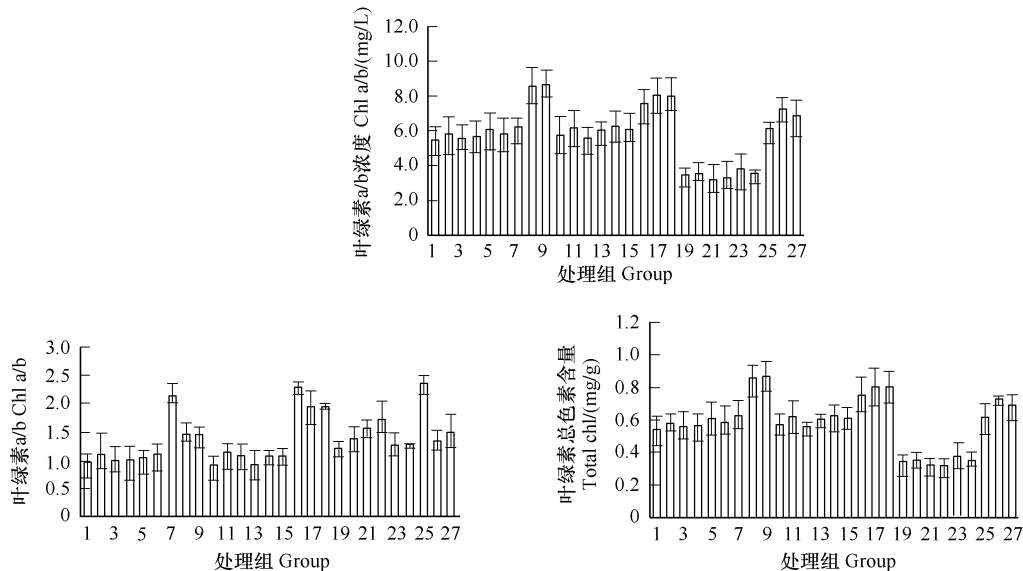


图2 不同光强、温度、总氮浓度对苦草叶绿素 a + b 浓度、叶绿素 a/b 和叶绿体总色素含量的影响(平均值 ± 标准误)

Fig. 2 The concentration of chlorophyll a + b, chlorophyll a/b, and total chlorophyll content of *V. natans* at three levels of light intensity, temperature and total nitrogen concentration (Mean ± SE)

植物光合色素的组成变化引起的光合效率的变化可能是水生植物光适应最主要的机理^[20]。处理组17、18苦草光合作用各指标均较大,而处理组21各指标均较小(图2)。故50%光强、10℃及2—4mg/L的总氮浓度为实验条件下苦草光合色素合成的最佳组合,而10%光强、30℃及2mg/L总氮浓度最不利于光合色素的合成。苏文华^[21]等对5种沉水植物的光合特征进行分析后也发现,苦草对光照强度的需求量最低,适合于在低光照条件的水下生长,穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L)对光照强度的需求量最高,在上层水体有较强的竞争力,而菹草(*Potamogeton crispus*)和黑藻(*Itydriua verticillata*)对光照强度的需求量居中,可在中层水体形成优势种群。因此,根据环境条件以及沉水植物的种群特性,在富营养化水体恢复和重建沉水植物群落的过程中,苦草较适宜在秋冬季节的深水区域种植。根据光照强度、温度和总氮浓度将27组试验分类统计,结果如下:平均叶绿素 a + b 浓度分别为50%光强(6.57mg/L) > 100%光强(6.39mg/L) > 10%光强(4.53mg/L), 10℃(7.43mg/L) > 20℃(5.14mg/L) > 30℃(4.92mg/L), 4mg/L(6.14mg/L) > 2mg/L(5.89mg/L) > 8mg/L(5.46mg/L); 平均叶绿素 a/b 分别为10%光强(1.49) > 50%光强(1.37) > 100%光强(1.24), 10℃(1.81) > 20℃(1.15) ≈ 30℃(1.14), 8mg/L(1.49) > 2mg/L(1.32) > 4mg/L(1.29); 平均叶绿体总色素含量分别为50%光强(0.66mg/g) > 100%光强(0.64mg/g) > 10%光强(0.45mg/g), 10℃(0.74mg/g) > 20℃(0.51mg/g) > 30℃(0.49mg/g), 4mg/L(0.61mg/g) > 2mg/L(0.59mg/g) > 8mg/L(0.55mg/g)。但有研究指出,单纯总氮浓度的变化对苦草光合作用影响不大^[22],与本试验结果不符,这可能与水体硝态氮与铵态氮的比例等因素有关。

为探究主要环境因子以及其交互作用对苦草光合色素合成的影响,对上述生长指标数据作单因素方差分

析,结果见表 4。

表 4 光合指标的方差分析
Table 4 Analysis results of photosynthetic indices

因素 Factor	叶绿素 a + b 浓度 Chl a + b		叶绿素 a/b Chl a/b		叶绿体色素含量 Chl content	
	F	SS/%	F	SS/%	F	SS/%
光强(L) Light intensity	97.92	35.52 **	7.65	6.20 *	97.85	35.59 **
温度(T) Temperature	148.56	53.89 **	72.34	58.52 **	148.48	53.93 **
总氮(TN) Total nitrogen	9.05	3.28 **	5.25	4.24 *	9.04	3.24 **
光强×温度 L×T	5.17	3.75 *	6.60	10.68 *	5.16	3.70 *
光强×总氮 L×TN	1.35	0.98	2.23	3.61	1.35	0.92
温度×总氮 T×TN	3.56	2.58	10.35	16.75	3.55	2.62

SS:离均差平方和除以总平方和, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

苦草植株光合色素含量受到光照强度、温度、总氮浓度极显著影响,受到光强与温度交互作用的显著影响;叶绿素 a/b 受到温度的极显著影响和光照强度、总氮浓度以及光强与温度交互作用的显著影响(表 4)。已有研究也指出,光照强度独立作用于苦草的光合作用^[18],而营养盐的作用方式和阈值会在很大程度上受光照强度的影响而改变^[23],这也解释了本研究结果中光合色素指标与 3 个环境因子均呈现显著相关性。

2.3 光强、温度和总氮对苦草生理活动的影响

27 个处理组的苦草培养 40d 后各生理活性指标变化见图 3。

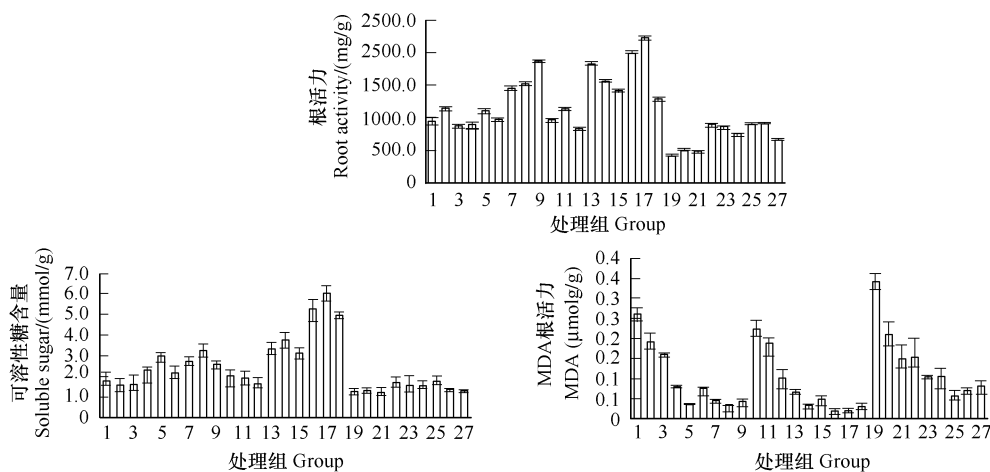


图 3 不同光强、温度、总氮浓度对苦草根活力、可溶性糖含量和叶 MDA 含量的影响(平均值 ± 标准误)

Fig. 3 The root activity, soluble sugar content, and MDA content of *V. natans* at three levels of light intensity, temperature and total nitrogen concentration (Mean ± SE)

植物对环境变化的反应可以通过其根活力及可溶性糖含量的变化来表征,同时丙二醛(MDA)是植物在逆境条件下膜脂过氧化的产物。处理组 17 苦草根活力和可溶性糖含量最高而 MDA 含量最低,处理组 19 苦草的根活力和可溶性糖含量最低而 MDA 含量最高(图 3)。故在实验所设 50% 光强、10℃、4mg/L 的总氮浓度条件下,苦草的生理活动最为旺盛;而 10% 光强、30℃、8mg/L 的总氮浓度条件下,苦草的生理活动受到一定程度的抑制,膜脂过氧化程度也较高。熊汉锋^[24]等对贫营养、中营养、富营养、重富营养 4 个营养盐水平下苦草生理响应的研究也指出,其抗氧化酶系统活性随营养程度的增加而增加。抗氧化酶系统和 MDA 都是苦草对胁迫的响应,因而苦草可能不耐受过高营养盐的环境。

根据光照强度、温度和总氮浓度将 27 组试验分类统计,结果如下:平均根活力分别为 50% 光强 (1478.52mg/g) > 100% 光强 (1196.74mg/g) > 10% 光强 (716.78mg/g), 10℃ (1432.73mg/g) > 20℃

(1143.81mg/g) > 30℃ (815.50mg/g), 4mg/L (1220.79mg/g) > 8mg/L (1150.13mg/g) > 2mg/L (1021.13mg/g); 平均可溶性糖含量分别为 50% 光强 (3.54mmol/g) > 100% 光强 (2.32mmol/g) > 10% 光强 (1.45mmol/g), 10℃ (3.24mmol/g) > 20℃ (2.49mmol/g) > 30℃ (1.57mmol/g), 4mg/L (2.63mmol/g) > 8mg/L (2.45mmol/g) > 2mg/L (2.23mmol/g); 平均 MDA 含量分别为 10% 光强 (0.14μmol/g) > 100% 光强 (0.10μmol/g) > 50% 光强 (0.08μmol/g), 30℃ (0.20μmol/g) > 20℃ (0.08μmol/g) > 10℃ (0.04μmol/g), 8mg/L (0.14μmol/g) > 4mg/L (0.10μmol/g) > 2mg/L (0.09μmol/g)。鉴于硝态氮对水生生物的毒性较小这种认识^[24], 硝态氮对沉水植物的定量研究较少受到关注。Best 曾发现, 105 mg/L 硝态氮对金鱼藻的生长及生理活动均无影响^[25], 这与本研究中苦草对硝态氮胁迫的响应相似, 这说明富营养水体中单纯的高硝态氮浓度对苦草的直接影响十分有限。

为探究主要环境因子以及其交互作用对苦草生理活性的影响, 对上述生长指标数据作单因素方差分析, 结果见表 5。

表 5 生理活性指标的方差分析

Table 5 Analysis results of physiological activity indices

因素 Factor	根活力 Root activity		可溶性糖 Soluble sugar		丙二醛 MDA	
	<i>F</i>	SS/%	<i>F</i>	SS/%	<i>F</i>	SS/%
光强 (<i>L</i>) Light intensity	32.10	53.49 **	238.58	52.36 **	24.69	9.52 **
温度 (<i>T</i>) Temperature	20.64	34.39 **	150.47	33.02 **	186.04	76.19 **
总氮 (TN) Total nitrogen	2.22	3.70	8.95	1.96	19.39	8.33 **
光强 × 温度 <i>L</i> × <i>T</i>	3.20	5.33	54.07	11.87 **	0.78	0.00
光强 × 总氮 <i>L</i> × TN	1.61	2.69	2.16	0.47	1.21	0.00
温度 × 总氮 <i>T</i> × TN	0.24	0.40	1.45	0.32	13.86	5.95 **

SS: 离均差平方和除以总平方和, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

光照强度和温度对 3 个生理指标的影响均呈极显著; 总氮浓度只对 MDA 的含量影响极为显著; 光强和温度的交互作用对可溶性糖含量的影响极为显著, 而温度和总氮浓度的交互作用对 MDA 的含量影响呈极显著 (表 5)。故光照强度、温度以及这两个环境因子的交互作用为影响苦草生理活性的主效环境因子。已有研究也指出, 光照强度对苦草可溶性糖含量有显著影响 ($P < 0.001$), 营养盐浓度对可溶性糖含量无显著影响 ($P > 0.5$)^[26], 与本实验结果相仿。有研究也报道, 高营养盐对沉水植物的抑制作用需要协同水体低溶解氧浓度^[27], 而本研究中水体溶氧充足, 故这可能是高氮浓度对其生理指标影响不显著的原因之一。同时根据 Barko^[28] 等的研究, 其他生态因子对沉水植物的作用只有在光照条件充足的情况下才会发生, Evans^[29] 等也认为低的潜在生长率会抑制植物体对外界营养的生理反应。这些观点进一步说明了光照条件对沉水植物生长的重要性, 故富营养化水体治理的首要任务之一就是提高水体的透明度。

3 结论

水生生态系统的失调是目前世界水环境的一大生态灾难, 受损生态系统的生态修复已成为当今世界环境科学的研究热点之一^[30], 基于沉水植物对水生生态系统的重要意义, 在受损水域实现其恢复和重建又是水域生态学研究的重点领域。并且在利用沉水植物进行水质净化或进行退化水体的生态修复时, 需要考虑各种环境因子对沉水植物修复的影响。

苦草是长江中下游淡水水域优势物种之一, 对浮游动植物、鱼类等的活动及水质的保持均有重要作用^[31]。作为一种基生叶、莲座型沉水植物, 苦草一般生活在较深的水体中, 具有较低的 $K_{0.5}$ (达 1/2 最大光合速率时的最低光照)^[32]。根据本研究结果, 光强和温度为影响苦草生长及生理活性的主效环境因子, 且两者的交互作用对苦草有较显著影响; 总氮浓度主要通过影响光合色素的合成来影响苦草的生长。本实验条件下, 苦草在约为 5320lx 光照强度、10℃、2—4mg/L 水体总氮浓度的条件下生长最佳, 因此, 相比于伊乐藻、微齿眼子菜等沉水植物^[14], 苦草可能对低温的耐受性较好但较不耐高营养盐浓度, 所以, 在秋冬季节富营养化

浅水湖库沉水植物的恢复和重建工作中,需要将工程治理措施和生态治理措施相结合,在外源污染得到一定控制的前提下,苦草可能可以作为沉水植物恢复和重建工作的关键物种大量推广使用,并且待水质有所改善之后,再按一定比例在空间和时间分布上组件其他水生植物物种,以形成稳定可持续利用的健康水生生态系统。

致谢:感谢浙江师范大学杨冬梅博士对写作给予的帮助。

References:

- [1] Schulz M, Rinke K, Kohler J. A combined approach of photogrammetrical methods and field studies to determine nutrient retention by submersed macrophytes in running water. *Aquatic Botany*, 2003, 76: 17-29.
- [2] Wang J, Liu J K. Role of phosphorus cycling in algal metabolism and algal succession in lake Donghu, China. *Archiv für Hydrobiologie*. Stuttgart, 1991. 120(4):433-445.
- [3] Christophe P H, Claude A, Nicola R. Restoration ecology of riverine wetlands: A 5-year post-operation survey on the Rhone River. France *Ecological Engineering*, 2002, 18(5):543-554.
- [4] Schubert H, Sagert S, Forster R M. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary. *Helgol and Marine Research*, 2001, 55:12-22.
- [5] Küster A, Schaible R, Schubert H. Light acclimation of photosynthesis in three charophyte species. *Aquatic Botany*, 2004, 79:111-124.
- [6] Moore K A. Seasonal variations in eelgrass responses to nutrient enrichment and reduced light availability in experimental ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 24(4):1-28.
- [7] Cao T, Ni L Y, Xie P. Acute biochemical response of a submersed macrophyte, *Potamogeton crispus* L., to high ammonium in an aquarium experiment. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(2):279-284.
- [8] Takashi A, Munira S, Jagath M, Takeshi F. The effect of epiphytic algae on the growth and production of *Potamogeton perfoliatus* L. in two light condition. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52:225-238.
- [9] Flora of China editorial committee of Chinese academy of sciences. *Flora of China (Volume 8)*. Beijing: Science Press, 1992:176-180.
- [10] Schubert H, Sagert S, Forster R M. Evaluation of the different levels of variability in the underwater light field of a shallow estuary. *Helgol and Marine Research*, 2001, 55:12-22.
- [11] Pokorný J, Kvet J, Ondok J P. Functioning of the plant component in densely stocked fishponds. *Bulletin d'Ecologie*, 1990, 21(3):44-48.
- [12] Takamura N, Kadono Y, Fukushima M, Nakagawa M, Kim B O. Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes. *Ecological Research*, 2003, 18:381-395.
- [13] Korschgen C E, Green W L, Kenow K P. Effects of irradiance on growth and winter bud production by *Vallisneria spiralis* americana and consequences to its abundance and distribution. *Aquatic Botany*, 1997, 58:1-9.
- [14] Cheng X Y, Wang G X, Pu P M, Zhang S Z, Chen B J. Restoration and purification of Macrophytes in an eutrophic lake during autumn and winter. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(2):139-144.
- [15] Ye C, Zou G Y, Fu Z S, Song X F, Yu H C, Kong H N. Responses of three submersed macrophytes to total nitrogen supply. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5):739-746.
- [16] Yan C Z, Zeng A Y, Jin X C, Zhao J Z, Xu Q J, Wang X M. Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1050-1055.
- [17] Xue W N. Study on the Response of Physiological and Ecological of Several Submerged Macrophytes in Aquatic Ecological Restoration. Shanghai: Shanghai Normal University, 2005:3-47.
- [18] Li H J, Ni L Y, Cao T, Zhu L X. Responses of *Vallisneria spiralis* natans to reduced light availability and nutrient enrichment. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(2):225-230.
- [19] Short F T, Wyllie-Echeverria S. Natural and human-induced disturbance of sea grass. *Environmental Conservation*, 1996, 23(1):17-27.
- [20] Schagerl M, Pichler C. Pigment composition of freshwater charophyceae. *Aquatic Botany*, 2000, 67:117-129.
- [21] Su W H, Zhang G F, Zhang Y S, Xiao H, Xia F. The photosynthetic characteristics of five submerged aquatic plants. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(4):391-395.
- [22] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2):185-192.
- [23] Wang P F, Wang C, Wang X R, Xu Y, Yang A. Purification effects on nitrogen under different concentration and nitrogen conformation transform

- principles by *Vallisneria spiralis* L. . *Environmental Science*, 2008,29(4):890-895.
- [24] Xiong H F, Cao Q L, Liu Y L. Physiological responses of *Vallisneria spiralis* under different nutritional status. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009,28(4):442-445.
- [25] Best E P H. Effects of nitrogen on the growth and nitrogenous compounds of *Ceratophyllum demersum*. *Aquatic Botany*, 1980,8:197-206.
- [26] Li H J. The Influences of Light, Nutrition and Phytoplankton on Growth and Physiology of Submerged Macrophytes in Eutrophic Waters. *Whhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences*, 2006: 25-37.
- [27] Chamber P A. Light and nutrient in the control of aquatic plant community structure. In situ observation. *Journal of Ecology*, 1987,75:621-628.
- [28] Barko J W, Smart R M, McFarland D G. Interactive effects of environmental conditions on the growth of submerged aquatic macrophytes. *Freshwater Biology*, 1991,6:199-207.
- [29] Evans C A, Miller E K, Friedland A J. Effects of nitrogen and light on nutrient concentrations and associated physiological responses in birch and fir seedlings. *Plant Soil*, 2001,236:197-207.
- [30] Leslie A, Farnsworth L, Lawrence A B. Conceptual model of aquatic plant decay and ammonia toxicity for shallow lakes. *Journal of Environmental Engineering*, 2000,126:199-207.
- [31] Poe T P, Hatcher C O, Brown C L, Schloesser D W. Comparison of species composition and richness of fish assemblages in altered and unaltered littoral habitats. *Freshwater Biology*, 1986,3:525-536.
- [32] Titus J E, Adams M S. Coexistence and the comparative light relations of the submersed macrophyte *Myriophyllum spicatum* L. and *Vallisneria spiralis* Michx. *Oecologia*, 1979,40:273-286.

参考文献:

- [9] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第8卷). 北京:科学出版社,1992:176-180.
- [14] 成小英,王国祥,濮培民,张圣照,陈宝君. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及净化作用. *湖泊科学*,2002,14(2):139-144.
- [15] 叶春,邹国燕,付子斌,宋祥甫,于海婵,孔海南. 总氮浓度对3种沉水植物生长的影响. *环境科学学报*,2007,27(5):739-746.
- [16] 颜昌宙,曾阿妍,金相灿,赵景柱,许秋瑾,王兴民. 不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响. *生态学报*,2007,27(3):1050-1055.
- [17] 薛维纳. 水生生态修复中几种沉水植物生理生态研究. 上海:上海师范大学,2005:3-47.
- [18] 黎慧娟,倪乐意,曹特,朱龙喜. 弱光照和富营养对苦草生长的影响. *水生生物学报*,2008,32(2):225-230.
- [21] 苏文华,张光飞,张云孙,肖衡,夏峰. 5种沉水植物的光合特征. *水生生物学报*,2004,28(4):391-395.
- [23] 王沛芳,王超,王晓蓉,薛艳,杨爱. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律. *环境科学*,2008,29(4):890-895.
- [24] 熊汉锋,谭启玲,刘艳玲. 不同营养状态下苦草的生理响应. *华中农业大学学报*,2009,28(4):442-445.
- [26] 黎慧娟. 富营养化水体中光照、营养及浮游植物对沉水植物生长和生理影响的研究. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2006:25-37.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 23 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 23 2010

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:100717	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